

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Kontaktní 3D měření - analýza a  
vyhodnocení dat dotykovými  
sondovacími systémy**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šťastná** Jméno: **Pavína** Osobní číslo: **475431**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**  
Studijní program: **Strojírenství**  
Studijní obor: **Informační a automatizační technika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Kontaktní 3D měření - analýza a vyhodnocení dat dotykovými sondovacími systémy**

Název bakalářské práce anglicky:

**Contact 3D measurement - analysis and evaluation of data by touch probe systems**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte rešerši typů a možností sondovacích systémů pro souřadnicové měřicí stroje.
- 2) Analyzujte 3D naměřená data na konkrétním měřicí stroji.
- 3) Popište parametry měření dílu spínací dotykovou sondou a vyhodnocení měření v závislosti na CAD datech.
- 4) Porovnejte měření dílu a CAD data měřicí dotykovou sondou s měřením pomocí sondy spínací, včetně vyhodnocení dat.

Seznam doporučené literatury:

- [1] TICHÁ, Šárka.: Strojírenská metrologie. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004.
- [2] BOSCH, John A.: Coordinate measuring machines and systems. New York: M. Dekker, (c)1995.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**doc. Ing. Jan Hošek, Ph.D., odbor přesné mechaniky a optiky FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

\_\_\_\_\_

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **17.06.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Jan Hošek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studentky

### ***Prohlášení***

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně, s tím, že její výsledky mohou být dále použity podle uvážení vedoucího bakalářské práce jako jejího spoluautora. Souhlasím také s případnou publikací výsledků bakalářské práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako její spoluautor.

V Praze 2021

.....  
Šťastná Pavlína

### ***Poděkování***

Ráda bych touto cestou vyjádřila poděkování svému vedoucímu práce panu doc. Ing. Janu Hoškovi Ph.D. za jeho rady, ochotu a čas věnovaný vedení mé bakalářské práce. Dále bych také velmi chtěla poděkovat zaměstnancům ŠKODA AUTO a.s. i celé společnosti za to, že mi v této nelehké době umožnila právě zde provést praktickou část práce. Děkuji všem, hlavně svému vrchnímu nadřízenému panu J. Zvěřinovi za podporu a nalezení dalších kontaktů pro realizaci praktika. Dále A. Horvátovi, K. Kaliničové a Bc. P. Nýčovi. Zejména bych chtěla poděkovat za pomoc a ochotu panu Ing. Janu Urbanovi, bez kterého by praktická část měření nikdy nevznikla. V neposlední řadě bych také ráda poděkovala své rodině, partnerovi a všem přátelům, kteří mě při vytváření této práce podpořili, a bez jejichž pomoci by nebylo možné práci dokončit.

### ***Abstrakt***

Tato bakalářská práce je zaměřena na seznámení čtenáře s dotykovými sondovacími systémy. Obsahuje jejich základní rozdělení, stavbu a funkci. Dále zahrnuje metody měření pomocí jednotlivých druhů dotykových sond, algoritmy pro souřadnicové měřicí stroje a shrnutí použití jednotlivých algoritmů. Praktická část práce se věnuje měření na konkrétním souřadnicovém měřicím stroji se dvěma různými druhy sond. Je zde provedeno jednak vyhodnocení jednotlivých měření, tak i vzájemné porovnání obou měření. V rámci porovnání jsou zde dále uvedeny některé důležité vlastnosti souřadnicových strojů jak s aktivní, tak i se spínací dotykovou sondou.

### ***Klíčová slova***

SMS, dotykové sondovací systémy, spínací sondy, měřicí (aktivní) sondy, algoritmy pro CMM

### ***Abstract***

This bachelor thesis is focused on acquainting the reader with touch probe systems. It contains their basic division, structure and function. It also includes measurement methods using individual types of touch probes, algorithms for coordinate measuring machines and a summary of the use of individual algorithms. The practical part of the work is devoted to measurements on a specific coordinate measuring machine with two different types of probes. There is an evaluation of individual measurements, as well as a mutual comparison of both measurements. As part of the comparison, some important features of coordinate machines with both active and switching touch probes are also listed here.

### ***Keywords***

SMS, touch probe systems, touch trigger probes, measuring (active) probes, algorithms for CMM

# Obsah

1	Přehled použitých symbolů a zkratk.....	7
2	Úvod.....	8
3	Souřadnicové měřicí stroje.....	9
4	Sondovací systémy pro souřadnicové měřicí stroje .....	14
4.1	Dotykové sondy .....	15
4.1.1	Základní stavba .....	15
4.1.2	Tvrdé sondy („ <i>hard probe</i> “).....	16
4.1.3	Spínací sondovací systémy („ <i>touch - trigger probe</i> “).....	17
4.1.4	Měřicí sondovací systémy .....	22
5	Algoritmy CMM .....	25
5.1	Metody přizpůsobení geometrických prvků.....	26
5.1.1	Přizpůsobení pomocí nejmenších čtverců („ <i>least squares fit</i> “).....	29
5.1.2	Přizpůsobení pomocí minimální zóny („ <i>minimum zone fit</i> “).....	30
5.1.3	Metoda minimální celkové vzdálenosti („ <i>minimum total distance fit</i> “).....	32
5.1.4	Maximálně vepsané přizpůsobení („ <i>maximum inscribed circle fit</i> “) .....	33
5.2	Srovnání algoritmů.....	34
6	Praktická část .....	36
6.1	Měření pomocí spínací dotykové sondy.....	38
6.1.1	Postup měření.....	39
6.1.2	Posouzení vlivu naměřených bodů na výslednou přesnost .....	40
6.1.3	Měření dílu pro porovnání .....	48
6.1.4	Shrnutí.....	53
6.2	Měření pomocí měřicí dotykové sondy.....	55
6.2.1	Postup měření.....	55
6.2.2	Vyhodnocení měření .....	58
6.2.3	Shrnutí.....	65
6.3	Porovnání měření spínací a měřicí dotykové sondy.....	66
7	Závěr .....	71
8	Seznam obrázků .....	73
9	Seznam tabulek .....	75
10	Zdroje.....	76

# 1 Přehled použitých symbolů a zkratek

Aj. – a jiné

Apod. – a podobně

CAD – z anglického „Computer aided program“ – počítačem podporované projektování

CMM – z anglického „*Coordinate measuring machines*“ – souřadnicové měřicí stroje

MPEE – z anglického „*Maximum Permissible Error for length measurement*“ – maximální přípustná chyba pro měření délky

Např. – například

PC – z anglického „*Personal computer*“ – osobní počítač

SMS – souřadnicové měřicí stroje

Tj. – také jinak

TP – toleranční pole

Tzv. – tak zvané

## 2 Úvod

Jako první bych chtěla zmínit, že téměř veškerá literatura, ze které jsem čerpala, byla v cizích jazycích, a to zejména v jazyku anglickém. Proto zde může docházet k „nepřesnému“ či nevhodnému překladu. V těchto případech budu proto uvádět i anglický ekvivalent, aby nedocházelo ke zbytečným omylům či zmatení.

Práce je rozdělena na dvě části, teoretickou a praktickou. Úvod první části je věnován souřadnicovým měřicím strojům jako takovým. Pojednává se zde o jejich základních funkcích, typech, vlastnostech apod. Ačkoliv to není hlavním tématem této práce, úzce to s ním souvisí. K tomu, aby si čtenář udělal ucelený přehled a pochopil základní podstatu práce, je nutno se o této problematice dle mého názoru zmínit.

Dále se práce věnuje sondovacím systémům. Obsahuje základní rozdělení sond, jejich stavbu a funkci. Soustředí se zejména na sondy s dotykovým aktivem, protože právě ty jsou její hlavní náplní. Rovněž jsou zde uvedeny metody měření pomocí jednotlivých druhů dotykových sond.

Další objemnou část práce tvoří algoritmy pro souřadnicové měřicí stroje. Jsou zde popsány základní metody přizpůsobení a jsou demonstrovány na jednoduchých příkladech, které by měly celou problematiku přiblížit. Závěr této podkapitoly tvoří shrnutí použití jednotlivých metod. Zejména zde téměř veškerá použitá literatura byla v cizích jazycích a jsou zde tedy uvedeny anglické ekvivalenty.

Praktická část se věnuje podpoření faktů z části teoretické. Skládá se z tří hlavních podtémat. V první části je vybraný díl měření pomocí dotykového souřadnicového měřicího stroje. Jelikož dotykové měřicí stroje lze rozdělit na spínací a měřicí (aktivní), jak je vysvětleno v následujícím textu, je díl měření oběma typy sond. Dále je provedeno vyhodnocení obou metod nezávisle na sobě. Na závěr praktické části jsou výsledky měření porovnány a vyzdvihnuty jejich „pro“ a „proti“, zejména co se týče vlastností jako produktivita, přesnost a časová náročnost.



### 3 Souřadnicové měřicí stroje

Souřadnicové měřicí přístroje (dále jen CMM), slouží k měření geometrických vlastností dílců, jako například délka, průměr, úhel apod. Představují jeden z nejvýkonnějších a nejvýznamnějších metrologických nástrojů široce se využívající ve většině výrobních závodů. Sotva existuje obrobek, jehož rozměry nelze měřit pomocí CMM. Jsou všestranné díky své schopnosti zaznamenávat měření složitých profilů s vysokou citlivostí a rychlostí. Přednosti jako flexibilita, přesnost a rychlý čas měření odpovídají za široké přijetí CMM pro průmyslovou metrologii. Primární funkcí CMM je změřit skutečný tvar obrobku, porovnat jej s požadovaným tvarem a vyhodnotit metrologické informace (velikost, forma, umístění apod.). Skutečný tvar obrobku je získáván sběrem dat na jeho povrchu. Sběr dat lze provádět pomocí různých sond jak kontaktních, tak nekontaktních a nepřetržitě nebo diskrétně. Téma kontaktních sond a sběru dat bude popsáno v dalších kapitolách. [1], [2], [3], [4]

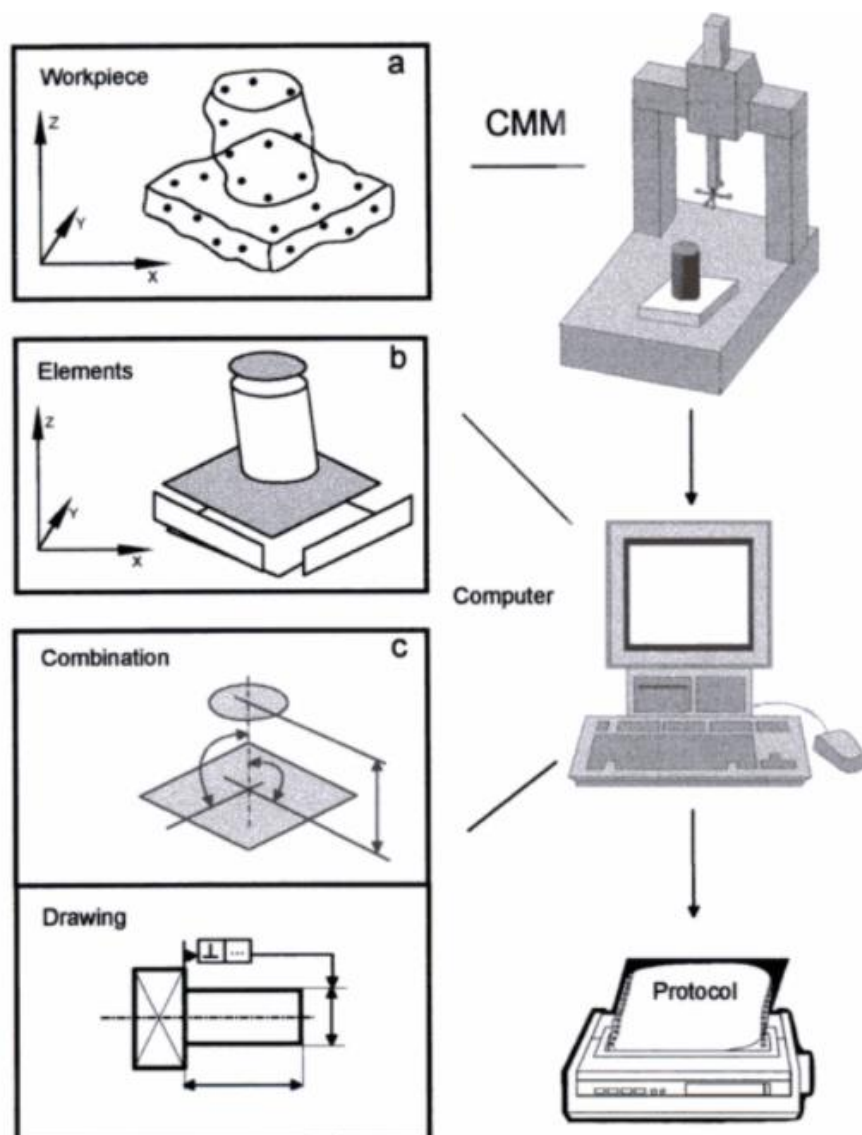
Princip souřadnicového měření spočívá v tom, že stanovíme základní bod v prostoru a polohy dalších bodů na měřeném objektu měříme formou souřadnicových rozměrů v osách X, Y, Z. Každý měřicí bod je vyjádřen pomocí měřených souřadnic. Některé sondy jsou také schopny sbírat směrové vektory měřených bodů, což obvykle umožňuje lepší přesnost. Není však možné vyhodnotit parametry obrobku, např. průměr, vzdálenost, úhel, tvar apod. přímo ze souřadnic měřených bodů. K vyhodnocení parametrů je nutný analytický model obrobku. Tento model se obvykle skládá z ideálních geometrických prvků, tzv. substitučních (matematických) geometrických prvků. Takové prvky mohou být určeny použitím vhodného algoritmu, který nejlépe vyhovuje geometrii prvku na soubor měřených dat. Tato problematika bude více rozebrána v kapitole 5. [1], [2], [10]

Princip souřadnicové metrologie: [2], [10], [20]

- **Generování datových souborů měřením skutečného tvaru obrobku** (obrázek 1 a.)

Sonda obsahuje špičku s kuličkovým zakončením, která je v několika bodech uvedena do kontaktu s povrchem obrobku. Pro každý takový bod CMM zaznamená kartézské souřadnice středu koule. Naměřené souřadnice neposkytují přímé posouzení formy, proto je nutné analyzovat měřené body, aby bylo možné odvodit spojitý tvar.

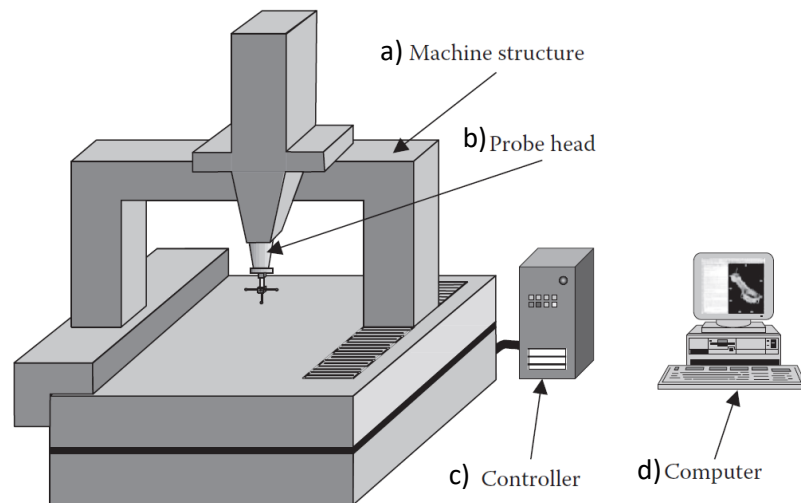
- **Rozdělení na příslušné substituční matematické základní prvky** (obrázek 1 b.)  
 Kvůli chybám ve tvaru a měření nebudou body obecně ležet přesně v povrchu jmenovitého tvaru. Proto je dalším postupem najít „náhradní prvky“, které nejlépe vyhovují měřeným bodům pod určitým kritériem.
- **Vyhodnocení požadovaných vlastností obrobků** (obrázek 1 c.)  
 V této fázi jsou analyzovány odchylky měřených bodů od tohoto náhradního prvku za účelem posouzení vyrobené formy (porovnání výkresových kót a tolerancí s naměřenými hodnotami).



Obrázek 1 - Rozdělení na základní elementární prvky [10]

CMM se skládá z následujících nezbytných systémových komponentů: [2], [10]

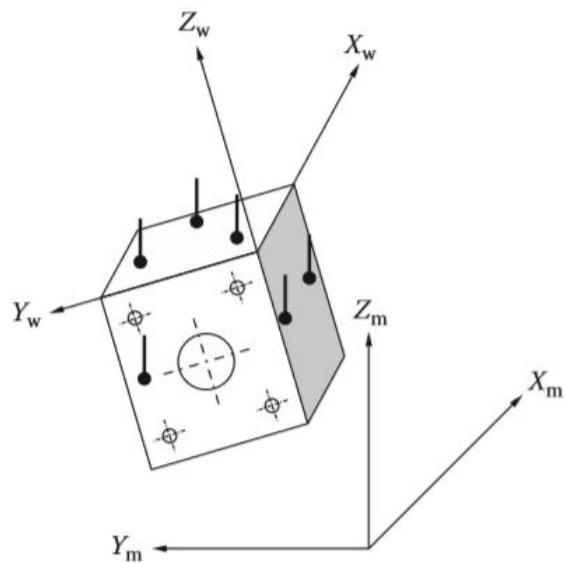
- Mechanický rám s 3 osami a snímači posunutí - obrázek 2 (a).
- Hlava sondy držící senzor, který měří danou část - obrázek 2 (b).
- Řídící jednotka - obrázek 2 (c).
- PC s periferním vybavením (např. tiskárna) a software pro výpočet a zobrazení výsledků měření. PC je obvykle připojen k síti, ze které lze získat programy a CAD soubory a následně je možné odesílat zprávy o měření a data – obrázek 2 (d).



Obrázek 2 - Systémové komponenty souřadnicových měřících strojů [2]

Měření s CMM vždy zahrnuje následující kroky: [2], [10]

- Kalibrace dotykového čidla s ohledem na referenční bod hlavy sondy (většinou pomocí kalibrační koule).
- Určení polohy a orientace obrobku, souřadný systém obrobku  $X_w$ ,  $Y_w$  a  $Z_w$  ve vztahu k souřadnému systému  $X_m$ ,  $Y_m$  a  $Z_m$  CMM (obrázek 3).
- Měření povrchových bodů na obrobku.
- Vyhodnocení geometrických parametrů obrobku.
- Hlášení výsledků měření.



Obrázek 3 - Souřadnicové osy obrobku a stroje [2]

Možnost určení základního bodu v kterémkoliv místě pracovního prostoru měřicího stroje je velkou výhodou oproti konvenčním metodám. Odečítání naměřených hodnot z jemných stupnic je nejen zdlouhavé, ale i namáhavé. Ve srovnání s tradičními způsoby měření, představuje číslicový způsob vyhodnocení výsledků značný krok vpřed. Z toho plyne, že souřadnicová metrologie je v mnoha směrech výhodnější než klasická konvenční metrologie. [1], [2]

Z následující tabulky jsou patrné hlavní rozdíly v konvenční a souřadnicové metrologii. [10]

Konvenční metrologie	Souřadnicová metrologie
Manuální a časově náročné vyrovnání obrobku.	Ruční vyrovnání není nutné.
Jednoúčelové měřicí přístroje se obtížně přizpůsobují měřícím se měřícím úkolům (tj. rozdílná zařízení pro měření délky, sklonu, úhlu apod.).	Jednoduché přizpůsobení měřícím se měřícím úlohám pomocí softwaru.
Samostatné určení velikosti, tvaru, umístění a orientace s různými nastaveními – více zdrojů chyb.	Určení velikosti, tvaru, umístění a orientace v jednom nastavení pomocí jednoho referenčního systému.
Jednotlivá provádějící měření musí být vysoce kvalifikovaná.	Porovnání měření s matematickými nebo numerickými modely.

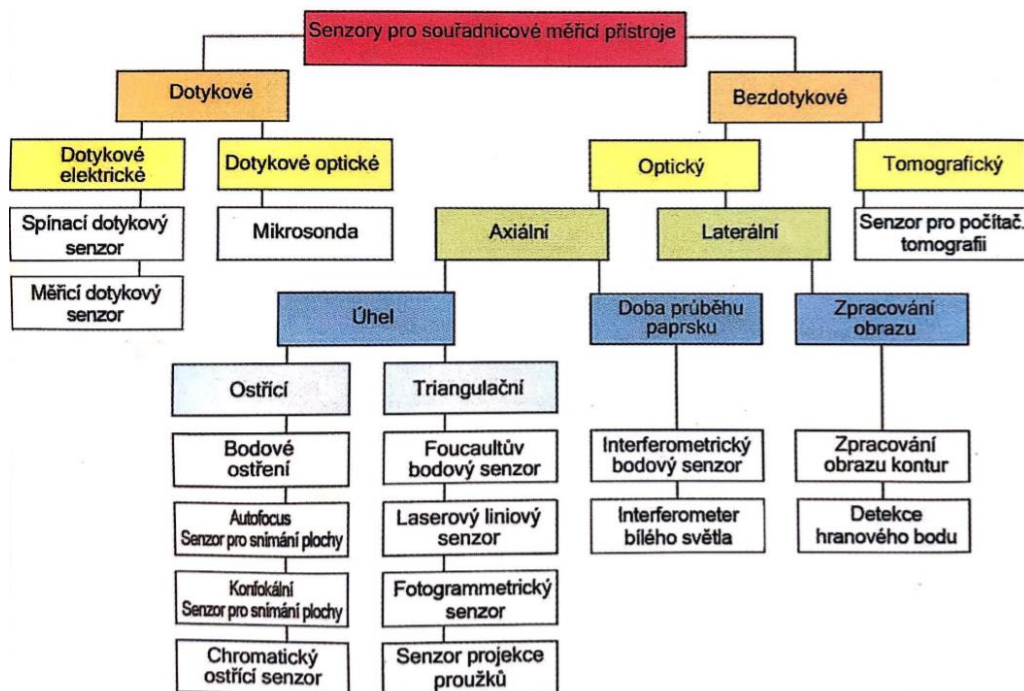
*Tabulka 1 - Porovnání konvenční a souřadnicové metrologie [10]*

## 4 Sondovací systémy pro souřadnicové měřicí stroje

Sondovací systémy jsou nedílnou součástí celého měřicího systému a tvoří jakési spojení mezi strojem a měřeným obrobkem. Zároveň jsou zodpovědné za přesnost měření souřadnic. Nezbytnou součástí pro využití plného potenciálu souřadnicového měřicího systému je jak správný výběr senzoru, tak i jeho konfigurace a plně kvalifikovaný personál. Uživatelé CMM vyžadují jasné pochopení vlastností a rozdílů v široké škále sondovacích systémů, aby bylo možné správně zvolit a používat odpovídající systémy pro dané aplikace měření. [2], [5]

Nejdůležitější rozdělovací hledisko, alespoň co se týče této práce, je větvení do dvou hlavních kategorií podle způsobu dotyku. Jedná se o sondy kontaktní (dotykové, taktilní) a bezkontaktní (optické). Kontaktní sonda, jak již napovídá název, potřebuje ke své funkci hmotný dotyk (tj. získává data fyzickým dotykem vzorku přímo). U optických sond se informace transponuje přes pozici měřicího bodu z objektu na senzor. Vzhledem k tomu, že hlavním tématem této práce je dotykové 3D měření, práce se bude nadále věnovat zejména kontaktním sondám. [5], [8], [4]

Na obrázku níže je zobrazeno detailní rozdělení sondovacích systémů pro souřadnicové měřicí stroje.



Obrázek 4 - Základní rozdělení sondovacích systémů [4]

## 4.1 Dotykové sondy

Jak bylo uvedeno výše, princip dotykových sond spočívá na mechanickém dotyku aktiva a měřeného objektu. Taktilní sondy se větví do různých skupin, záleží na tom, z jakého hlediska je na ně nahlíženo. Dle různých kritérií se mohou dělit například na:

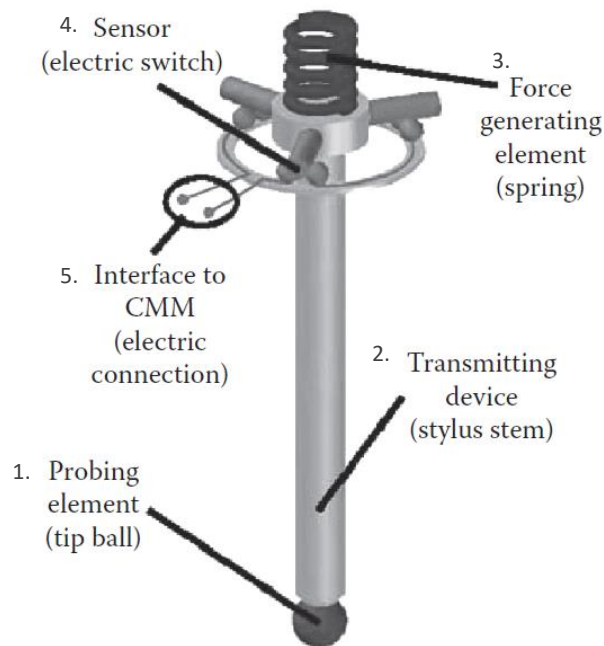
- **Sondy aktivní a pasivní** - Přerušení může fungovat pasivně (např. pružina) nebo aktivně (např. piezoelektricky). Výhodou aktivního principu je, že lze dosáhnout „naladitelné“ směrově nezávislé sondovací síly. Na druhou stranu nespornou výhodou pasivního systému je nižší hmotnost, která poskytuje lepší dynamické vlastnosti a hlavně nižší cenu. [6]
- **Sondy statické a dynamické** - Statické sondování se provádí, zatímco každá součást měřicího systému zůstává v klidu. Dynamické měření je vykonáváno, když se během odečítacích měřicích systémů pohybuje alespoň jedna součást. U dotykových spínacích sond není možné provádět statická měření, protože spouštěcí signál lze generovat pouze během pohybu. [6], [2]
- **Podle typu dotyku** - Tento dotyk lze rozdělit do tří specifických rodin, a to konkrétně na ruční tvrdé sondy, měřicí a dotykové spínací sondy viz dále. [5], [8], [4]

### 4.1.1 Základní stavba

Aby mohl systém hmatového sondování splnit svůj úkol, musí mít tyto součásti: [2], [6], [21]

- 1) Sondovací prvek pro vytvoření mechanické interakce s povrchem obrobku (např. kulička). Dotyková aktiva musí vykazovat velmi nízkou odchylku tvaru, vysokou tuhost a nízké opotřebení. Obvykle jsou vyrobeny z rubínu.
- 2) Vysílací zařízení (např. dřík) pro přenos kontaktních informací (např. sondovací síly) do senzoru. Dřík musí vykazovat velmi vysokou a jednotnou tuhost, nízkou tepelnou roztažnost a nízkou hmotnost. Vhodné materiály pro konstrukci dříku jsou ocel, karbid wolframu, keramika nebo plast vyztužený uhlíkovými vlákny.
- 3) Prvek vytvářející sílu pro vytvoření definované sondovací síly (např. pružina). Množství síly musí být zvoleno podle obrobku, sondovacího prvku a vlivů prostředí.

- 4) Senzor pro vyhodnocení kontaktních informací (např. spínač, síla nebo snímač posunu). Kromě těch, které pouze detekují kontakt, jsou běžné také sondovací systémy, které měří směr a velikost posunutí dráku.
- 5) Rozhraní k CMM pro přenos naměřených informací do řídicí jednotky pro spouštěcí měření polohy os CMM, další zpracování a vyhodnocení polohy sondovaného bodu v souřadnicovém systému stroje.



Obrázek 5 - Stavba sondovacího systému [2]

#### 4.1.2 Tvrdé sondy („hard probe“)

Tvrdé sondy jsou k dispozici v různých konfiguracích a nadále mají široké uplatnění v metrologii souřadnic. Používají se ve spojení s ručními CMM pro nízké a střední požadavky na přesnost. Jsou to v podstatě tuhé dotykové hroty, kde čidlo pro detekci kontaktu mezi měřicím přístrojem a sondou je obsluha. Působením obsluhy je sonda přivedena do kontaktu s obrobkem (obr.6a). [5], [7]

Nespornou výhodou tohoto typu sond je jejich jednoduchost. Opakovatelnost však závisí na „dotyku“ obsluhy. Vzhledem k tomu, že každý operátor má jiný „dotek“ při pohybu a uvedení sondy do kontaktu s povrchem obrobku, používá se tento typ sond v sériové výrobě velmi málo. V dnešní době je však technologie natolik pokročilá, že existují ruční tvrdé sondy, které dokážou měřit až s přesností na setiny mikrometru. Přítomnost tvrdých



sond je tak velkou výhodou, jelikož umožňují kontrolu obrobku přímo na daném stanovišti namísto přepravy do měrového střediska. [5], [7]

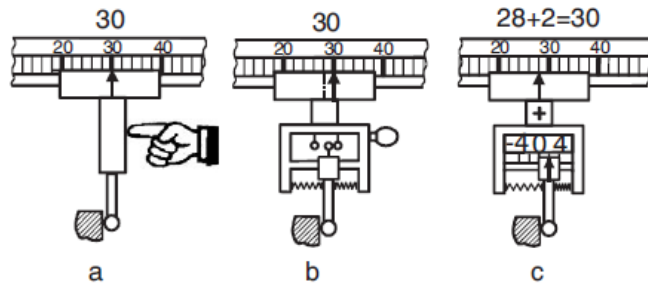


Figure 7: Hard (a), touch-trigger (b) and measuring (c) probe.

Obrázek 6 - Druhy sondovacích systémů [2]

#### 4.1.3 Spínací sondovací systémy („touch - trigger probe“)

Spínací sondy jsou běžně používané typy sondovacích systémů, které sbírají pouze několik diskrétních sondovacích bodů. Samotná hlava sondy je namontována na konci jedné z pohyblivých os CMM. Může být automaticky otáčena a zároveň lze připojit mnoho různých dotykových hrotů (obrázek 7). Díky těmto funkcím je spínací sonda všestranným a flexibilním zařízením pro shromažďování dat. Souřadnicové stroje vybavené těmito sondami eliminují vliv dotyku obsluhy na kvalitu naměřených dat ve srovnání s tvrdým typem sondy. Mezi další výhody patří nízká cena, hmotnost a velikost. [2], [7], [8]



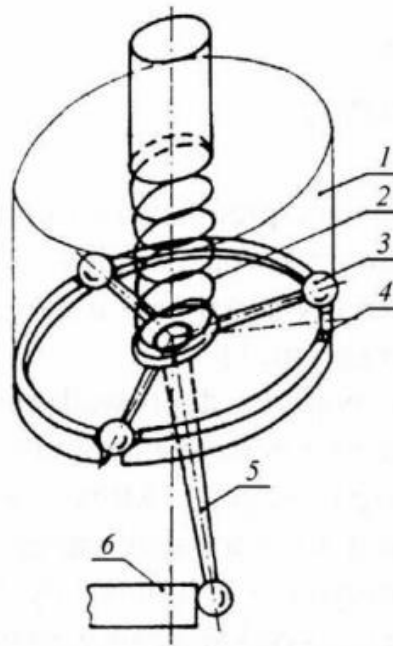
Obrázek 7 - Ukázka sondy s více dotykovými členy [17]

Společnou nevýhodou všech spínacích systémů je fakt, že dotyková kulička je uvedena do kontaktu s obrobkem za účelem určení jednoho měřicího bodu. Následně je nutno tento bod opustit. Z toho důvodu vznikají pro každý měřený bod prodlevy v řádech sekund. Za další nevýhodu lze považovat to, že síly dotyku jsou závislé na směru dotyku, což vede k různým prohnutím dotykového prvku a tím k nezanedbatelné odchylce dotyku závislé na směru. [6], [4]

#### **4.1.3.1 Diskrétní snímání („discrete-point probing“, „point to point probing“)**

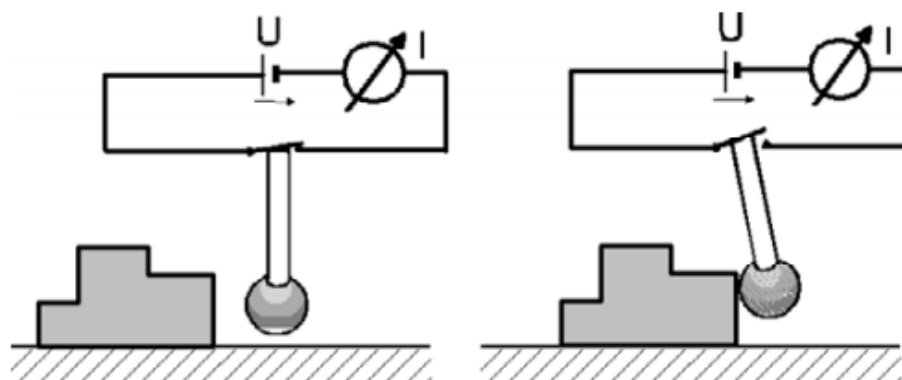
Jednoduché spínací systémy mají přesně vestavěné dotykové citlivé zařízení, které generuje elektronický signál vždy, když dojde ke kontaktu špičky sondy s povrchem vzorku. V okamžiku, kdy spínací sonda vydá signál, dojde k zastavení pohybu stroje a následně k odečtení aktuálních souřadnic z odměřovacího systému stroje. Existují dva způsoby provedení sond pro diskrétní snímání, a to buď sondy elektromechanické, nebo piezoelektrické. [6]

Uvnitř modulu elektromechanické sondy je elektrický obvod obsahující součást ve tvaru hvězdice a rozpínací kontakty vzájemně pootočené o  $120^\circ$  (obrázek 8). Měřený bod je vztažen ke středu dotykové kuličky, která je dříkem upevněna na trojbodovém ložisku. Pokud se dotykové aktivum vychýlí v libovolném směru, rozpojí se minimálně jeden kontakt, a tím dojde k odečtení polohy stroje. Rozpínací kontakty jsou tvořené kulovými plochami, aby při odpojení kontaktu docházelo vždy ke stejné výchylce dotyku. I navzdory tomu vzniká drobná chyba, která je způsobena tím, že než se kontakt rozpojí, dojde k malému vychýlení měřicího dotyku sondy a zároveň dojde k posunu osy stroje oproti okamžiku, kdy se dotyk skutečně dotkl povrchu měřené součásti. Této chyby se lze vyvarovat použitím piezoelektrické sondy. [2], [6], [7], [8], [14]



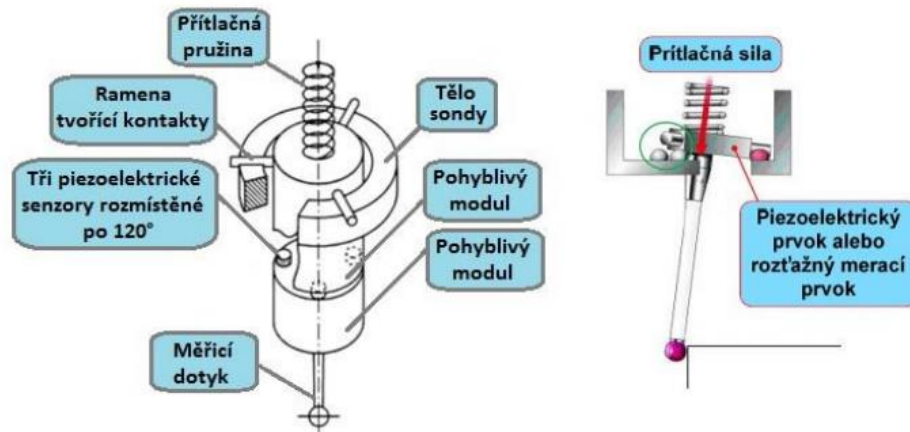
Obrázek 8 – Princip elektromechanické spínací sondy [14]

Jádrem výše uvedených systémů jsou obvody, které rozhodují o kontaktu nebo „nekontaktu“. V důsledku dotyku sondy s obrobkem je vyslán binární signál a konečným výstupem je tedy logická hodnota 1 nebo 0 (kontakt nebo žádný kontakt). Spouštěcí signál je generován vždy, když se povrchu dotkne pohyblivý hrot. S transformátorem pro převod efektu na elektrický signál může být při překročení určité prahové hodnoty generován zmíněný spouštěcí signál. V raných implementacích dotykových spínacích sond se předpokládaly pouze dva možné stavy systému. Odpor nula a nekonečná rezistence. Soudobé kinematické odporové sondy analyzují progresi křivky odporu a spouštějí se při překročení předdefinované prahové hodnoty. Zjednodušený model obvodu dotykové spínací sondy lze vidět na obrázku níže. Jedná se o elektrický obvod, ve kterém je kontakt buď otevřen, nebo uzavřen podle toho, zda se sonda dané součásti dotýká či nikoliv. Důležitou podmínkou je to, že odpor musí být měřen a musí být zavedena jeho prahová hodnota. V okamžiku, kdy odpor překročí prahovou hodnotu, je generován spouštěcí signál. Tím dojde k zastavení stroje a odečtení aktuálních souřadnic. Tímto způsobem lze měřit libovolný počet bodů. [2], [6], [14]



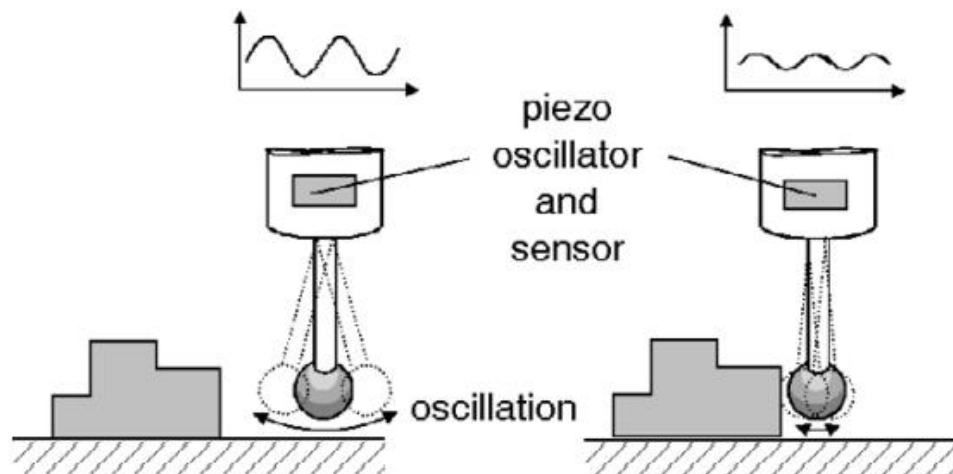
Obrázek 9 - Princip rozpojení kontaktů u elektromechanické sondy [6]

Kvalitnější dotykové systémy používají pro přeměnu mechanického signálu v elektrický signál transformátorové prvky, např. piezoelektrické. Přídavné zlepšení základního návrhu dotykové spínací sondy spočívá v piezoelektrickém snímání pro přenos vychýlení sondy do konstantního digitálního akustického signálu. Tato konstrukce zajišťuje vysokou přesnost měření v souladu s eliminací nepříznivých vlivů jako např. ohýbání pera a vnitřními elektromechanickými reakcemi sondy. Díky tomu lze dosáhnout měření dotykem bez vlivu směru pohybu a rovněž lze pracovat i s velmi malými silami dotyku. Rovněž nejistota měření ovlivněná senzorem je nižší. Piezosenzory jsou vysoce citlivé na měnící se síly a mohou být použity pro detekci nárazového šoku, když dotykové aktivum „zasáhne“ obrobek (tj. při zatížení udají signál pro odečítání hodnot souřadnic). Piezoelektrické sondy mají dvojí indikaci měřeného bodu. První způsob indikace využívá piezokrystaly. Piezokrystaly nacházející se uvnitř sondy se při malém vychýlení deformují a vydávají elektrické impulsy pro odečtení a dočasné uložení souřadnic. Druhý způsob indikace je elektromechanický. Při větším vychýlení dojde k rozpojení elektrického kontaktu. Naměřený impulz se potvrdí a dočasně uloží souřadnice. Následně dojde k zastavení pohybu stroje. [4], [6], [7], [14]



Obrázek 10 – Schéma spinací dotykové piezoelektrické sondy a její princip [14]

Vzhledem k vysoké citlivosti piezosond mohou inerciální síly způsobené zrychleným zdvihovým pojezdem stroje způsobit spouštění bez kontaktu s obrobkem (tzv. falešné spouštění). Často se proto používají další systémy k potvrzení sondovací události, například oscilátor. V případě oscilátoru je v okamžiku kontaktu s obrobkem kmitání tlumeno a rezonanční frekvence se změní. Tento efekt lze použít ke generování spouštěcího signálu. [6]



Obrázek 11 – Spinací sonda vybavená piezooscilátorem [6]

#### 4.1.3.2 Pseudoskenování

V případě spinacích sondovacích systému je k dispozici také možnost tzv. pseudoskenování. Princip funkce je stejný, pouze s tím rozdílem, že vzdálenost mezi jednotlivými body je velmi malá. Může se tedy zdát, že dotykový hrot se kontinuálně

pohybuje po povrchu. Ale není tomu tak, protože spínací dotykové systémy nejsou schopny udržovat neustálý kontakt s povrchem obroku. Tuto možnost poskytují měřicí sondovací systémy, které jsou popsány níže. Rychlost sběru dat je u pseudoskenování mnohem menší než u měřicích sond. [2], [6]

#### 4.1.4 Měřicí sondovací systémy

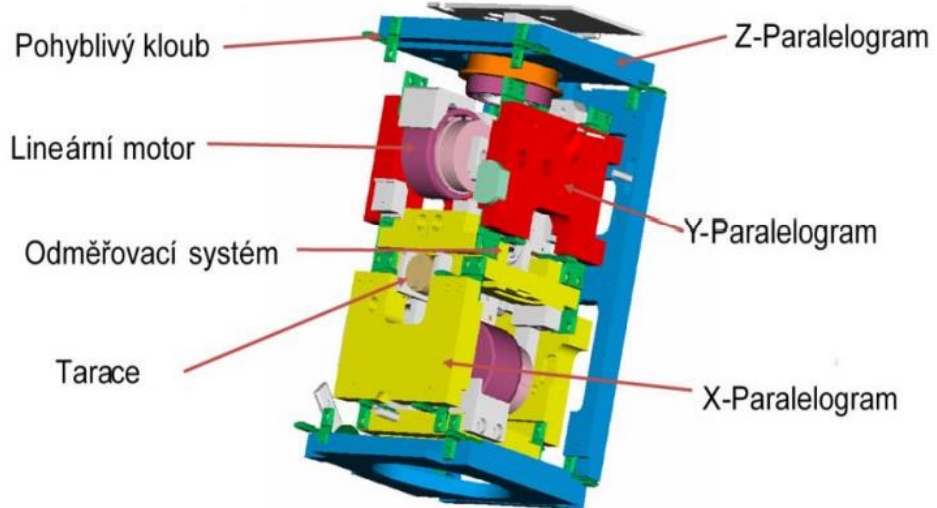
Sondovací systémy s dotykovým aktivem obecně získávají data z měření použitím nízké spouštěcí síly na měřicí plochy a zachycením souřadnic dotykového bodu. Oproti výše uvedeným systémům, měřicí sondovací systémy mohou udržovat neustálý kontakt s povrchem obrobku. Jelikož disponují vlastním rozsahem měření, mohou sbírat tisíce bodů na jejich cestě po povrchu pro zachycení spojitých dat. Tento způsob se nazývá skenování. Díky skenování lze získat detailní informace o měřeném povrchu v relativně krátkém čase. [2], [9]



Obrázek 12 - Měřicí sondovací systém [10]

Systém snímacího typu se skládá z těla sondy, které je v pouzdře snímací hlavy, a je uložené ve dvojitěm nebo trojitěm paralelogramu. Funkce skenující sondy je následující. Měřicí hrot pracuje v režimu, při kterém je v neustálém kontaktu s měřeným objektem. V okamžiku, kdy řídicí systém zaznamená kontakt hrotu s měřeným objektem, vypne přítlak, který vyvozuje nastavenou měřicí sílu, a zapne pohony pro příslušné osy. Tímto způsobem se zabezpečí trvalý kontakt hrotu s měřeným předmětem. Tyto sondy mají systémy měření dráhy, například měřítka, indukční senzory, optické měřicí systémy aj. ve všech

souřadnicových osách. Pokud tedy dojde při kontaktu s obrobkem k vychýlení dotykového aktiva v libovolném směru, velikost tohoto vychýlení se zaznamená na základě informací ze systému měření dráhy. Měřící bod vznikne překrytím vychýlení senzoru s pozicí senzoru v systému CMM. Tímto vychýlením a vracením lze stále „sbírat“ měřící body v průběhu celého měření. [2], [4]



Obrázek 13 - Skenovací hlava [15]

Skenující sonda může pracovat ve dvou režimech: [2], [6], [8]

- **Ve statickém režimu** - Pokud je indukční měřicí systém v „nulové“ poloze, je možnost snímání správných hodnot souřadnic, jedná se o tzv. diskrétní snímání
- **V dynamickém režimu** - Možnost spojitého snímání, tzv. skenování.

#### 4.1.4.1 Skenování

Pro měření tvarovaných povrchů je obvykle vyžadován neustálý kontakt a pohyb po povrchu součásti, takže sondy s dotykovou spouští nelze použít. Namísto toho se používají měřicí dotykové systémy a režim skenování. V tomto režimu, kromě posouzení standardních geometrických prvků, je navíc možné vyhodnotit odchylku tvaru. To je nezbytné v případě, že očekávaná odchylka tvaru části není ve srovnání se stanovenou tolerancí zanedbatelná. Díky schopnosti sondování dokážou měřit sondovací vektor (normu a směr). Z dotykového měření lze pomocí měřících sond zaznamenat kompletní průběh měření a z toho extrapolovat dotykový bod pro předpokládané nulové vychýlení (tj. dotyk se silou dotyku 0

N), což je významné pro měření ohebných dílců. Skenování lze provést při dodržení předem daných drah (např. CAD dat), což umožňuje vyšší rychlost skenování. Použití měřících dotykových systémů je univerzálně možné, pokud to připouštějí vlastnosti dílce (citlivost, velikost části dílce). V porovnání se spínacími systémy jsou méně přesné, ale umožňují vyšší reprodukovatelnost. Obecně platí, že nejistota měření polohy jednoho bodu je vyšší v režimu skenování kvůli dynamickým vlivům. Ale vzhledem k mnohem vyšší bodové rychlosti se shromažďuje více informací o obrobku, což umožňuje testování složitějších vlastností obrobku. Zásadní předností je vysoký počet měřících bodů. [2], [6], [4]

#### ***4.1.4.2 Discrete-point probing***

Měřící sondy rovněž nabízí i možnost diskrétního snímání. Hlavní rozdíl mezi uvedenými systémy je ten, že měřící sondy disponují vlastním rozsahem měření, kdežto ty spínací pouze rozeznávají překročení mezní hodnoty. Při měření většího počtu bodů nebo potřeby měření složitých tvarových ploch se spínací dotykové sondy stávají zdlouhavým řešením a použití měřících sond je nezbytnou záležitostí. [4], [9]



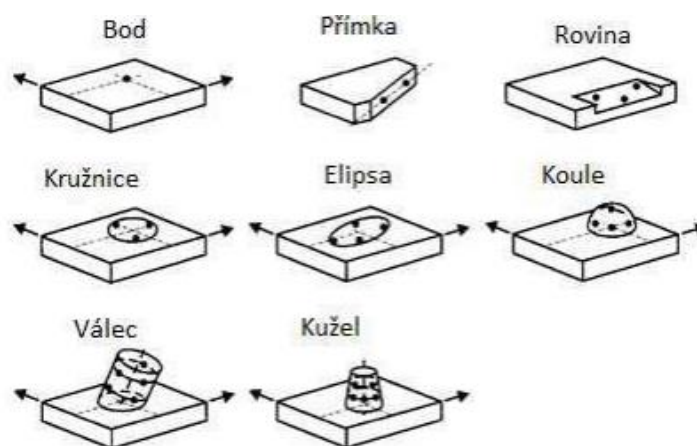
## 5 Algoritmy CMM

Může se zdát, že CMM pouze detekuje kolekci jednotlivých bodů, ale ve skutečnosti je to software, který tyto body zpracovává a mění CMM z pouhého sběrače bodů na nesmírně flexibilní, výkonný měřicí přístroj. Proces „sbírání“ bodů probíhá, dokud se nezíská požadovaný počet měřicích bodů. Software CMM poté vyhodnotí měřené body a provede specifické operace pro vyhodnocení těchto bodů. Analýza bodových dat je základní součástí softwaru CMM. Ačkoli jsou algoritmy uživateli často skryty (tj. „odpověď“ je generována automaticky, jakmile je funkce změřena), většina softwarových balíčků CMM má k dispozici různé algoritmy pro analýzu bodů. Samozřejmě existují i pokročilejší techniky, které mohou zahrnovat výběr algoritmu. Je však zapotřebí velké zkušenosti operátora, aby věděl, jaké metody analýzy přinesou „nejspřávnější“ výsledky daného softwarového balíčku. V průběhu doby bylo vyvinuto několik různých algoritmů pro různé typy případů přizpůsobení. Některé z těchto algoritmů jsou robustní a dosahují výsledků, které lépe aproximují měřenou část. Výchozí metoda přizpůsobení bodů náhradní geometrii je však obvykle pomocí metody nejmenších čtverců („*least squares fits*“), protože tato metoda poskytuje jedinečný a stabilní výsledek. Rovněž se snadno implementuje a poskytuje rychlé výsledky. Na druhé straně výsledky získané touto metodou jsou pouze přibližnou hodnotou měřeného prvku a neodpovídají definici v normě. V úvahu proto připadají i jiné „vhodnější“ algoritmy v závislosti na požadavcích na výkres. [2], [10], [13]

Každý algoritmus vyžaduje minimální počet datových bodů – Tabulka 2. Pro dosažení nejlepších výsledků algoritmy vyžadují, aby data byla plně reprezentativní pro odpovídající geometrický prvek. Jinak je také vyžadován adekvátní počet datových bodů dobře rozmístěných po povrchu prvku (alespoň dvojnásobný počet bodů počtu minimálního). Obecně platí, že čím více datových bodů bude, tím spolehlivější budou výsledky hodnocení. [12], [14]

Element	Minimální počet bodů
Čára	2
Rovina	3
Kruh	3
Koule	4
Válec	5
Kužel	6

Tabulka 2 - Minimální počet datových bodů potřebný k přizpůsobení geometrických prvků [12]



Obrázek 14 - Geometrické elementy sestaveny z minima bodů [14]

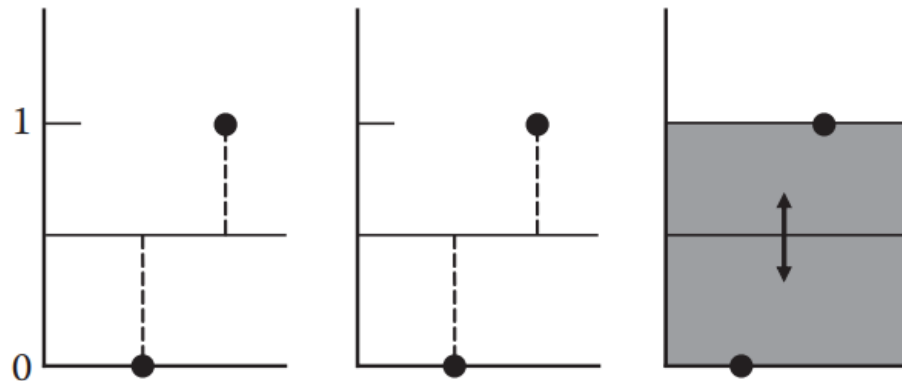
## 5.1 Metody přizpůsobení geometrických prvků

Klíčovým prvkem v jádru softwaru CMM je křivka a povrchové přizpůsobení („*surface fitting*“). Takové přizpůsobení datových bodů je nezbytné k posouzení velikosti, umístění nebo odchylky prvku. Tvar měřených součástí, jak již bylo zmíněno v úvodní pasáži, je tvořen ze základních geometrických elementů, jako například kružnice, rovina, válec, kužel, koule. Měřené elementy obsahují jmenovitou geometrii, na základě které se provádí vyhodnocení rozměrů, úchylek tvarů a polohy. Pro představu je níže uvedena daná problematika.[2], [10], [14]

Je dána sada bodů, které se budou optimálně hodit například na rovinu. Optimální hodnota bude určena velikostí tzv. reziduí (zbytků). Rezidua jsou vzdálenosti bodů od vhodné geometrie, v tomto případě od roviny. I když vzdálenosti nemohou být záporné, rezidua lze považovat za pozitivní (nad rovinou) nebo záporné (pod rovinou). V následujících dvou odstavcích jsou uvedeny příklady základních 3 metod přizpůsobení na jednoduchých příkladech k pochopení základní podstaty. [2], [12]

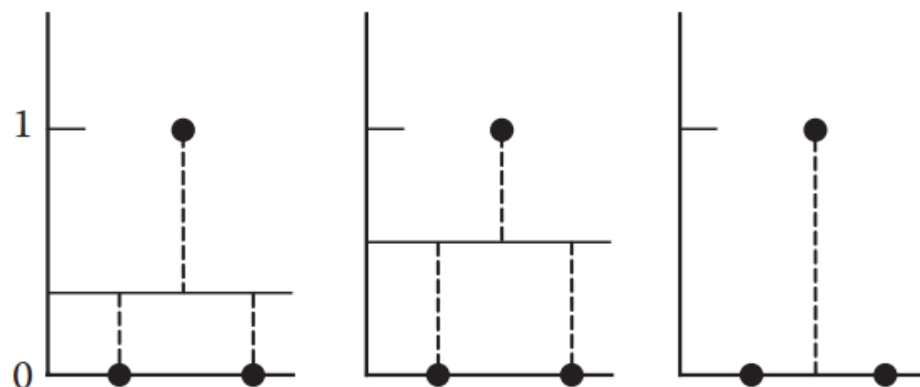
Je dáno přizpůsobení vodorovné čáry datovým bodům, které se objevují v rovině  $xy$ . Protože je čára omezena na vodorovnou polohu, může se změnit pouze její výška. Cílem je tedy najít správnou výšku čáry, která odpovídá datům. Data se skládají ze dvou bodů, jednoho ve výšce 0 a druhého ve výšce 1 - obrázek 15. Pro metodu nejmenších čtverců a metodu minimální zóny vychází stejný výsledek. Optimálně „přizpůsobená“ („*fitting*“) čára je vodorovná čára ve výšce  $\frac{1}{2}$ . Pro případ nejmenších čtverců jsou zbytky  $+\frac{1}{2}$  a  $-\frac{1}{2}$  a součet čtverců zbytků je  $\frac{1}{4} + \frac{1}{4}$ , což se rovná  $\frac{1}{2}$ . To znamená, že žádné jiné umístění vodorovné čáry nebude mít za následek tak malý součet čtverců zbytků. V případě minimální zóny jsou zbytky rovněž  $+\frac{1}{2}$  a  $-\frac{1}{2}$ , což činí hodnotu  $\frac{1}{2}$  největší zbytkovou absolutní hodnotou. Žádné

jiné umístění vodorovné čáry nebude mít za následek menší hodnotu pro největší zbytkovou absolutní hodnotu. Neobvyklejší je přizpůsobení minimální celkové vzdálenosti („*minimal total distance*“), které může mít libovolnou výšku mezi 0 a 1, protože jakákoliv výška přináší stejný součet vzdáleností, v tomto případě 1. Přizpůsobení horizontální čáry dvou bodů dle výše uvedených metod je vidět níže. [2], [10]



Obrázek 15 - a) Přizpůsobení pomocí nejmenších čtverců b) Přizpůsobení pomocí minimální zóny c) Přizpůsobení minimální celkové vzdálenosti [2]

Následující odstavec simuluje rovněž přizpůsobení podle zmíněných metod, avšak pro tři body. K dalším dvěma uvedeným bodům o výšce 1 a 0 je přidán bod třetí, který má výšku rovněž 0 - obrázek 16. V tomto případě má „nejmenší čtvercová“ čára výšku  $1/3$ , což je stejná hodnota jako průměrná hodnota výšek bodů. Metoda nejmenších čtverců totiž „reaguje“ na všechny body a podle toho se přizpůsobí. Tudíž čára přizpůsobená dle metody nejmenších čtverců bude mít vždy výšku rovnou průměrné výšce datových bodů. Přímka, která vznikla přizpůsobením dle minimální zóny, se oproti předchozímu příkladu vůbec nezměnila. Přidáním dalšího bodu na nulu se totiž nezměnily extrémní hodnoty, takže v přizpůsobení nedošlo k žádné změně. Přizpůsobení dle minimální zóny je ovlivněno pouze tím, co se děje v extrémních bodech, a nikoli počtem bodů nacházejících se mezi extrémními hodnotami. To je zásadní rozdíl mezi touto metodou a metodou nejmenších čtverců. Metoda nejmenších čtverců „cítí“ účinek všech bodů, zatímco přizpůsobení dle minimální zóny je ovlivněno pouze několika extrémními body. V případě přizpůsobení dle minimální celkové vzdálenosti se optimálně lícová čára přesunula až na nulu. Důvodem je, že jakákoli vzdálenost od nuly se počítá dvakrát (při počítání dvou bodů), ale jakákoli vzdálenost od 1 se počítá pouze jednou (protože je přítomen pouze jeden bod). [2], [10]



Obrázek 16 - a) Přizpůsobení pomocí nejmenších čtverců b) Přizpůsobení pomocí minimální zóny c) Přizpůsobení minimální celkové vzdálenosti [2]

Většina softwarových balíčků CMM provádí metodu nejmenších čtverců a přizpůsobení pomocí minimální zóny standardním tvarům, jako jsou čáry, roviny, kruhy, koule, válce a kužely. Pro případy úseček a kružnic mohou být problémy dvojrozměrné nebo trojrozměrné. U dvojrozměrného (2D) uložení leží všechny datové body v rovině (řekněme rovině xy) a uložení přímky nebo kružnice probíhá pouze v této rovině. 3D přizpůsobení umožňuje, aby data ležela mimo jakoukoli jednu rovinu, a umožňuje, aby čára nebo kruh byly v libovolném úhlu v 3D prostoru. [2], [13]

V případě kruhů, válců a koulí má smysl hovořit o dvou dalších přizpůsobeních tzv. minimálním opsání („*minimum circumscribed*“) a maximálním vepsání („*maximum inscribed*“). Minimálně opsaný kruh pro sadu bodů v rovině je kruh nejmenšího průměru, který nemá žádné body ležící mimo ni. Maximálně vepsaný kruh je kruh s největším průměrem, který je obklopený body, a zároveň v sobě neobsahuje žádné datové body. [2]

	Least-squares	Min-zone	Max-inscribed	Min-circumscribed
Line	X	X		
Plane	X	X		
Circle	X	X	X	X
Sphere	X	X	X	X
Cylinder	X	X	X	X
Cone	X	X		

Obrázek 17 - Použitelnost jednotlivých přizpůsobení na geometrické tvary [19]

### 5.1.1 Přizpůsobení pomocí nejmenších čtverců („*least squares fit*“)

Toto přizpůsobení je také známo jako Gaussovo přizpůsobení („*Gaussian fit*“). Jedná se o matematický postup pro nalezení nejvhodnější křivky pro danou sadu bodů minimalizací součtu čtverců reziduí („zbytků“) bodů z křivky. Protože se však používají čtverce posunů, mohou mít odlehlé body nepřiměřený účinek na uložení, což je vlastnost, která může nebo nemusí být žádoucí v závislosti na daném problému. Přizpůsobení nejmenších čtverců je obecně jedinečné. To znamená, že bude existovat jediné optimální přizpůsobení jakékoli rozumné datové sadě. Jako vždy i zde existují výjimky, ale nevyskytují se příliš často. Výjimkou může například být již zmíněný nedostatečný počet datových bodů (viz tabulka 2). Dvěma datovými body lze proložit nekonečné množství kruhů, které jimi procházejí. Na druhé straně existují příklady, kde i několik stovek bodů (také nazýváno jako tzv. mračno bodů) stejně nevytvoří jedinečnou rovinu, protože pokud by všechny tyto body byly přesně kolineární, přizpůsobená rovina by stále nebyla jedinečná. Z toho plyne, že bodů musí být nejen dostatečný počet, ale rovněž musí být i „rozumně“ rozmístěny po povrchu. Pro rozumné soubory dat, které jsou dobře vzorkovány, by se mělo očekávat jedinečné řešení nejmenších čtverců. [2], [11], [12]

Typickým příkladem metody nejmenších čtverců je přizpůsobení  $m$  naměřených bodů do roviny. Je tedy dána zmíněná sada  $m$  datových bodů  $(X_1, Y_1, Z_1), \dots, (X_i, Y_i, Z_i), \dots, (X_m, Y_m, Z_m)$  představující naměřené body roviny na povrchu objektu. Cílem je najít polohu a orientaci roviny, která je v určitém smyslu „nejblíže“ datovým bodům. K dosažení tohoto cíle potřebujeme: [12]

- 1) způsob popisující polohu a orientaci rovin
- 2) míru toho, jak dobře rovina odpovídá datům

První problém se týká parametrizace. Rovinu lze jednoznačně specifikovat bodem  $(X_0, Y_0, Z_0)$  v rovině a směrovými kosiny  $(a, b, c)$  normály (platí, že  $a^2 + b^2 + c^2 = 1$ ). Libovolnou rovinu lze tedy definovat šesti takovými parametry, které jsou navzájem nezávislé. Jestliže máme rovinu specifikovanou parametry, jenž byly uvedeny výše  $(X_0, Y_0, Z_0$  a  $a, b, c)$ , nyní je zapotřebí zjistit, jak dobře se rovina „hodí“ na data bodů. Pro jeden bod je přirozené brát vzdálenost  $d$  danou těmito body od roviny jako chybu v uložení. [12]

$$d = a \cdot (x - x_0) + b \cdot (y - y_0) + c \cdot (z - z_0)$$

Pokud máme více bodů, pak je stejně přirozené použít jako měřítko chyby nějaké součty vzdáleností od bodů k rovině. Jak již zde bylo zmíněno, tato vzdálenost, respektive zbytky (popř. rezidua), může být buď kladná, nebo záporná podle toho, na které straně roviny bod leží. Právě z tohoto důvodu nelze přímý součet vzdáleností obvykle použít jako měřítko blízkosti. Místo toho se proto používá jako měřítko součet čtverců vzdáleností. Tedy pro každý datový bod  $(X_i, Y_i, Z_i)$  se vypočítá vzdálenost  $d$  bodu k rovině

$$d = a \cdot (x_i - x_0) + b \cdot (y_i - y_0) + c \cdot (z_i - z_0)$$

a následně vypočte součet  $E$ , který je dán vztahem: [12]

$$E = \sum_{i=1}^n d_i^2$$

Tento součet závisí na parametrech  $(X_0, Y_0, Z_0)$  a  $(a, b, c)$ . Nalezení nejvhodnější roviny se rovná nalezení hodnot parametrů, díky nimž součet čtverců  $E$  nabyde minimální hodnoty. Odtud proto termín metoda nejmenších čtverců. [12]

### 5.1.2 Přizpůsobení pomocí minimální zóny („*minimum zone fit*“)

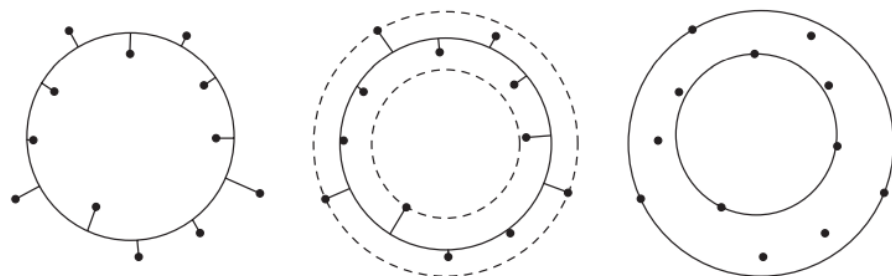
Také je známé pod názvem Chebyshevo přizpůsobení („*Chebyshev fit*“ nebo „*fit min-max*“). Jak je vidět na obrázku 18 v případě kruhu, uložení minimální zóny lze také považovat za kruh v polovině mezi dvěma soustřednými kruhy s minimální separací, které obsahují všechny body mezi nimi. Při aplikaci na skutečnou křivku je minimální separací zaoblení. U dalších funkcí lze přizpůsobit minimální zónu následujícím způsobem: [20], [10], [18]

- **Rovina minimální zóny** - Rovina na půli cesty mezi dvěma rovnoběžnými rovinami s minimální vzdáleností, které obsahují všechny body mezi nimi. Při aplikaci na skutečný povrch je toto minimální oddělení rovinnosti.
- **Čára minimální zóny (ve 2D)** - Čára na půli cesty mezi dvěma rovnoběžnými čarami s minimálním oddělením, které obsahují všechny body mezi nimi. Při použití na skutečnou křivku je toto minimální oddělení přímostí.

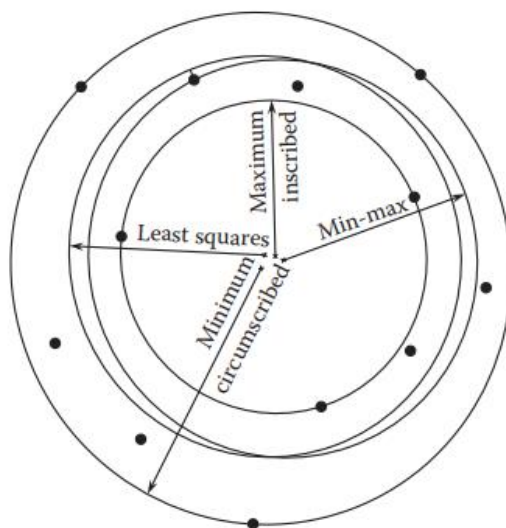
- **Čára minimální zóny (ve 3D)** - Čára, která je osou minimálního vymezeného válce bodů.
- **Koule minimální zóny** - Koule na půli cesty mezi dvěma soustřednými koulemi s minimální separací, které obsahují všechny body mezi nimi. Při aplikaci na skutečný povrch je toto minimální oddělení sféricností.
- **Válec minimální zóny** - Válec uprostřed mezi dvěma koaxiálními válci s minimálním oddělením, které obsahují všechny body mezi nimi. Při aplikaci na skutečný povrch je toto minimální oddělení válcovitostí.
- **Kužel minimální zóny** - Kužel na půli cesty mezi dvěma koaxiálními kužely, mající stejný vrcholový úhel, s minimální separací, která obsahuje všechny body mezi nimi. Při aplikaci na skutečný povrch je toto minimální oddělení kuželovitostí.
- **Torus minimální zóny** - Torus na půli cesty mezi dvěma soustřednými, koaxiálními torusy, majícími stejné hlavní poloměry, s minimálním oddělením, které obsahují všechny body mezi nimi. (Jinými slovy, dva torusy se liší pouze v jejich menších poloměrech.)

Pro přizpůsobení minimální zóny těmto tvarům budou mít největší kladné a největší záporné zbytky vždy stejnou velikost (kromě 3D čáry, kde zbytky nikdy nejsou záporné).  
[2]

Na následujícím obrázku lze vidět datovou sadu bodů, ke které se nejvíce hodí kružnice. Body jsou přizpůsobeny pomocí čtyř různých metod.



Obrázek 18 - a) metoda nejmenších čtverců, b) Chebyshevovo přizpůsobení, c) Maximálně vepsaná a minimálně opsaná kružnice [2]

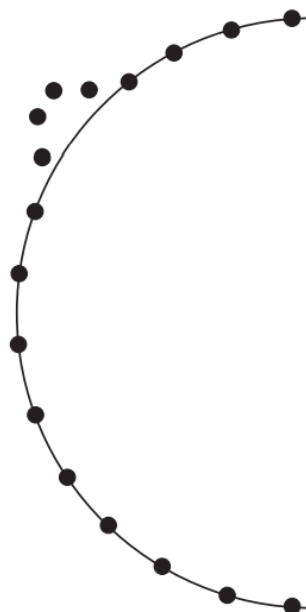


Obrázek 19 - Přizpůsobení stejných datových bodů různými metodami [2]

### 5.1.3 Metoda minimální celkové vzdálenosti („*minimum total distance fit*“)

Rovněž je nazýváno jako přizpůsobení  $L^1$  („*L<sup>1</sup> fit*“). Minimální celková vzdálenost v případě obrázku 16 měla medián zbytku nula. Tento nulový zbytek je vždy pravdivý pro uložení čar (ve dvou rozměrech), rovin, kruhů (ve dvou rozměrech), koulí, válců a kuželů. Ve všech těchto případech je společným atributem přizpůsobení  $L^1$  použití lichého počtu datových bodů. V případě sudého počtu bodů (viz obrázek 15) lze přijmout společnou konvenci, že ideální přizpůsobený prvek leží uprostřed mezi dvěma hodnotami. Tato vlastnost dává přizpůsobení  $L^1$  schopnost ignorovat odlehlé hodnoty, což je vlastnost užitečná v mnoha situacích, kdy by rušivé body měly být ignorovány, ať už jsou to rušivé body z měřicího přístroje nebo z anomálie, jako je špína na měřeném povrchu.





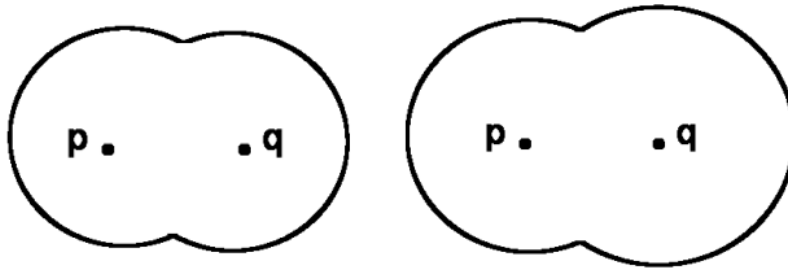
Obrázek 20 - Přizpůsobení minimální totální vzdálenosti [2]

#### 5.1.4 Maximálně vepsané přizpůsobení („*maximum inscribed circle fit*“)

Vzhledem k sadě datových bodů definujeme maximálně vepsaný kruh jako kruh splňující následující tři podmínky: [19]

- 1) V kruhu nejsou žádné datové body.
- 2) Kružnice se dotýká tří datových bodů, které tvoří ostrý nebo pravý trojúhelník.
- 3) Žádná kružnice s větším poloměrem nesplňuje podmínky (1) a (2).

Maximálně vepsané přizpůsobení je, na rozdíl od přizpůsobení nejmenších čtverců, relativně méně stabilní. Přizpůsobení může mít problémy jak s existencí, tak i s jedinečností. Například v případě maximálně vepsaných kružnic (ve 2D) není ke každé datové sadě bodů dána kružnice s maximálním vepsáním. Na praktickém příkladu by to byla situace, kdy se všechny datové body nacházejí na oblouku kružnice v rozpětí od 0 do 90 °. V takovém to případě nemá tato datová sada maximálně vepsanou kružnici. Další problém je ten, že datová sada může mít v jistých případech více než jeden maximálně vepsaný kruh. To znázorňuje obrázek 21 – posunutí obrobku při vrtání díry. Na rozdíl od zvláštních případů, jež byly uvedeny dříve u jiných přizpůsobení, které byly buď nerealistické, nebo vyřešitelné lepším vzorkováním, je tento případ realistický a nelze jej vyřešit lepším vzorkováním. [2], [19]



Obrázek 21 - Přizpůsobení dle maximálního vepsání ve speciálním případě (posunutí obrobku při vrtání díry) [19]

Pro případ vlevo by datové body vybrané kolem tvaru mohly přinést dvě maximálně zapsaná uložení, která mají stejné poloměry ale různé středy. Body vybrané kolem tvaru vpravo ukazují častější případ. Body mají jednu jedinečnou maximálně zapsanou kružnici, ale bez dalšího hledání by algoritmus mohl „omylem“ najít kružnici se středem  $p$  a domnívat se, že našel maximálně zapsanou kružnici. Jinými slovy algoritmus může snadno udělat „chybu“ při hlášení nesprávného vepsaného kruhu. To znamená, že při hledání globálně optimálního přizpůsobení se skrývá mezi ostatními „blízkými“ přizpůsobeními, která jsou místně optimální. Tato vlastnost absolutního optimálního přizpůsobení „skrytého“ mezi lokálně optimálním přizpůsobením je jedním z důležitých důvodů, proč jsou tyto přizpůsobení výpočetně intenzivnější. Minimálně vepsané přizpůsobení může trvat i stokrát více výpočetního času než uložení nejmenších čtverců. [2], [19]

## 5.2 Srovnání algoritmů

Jaký algoritmus z výše uvedených je ten „nejlepší“ či „nejvhodnější“ nelze obecně definovat. Výběr daného algoritmu přizpůsobení závisí na tom, co přesně chce uživatel zjistit. I to je jeden z hlavních důvodů, proč je možno volit z tolika softwarových balíčků, jež obsahují různé druhy přizpůsobení. Vhodnější je tedy specifikovat preference algoritmu podle konkrétní situace.

Pokud chce uživatel vědět, zda by se kolík vešel do otvoru určité velikosti, má smysl řešit minimálně ohraničené uložení kolíku. V opačném případě, tedy pokud uživatel potřebuje vědět, zda je otvor dostatečně velký pro kolík určité velikosti, je vhodné použít maximálně vepsané uložení do otvoru. Pokud je nejdůležitější ignorovat malou menšinu mírně anomálních bodů, může být „nejvhodnější“ přizpůsobení  $L^1$ . Co se týče rozhodnutí, kdy použít metodu nejmenších čtverců nebo metodu minimální zóny, může být komplikovanější. Přizpůsobení nejmenších čtverců má průměrný účinek. Tento efekt má tendenci průměrovat šum měření (chyby měření vyvolané přístrojem z náhodných efektů).

Prizpůsobení minimální zóny však vede k nižší (nebo stejné) vzdálenosti zbytků mezi vrcholy a může být lepším ukazatelem formy, zvláště pokud jsou datové body „dobré“, což znamená poměrně husté, bez odlehlých hodnot a není příliš ovlivněn šumem měření. Některé rozdíly, které je třeba mít na paměti při rozhodování mezi těmito algoritmy, jsou uvedeny níže. [2], [20]

<b>Metoda nejmenších čtverců</b>	<b>Metoda minimální zóny</b>
Méně citlivé na odlehlé body (extrémy)	Velmi citlivé na odlehlé body (extrémy)
Obvykle méně ovlivněno měřicím šumem	Obvykle více ovlivněno měřicím šumem
Testování algoritmů existuje pro základní tvary – výpočtově rychlé	Testování algoritmů je pouze v primitivních fázích – výpočtově náročné

*Tabulka 3 - Rozdíly mezi metodou nejmenších čtverců a metodou minimální zóny [2]*

## 6 Praktická část

Celá praktická část se bude opírat především o znalosti a fakta, které byly popsány v části teoretické. Zejména o kapitolu čtvrtou, kde byly vysvětleny druhy dotykových měřících sond.

Samotná praktická část se skládá ze dvou oddílů. První úsek praktické práce se bude věnovat tomu, jak počet naměřených bodů ovlivní výsledek měření. Jedná se o experiment, který je vložen před hlavní segment praktické části. Druhý a také hlavní oddíl praktické práce se bude týkat změření vybraného dílce dvěma různými druhy dotykových měřících sond (viz kapitola 4). Následně bude provedeno jejich vyhodnocení a vzájemné porovnání.

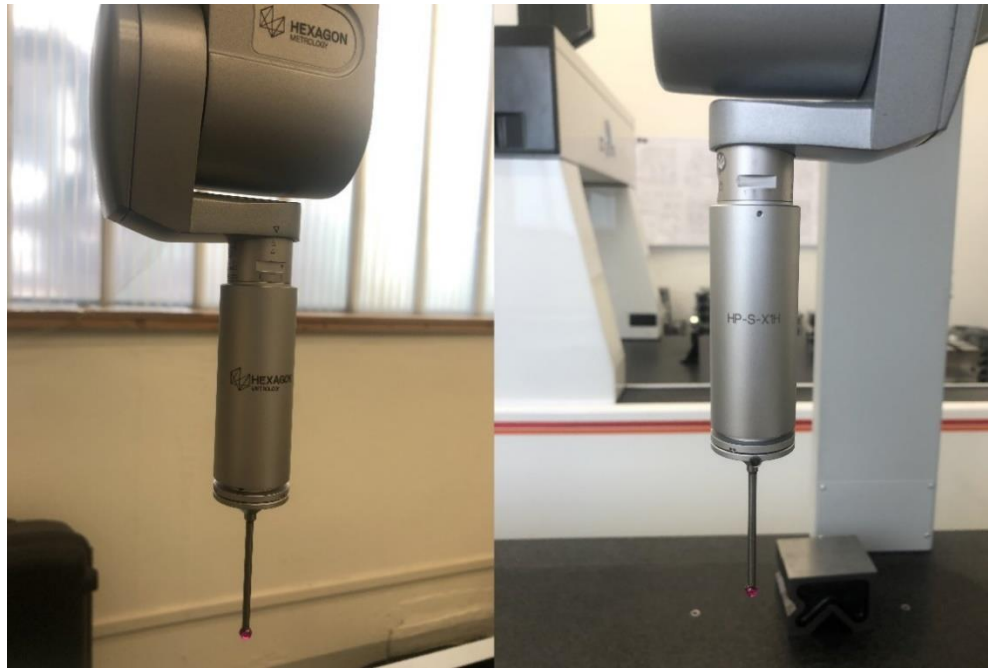
V praxi existuje mnoho různých měřících strojů od různých výrobců. Rovněž každý výrobce používá svůj systém pro vytvoření měřicího programu a finálního vyhodnocení. V rámci této práce byly použity SMS od firem Zeiss a Hexagon, kde každá z těchto firem má svůj vlastní software. Veškeré uvedené výstupy a metody vyhodnocení tedy nejsou jediné možné, ale výlučně podléhají možnostem daného prostředí programu.

Předmětem celé praktické práce je díl, který je vyobrazen na obrázku níže. Jedná se o součást o rozměrech přibližně D100x30 mm vyrobenou z hliníku. Po obvodu součásti byly z důvodu souřadnicového měření speciálně vyfrézovány tvarové plochy. Celá výkresová dokumentace dílu je uvedena na další stránce na obr. 23.



## 6.1 Měření pomocí spínací dotykové sondy

Jako první byl díl změřen pomocí souřadnicového měřicího stroje DEA GLOBAL 09.20.08 s dotykovou spínací sondou s MPEE  $(1,4 + L/333) \mu\text{m}$  od firmy HEXAGON. Fotografii použité spínací sondy je možno vidět na obr. 24. Měření bylo provedeno celkem třikrát.



Obrázek 24 - Použitá spínací sonda

První měření obsahuje minimální počet bodů potřebný k vytvoření dané geometrie (viz kapitola 5). Tedy 3 náhodně rozmístěné body na každé rovinné ploše a 3 body na každé ploše válcové. Body byly po válcové ploše rozloženy soustavně, a to v jedné rovině řezu válce. Tato rovina řezu byla kolmá na osu válce. Celkově tedy toto měření zahrnuje 27 bodů po celé geometrii součásti – 2 rovinné a 7 válcových ploch.

Pro druhé měření byl použit redundantní počet bodů. Konkrétně válcové plochy byly snímány v jednom řezu válce kolmém na jeho osu a to 10 měřenými body. Rovinné plochy pak byly snímány celkem 15 měřeními body náhodně rozmístěnými po rovinné ploše. Celkový počet bodů sejmutých při tomto měření odpovídal 85 bodům.

Třetí a také poslední měření se spínací dotykovou sondou proběhlo v návaznosti na měření s měřicí dotykovou sondou. Výstupy tohoto měření budou dále sloužit jako podklady pro porovnání se zmíněnou aktivní sondou. V případě tohoto měření byl počet bodů volen následovně. Všechny válcové plochy byly měřeny čtyřmi body, které byly systematicky rozmístěny po povrchu válce v jedné rovině řezu kolmé na osu válce. Co se týče měření rovinných ploch, ty byly nasnímány třemi body, které byly stejně jako v předchozích případech náhodně rozmístěny na dané ploše. Každý tvar byl postupně změřen třemi body, kde všem těmto bodům byla definovaná jednotná vzdálenost od „vrchní“ roviny (rovina, jenž má na sobě vypálenou ustavovací značku pro měření). Celkový počet bodů tohoto měření byl 46.

Pro větší vypovídací hodnotu byly všechny typy měření provedeny celkem třikrát. Počet bodů u každého měření zůstal vždy stejný, jak bylo uvedeno v odstavci výše. Z naměřených hodnot byl vygenerován soubor typu Excel a následně byl proveden aritmetický průměr naměřených hodnot pro každý typ měření. Vzhledem k tomu, že se jednotlivá měření od sebe nijak výrazně nelišila (relativní chyba pozice byla  $\ll 1\%$ ), bylo vybráno vždy 1 měření ze série a pro ukázkou zobrazen jeho výstup, ať už grafický či tabulkový. Porovnání měření, ať v rámci jedné sondy s rozdílným počtem bodů nebo v rámci dvou druhů sond, proběhlo ze zmíněného aritmetického průměru hodnot měření. To je důvod, proč se hodnoty zanesené v tabulce liší od těch, které jsou zobrazeny na obrázcích při konkrétním vyhodnocování. Postup měření byl ve všech případech identický, obsahoval vždy stejný počet bodů pro daný typ měření. Celé měření probíhalo za teploty 21 °C.

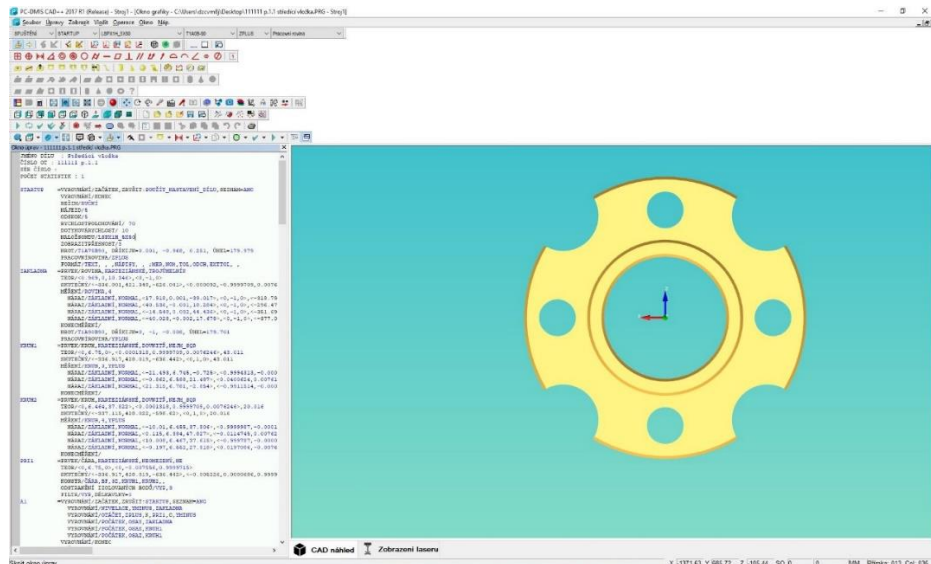
### **6.1.1 Postup měření**

Postup měření ve všech případech odpovídal bodům uvedených na stránce 11. Nejprve byla extrahována data modelu a posléze byla nahrána do počítače. Následně proběhla kalibrace dotykového čidla, v tomto případě kuličky. Kalibrace probíhala pomocí kalibrační koule, kde sonda postupně nasnímala 25 bodů po jejím obvodu. Počet nasnímaných bodů se odvíjí od přesnosti dané dotykové hlavy. Dalším krokem bylo ustavení kusu do pojezdu stroje a jeho následné vyrovnání a přiřazení os stroje k osám modelu.

Celé měření probíhalo pomocí metrologického softwaru PC DMIS, rovněž od firmy HEXAGON. Měřené body byly přímo „zachytávány“ na povrch modelu ve zmíněném softwarovém prostředí. Při měření je velmi důležité nezapomenout na přidání tzv. pozičních bodů. To jsou body, které tvoří jakési odskoky od dílu, aby nedošlo ke kolizi sondy a

měřeného dílu. Jelikož SMS bere vždy nejkratší vzdálenost mezi jednotlivými měřenými body, je přidání pozičních bodů nezbytnou a důležitou součástí celého procesu měření.

V případě měření plochy lze body libovolně umisťovat na povrch modelu. Při měření průměrů je postup ještě jednodušší. Navolí se pouze počet bodů, jež chceme měřit, a program je sám pravidelně rozmístí po obvodu kružnice.



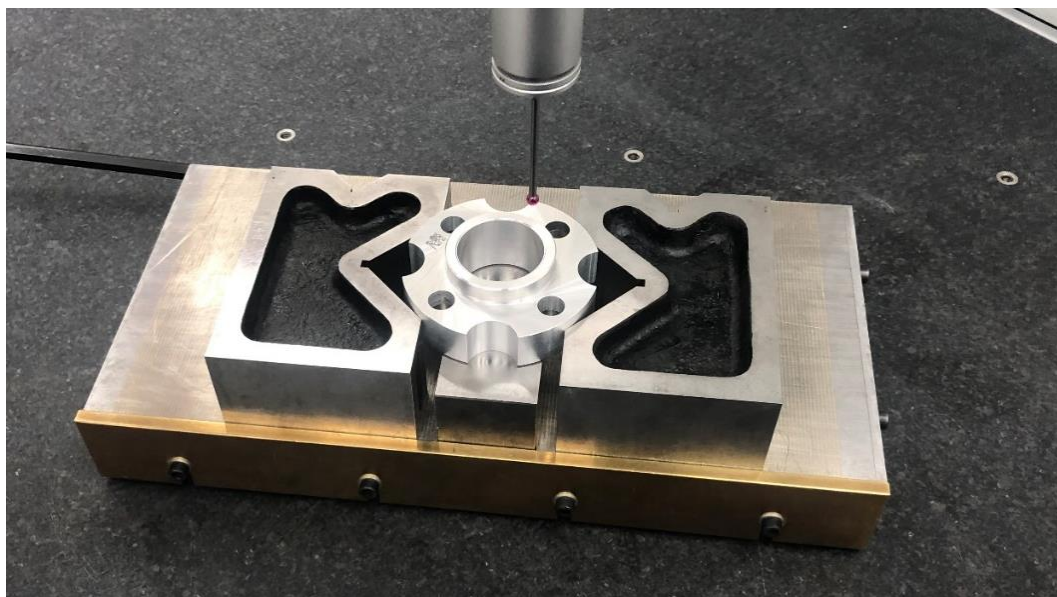
Obrázek 25 - Ukázka softwarového prostředí PC DMIS

### 6.1.2 Posouzení vlivu naměřených bodů na výslednou přesnost

V kapitole 5 bylo řečeno, že každý algoritmus vyžaduje minimální počet datových bodů. Pro dosažení nejlepších výsledků je potřeba, aby byla data plně reprezentativní pro odpovídající prvek, viz tabulka 2. V této podkapitole praktické části je díl měřen stejným typem spínací sondy s různým počtem datových bodů a diskutuje se tento vliv na výsledek. Měření s méně datovými body bude nadále označováno jako měření 1. Druhé měření s více datovými body jako měření 2.

Jelikož byl měřený díl vyroben z hliníku, nemohl být sám o sobě upnut pomocí magnetického upínače. Místo toho byly použity dvě prizmata a broušená kostka. Pomocí prizmat, která magnetickým upínačem lehce upnout lze, byl dílec pevně uchycen. Pro možnost měření i vnějšího průměru byl kus usazen na broušenou kostku. Tím bylo docíleno zpřístupnění pro měření i po vnějším obvodu kusu.





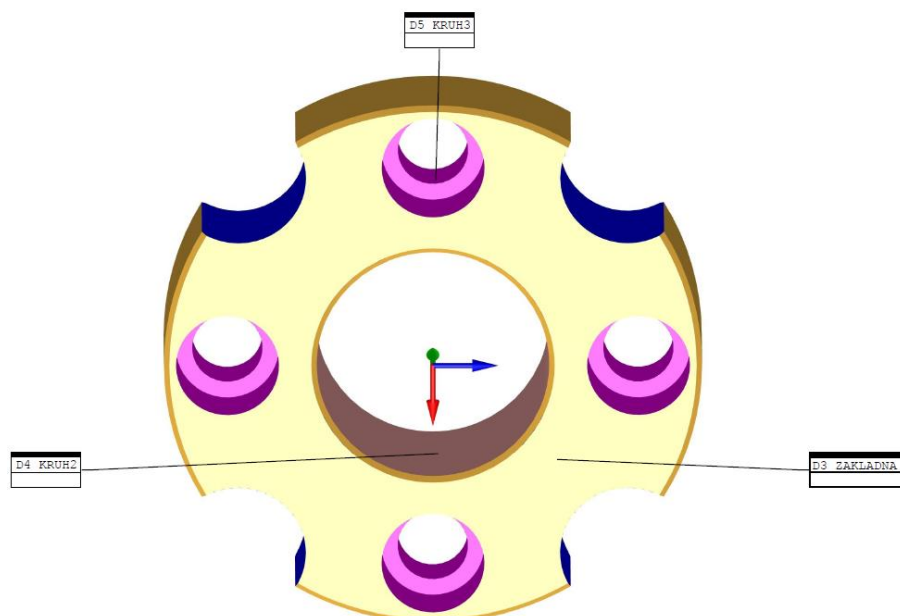
Obrázek 26 – Způsob upnutí pro měření spínací sondou

Vzhledem k zavedenému souřadnicovému systému v modelu, odpovídají osy stroje osám modelu následovně.

Osy stroje	Osy modelu
x	x
y	-z
z	y

Tabulka 4 - Přřazení os stroje k osám modelu

Vyrovnnání bylo provedeno vzhledem k otvoru 43H7 (D4 KRUH2), spodní rovině (D3 ZÁKLADNA) a k netolerovanému otvoru 13 (D5 KRUH3), jejíž střed se nachází v ose – X. Vyrovnnání dílu je zobrazeno na obrázku níže.



Obrázek 27 - Vyrovnání dílu 1

Před samotným vyhodnocením je v tabulce níže uvedeno, co znamenají jednotlivé zkratky v měrovém protokolu.

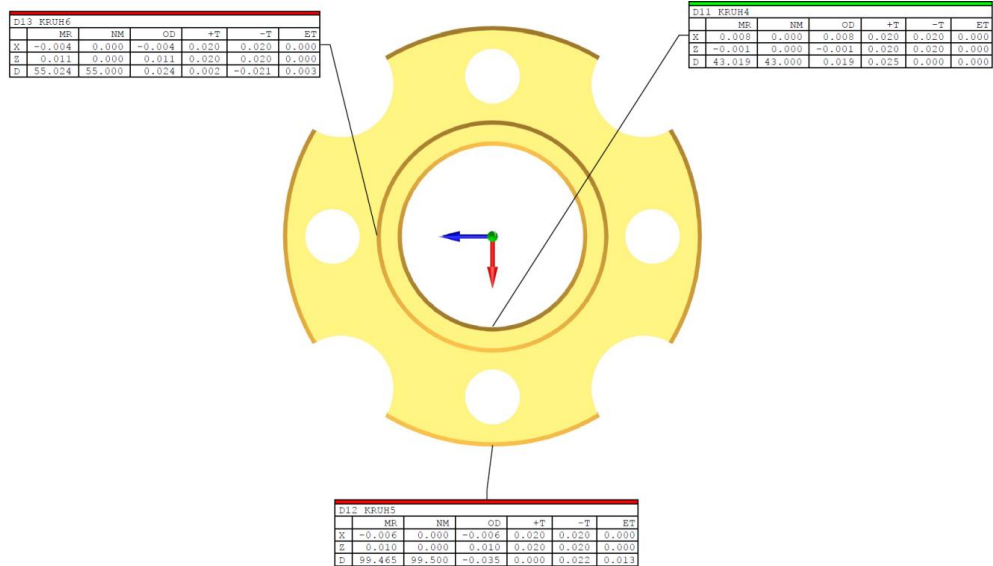
MR	Naměřená hodnota
NM	Nominální hodnota
OD	Odchylka od nominální hodnoty
+T	Tolerance (+)
-T	Tolerance (-)
ET	Hodnota mimo toleranci

Tabulka 5 - Vysvětlivky zkratk v měrovém protokolu

Následující dva obrázky zobrazují měření týž průměrů s méně či více datovými body. Obrázky ukazují vyhodnocovací tabulky, jež jsou přímo přichyceny k měřené geometrii. Jednotlivé tabulky ukazují naměřenou hodnotu, nominální hodnotu a další hodnoty, které jsou vysvětleny v tabulce 5. Záhloví tabulek je vybarveno buď zelenou, nebo červenou barvou. Barva se odvíjí od toho, zda se vyhodnocený průměr pohybuje v tolerančním poli. Zelená barva signalizuje hodnotu v tolerančním poli, naopak červená barva hlásí hodnotu mimo toleranční pole.

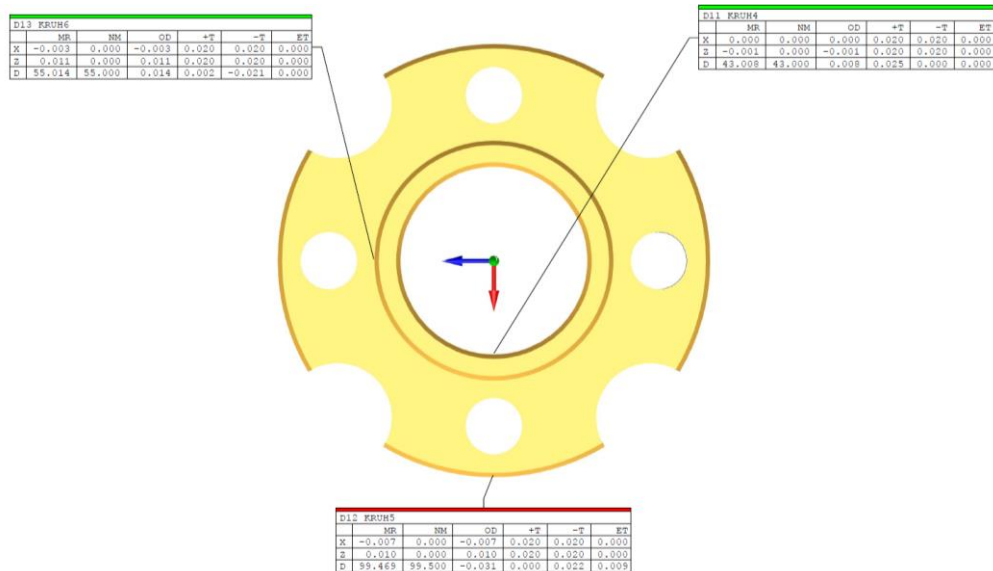
Toto grafické znázornění je jedno z možných vyhodnocení, které nabízí program PC DMIS. Všechny obrázky jsou z první série měření.

- **Měření č. 1**



Obrázek 28 - Měření č. 1 průměry

- **Měření č. 2**



Obrázek 29 - Měření č. 2 průměry

Tabulka 6 zobrazuje zmíněný aritmetický průměr naměřených hodnot pro daný prvek. Při porovnání měření musí být kladen důraz nejen na samotné výsledky měření, ale důležitý vliv na vyhodnocení má rovněž velikost tolerančního pole. Nemůže být jednoduše

konstatováno, že například hodnota 0,02 mm je „malá“ či „velká“ odchylka. Vyhodnocení se musí odvíjet od velikosti tolerančního pole. Pro lepší názornost byly odchylky měření vztaženy k velikosti tolerančního pole prvku a vyjádřeny procentuálně, aby byl rozdíl měření patrný. Každé měření dále ovlivňuje ještě maximální přípustná chyba pro měření délky (MPEE). Tato chyba bude při vyhodnocování rovněž zahrnuta.

				1. měření			2. měření		
	NM	+T	-T	MR	OD	ET	MR	OD	ET
KRUH 4	43	0,025	0	43,0175	0,022	0	43,0097	0,0097	0
KRUH 5	99,5	0	0,022	99,466	-0,034	0,012	99,467	-0,033	0,011
KRUH 6	55	0,002	-0,021	55,0225	0,0225	0,0025	55,0127	0,0127	0

Tabulka 6 - Porovnání měření D4 - D6

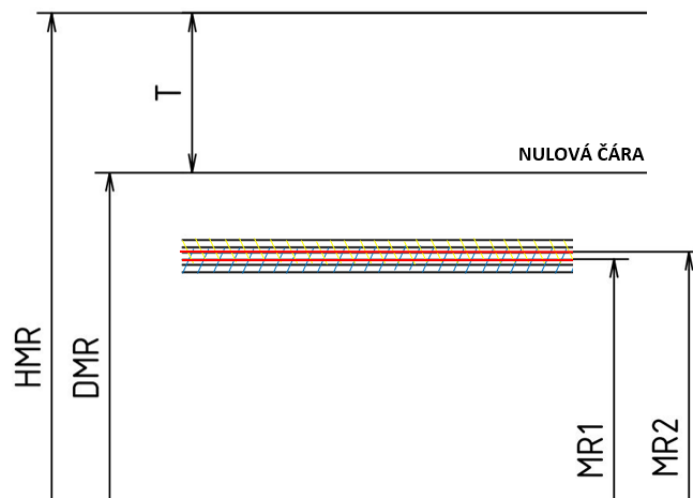
Pro představu byla k výše uvedeným geometriím vypočítána i směrodatná odchylka dat pro oba případy měření. Směrodatná odchylka určuje míru rozptýlení hodnot od průměrné (střední) hodnoty. Z tabulky 7 lze vidět, že směrodatná odchylka dat je výrazně menší než naměřené hodnoty. Malé hodnoty směrodatných odchylek signalizují, že prvky souboru jsou si navzájem velmi podobné.

	Směrodatná odchylka	
	1. měření	2. měření
KRUH 4	0,00300	0,00153
KRUH 5	0,00100	0,00200
KRUH 6	0,00115	0,00153

Tabulka 7 - Směrodatná odchylka pro KRUH 4, 5, 6

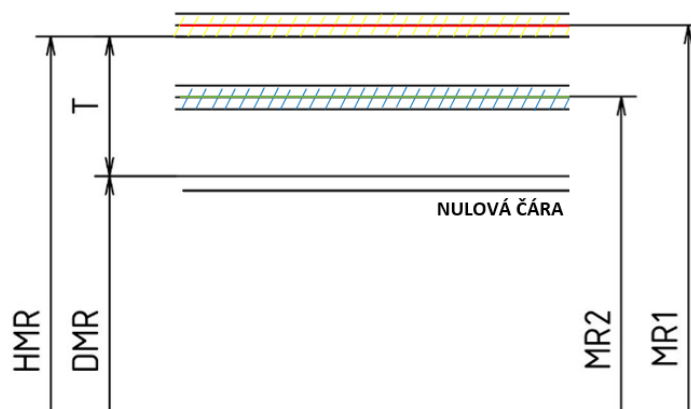
Pro průměr KRUH5 je velikost tolerančního pole od 0 do - 0,022 mm (h6). Odchylka od nominálního povrchu u prvního měření je - 0,034 mm, u druhého - 0,033 mm. Rozdíl mezi těmito hodnotami je tedy pouhá 0,001 mm. Pokud by byl tento rozdíl vztažen na hodnotu tolerančního pole měřeného prvku, pohyboval by se okolo 4,5 %. Ačkoliv odchylka jednotlivých měření je relativně malá, v celkovém pohledu se obě měření nachází mimo toleranční pole. Konkrétně o 55 % a 50 %. I když se výsledný průměr nachází mimo toleranční pole, v našem případě to není podstatné. Podstatné je, že obě měření mají velmi podobný výstup. Celá situace je zobrazena na obrázku níže. Obrázek je zobrazen při zvětší

100:1. Obrázek znázorňuje i velikost maximální chyby MPEE, která je v obrázku vyznačena jako šrafované pásmo (žlutě MR1, modře MR2).



Obrázek 30 - Toleranční pole KRUH5

Zajímavější je vyhodnocení průměru u prvku označeného jako KRUH6. Situace je znázorněna na obrázku 31 (100:1). Na něm je vidět, že první měření nespadá do tolerančního pole, kdežto druhé měření ano. Pokud by však k naměřené hodnotě z prvního měření byla přičtena (respektive odečtena) chyba MPEE, výsledek do TP prvku již spadá (viz obrázek). Na tomto příkladu je názorné, jak i maximální chyba MPEE ovlivňuje výsledek měření. Odchylka obou měření je 0,0098 mm. Dalo by se říci, že rozdíl je to poměrně malý. Pokud by byl však tento rozdíl vztažen k TP prvku, dostali bychom odchylku měření č. 1 a č. 2 přibližně 51,58 %. Jedná se o hodnotu větší než polovina TP. Hodnota z prvního měření je o 13,19 % mimo TP.

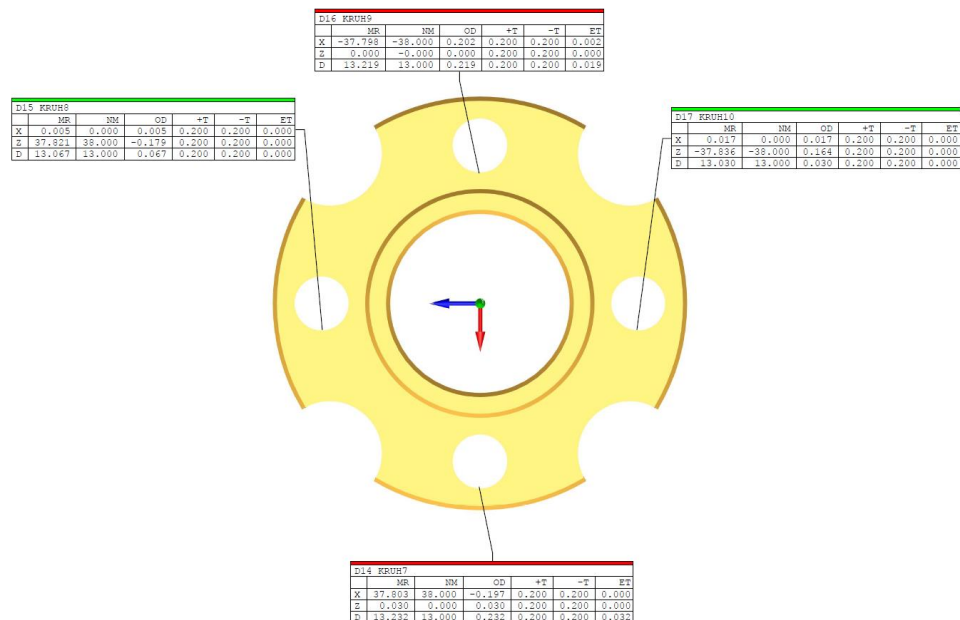


Obrázek 31 - Toleranční pole KRUH6

Vyhodnocení prvku označeného jako KRUH4 bylo provedeno stejným způsobem. Odchylka obou měření vztažená k TP prvku je 31,2 %. Jmenovitě se rovná 0,0073 mm. Odchylka je opět celkem vysoká, ale na finální výsledek tento rozdíl nemá vliv, jelikož se obě měření nachází v toleranci.

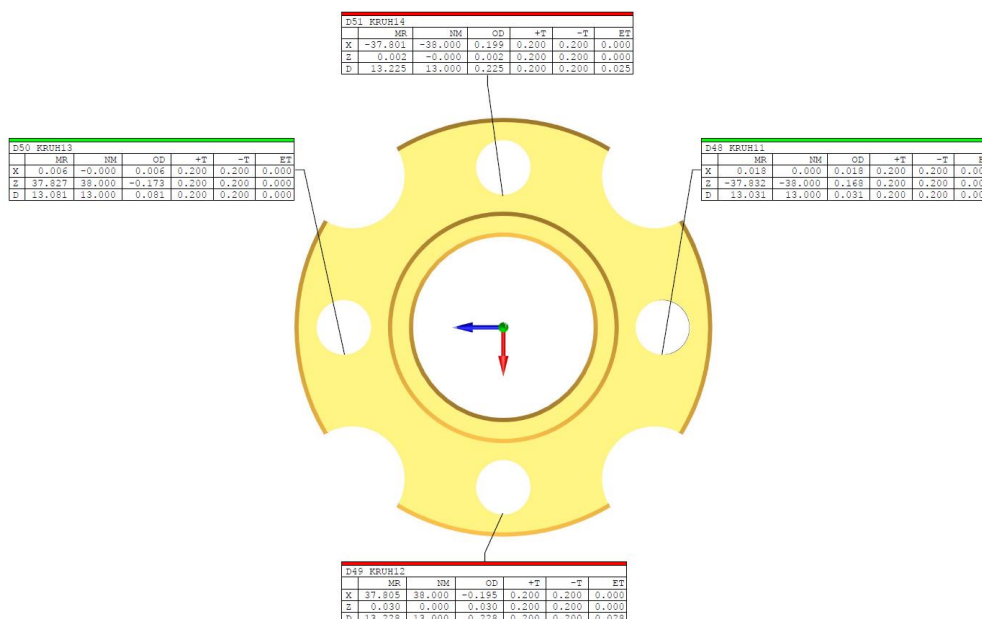
Následující odstavce se věnují vyhodnocení děr pro šrouby D14 (D48) – D17 (D51). Na obrázcích 32 a 33 je znázorněno měření pro oba případy (první měření ze série). Při prvním pohledu na obrázky je patrné, že výsledky měření 1 a 2 spolu korespondují. Průměry otvorů v osách x a x- (červená osa) jsou mimo toleranční pole v obou případech, zatímco v osách z a z- (modrá osa) jsou výsledky obou měření uvnitř TP. Pro přehlednost je opět celá situace zanesena do obr. 34.

- **Měření č. 1**



Obrázek 32 - Měření č. 1 díry pro šrouby

- **Měření č. 2**



Obrázek 33 - Měření č. 2 díry pro šrouby

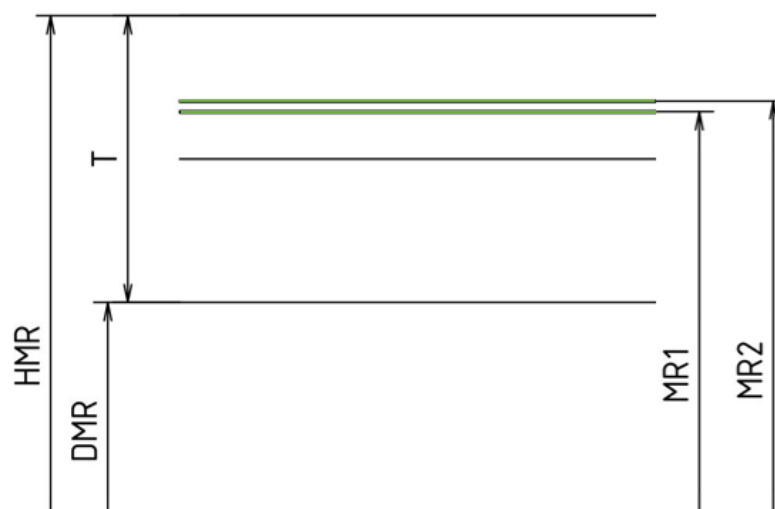
Stejně jako v předchozím případě byl vytvořen aritmetický průměr ze tří po sobě jdoucích měření jak pro první, tak i pro druhý typ měření.

				1. měření			2. měření		
	NM	+T	-T	MR	OD	ET	MR	OD	ET
D14=D49	13	0,2	0,2	13,2317	0,2317	0,0317	13,2267	0,2267	0,0267
D15=D50				13,0660	0,0660	0	13,0810	0,0810	0
D16=D51				13,217	0,217	0,017	13,2263	0,2263	0,0263
D17=D48				13,0263	0,0263	0	13,0310	0,0310	0

Tabulka 8 - Porovnání měření D14 - D17 (D48 – D51)

Rovněž i zde byl proveden výpočet směrodatných odchylek dat pro případ měření děr pro šrouby. Hodnoty směrodatných odchylek opět vyšly velmi malé (v řádech tisícín milimetru).

Při tomto porovnání bude postupováno stejně jako v předešlých případech. Poloha změřené hodnoty vůči tolerančnímu poli je zobrazena na obr. 34. Chyba MPEE je vzhledem k velikosti tolerančního pole zanedbatelná (0,35 %). Celý obrázek 34 je zvětšen 10:1, tudíž chyba MPEE není v obrázku zanesená, neboť je příliš malá. Pro ostatní případy vyhodnocení děr by vykreslení vypadalo podobně, proto zde dále nebude uvedeno. Vyhodnocení ostatních děr je uvedeno v tabulce 9. Ta znázorňuje, o kolik procent dané měření překračuje hodnotu TP a také odchylku obou měření.



Obrázek 34 - Toleranční pole D15

	Odchylka přes TP MR1	Odchylka přes TP MR2	Odchylka obou měření
D14=D49	7,925 %	6,675 %	1,25 %
D15=D50	0 %	0 %	3,75 %
D16=D51	4,25 %	6,575 %	2,33 %
D17=D48	0 %	0 %	1,18 %

Tabulka 9 - Odchylky měření D14 – D17 (D48 – D51)

Z tabulky 9 je patrné, že odchylky měření nevyšly nijak fatálně odlišné. Největší odchylka při měření byla 3,75 % TP prvku, což odpovídá hodnotě 0,015 mm. Naopak nejmenší odchylka činí 1,18 % TP prvku. Ta odpovídá hodnotě 0,00467 mm. Důvodem takto malých, respektive velkých odchylek je velikost tolerančního pole, které se pohybuje v rozmezí  $\pm 0,2$  mm. Právě na tomto příkladu je dobře vidět, jak velikost TP ovlivňuje výsledek (například v porovnání s vyhodnocením geometrie KRUH 6).

Pro tento případ nemá smysl měření tvarové plochy porovnávat. Důvod je v použití spínací dotykové sondy v závislosti na CAD modelu. V tomto případě lze totiž vyhodnotit pouze odchylku od CAD modelu, která bude v obou případech stejná, jelikož první měření je podmnožinou měření druhého.

### 6.1.3 Měření dílu pro porovnání

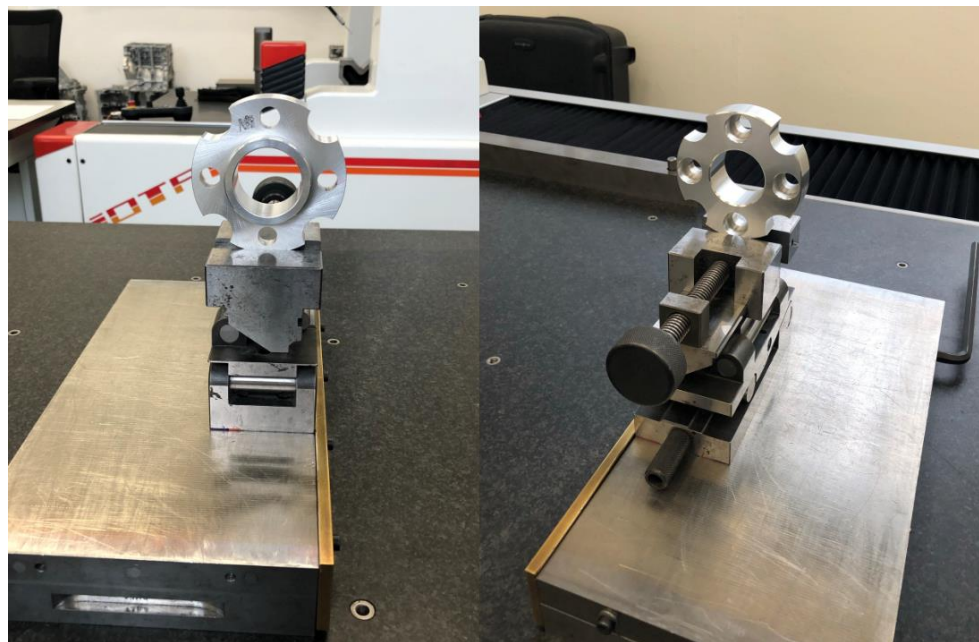
Jelikož bude díl měřen i pomocí aktivní dotykové sondy, je zapotřebí, aby byl kus upnut vždy stejně a rovněž vyrovnání os modelu k osám stroje bylo shodné. Vzhledem k tomu, že vybraný díl je rotační, mohlo by dojít při měření k záměně přiřazených os či upnutí dílu na obou strojích jinak. Z těchto důvodů byla na díl pomocí laseru vypálena



rozlišovací značka, aby byl díl upnut na stoji vždy stejně. Aby i přiřazení os stroje k osám modelu proběhlo vždy shodně, bylo dodrženo pravidlo, že značka na CAD modelu se nachází v kvadrantu  $+X+Y$ .

Při nedodržení těchto podmínek by mohlo dojít k zanesení chyb a nepřesností do měření, které by se projevily při závěrečném porovnání měření. V tom případě by jiné (ne však špatné) přiřazení os modelu k osám stroje mělo za následek porovnání ne sobě odpovídajících děr pro šrouby a vybrání. Toto jiné přiřazení os modelu k osám stroje samozřejmě není chybné, ale vzhledem k povaze práce je nezbytné, aby přiřazení proběhlo tímž způsobem na obou strojích. Stejně jako jiným přiřazením os by se výsledek měření podepsal i na jiném způsobu upnutí. Přípravek by měl být proto upnut stejně na obou strojích, aby měření bylo ovlivněno stejnými vlivy.

Měření bylo proto provedeno znovu při následujícím způsobu upnutí a přiřazení os stroje k osám modelu.



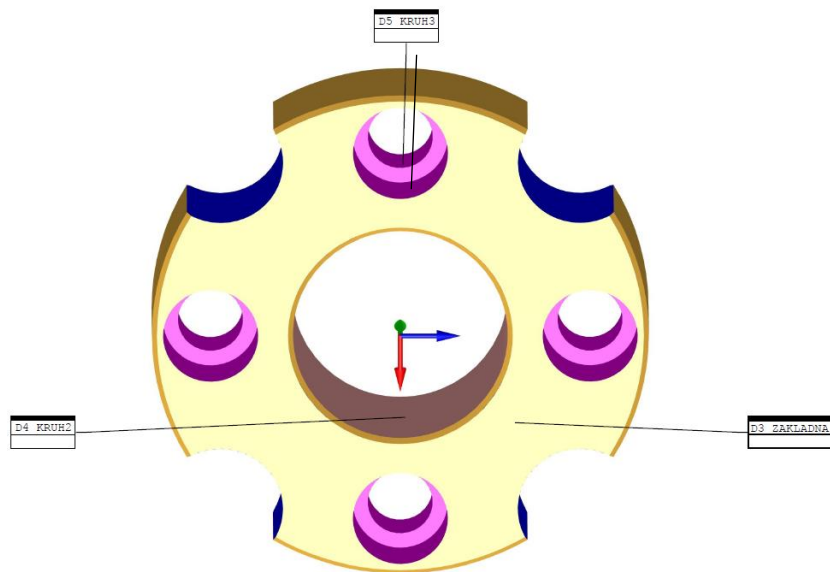
Obrázek 35 - Způsob upnutí pro měření spínací sondou 2

Na obrázku výše je vidět, že byl kus upnut pomocí svěráku, který byl přichycen magnetickou deskou ke stolu stroje. V tomto případě se přiřazení os stroje shodovalo s osami modelu. Kde souřadnicové osy stroje jsou v následující orientaci. Osa X podél stolu, osa Y po jeho šířce a osa Z kolmá na stůl stroje (výška).

Osy stroje	Osy modelu
x	x
y	y
z	z

Tabulka 10 - Přiřazení os stroje k osám modelu 2

Vyrovnaní dílu je zobrazeno na obrázku níže. Způsob vyrovnaní je podobný předešlému příkladu s tím rozdílem, že zde proběhlo vyrovnaní na netolerovaný otvor o nominálním průměru 19 mm.



Obrázek 36 - Vyrovnaní dílu 2

Vzhledem k použití téže sondy a stejného prostředí programu byl postup i způsob měření identický předchozímu případu. Nejen pro lepší přehlednost, ale také i pro ukázkou dalších možností vyhodnocení, byl v tomto případě zvolen tabulkový způsob výstupu. Jeho část je vidět na obrázku níže.

Zkratky v měrovém protokolu odpovídají zkratkám, jejichž vysvětlení je uvedeno v tabulce 5. Z protokolu je na první pohled patrné, zda se měřené rozměry nachází v TP či ne. Kromě vyhodnocení průměrů protokol obsahuje také vyhodnocení polohy k příslušným výchozím plochám. Další listy měrového protokolu nabízejí informace o změřené rovinnosti, popřípadě tvaru.

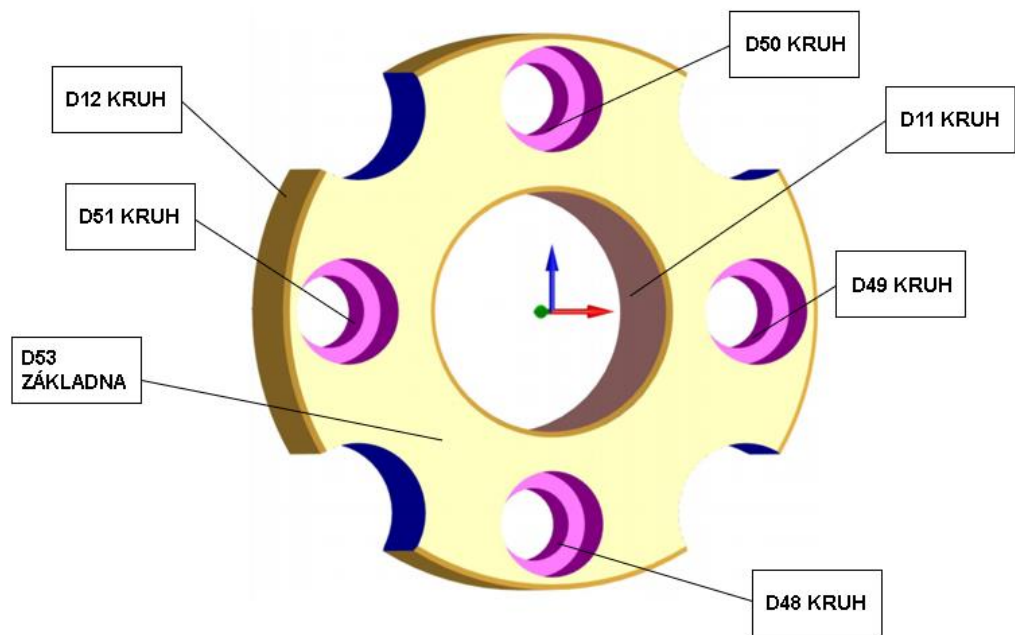
podmis		JMÉNO DÍLU : Sřídící vložka					května 03, 2021	16:13
		ČÍSLO OT :	111111 p.1.1		SÉR ČÍSLO :	POČET STATISTIK : 1		
#	MM	D49 - KRUH14						
OS	MĚŘ	NOMINÁLNÍ	+TOL	-TOL	ODCH	EXTTOL		
X	37.815	38.000	0.200	0.200	-0.185	0.000		
Z	-0.011	0.000	0.200	0.200	-0.011	0.000		
D	13.088	13.000	0.200	0.200	0.088	0.000		
#	MM	D1 - KRUH14						
OS	MĚŘ	NOMINÁLNÍ	+TOL	-TOL	ODCH	EXTTOL	BONUS	
TP	0.370	RFS	0.200		0.370	0.170	0.000	
#	MM	D50 - KRUH15						
OS	MĚŘ	NOMINÁLNÍ	+TOL	-TOL	ODCH	EXTTOL		
X	0.003	0.000	0.200	0.200	0.003	0.000		
Z	37.802	38.000	0.200	0.200	-0.198	0.000		
D	13.228	13.000	0.200	0.200	0.228	0.028		
#	MM	D54 - KRUH15						
OS	MĚŘ	NOMINÁLNÍ	+TOL	-TOL	ODCH	EXTTOL	BONUS	
TP	0.395	RFS	0.200		0.395	0.195	0.000	
#	MM	D51 - KRUH16						
OS	MĚŘ	NOMINÁLNÍ	+TOL	-TOL	ODCH	EXTTOL		
X	-37.833	-38.000	0.200	0.200	0.167	0.000		
Z	-0.018	0.000	0.200	0.200	-0.018	0.000		
D	13.032	13.000	0.200	0.200	0.032	0.000		
#	MM	D53 - KRUH16						
OS	MĚŘ	NOMINÁLNÍ	+TOL	-TOL	ODCH	EXTTOL	BONUS	
TP	0.337	RFS	0.200		0.337	0.137	0.000	
#	MM	D48 - KRUH17						
OS	MĚŘ	NOMINÁLNÍ	+TOL	-TOL	ODCH	EXTTOL		
X	0.030	0.000	0.200	0.200	0.030	0.000		
Z	-37.806	-38.000	0.200	0.200	0.194	0.000		
D	13.230	13.000	0.200	0.200	0.230	0.030		
#	MM	D55 - KRUH17						
OS	MĚŘ	NOMINÁLNÍ	+TOL	-TOL	ODCH	EXTTOL	BONUS	
TP	0.392	RFS	0.200		0.392	0.192	0.000	

Obrázek 37 - Ukázka měrového listu (spínací sonda)

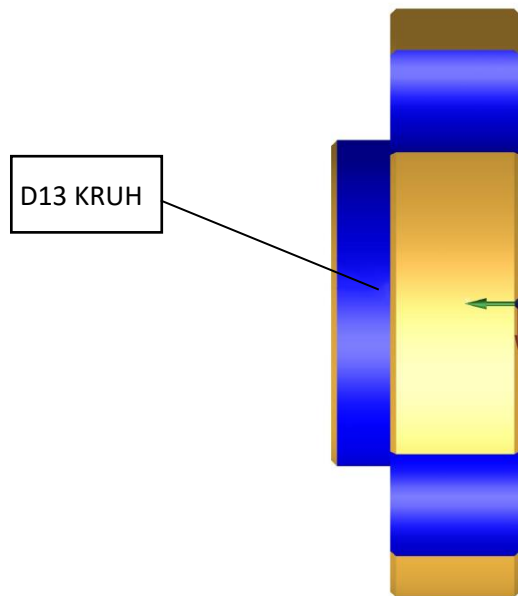
Měrový list zobrazuje souřadnice středů měřených otvorů. Vzhledem k tomu, že všechny snímané body na povrchu každé válcové plochy byly v jedné rovině řezu válce, je souřadnice y konstantní (neměnná), a proto není ve výstupu zobrazena. Všechny sejmuté body se nacházejí v rovině kvadrantu  $\pm X \pm Z$ . Pod souřadnicemi středu se nachází vyhodnocený průměr (D). Poslední část protokolu tvoří vyhodnocení tolerance polohy prvku k základně (v protokolu označeno jako TP). Vzhledem k tomu, že v programu PC DMIS je nutno vykonat toto vyhodnocení jako samostatný úkon, nachází se v oddělené buňce. Tato buňka se ale vždy vztahuje k tabulce nad ní (např. TP D1 KRUH14 se vztahuje k D49 –

KRUH14). Buňka TP znázorňuje velikost měřené hodnoty. Jelikož tolerance polohy prvku je v podstatě válcová plocha, vyhodnocená hodnota musí ležet uvnitř tohoto válcového tolerančního pole (v tomto případě válec, respektive kružnice o průměru 0,2 mm). Tuto situaci znázorňuje malý grafický výstup v rohu každé buňky TP.

Pro lepší orientaci je na obrázcích 38 a 49 zobrazeno pojmenování jednotlivých měřených geometrií, které jsou přichyceny k odpovídajícímu nominálnímu povrchu.



Obrázek 38 - Pojmenování jednotlivých geometrií 1/2



Obrázek 39 - Pojmenování jednotlivých geometrií 2/2

#### 6.1.4 Shrnutí

V rámci tohoto měření bylo provedeno vyhodnocení spínací dotykovou sondou. Daný kus byl změřen spínací dotykovou sondou celkem třikrát. Nejdříve s minimálním počtem datových bodů a posléze 10 až 15 body rozmístěnými po měřené geometrii. Třetí měření probíhalo na téže stroji při jiných podmínkách. Tyto podmínky jsou uvedeny o pár odstavců níže. Následující dva odstavce se věnují prvnímu a druhému typu měření a shrnují tak vliv počtu naměřených bodů na výsledné vyhodnocení. Třetí typ měření je vyložen pod těmito odstavci.

Na každém díle bylo při prvním a druhém měření celkově měřeno 9 geometrií - 2 rovinné a 7 válcových ploch. První měření obsahuje 27 bodů po celé geometrii dílu. Měření druhé obsahuje 10 bodů na každé válcové ploše rozmístěných po obvodu kružnice a 15 bodů na každé rovinné ploše. Celkový počet bodů při tomto měření byl 85. Výsledek porovnání měření byl značně rozličný. Zatímco při měření děr pro šrouby se odchylky jednotlivých měření pohybovaly v rozsahu 1,18 – 3,75 %, při vyhodnocení vnějšího průměru o nominální hodnotě 55 mm se odchylka jednotlivých naměřených hodnot rovnala dokonce 51,58 % TP rozměru. Právě v tomto případě došlo ve výsledném vyhodnocení k jedinému rozporu. V případě měření č. 1 byla naměřená hodnota vně TP, kdežto u měření č. 2 v TP. Pokud však bude uvažován vliv chyby MPEE pro první typ měření, výsledná hodnota se již nachází v TP prvku (viz obr. 31). Ve všech ostatních případech, navzdory větší či menší odchylce obou

měření, se finální vyhodnocení shodovalo. Důležitý vliv při celkovém vyhodnocení má jednak velikost tolerančního pole, tak i zmíněná maximální přípustná chyba MPEE. Tyto dvě složky významně ovlivňují jak celkové porovnání, tak i finální výsledek. Výsledky porovnání z obou měření jsou zaznamenány v tabulce 6, v tabulce 8 a v tabulce 9.

Na základě informací z kapitoly 5 a rovněž výsledků uvedených v odstavci výše bude dále diskutován vliv počtu naměřených bodů na výsledné vyhodnocení. Ačkoliv odchylky jednotlivých měření vyšly v některých případech fatálně odlišné, při celkovém vyhodnocení spolu výsledné hodnoty korespondovaly, což do tvrzení, zda se měření nachází mimo či v tolerančním pásmu prvku. Při zohlednění těchto výsledků by se dalo konstatovat, že počet nasnímaných bodů nemá na výsledné vyhodnocení nijak závratný vliv. V praxi, zejména myšleno při sériové výrobě, se toto stanovisko potvrzuje. Při sériové výrobě je snímáno pouze několik diskrétních bodů, neboť snímání většího počtu bodů by bylo velmi časově náročné. Výjimku tvoří měření složitých tvarových ploch, kde je dostatečný počet datových bodů nezbytnou záležitostí. Dalo by se říci, že měření tvarových ploch se provádí „účelně“. Tím je myšleno, že jsou měřena technologicky významná místa. Právě v okolí těchto míst je zhuštěná koncentrace snímaných bodů.

Poslední měření spínací dotykovou sondou bylo provedeno z důvodů následného porovnání s měřicí dotykovou sondou. Podstatný rozdíl oproti výše uvedenému měření je ve způsobu upnutí, přiřazení os stroje k osám modelu a počtu nasnímaných bodů. Přiřazení os a způsob upnutí musí být v případě porovnání měření spínací a aktivní dotykové sondy shodné, aby došlo k zamezení vnesení nejistot a chyb do měření, které by mohly ovlivnit celkové porovnání. Celkový počet nasnímaných bodů při tomto měření byl 46 bodů. 4 body v jedné rovině na každé válcové ploše a 3 náhodné body na každé ploše rovinné a na každém vybrání. V případě vybrání měl každý bod stejnou vzdálenost od „vrchní“ roviny (rovina označena ustavovací značkou – logo ČVUT). O tomto měření a vyhodnocení bude více hovořeno v kapitole 6. 3.

Co se týče samotného měření, byla jsem velmi překvapena. Měření na SMS není vůbec lehkou záležitostí. Na vytvoření programu je zapotřebí zkušeného operátora, který umí pracovat v daném prostředí. Při tomto měření byl použit program PC DMIS, který z mého pohledu není zcela uživatelsky přívětivý. Zejména co se týče tvorby samotných měrových protokolů, má program velké rezervy. V rámci práce se zmíněným softwarovým prostředím zde byly ukázány dva možné výstupy vyhodnocení, které program nabízí. Jeden grafický a druhý tabulkový.

Využití spínací sondy v sériové výrobě je velké. Používají se pro měření zápustek, forem, ustavovacích přípravků, elektrod apod. Lze je využít jak pro měření jednoduchých geometrických ploch, tak i na měření složitých tvarů.

## 6.2 Měření pomocí měřící dotykové sondy

Následující část bude pojednávat o měření s aktivní dotykovou hlavou. Celé měření probíhalo na stroji Prismo Navigator se specifikací MPEE ( $0,9 + L/350$ )  $\mu\text{m}$ . Vše od firmy Zeiss. Obdobně jako u měření spínací dotykovou sondou byl kus měřen při teplotě 21 °C. Celkový počet nasnímaných bodů byl ponechán dle defaultního nastavení. S jistotou lze ale konstatovat, že byl několikanásobně větší než v případě měření se spínací dotykovou sondou.



Obrázek 40 - Použitá měřící sonda

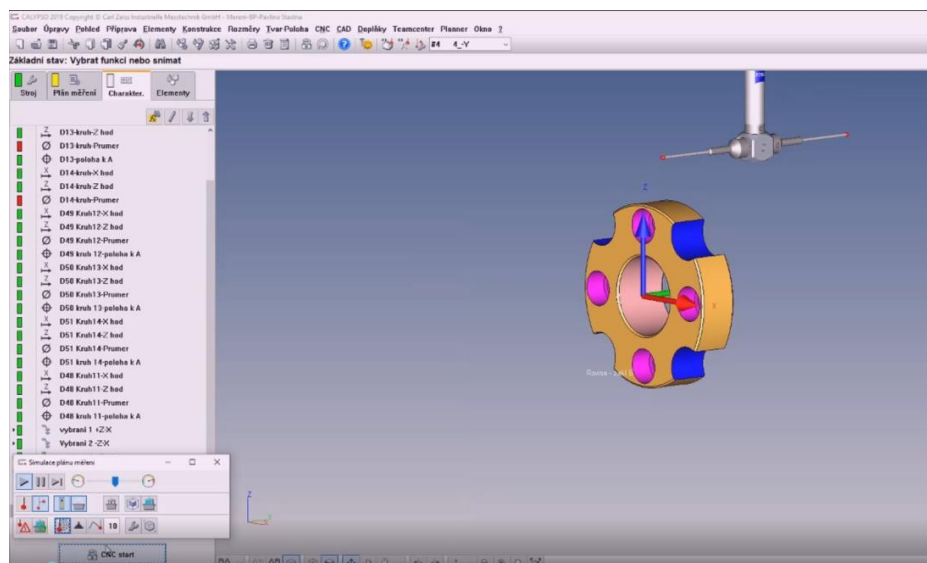
I toto měření proběhlo celkem třikrát a výsledné hodnoty uvedené v tabulkách pro porovnání vznikly aritmetickým průměrem všech třech měření. Jednotlivé výsledky měření byly opět velmi totožné. Proto bylo vybráno jedno měření ze série a na něm demonstrován způsob vyhodnocení.

### 6.2.1 Postup měření

Postup měření je opět vesměs shodný s postupem, který byl vyložen v teoretické části. Rovněž je podobný postupu při měření pomocí spínací dotykové sondy. Výklad

postupu proto bude poněkud stručnější, aby nedocházelo k zbytečnému opakování. Případné rozdíly v postupu budou v průběhu výkladu zmíněny.

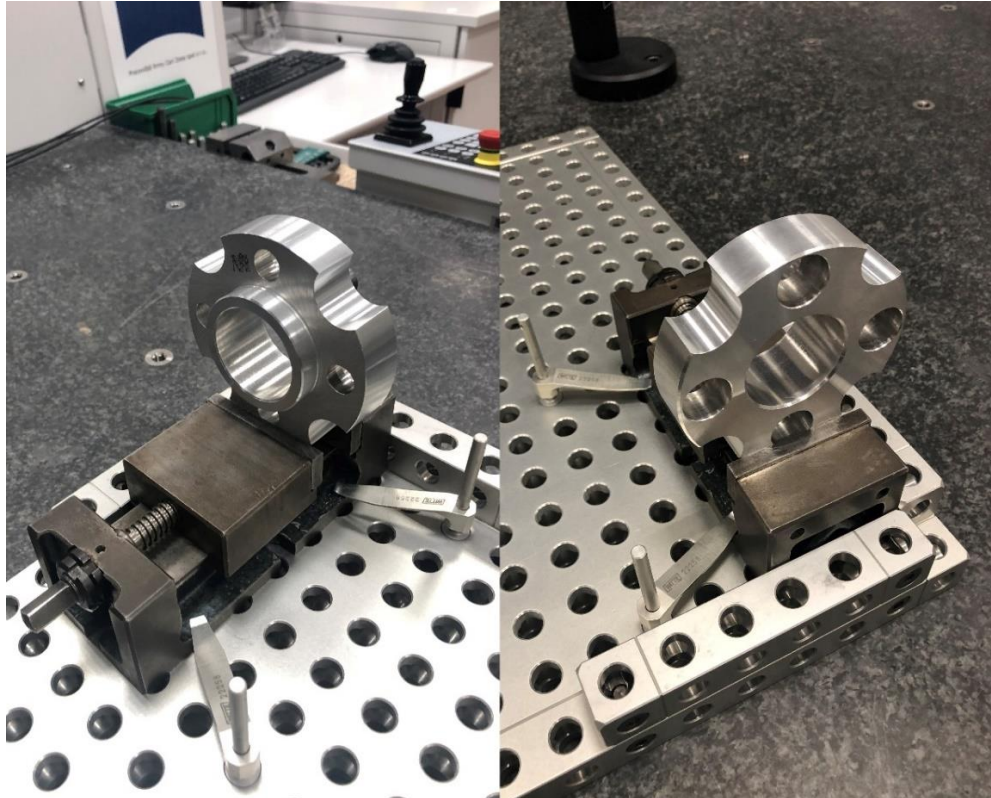
Stejně jako u předchozího měření i toto měření vycházelo z CAD dat, která byla na začátku měření extrahována do počítače. V systému Calypso (2019) byl vytvořen program pro skenování jednotlivých geometrických tvarů. Jako další následovala kalibrace dotykového čidla – kuličky, ustavení kusu do pojezdu stroje a jeho následné vyrovnaní a přiřazení os stroje k osám modelu.



Obrázek 41 - Ukázka softwarového prostředí Calypso

Způsob upnutí měřeného kusu při měření skenovací hlavou je vidět na obrázku níže. Je obdobný způsobu upnutí při předchozím měření, rozdíl je v použití „děrované“ spodní desky namísto magnetu.





Obrázek 42 - Způsob upnutí pro měření skenovací sondou

Přiřazení os stroje k osám modelu je vidět v tabulce níže. Zde je třeba zdůraznit, že osy CMM spínací dotykové sondy se neshodují s CMM se sodnou měřicí. Osa Z je v obou případech stejná, dochází ale k pootočení kvadrantu XY o 90 stupňů proti směru hodinových ručiček. Zatímco v prvním případě byla osa X podél stolu CMM, v tomto případě je to přesně naopak. Osa Y je podél stolu CMM a osa X po jeho šířce. Důvod je ten, že souřadnicové stroje nejsou od stejného výrobce. Právě výrobce daného souřadnicového stroje si volí orientaci os.

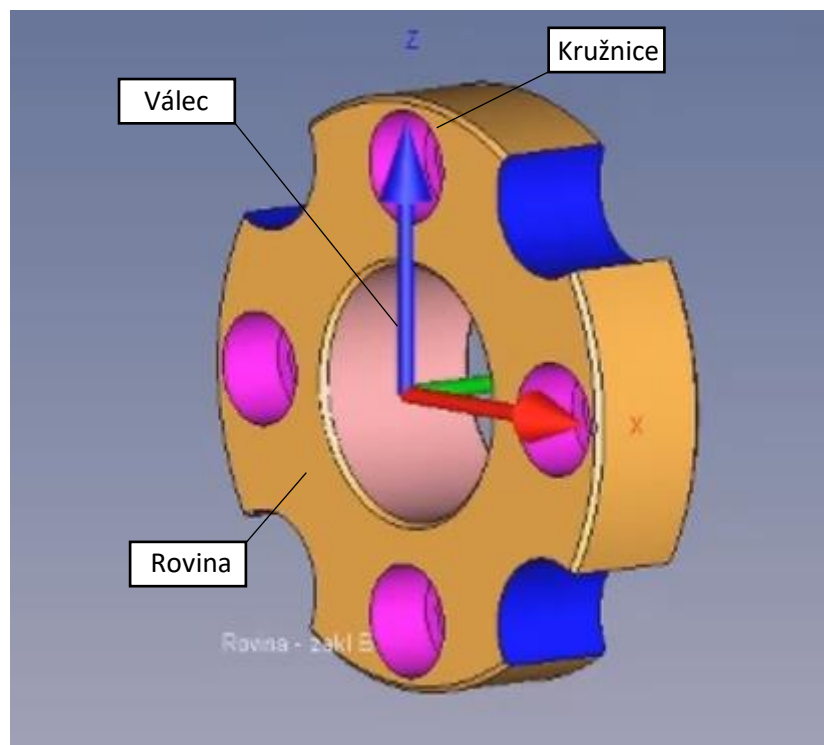
Osy stroje	Osy modelu
x	x
y	y
z	z

Tabulka 11 - Přiřazení os stroje k osám modelu 3

Obdobně jako při měření spínací sondou je důležité nezapomenout na přidání tzv. pozičních bodů. V tomto případě se však nedefinují jednotlivé body, nýbrž tzv. obalový kvádr. Jedná se o maximální možný kvádr odskoku od dílu, aby při přechodu mezi jednotlivými plochami měření nedošlo ke kolizi sondy s dílem. V programu rovněž muselo

být zamezeno měření spodní části kusu, jelikož právě tato část je uchycena do svěráku. Mohlo by tedy dojít ke kolizi mezi sondou a svěrákem.

Zatímco v případě měření spínací dotykovou sondou vyrovnání probíhalo ke tvarům rovina, kružnice a kružnice (viz obrázek 36), v tomto případě vyrovnání probíhalo na geometrické prvky rovina, kružnice a válec. Při použití programu Calypso musí proběhnout vyrovnání vždy na jeden prostorový prvek. V tomto případě byl tímto prostorovým prvkem válec, který byl vytvořen z otvoru 43H7.



Obrázek 43 - Vyrovnání dílu 3

### 6.2.2 Vyhodnocení měření

Při použití aktivní sondovací hlavy v kombinaci s uživatelsky přívětivým prostředím programu Calypso se nabízí hned několik druhů vyhodnocení. Díky velkému počtu naměřených bodů se vedle klasického tabulkového protokolu, jehož část je vidět na obr. 44, nabízí i vyhodnocení grafické s detailním zobrazením trajektorie pohybu dotykové kuličky.

Na obrázku níže je vidět část měrového protokolu. Pojmenování jednotlivých měřených geometrií se shoduje s označením z obrázků 38 a 39. Z obrázku je na první pohled patrné, které hodnoty se pohybují mimo TP, a které nikoliv, popřípadě o jakou hodnotu toleranci překračují.

	Název	Naměřená hodnota	Minimální hodnota	+Tol	-Tol	Odchyška +/-	
X	D12-kruh-X hod	0.0112	0.0000	0.0200	-0.0200	0.0112	
Z	D12-kruh-Z hod	0.0052	0.0000	0.0500	-0.0500	0.0052	
Ø	D12-kruh-Prumer	99.4626	99.5000	0.0000	-0.0220	-0.0374	-0.0154
X	D11-kruh-X hod	0.0002	0.0000	0.0200	-0.0200	0.0002	
Z	D11-kruh-Z hod	0.0008	0.0000	0.0200	-0.0200	0.0008	
Ø	D11-kruh-Prumer	43.0022	43.0000	0.0250	0.0000	0.0022	
X	D13-kruh-X hod	0.0120	0.0000	0.0200	-0.0200	0.0120	
Z	D13-kruh-Z hod	0.0061	0.0000	0.0200	-0.0200	0.0061	
Ø	D13-kruh-Prumer	55.0113	55.0000	0.0210	0.0020	0.0113	
⊕	D13-poloha k A	0.0269	0.0000	0.2000	0.0000	0.0269	
X	D14-kruh-X hod	0.0001	0.0000	0.0200	-0.0200	0.0001	
Z	D14-kruh-Z hod	0.0005	0.0000	0.0200	-0.0200	0.0005	
Ø	D14-kruh-Prumer	43.0021	43.0000	0.0250	0.0000	0.0021	
X	D49 Kruh14-X hod	37.8308	38.0000	0.2000	-0.2000	-0.1692	
Z	D49 Kruh14-Z hod	-0.0063	0.0000	0.2000	-0.2000	-0.0063	
Ø	D49 Kruh14-Prumer	13.1564	13.0000	0.2000	-0.2000	0.1564	
⊕	D49 kruh 12-poloha k A	0.3384	0.0000	0.2000	0.0000	0.3384	0.1384
X	D50 Kruh15-X hod	0.0034	0.0000	0.2000	-0.2000	0.0034	
Z	D50 Kruh15-Z hod	37.8026	38.0000	0.2000	-0.2000	-0.1974	
Ø	D50 Kruh15-Prumer	13.2259	13.0000	0.1000	-0.1000	0.2259	0.1259
⊕	D50 kruh 15-poloha k A	0.3947	0.0000	0.2000	0.0000	0.3947	0.1947
X	D51 Kruh16-X hod	-37.8347	-38.0000	0.2000	-0.2000	0.1653	
Z	D51 Kruh16-Z hod	-0.0165	0.0000	0.0500	-0.0500	-0.0165	
Ø	D51 Kruh16-Prumer	13.0334	13.0000	0.1000	-0.1000	0.0334	

Obrázek 44 - Ukázka měrového protokolu

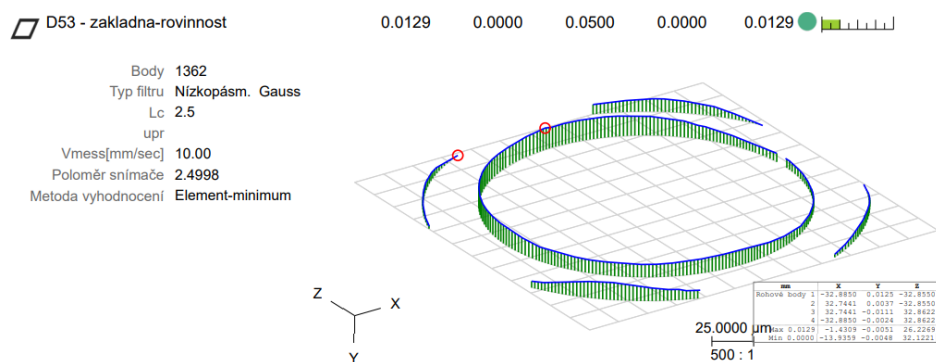
Vyhodnocení měřených geometrií (zejména průměrů) lze pozorovat na obrázku 44. Další výklad bude zaměřen na vyhodnocení geometrií, které jsou nějakým způsobem zajímavé a lze na nich vyhodnotit i jiné geometrické specifikace, popřípadě provést grafické vyhodnocení.

Prvním takovým případem je měření prvku označeného jako D53 ZÁKLADNA. Jedná se o měření roviny, ze které byla následně vyhodnocena rovinnost. Z obrázku 45 je vidno hned několik důležitých informací.

Na měřené rovině bylo naskenováno celkem 1362 bodů. Pro vyhodnocení byl použit algoritmus „Element minimum“, který v této práci odpovídá přizpůsobení pomocí minimální celkové vzdálenosti („*minimum total distance fit*“), viz strana 32. Rovina byla měřena ve dvou úrovních. První úroveň odpovídá celistvé kružnici. Druhá úroveň je tvořena částmi kružnice. Chybějící části kružnice reprezentují otvory pro šrouby na měřené ploše, které pochopitelně nemůžou být měřeny. Na obrázku jsou mimo jiné vidět i krajní body

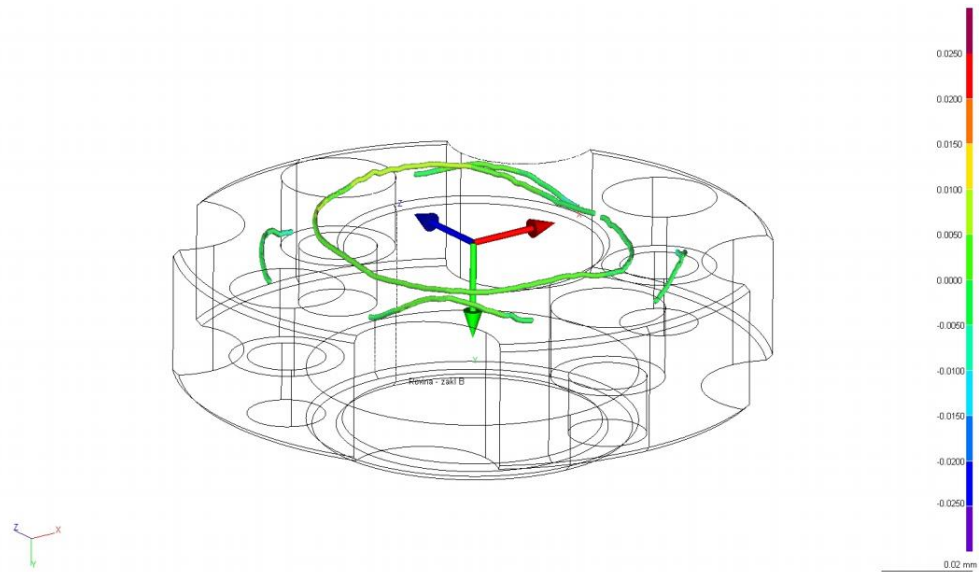
měření znázorněné červeným ohraničením. Tedy body, které mají od nominálního povrchu největší a nejmenší vzdálenost (v absolutní hodnotě). Jednotlivými nasnímanými body jsou proloženy kolmice k nominálnímu povrchu na obrázku znázorněné jako zelené čáry. Všechny naměřené body jsou spojeny kontinuální křivkou (modře zakresleno) a vytváří tak detailní popis o měřeném povrchu.

Toleranční pole rovinnosti je vymezeno dvěma vzájemně rovnoběžnými rovinami, které jsou v tomto případě od sebe vzdáleny o hodnotu 0,05 mm. Aby byla podmínka rovinnost splněna, všechny naměřené body musí ležet uvnitř prostoru vymezeného těmito rovinami. Při tomto měření je požadavek pro rovinnost splněn.



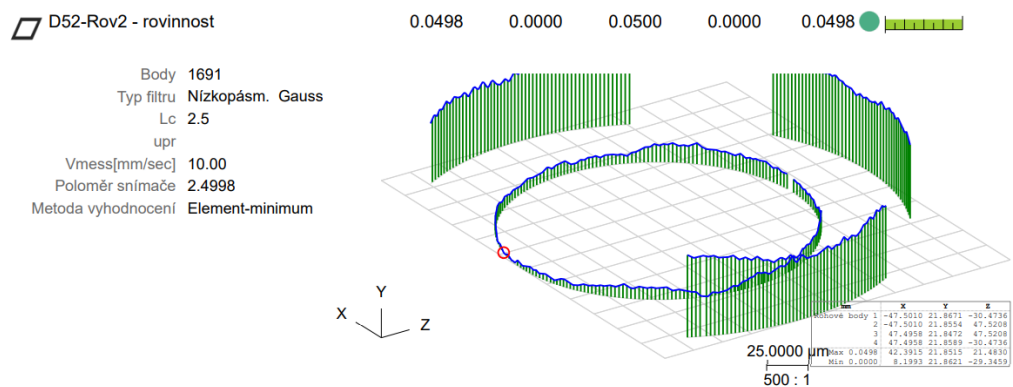
Obrázek 45 - Grafické vyhodnocení rovinnosti 1

Následující obrázek vykresluje měření těžce plochy. Jediný rozdíl mezi obrázky je ve zvoleném způsobu vyhodnocení. Obrázek zobrazuje křivku složenou z naskenovaných bodů „přichycených“ přímo na „drátěný povrch“ součásti. Velkou výhodou tohoto zobrazení je barevná vizualizace, která poskytuje přehledný výstup měření. Oproti zobrazení výše zde nejsou vyznačeny minimální a maximální hodnoty naměřených bodů.



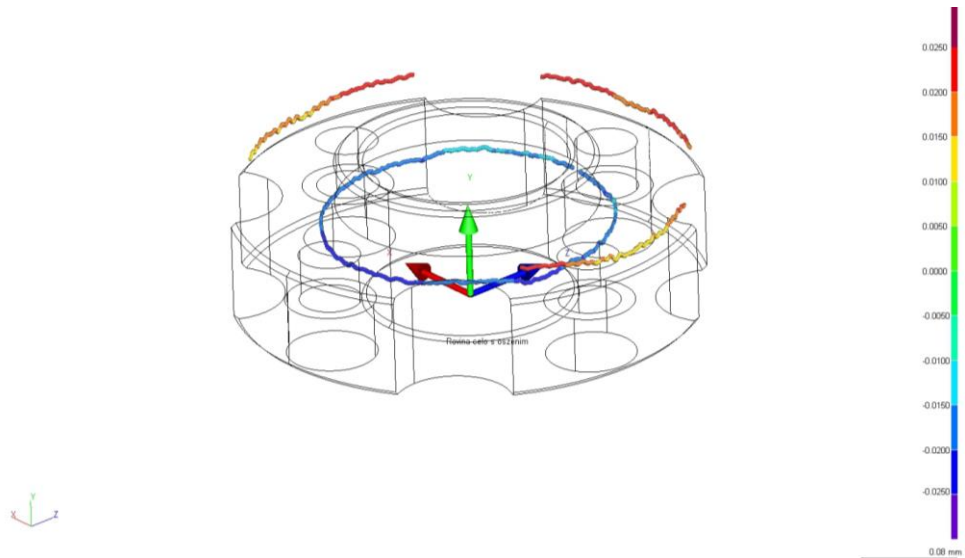
Obrázek 46 - Grafické vyhodnocení rovinnosti 2

Další plochou vybranou k vyhodnocení je plocha označená jako D52 ROV 2. Způsob vyhodnocení je totožný obrázkům 45 a 46. Při pohledu na obrázek 47 výsledná naměřená geometrie připomíná tvar misky, tj. je propadlá směrem dovnitř. Stejně jako na obrázku výše je celé zobrazení zvětšeno 500:1, tudíž při pohledu na kus by toto prohnutí nebylo možné zaznamenat. Dále je na obrázku také vidět chybějící datová sada bodů ve spodní části. Právě tato část dílu byla uchycena do svěráku, a proto zde body chybí. Celkový počet nasnímaných bodů je roven 1691 a podobně jako při měření plochy výše byla pro vyhodnocení rovinnosti použita metoda minimální celkové vzdálenosti.



Obrázek 47 - Grafické vyhodnocení rovinnosti 3

Obrázek 48 vyobrazuje „drátěný model“ a na něm přichycenou křivku, která odpovídá naměřenému povrchu v daných místech. I na tomto vykreslení je vidět prohnutí plochy směrem dovnitř.



Obrázek 48 - Grafické vyhodnocení rovinnosti 4

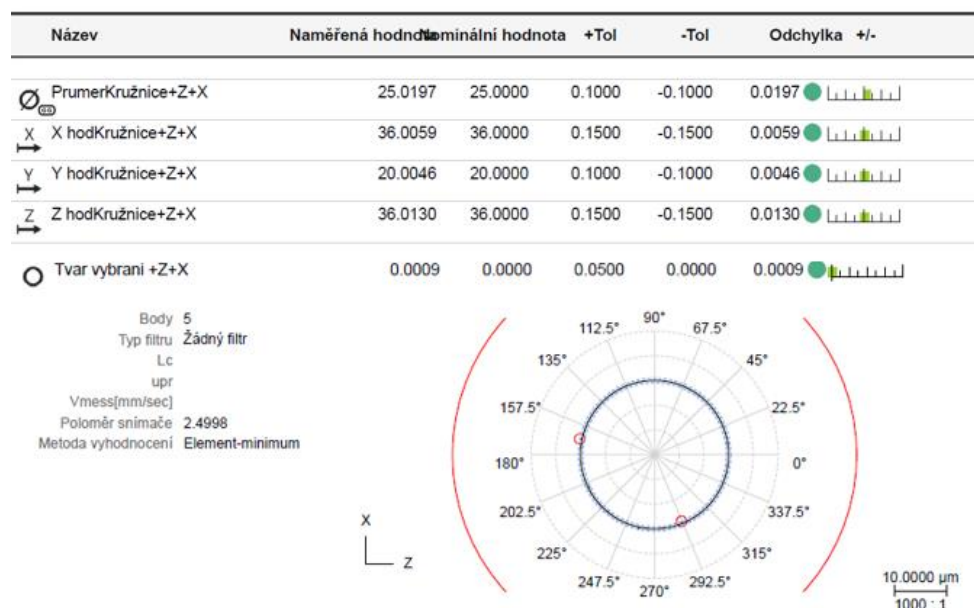
Další prvek vybraný pro vyhodnocení je vybrání tvaru kružnice. Vzhledem k tomu, že geometrie všech vybrání je stejná, bude vyhodnocení všech vybrání demonstrováno na následujícím příkladu. Vybrané vybrání se nachází v kvadrantu +X +Z. Na vybrání bylo nejdříve sejmuto 5 bodů, které odpovídaly bodům naměřených při měření spínací dotykovou sondou. Následně byl celý tvar projet kontinuálně. Vyhodnocení jednotlivých bodů vybrání zobrazuje obrázek níže. Na něm je vidět, že všechny naměřené body se pohybují ve stanovené toleranci.



Název	Naměřená hodnota	Minimální hodnota	+Tol	-Tol	Odchylka +/-
<b>vybrání 3 +Z+X</b>					
X hodD24-bod12	24.4124	24.3930	0.1000	-0.1000	0.0194
Y hodD24-bod12	20.0000	20.0000	0.1000	-0.1000	0.0000
Z hodD24-bod12	40.7121	40.7200	0.1500	-0.1500	-0.0079
X hodD43-bod31	23.7699	23.7620	0.1000	-0.1000	0.0079
Y hodD43-bod31	20.0000	20.0000	0.1000	-0.1000	0.0000
Z hodD43-bod31	33.4067	33.4050	0.1500	-0.1500	0.0017
X hodD25-bod13	26.2968	26.2960	0.1000	-0.1000	0.0008
Y hodD25-bod13	20.0000	20.0000	0.1000	-0.1000	0.0000
Z hodD25-bod13	28.1246	28.1240	0.1000	-0.1000	0.0006
X hodD26-bod14	38.5676	38.5630	0.1500	-0.1500	0.0046
Y hodD26-bod14	20.0000	20.0000	0.1000	-0.1000	0.0000
Z hodD26-bod14	23.7680	23.7900	0.1000	-0.1000	-0.0220
X hodD42-bod30	30.4778	30.4870	0.1500	-0.1500	-0.0092
Y hodD42-bod30	20.0000	20.0000	0.1000	-0.1000	0.0000
Z hodD42-bod30	24.7913	24.8100	0.1000	-0.1000	-0.0187

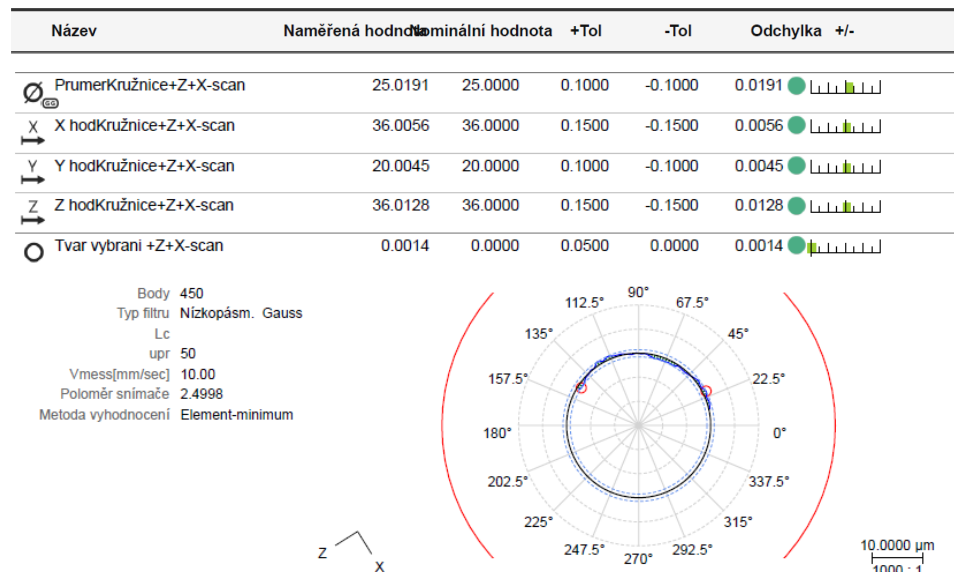
Obrázek 49 - Vyhodnocení vybrání v rovině XZ

Na obrázku 50 je zachyceno vyhodnocení vybrání pomocí 5 nasnímaných bodů. Na obrázku rovněž můžeme vidět body, které jsou od dané geometrie nejbližší a nejdále. Z naměřených bodů byl posléze vyhodnocen průměr kružnice pomocí metody minimální celkové vzdálenosti. Jak všechny naměřené body, tak i výsledný vyhodnocený průměr se nacházejí v dané toleranci.



Obrázek 50 - Vyhodnocení vybrání - body 1

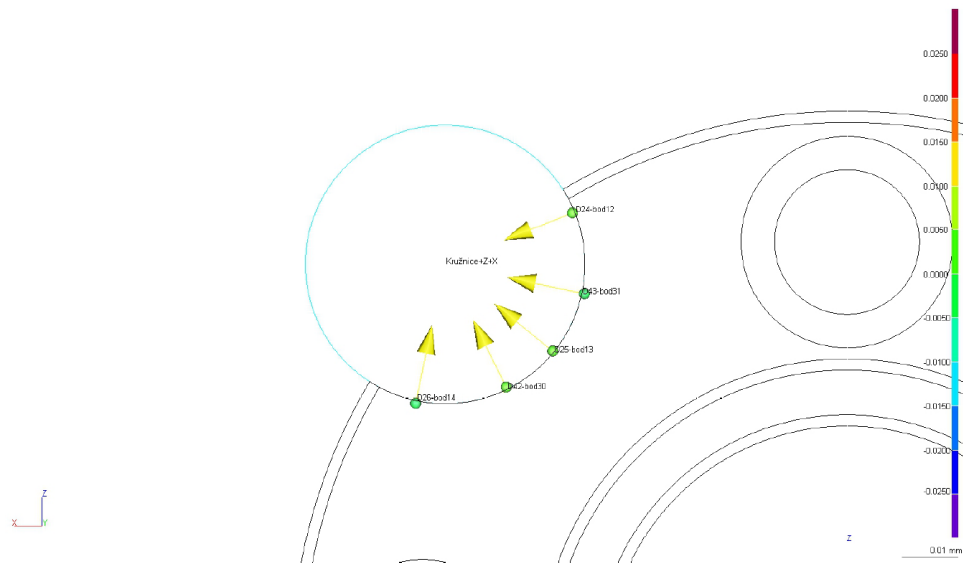
Obrázek níže zobrazuje tutéž situaci jako obrázek 50 s tím rozdílem, že v tomto případě byl tvar měřen kontinuálně, nikoliv bodově. Celkový počet nasnímaných bodů byl 450. Rovněž jako v předchozím příkladu i zde mohou být na obrázku níže pozorovány extrémní hodnoty bodů. Navíc je na obrázku zobrazena křivka pohybu sondy podél tvaru, která je vykreslena modrou barvou. Při detailním pohledu na oba vyhodnocené průměry je vidět, že vyšly téměř totožné.



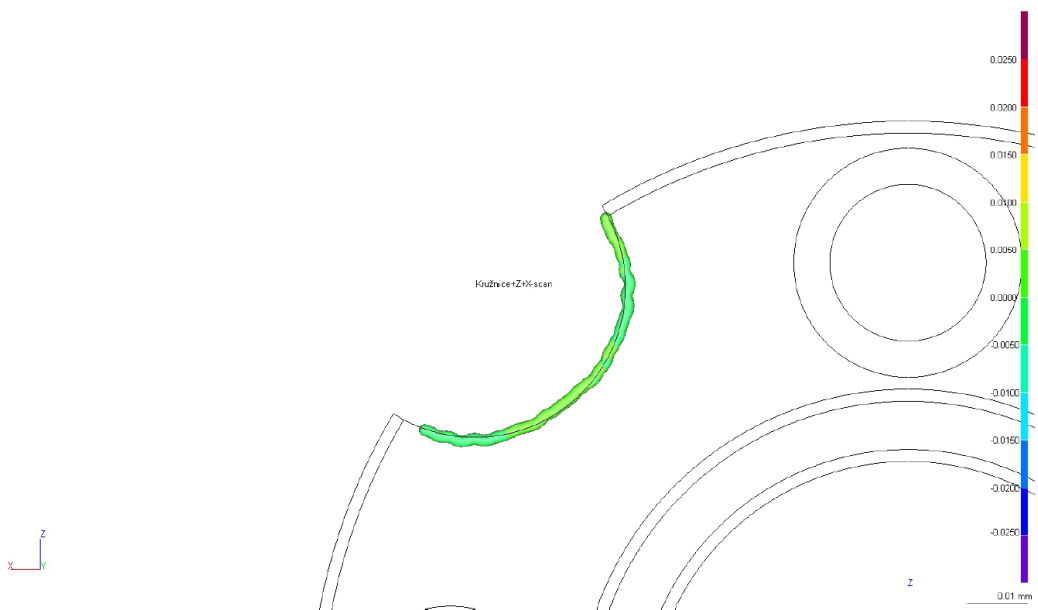
Obrázek 51 - Vyhodnocení vybrání - scan 1

Další dva obrázky ilustrují grafické vyhodnocení diskutovaného vybrání. První obrázek 52 se týká pouze pěti sejmutých bodů. Obrázek 53 zobrazuje scan daného tvaru. Zejména na tomto obrázku je dobře vidět, že vybrání je vyrobeno velmi přesně a pohybuje se v dané toleranci. I zde je barevná vizualizace nespornou výhodou a tvoří tak jasný a přehledný výstup.





Obrázek 52 - Vyhodnocení vybrání - body 2



Obrázek 53 - Vyhodnocení vybrání - scan 2

### 6.2.3 Shrnutí

Celá kapitola 6.2 se týkala měření se skenovací dotykovou sondou. Vybraný kus (viz obrázek 22 a 23) byl měřen na stroji Prismo Navigator a vyhodnocen v programu Calypso, vše od firmy Zeiss. Na zadaném dílu byly měřeny různé specifikace. Pro vyhodnocení byly použity rozličné druhy výstupů, ať klasický tabulkový protokol nebo grafické výstupy. Způsoby vyhodnocení jednotlivých geometrií byly opravdu rozmanité. Z mého pohledu nejvíce vyhovoval grafický výstup, kde byl vyobrazen „drátěný model“ a k danému povrchu

byla přímo „přichycena“ měřená křivka. Tato křivka byla zároveň barevně vykreslena, takže na první pohled bylo patrné, zda je měřená geometrie v TP či nikoliv.

Samotné měření a práce se softwarem Calypso byla velmi příjemná. Celému měření napomáhá i uživatelsky přívětivý program Calypso, se kterým alespoň dle mého názoru velmi dobře pracuje. Další nespornou výhodou celého měření je možnost vyhodnocení různými způsoby. Uživatel si tak může vybrat typ vyhodnocení, který právě jemu vyhovuje nejlépe. Možnost výběru vyhodnocení je z velké části podmíněna použitím skenovací dotykové sondy, jelikož je k dispozici mnohem více informací o měřeném povrchu. V porovnání s počítačovým softwarem, který byl použit při měření spínací sondou, je program Calypso mnohem lépe uspořádán a stává se tak mnohem více intuitivním.

Stejně jako spínací dotykové sondy i měřicí aktivní sondy jsou nedílnou součástí průmyslové a sériové výroby. Zejména se jedná o měření dílů s vysokou přesností (pod 1 setinu mm) a složité tvarové plochy. Používají se k měření komponentů motorů a převodovek, ozubení, v leteckém průmyslu (turbínové lopatky), apod. Díky neustálému kontaktu s povrchem obrobku nabízejí detailní popis měřeného povrchu, což je velkou výhodou při měření zmíněných tvarových ploch a také při tvorbě samotných měrových protokolů.

### **6.3 Porovnání měření spínací a měřicí dotykové sondy**

V této části práce budou porovnány především numerické výsledky z obou provedených měření. Jelikož porovnání výsledků dvou způsobů měření je celkem komplikovaná záležitost, byl při porovnání zvolen následující způsob. Aritmetický průměr hodnot z měření spínací a skenovací dotykovou sondou byl zanesen do tabulek. Z těchto tabulek je vidět, o jakou hodnotu se jednotlivá měření liší. Pro lepší orientaci byly vybrány některé geometrie a jejich odchylky vztaženy k velikosti tolerančního pásma prvku a převedeny do procentuální sféry. Z těchto tabulek by mělo být na první pohled jasné, jak „velká“ je daná odchylka vztažená k tolerančnímu poli konkrétního prvku. V neposlední řadě byla k těmto vybraným prvkům spočítána chyba MPEE, která rovněž ovlivňuje výsledky měření. Závěr této kapitoly tedy tvoří změřené hodnoty (tj. jejich aritmetický průměr) a příslušná hodnota chyby MPEE.

				Spínací dotyková sonda			Měřicí dotyková sonda		
	NM	+T	-T	MR	OD	ET	MR	OD	ET
D11	43	0,025	0	43,0225	0,0225	0	43,0021	0,0021	0
D13	55	0,021	0,002	55,019	0,019	0	55,0113	0,0113	0
D12	99,5	0	0,022	99,4657	-0,0343	-0,0123	99,4625	-0,0375	-0,0155

Tabulka 12 - Porovnání měření D11-D13

				Spínací dotyková sonda			Měřicí dotyková sonda		
	NM	+T	-T	MR	OD	ET	MR	OD	ET
D48	13	0,2	-0,2	13,2287	0,2287	0,0287	13,2237	0,2237	0,0237
D49				13,0897	0,0897	0	13,1566	0,1566	0
D50				13,2277	0,2277	0,0277	13,226	0,226	0,026
D51				13,0317	0,0317	0	13,0335	0,0335	0

Tabulka 13 - Porovnání měření D48-D51

				Spínací dotyková sonda			Měřicí dotyková sonda		
	NM	+T	-T	MR	OD	ET	MR	OD	ET
D13 pol.	0	0,02	0	0,0257	0,0257	0,0057	0,0268	0,0268	0,0068
D48 pol.	0	0,2	0	0,392	0,392	0,192	0,3967	0,3967	0,1967
D49 pol.				0,368	0,368	0,168	0,3384	0,3384	0,1384
D50 pol.				0,392	0,392	0,192	0,3947	0,3947	0,1947
D51 pol.				0,335	0,335	0,135	0,3308	0,3308	0,1308

Tabulka 14 - Porovnání vyhodnocení tolerance polohy díry pro šrouby

	Spínací dotyková sonda	Měřicí dotyková sonda - body	Měřicí dotyková sonda - scan
	MR	MR	MR
X	35,999	36,006	36,006
Y	20	20	20
Z	35,991	36,013	36,013
D	25,0190	25,0198	25,0190

Tabulka 15 - Porovnání vyhodnocení vybrání +Z-X

				Spínací dotyková sonda			Měřicí dotyková sonda		
	NM	+T	-T	MR	OD	ET	MR	OD	ET
D52	0	0,05	0	0,0033	0,0033	0	0,0497	0,0498	0
D52 Y	22	0,2	-0,2	21,8647	-0,1353	0	21,8506	-0,1492	0
D53 rov.	0	0,05	0	0,0047	0,0047	0	0,0129	0,0129	0

Tabulka 16 - Porovnání vyhodnocení rovnoběžnosti a vzdálenosti

I při tomto vyhodnocování narážíme na problém, jak je daná hodnota „velkou“ či „malou“ odchylkou. Pro lepší názornost byly některé odchylky měření převedeny do

procentuálních hodnot a vztaženy na velikost tolerančního pole (modře podbarvená pole tabulky).

				Spínací sonda	Měřicí sonda	Odchylka MR1 a MR2 (v absolutní hodnotě) [mm]	Procentuální odchylka měření vztažená k TP [%]
	NM	+T	-T	MR1 [mm]	MR2 [mm]		
D11	43	0,021	0	43,0225	43,0021	0,0204	81,60
D13	55	0,021	0,002	55,019	55,0113	0,01	40,53
D12	99,5	0	0,022	99,4657	99,4625	0,0032	14,55
D48	13	0,2	-0,2	13,2287	13,2237	0,005	1,25
D49				13,0897	13,1566	0,0669	16,72
D50				13,2277	13,226	0,0017	0,42
D51				13,0317	13,0335	0,0018	0,45
D13 pol.	0	0,02	0	0,0257	0,0268	0,0011	5,5
D48 pol.	0	0,2	0	0,392	0,3967	0,0047	2,35
D49 pol.				0,368	0,3384	0,0296	14,8
D50 pol.				0,392	0,3947	0,0027	1,35
D51 pol.				0,335	0,3308	0,0042	2,1
D52 Y	22	0,2	-0,2	21,8647	21,8506	0,0141	3,525
D53 rov.	0	0,05	0	0,0047	0,0129	0,0081	16,2

Tabulka 17 - Procentuální odchylka měření spínací a skenovací dotykové sondy

Pokud by byly srovnány konkrétní hodnoty jednotlivých měření, vyplývá z toho celkem rozporuplný výsledek. Zatímco nejmenší odchylka měření se pohybuje v rámci necelého půl procenta, ta největší dokonce přesáhla 80 %. Jmenovitě se jedná o hodnotu v řádech setin milimetru. Další větší odchylka měření nastala při vyhodnocení průměru o nominální hodnotě 55 mm. Zde odchylka obou měření dosáhla přibližně 40 %. Jmenovitá hodnota této odchylky je rovna setině milimetru. Hodnoty odchylek měření u zbylých geometrií se pohybují v řádech setin až tisícín milimetru. V procentuálním měřítku se jedná o rozmezí 0,42 – 16,72 %.

Výsledky měření rovněž ovlivňuje chyba MPEE, která je u každého stroje jiná. V případě stroje s měřicí dotykovou sondou je MPEE  $(0,9 + L/350) \mu\text{m}$ . U druhé sondy je MPEE rovno  $(1,4 + L/333) \mu\text{m}$ . Je zřejmé, že specifikace jsou rozdílné. Maximální povolená chyba obou CMM na jednotku délky pro konkrétní geometrii je v tabulce níže (modře podbarvená pole).

		Spínací dotyková Sonda MPEE = 1,4+L/333		Aktivní dotyková sonda MPEE = 0,9 + L/350	
	[mm]	MPEE [ $\mu$ m]	MPEE [mm]	MPEE [ $\mu$ m]	MPEE [mm]
D11	43	1,5291	0,0015	1,0229	0,0010
D13	55	1,5652	0,0016	1,0571	0,0011
D12	99,5	1,6988	0,0017	1,1843	0,0012
D48	13	1,4390	0,0014	0,9371	0,0009
D49					
D50					
D51					
D52	22	1,4661	0,0015	0,9629	0,0010

Tabulka 18 - Hodnoty MPEE k některým měřeným povrchům

Z tabulky výše je vidět, že stroj s aktivní dotykovou hlavou vykazuje menší chybu MPEE, a tudíž větší přesnost. Za předpokladu uvažování maximální přípustné chyby k dané hodnotě dostáváme finální velikost měřené geometrie pro oba typy stroje. Závěrečná tabulka zobrazuje aritmetický průměr tří po sobě jdoucích měření některých geometrických prvků. Rovněž obsahuje maximální přípustnou chybu stroje, která byla vypočtena pro konkrétní měřenou geometrii.

	Spínací dotyková Sonda		Aktivní dotyková sonda	
	MR [mm]	MPEE [mm]	MR [mm]	MPEE [mm]
D11	43,0225	$\pm 0,0015$	43,0021	$\pm 0,0010$
D13	55,0213	$\pm 0,0016$	55,0113	$\pm 0,0011$
D12	99,4657	$\pm 0,0017$	99,4625	$\pm 0,0012$
D48	13,2287	$\pm 0,0014$	13,2237	$\pm 0,0009$
D49	13,0897		13,1566	
D50	13,2277		13,226	
D51	13,0317		13,0335	

Tabulka 19 - Hodnoty z měření pomocí spínací a dotykové sondy s chybou MPEE

Tato kapitola porovnává zejména numerické výsledky z obou měření. Počítá jak s přesnými numerickými hodnotami, tak i s hodnotami procentuálními, jenž byly vztaženy na velikost TP prvku. Zda jsou odchylky jednotlivých měření „velké“ či „malé“ nelze jednoduše soudit. Toto rozdělovací hledisko je podmíněno mnoha faktory, nejčastěji je však závislé na tom, s jakou přesností chceme měřit. Velkou roli rovněž hraje, na jaké ploše se

daná odchylka nachází (funkční plocha, díra, hřídel). Další porovnání sond (a to zejména vlastností jako produktivita, cena, rychlost měření apod.) nabízí kapitola 7.

Další důležité kritérium, které je třeba zohlednit při tomto porovnání, je čas měření. Celkový čas při měření skenovací dotykovou sondou byl roven přibližně 3,5 minutám. Celkový počet nasnímaných bodů po celé geometrii byl několikanásobně větší než při měření spínací dotykovou sondou. Počet bodů naměřených při měření se spínací sondou byl roven 46. Čas měření se spínací sondou byl téměř dvojnásobný – 7,5 minuty. Při tomto porovnání s jistotou vítězí skenovací dotyková sonda, která je schopna za relativně krátký čas sejmout nespočet bodů v porovnání se sondou spínací.

Kromě konkrétních hodnot či odchylek jednotlivých měření by bylo také vhodné zmínit systematickosti měření. Ta je přímo závislá na definici strategie měření jednotlivých elementů v řídicím softwaru stroje operátorem.

Stroj s aktivním snímacím systémem při skenování rovnoměrně rozděluje body po celé snímané dráze s rozestupem, který definuje operátor. Operátor má možnost definovat buď pouze počet bodů (rozestup jednotlivých bodů se dopočítá na základě znalosti délky dráhy) nebo rozestup bodů (stroj dopočítá z celkové délky dráhy a rozstupu počet snímaných bodů) Zde je systematickosti definice jasně daná.

U bodového režimu skenovací sondy je systematickosti zcela závislá na operátorovi, kam zrovna měřený bod na modelu navolí. Podobný přístup platí i v situaci měření se spínací dotykovou sondou, kde operátor navolí počet bodů, které chce měřit. V případě měření provedeného v této práci byly body při měření se spínací dotykovou sondou rozděleny do dvou případů. V případě měření průměrů byly body rovnoměrně rozděleny po obvodu měřeného průměru softwarem (tj. byl definován přesný počet měřených bodů). Co se týče bodů snímaných na ploše a na vybrání, ty byly voleny zcela náhodně bez jakéhokoliv zásahu softwaru.

V případě měření s aktivní dotykovou hlavou všechny měřené geometrie byly předem definovány s jasným rozestupem. Na základě této myšlenky by se dalo konstatovat, že měření se skenovací dotykovou hlavou bylo v tomto případě více systematické. Co se týče porovnání jednotlivých vlastností sond, budou popsány v kapitole níže.

## 7 Závěr

Hlavním cílem této práce bylo porovnat výsledky z měření aktivní a spínací dotykovou sondou a vyzdvihnout vlastností obou sond. Výsledky porovnání jsou patrné z tabulek nacházejících se na straně 67. Na nich jsou vidět naměřené a vyhodnocené hodnoty některých geometrií. Při vyhodnocování je rovněž nutno zohlednit a do celkového vyhodnocení zahrnout chybu MPEE. Jedná se o maximální přípustnou chybu při měření délky. Každý stroj má přesně danou svou specifikaci MPEE. V případě SMS vybaveného spínací dotykovou sondou je tato chyba rovna  $(1,4 + L/333)$   $\mu\text{m}$ . U stoje s aktivní hlavou je tato chyba  $(0,9 + L/350)$   $\mu\text{m}$ . Jiné odchylky, popřípadě rozdíly, při měření mohly být ovlivněny řadou faktorů. Například při měření mohlo dojít k povrchové kontaminaci (ulpění smítka nečistoty na měřenou součást). Další nepříznivé vlivy, které mohly způsobit odchylky měření, jsou náhodné vibrace nebo rázy (prudký náraz apod.).

Závěrečné odstavce budou věnovány porovnání vlastností jako přesnost, produktivita, výběr sondy a další. Tímto porovnáním bude uzavřeno celé téma dotykového 3D měření.

Jako první bude zohledněna přesnost dotykových sond. Jak bylo řečeno v teoretické části, spínací dotykové sondy samy o sobě vykazují vysokou přesnost. V potaz se ale musí brát jedno důležité hledisko, a to počet nasnímaných bodů. Tento počet je velmi malý v porovnání se skenovací dotykovou sondou. Tím, že je snímán pouze malý počet bodů, je vypovídající schopnost poměrně malá, což může mít za následek vznik větších odchylek od nominálního povrchu. Skenovací dotykové sondy mají teoreticky nižší přesnost, a to zejména kvůli kinematickým a dynamickým vlivům, které vznikají v průběhu měření. Celé měření a vyhodnocení, avšak podléhá systémové korektuře, tzv. korekčním mapám. Díky těmto korekčním mapám, které by měly eliminovat zmíněné vlivy, je výsledné měření nejen velmi přesné, ale rovněž má velkou vypovídací hodnotou.

Dalším důležitým hlediskem je časová náročnost a produktivita. V tomto hledisku jednoznačně dominuje skenovací dotyková sonda, která dokáže za relativně krátký čas nasnímat nespočet bodů. Možnost skenovat kontinuálně povrch bez jakýchkoliv odskoků od měřené geometrie přináší nejen efektivnost, ale také zamezení jednotlivých časových prodlev, které vznikají při měření spínací dotykovou sondou. Maximální rychlost v tomto případě je až 25 bodů za vteřinu. Díky těmto vlastnostem je produktivita skenovacích sond opravdu velká.

V praktické části se tato stanoviska potvrdila. Čas měření byl u spínací dotykové sondy téměř dvojnásobný v porovnání se sondou aktivní. A zároveň rozdíl v počtu nasnímaných bodů je několikanásobný. Celkový čas měření je ovlivněn nejen výběrem sondy, ale také celým strojem. V případě použití kalibračního stroje se celkový čas měření může až několikanásobně zvýšit. Důvod je ten, že kalibrační stroje jsou o něco přesnější než klasické SMS, proto jsou stavěny robustněji. Častokrát také mají pomocnou konstrukci, která je připevněna zezadu k rámu měřicího stroje. Vykonávají tak pomalejší pohyby a celkový čas měření se ještě zvýší.

V celkovém pohledu má aktivní skenovací hlava hned několik výhod oproti spínací sondě počínaje větší produktivitou, efektivností, rychlejším časem skenování a větší vyovídací schopností. Mohlo by se zdát, že použití skenovací dotykové sondy je ve všech ohledech výhodnější. Doposud ale nebylo zmíněno možná to nejdůležitější hledisko – cena. Při rozdělení dotykových sond při tomto kritériu jasně převládají spínací dotykové sondy. Jejich cena je podstatně nižší v porovnání s aktivní měřicí hlavou.

Další velkou výhodou spínacích sond je také jejich nenáročnost na údržbu a možnost použití i ve zhoršených podmínkách, například možnost použití i v prašném prostředí. Díky tomu je možná přítomnost CMM se spínací dotykovou sondou přímo na hale. Odpadne tak nutnost stavět nákladná a klimatizovaná měřová střediska. Aktivní dotyková hlava klade velké nároky na čistotu prostředí, ve kterém se vyskytuje. Rovněž existují i laboratorní SMS se spínací dotykovou sondou, kde jsou čistá a klimatizovaná centra nutností. Při nedodržení laboratorních podmínek u stojů, které to vyžadují, může dojít k poškození celého stroje a jeho oprava bývá velmi nákladná.

Mnou zjištěné a posuzované hodnoty jednotlivých měřících technologií mohou v praxi sloužit jako výběrové kritérium pro pořízení vhodné měřicí techniky do průmyslových provozů.



## 8 Seznam obrázků

Obrázek 1 - Rozdělení na základní elementární prvky [10].....	10
Obrázek 2 - Systémové komponenty souřadnicových měřících strojů [2] .....	11
Obrázek 3 - Souřadnicové osy obrobku a stroje [2].....	12
Obrázek 4 - Základní rozdělení sondovacích systémů [4] .....	14
Obrázek 5 - Stavba sondovacího systému [2] .....	16
Obrázek 6 - Druhy sondovacích systémů [2].....	17
Obrázek 7 - Ukázka sondy s více dotykovými členy [17] .....	17
Obrázek 8 – Princip elektromechanické spínací sondy [14].....	19
Obrázek 9 - Princip rozpojení kontaktů u elektromechanické sondy [6] .....	20
Obrázek 10 – Schéma spínací dotykové piezoelektrické sondy a její princip [14].....	21
Obrázek 11 – Spínací sonda vybavená piezooscilátorem [6].....	21
Obrázek 12 - Měřící sondovací systém [10] .....	22
Obrázek 13 - Skenovací hlava [15].....	23
Obrázek 14 - Geometrické elementy sestaveny z minima bodů [14].....	26
Obrázek 15 - a) Přizpůsobení pomocí nejmenších čtverců b) Přizpůsobení pomocí minimální zóny c) Přizpůsobení minimální celkové vzdálenosti [2] .....	27
Obrázek 16 - a) Přizpůsobení pomocí nejmenších čtverců b) Přizpůsobení pomocí minimální zóny c) Přizpůsobení minimální celkové vzdálenosti [2] .....	28
Obrázek 17 - Použitelnost jednotlivých přizpůsobení na geometrické tvary [19] .....	28
Obrázek 18 - a) metoda nejmenších čtverců, b) Chebyshevovo přizpůsobení, c) Maximálně vepsaná a minimálně opsaná kružnice [2] .....	31
Obrázek 19 - Přizpůsobení stejných datových bodů různými metodami [2] .....	32
Obrázek 20 - Přizpůsobení minimální totální vzdálenosti [2].....	33
Obrázek 21 - Přizpůsobení dle maximálního vepsání ve speciálním případě (posunutí obrobku při vrtání díry) [19].....	34
Obrázek 22 - Měřený díl .....	37
Obrázek 23 - Výkres součásti .....	37
Obrázek 24 - Použitá spínací sonda .....	38
Obrázek 25 - Ukázka softwarového prostředí PC DMIS .....	40
Obrázek 26 – Způsob upnutí pro měření spínací sondou.....	41
Obrázek 27 - Vyrovnání dílu 1.....	42
Obrázek 28 - Měření č. 1 průměry .....	43
Obrázek 29 - Měření č. 2 průměry .....	43
Obrázek 30 - Toleranční pole KRUH5 .....	45
Obrázek 31 - Toleranční pole KRUH6 .....	45
Obrázek 32 - Měření č. 1 díry pro šrouby .....	46
Obrázek 33 - Měření č. 2 díry pro šrouby .....	47
Obrázek 34 - Toleranční pole D15.....	48
Obrázek 35 - Způsob upnutí pro měření spínací sondou 2 .....	49
Obrázek 36 - Vyrovnání dílu 2.....	50
Obrázek 37 - Ukázka měrového listu (spínací sonda).....	51
Obrázek 38 - Pojmenování jednotlivých geometrií 1/2 .....	52
Obrázek 39 - Pojmenování jednotlivých geometrií 2/2 .....	53
Obrázek 40 - Použitá měřící sonda .....	55
Obrázek 41 - Ukázka softwarového prostředí Calypso.....	56
Obrázek 42 - Způsob upnutí pro měření skenovací sondou.....	57
Obrázek 43 - Vyrovnání dílu 3.....	58
Obrázek 44 - Ukázka měrového protokolu .....	59

Obrázek 45 - Grafické vyhodnocení rovinnosti 1 .....	60
Obrázek 46 - Grafické vyhodnocení rovinnosti 2 .....	61
Obrázek 47 - Grafické vyhodnocení rovinnosti 3 .....	61
Obrázek 48 - Grafické vyhodnocení rovinnosti 4 .....	62
Obrázek 49 - Vyhodnocení vybrání v rovině XZ.....	63
Obrázek 50 - Vyhodnocení vybrání - body 1.....	63
Obrázek 51 - Vyhodnocení vybrání - scan 1.....	64
Obrázek 52 - Vyhodnocení vybrání - body 2.....	65
Obrázek 53 - Vyhodnocení vybrání - scan 2.....	65

## 9 Seznam tabulek

Tabulka 1 - Porovnání konvenční a souřadnicové metrologie [10] .....	13
Tabulka 2 - Minimální počet datových bodů potřebný k přizpůsobení geometrických prvků [12].	25
Tabulka 3 - Rozdíly mezi metodou nejmenších čtverců a metodou minimální zóny [2].....	35
Tabulka 4 - Přiřazení os stroje k osám modelu .....	41
Tabulka 5 - Vysvětlivky zkratk v měrovém protokolu .....	42
Tabulka 6 - Porovnání měření D4 - D6.....	44
Tabulka 7 - Směrodatná odchylka pro KRUH 4, 5, 6.....	44
Tabulka 8 - Porovnání měření D14 - D17 (D48 – D51) .....	47
Tabulka 9 - Odchytky měření D14 – D17 (D48 – D51) .....	48
Tabulka 10 - Přiřazení os stroje k osám modelu 2 .....	50
Tabulka 11 - Přiřazení os stroje k osám modelu 3 .....	57
Tabulka 12 - Porovnání měření D11-D13.....	67
Tabulka 13 - Porovnání měření D48-D51 .....	67
Tabulka 14 - Porovnání vyhodnocení tolerance polohy díry pro šrouby .....	67
Tabulka 15 - Porovnání vyhodnocení vybrání +Z-X .....	67
Tabulka 16 - Porovnání vyhodnocení rovnoběžnosti a vzdálenosti.....	67
Tabulka 17 - Procentuální odchylka měření spínací a skenovací dotykové sondy .....	68
Tabulka 18 - Hodnoty MPEE k některým měřeným povrchům .....	69
Tabulka 19 - Hodnoty z měření pomocí spínací a dotykové sondy s chybou MPEE .....	69

## 10 Zdroje

- [1] Úvod | Katedra výrobních systémů a automatizace [online]. Copyright © [cit. 27.11.2020]. Dostupné z: <http://www.ksa.tul.cz/getFile/id:2522>
- [2] HOCKEN, Robert J. a Paulo H. PEREIRA. Coordinate Measuring Machines and Systems: Manufacturing Engineering and Materials Processing. 2, ilustrované vydání, přepracované vydání. Praha: CRC Press, 2016. ISBN 1420017535, 9781420017533.
- [3] IGNOU — The People's University [online]. Copyright ©i [cit. 10.12.2020]. Dostupné z: <http://www.ignou.ac.in/upload/Unit-8-62.pdf>
- [4] CHRISTOPH, Ralf a Hans J. NEUMANN. Multisenzorová souřadnicová měřicí technika: měření rozměrů, tvarů, polohy a drsnosti – opticky, dotykově a rentgenovou tomografií. 4. přeprac. a rozš. vyd. Uherské Hradiště: PRIMA Bilavčák, 2008.
- [5] ALI, Salah. Probing System Characteristics in Coordinate Metrology. Measurement Science Review. 2010, vol. 10, no. 4, s. 120. ISSN 1335-8871.
- [6] WECKENMANN, A. et al. Probing Systems in Dimensional Metrology. CIRP Annals. 2004, vol. 53, no. 2, s. 657-684. ISSN 0007-8506.
- [7] ALI, Salah H. R. Automotive Engine Metrology [online].1. Singapore: CRC Press, 2017; ISBN 9789814669528
- [8] CAUCHICK-MIGUEL, P. A. a T. G. KING. Factors which influence CMM touch trigger probe performance. International Journal of Machine Tools & Manufacture. 1998, vol. 38, no. 4, s. 363-374. ISSN 0890-6955.
- [9] BASTAS, Ali. Comparing the probing systems of coordinate measurement machine: Scanning probe versus touch-trigger probe. Measurement : Journal of the International Measurement Confederation. 2020, vol. 156, s. 107604. ISSN 0263-2241.
- [10] PEREIRA, Paulo H. a John A. BOSCH. Coordinate Measuring Machines and Systems: Manufacturing Engineering and Materials Processing. Ilustrované vydání. Praha: CRC Press, 1995. ISBN 0824795814, 9780824795818
- [11] Least Squares Fitting -- from Wolfram MathWorld. Wolfram MathWorld: The Web's Most Extensive Mathematics Resource [online]. Copyright © 1999 [cit. 04.12.2020]. Dostupné z: <https://mathworld.wolfram.com/LeastSquaresFitting.html>
- [12] LEAST-SQUARES BEST-FIT GEOMETRIC ELEMENTS [online]. Teddington, Middlesex TW11 0LW, United Kingdom: National Physical Laboratory, 1991 [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: <https://eprintspublications.npl.co.uk/5050/>
- [13] Mohan, P., Haghghi, P., Shah, J.J. et al. Development of a library of feature fitting algorithms for CMMs. Int. J. Precis. Eng. Manuf. 16, 2101–2113 (2015). <https://doi.org/10.1007/s12541-015-0272-1>
- [14] TechPark.sk [online]. Copyright © 2008 [cit. 24.02.2021]. Dostupné z: <http://www.techpark.sk/>

- [15] BERÁNEK, Libor. ČVUT V PRAZE, FAKULTA STROJNÍ, ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE. Strojírenská metrologie. Praha, 2018.
- [16] DOBOSZ, Marek a Adam WOŹNIAK. CMM touch trigger probes testing using a reference axis. Precision Engineering. 2005, vol. 29, no. 3, s. 281-289. ISSN 0141-6359.
- [17] Renishaw TP7M Strain Gauge CMM Touch Trigger Probe [online]. Copyright © 2010 [cit. 4.03.2021]. Dostupné z: <https://usedrenishawprobes.wordpress.com/2010/12/08/renishaw-tp7m-strain-gage-cmm-touch-trigger-probe/>
- [18] MORONI, Giovanni a Stefano PETRÒ. Geometric tolerance evaluation: A discussion on minimum zone fitting algorithms. Precision Engineering. 2008, vol. 32, no. 3, s. 232-237. ISSN 0141-6359.
- [19] SHAKARJI, C. M. a A. CLEMENT. Reference Algorithms for Chebyshev and One-Sided Data Fitting for Coordinate Metrology. CIRP Annals. 2004, vol. 53, no. 1, s. 439-442. ISSN 0007-8506.
- [20] ANTHONY, G. T. et al. Reference software for finding Chebyshev best-fit geometric elements. Precision Engineering. 1996, vol. 19, no. 1, s. 28-36. ISSN 0141-6359.
- [21] Co je dotek SMS? | Hexagon Manufacturing Intelligence. *Object moved* [online]. Copyright © 2021 [cit. 01.04.2021]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/solutions/technical-resources/metrology-101/what-is-a-cmm-stylus>
- [22] Úvod do souřadnicového měření | Hexagon Manufacturing Intelligence. *Object moved* [online]. Copyright © 2021 [cit. 4.03.2021]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-cz/solutions/technical-resources/metrology-101/intro-to-coordinate-metrology>