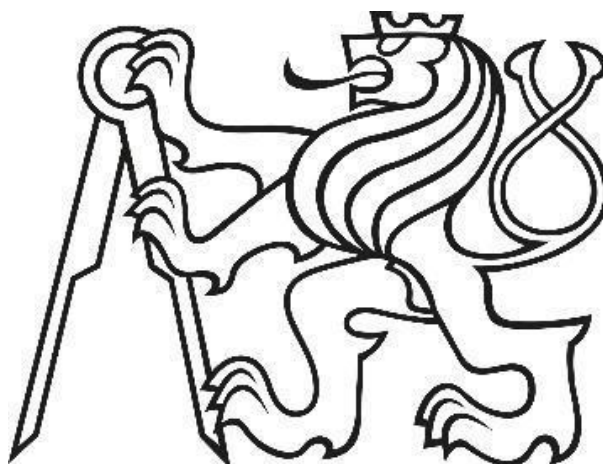


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta strojní**

**Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Optimalizace plánů měření při kontrole dílů s využitím CMM**

**Optimization of measurement plans for inspection of parts using  
CMM with tactile sensors**

Autor: Jan Černý

Studijní program: Výrobní a materiálové inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Libor Beránek, Ph.D.

Praha 2021

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Černý** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **483343**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**  
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Optimalizace plánů měření při kontrole dílů s využitím CMM**

Název bakalářské práce anglicky:

**Optimization of measurement plans for inspection of parts using CMM with tactile sensors**

Pokyny pro vypracování:

Strategie měření při kontrole dílů na CMM s dotykovým snímacím systémem a vliv jednotlivých parametrů na produktivitu a přesnost procesu měření.

Definování procesu temperace vybraných dílů, časová náročnost procesu, stanovení temperačních křivek  
Optimalizace vybraného plánu měření a její technicko-ekonomické vyhodnocení

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Libor Beránek, Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2021**

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

Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen 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 studenta

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, a že veškerá použitá odborná literatura je uvedena v seznamu, který je součástí této práce.

V Praze dne: .....

.....

Jan Černý

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl velmi poděkovat vedoucímu diplomové práce panu Ing. Liboru Beránkovi, Ph.D. za jeho vedení, trpělivost a čas, který mi během jejího vypracování poskytl. Poděkování patří rovněž mé rodině a snoubence za oporu a pomoc během celého studia. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat i svým přátelům za mentální oporu během celého studia.

## **Abstrakt**

Práce se týká problematiky měření na souřadnicových měřicích strojích s dotykovým snímacím systémem. Krátce popisuje rozdělení konstrukcí souřadnicových měřicích strojů, sensoriku a postup při měření na těchto strojích. V praktické části se zabývá optimalizací zadaného plánu měření a stanovením temperačních křivek pro zadané díly. Optimalizovaný plán je poté zhodnocen.

## **Klíčová slova**

Souřadnicový měřicí stroj, CMM, sensorika, optimalizace plánu měření, temperace dílu, rychlosti skenování

## **Abstract**

This thesis concerns the issue of measuring with coordinate measuring machines with tactile sensors. It briefly describes types of constructions of coordinate measuring machines, usable sensors and measuring procedure with coordinate measuring machines. The practical part involves optimization of measurement plans for inspection of given measuring plan and determination of tempering curves of given parts. Optimized measuring plan is then evaluated.

## **Key words**

Coordinate measuring machine, CMM, sensors, optimization of measurement plans, tempering of parts, sampling speed

## Obsah

1	Úvod.....	8
1.1	Princip souřadnicového měření .....	8
1.2	Zdroje variability.....	10
2	Souřadnicová měřicí technika a snímací systémy využívané v průmyslu ...	12
2.1	Konstrukce CMM .....	12
2.1.1	Rozdělení kartézských CMM dle normy ISO 10360 - 1.....	12
2.1.2	Nekartézsky uspořádané CMM .....	16
2.2	Snímací systémy užívané v CMM.....	21
2.2.1	Dotykové snímací systémy.....	21
2.2.2	Bezdotykové.....	25
3	Postup měření na CMM .....	32
3.1	Analyzování výkresové dokumentace.....	32
3.2	Volba upnutí dílu .....	32
3.3	Konfigurace snímacího systému .....	34
3.4	Kvalifikace snímacího systému .....	35
3.5	Vyrovnaní.....	35
3.5.1	Standardní metoda.....	36
3.5.2	Systém referenčních bodů – RPS .....	36
3.5.3	3D připasování (best fit) .....	37
3.5.4	Metoda P6.....	38
3.6	Extrakce bodů a výpočet geometrických prvků.....	39
3.7	Vyhodnocení měřených charakteristik dílu .....	39
4	Strategie měření při kontrole dílů na CMM.....	41
4.1	Tvar snímací dráhy .....	41
4.2	Rychlost skenování.....	42

4.3	Vzdálenost bodů .....	42
4.4	Filtry .....	42
4.5	Eliminace odlehlých bodů .....	46
4.6	Způsob výpočtu geometrických charakteristik .....	46
5	Vliv jednotlivých parametrů na produktivitu a přesnost měření .....	52
5.1	Vliv rychlosti snímání .....	52
5.2	Vliv počtu bodů .....	57
6	Optimalizace plánu měření.....	59
6.1	Zhodnocení původního plánu měření .....	59
6.1.1	Rov.A1_2B999 .....	61
6.1.2	Kruhovitost_2B999_INFO, Kruhovitost_2B998_INFO a Poloha_2B998 .....	63
6.1.3	2F999_A1 a 2F999_B1 .....	63
6.2	Zhodnocení optimalizovaného plánu měření .....	68
7	Proces temperace dílů v rámci měření (zdroj variability díl) .....	70
7.1	Časová náročnost procesu .....	70
7.2	Stanovení temperačních křivek.....	70
7.2.1	Popis experimentu stanovení temperačních křivek .....	70
7.2.2	Temperační křivky .....	72
7.2.3	Výsledek experimentu .....	76
8	Závěr .....	78
9	Bibliografie .....	80

# 1 Úvod

Souřadnicové měřicí stroje jsou v současnosti běžně využívány pro kontrolu kvality v průmyslu. Nejčastěji se vyskytují ve větších podnicích např. v automobilovém průmyslu. Tyto stroje jsou schopny běžně měřit až na tisícinu milimetru. Společně s přesností je podstatná i rychlost měření a velikost měřených dílů. Volba vhodného stroje se odvíjí od požadavků firmy na přesnost, rychlost měření a velikost měřených dílů.

Tyto stroje jsou považovány za nejlepší volbu pro běžné provozy, které potřebují přesné a rychlé měření. Díky rozmanitosti konstrukcí a ostatních vlastností jsou schopny poskytnout téměř vždy ideální řešení pro konkrétní měrové středisko.

Tato práce se zabývá problematikou kontroly dílů v průběhu výrobního procesu ve firmách. Hlavním cílem práce je popsat konstrukci nejpoužívanějších souřadnicových měřicích strojů a strategii volenou pro měření konkrétních dílů. Na základě těchto podkladů analyzovat zadaný měřicí plán, určit nevyhovující strategii u charakteristik a tu následně pozměnit. Dalším cílem je u zadaných dílů určit teplotní křivky a analyzovat možnost aktivní teploty.

## 1.1 Princip souřadnicového měření

Souřadnicová měřicí technika (dále jen CMM) vznikla v reakci na potřebu univerzálnějšího měřicího přístroje. CMM je zkratka anglického názvu (Coordinate Measuring Machine) označující měřicí stroje, které měří fyzické geometrické prvky těles za použití snímání (extrahování) bodů dotyku s tělesem tzv. dotyků.

Vývoj CMM byl zahájen v 50. letech 20. století v reakci na zvyšující se požadavky na měrová střediska. Především se jednalo o: přesnost i na velkých dílech, produktivitu měrového střediska, měření složitých tvarových součástí a vyhodnocování geometrických prvků dílů.

Dnes jsou CMM jedny z nejpoužívanějších metrologických přístrojů v průmyslu díky jejich univerzálnosti, flexibilitě a přesnosti.

Základním principem měření na CMM je určení základního bodu v prostoru a měření polohy bodů na povrchu měřené součásti za pomoci kartézského souřadnicového systému (souřadnice  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ).



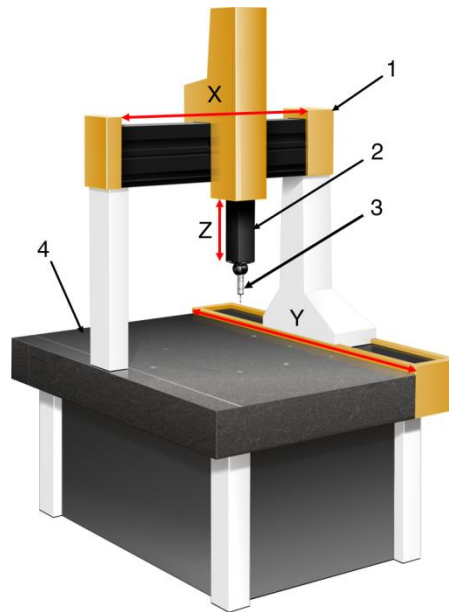
Nejpoužívanějším druhem CMM v praxi jsou portálové CMM. Pohyby v jednotlivých osách jsou prováděny za pomoci pohonu stroje. Přesné odečtení polohy dotyku je zajištěno díky přesným odměřovacím systémům – lineárním enkodérům. Toto odečtení probíhá zároveň ve všech osách. Pohyblivé části CMM jsou nejčastěji uloženy na vzduchových ložiscích.

Výsledkem měření je identifikace tvarů vzniklých ze snímaných bodů a porovnání těchto tvarů s požadavky na díl. Požadavky na produkt jsou dnes definovány v rámci systému ISO GPS (Geometrical Product Specifications), který definuje požadavky na tolerování rozměrů, geometrické tolerance a texturu povrchu.

Snímaní bodů s využitím CMM může být realizováno fyzickým kontaktem dotyku s povrchem dílu (dotykové snímací systémy), či bezkontaktně (bezdotykové snímací systémy).

Aby toto bylo možné, je nutné vyrovnání dílu (stanovení souřadného systému). Díky tomu lze určit polohu dotyků pomocí souřadnicových rozměrů v osách X, Y a Z. Dotyk je tedy popsán v nepohyblivém souřadném systému, nejčastěji kartézském, ten je pevně navázán na rám CMM. Měřené těleso musí být při měření umístěno v pracovním prostoru CMM.

Z těchto měřených bodů jsou vypočteny geometrické prvky (elementy) dílů. Z geometrických prvků jsou následně vyhodnoceny rozměrové a geometrické tolerance.



**Obrázek 1: Příklad portálového CMM**

Počátkem celého měření je analýza výkresové dokumentace měřeného dílu, aby mohlo být stanoveno, co bude měřeno, a popř. i zjištěno, jaký stroj bude nejlepší.

Jakmile je znám tvar měřeného dílu, plochy, ke kterým musí být zajištěn přístup, a stroj, na kterém bude měřeno, může být definováno upnutí dílu v měřicím prostoru CMM a zvolena konfigurace snímacího systému.

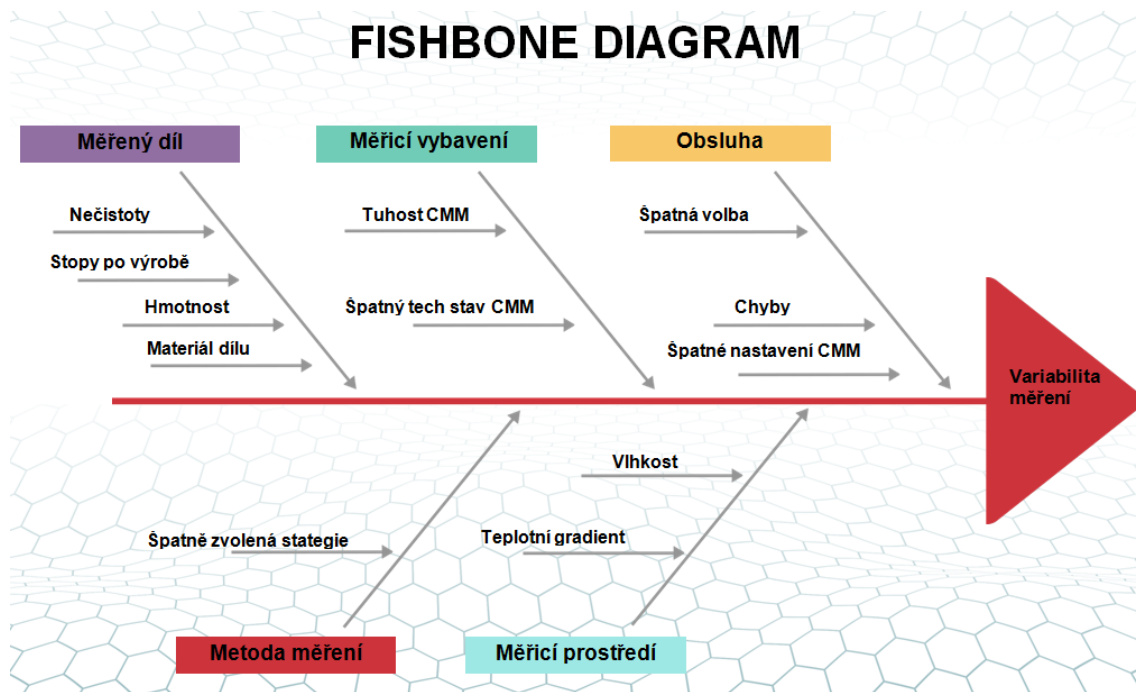
S každým započatým měřením je nejdříve provedena kalibrace snímacího systému.

Poté je na řadě samotná extrakce bodů a definování geometrických prvků z dílu. Z nasnímaných bodů jsou softwarem vypočteny charakteristiky dílu (tvarové a rozměrové specifikace).

Závěrečným krokem je zhodnocení realizovaného měření a tvorba výstupních protokolů měření. (1) (2) (8)

## 1.2 Zdroje variability

Zdroje variability ovlivňují přesnost měření. Systém je zatěžován zdroji variability, které se odvíjí hlavně od pěti faktorů, vyznačených v tzv. fishbone diagramu. Těmito faktory jsou: metoda měření, měřicí vybavení, měřený díl, měřicí prostředí a obsluha. (2)



**Obrázek 2: Diagram zdrojů variability měření**

## 2 Souřadnicová měřicí technika a snímací systémy využívané v průmyslu

### 2.1 Konstrukce CMM

Konstrukcí CMM může být ovlivněna přesnost, rychlost snímání, flexibilitu, průchodnost (počet proměřených dílů za určitý časový úsek) a nároky na údržbu. Základní dělení CMM je podle jejich uspořádání na kartézské a nekartézské. Obě tyto kategorie obsahují dále několik druhů konstrukcí. (1) (2) (6) (4)

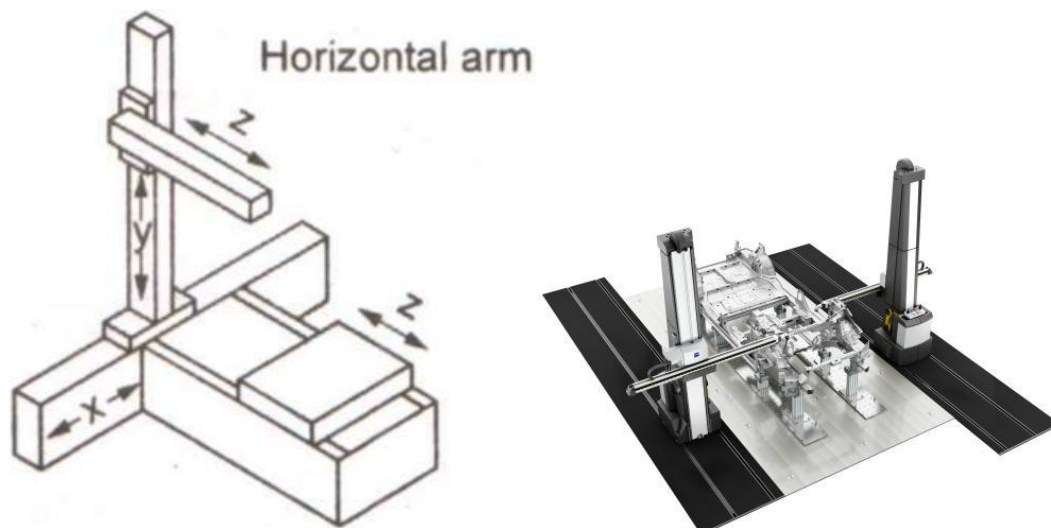
#### 2.1.1 Rozdělení kartézských CMM dle normy ISO 10360 - 1

##### 2.1.1.1 Stojanové CMM s horizontálním ramenem

Pinola či stůl (osa z) je oproti ostatním dvěma částem horizontálně pohyblivá. Pohyb po stojanu pinoly reprezentuje pohyb v ose y a pohyb samotného stojanu reprezentuje pohyb v ose x.

Tyto CMM jsou užívány v provozech, kde je zapotřebí měřit velké, dlouhé díly (lisovací formy, velké klikové hřídele...), při zachování střední přesnosti. Jsou ideální díky své otevřené konstrukci pro integraci do výrobní linky. Podle velikosti stojanového CMM se dá zakoupit již kompletní stroj, nebo je zapotřebí provést sestavení až na místě.

Příkladem tohoto druhu CMM je např. Zeiss Carmet, u něhož se udává chyba měření délky  $E_0$  v  $\mu\text{m}$   $35 + L/50 \leq 80$  a rozsah teplot měření od 16 do 24°C. (1) (2) (6) (4)



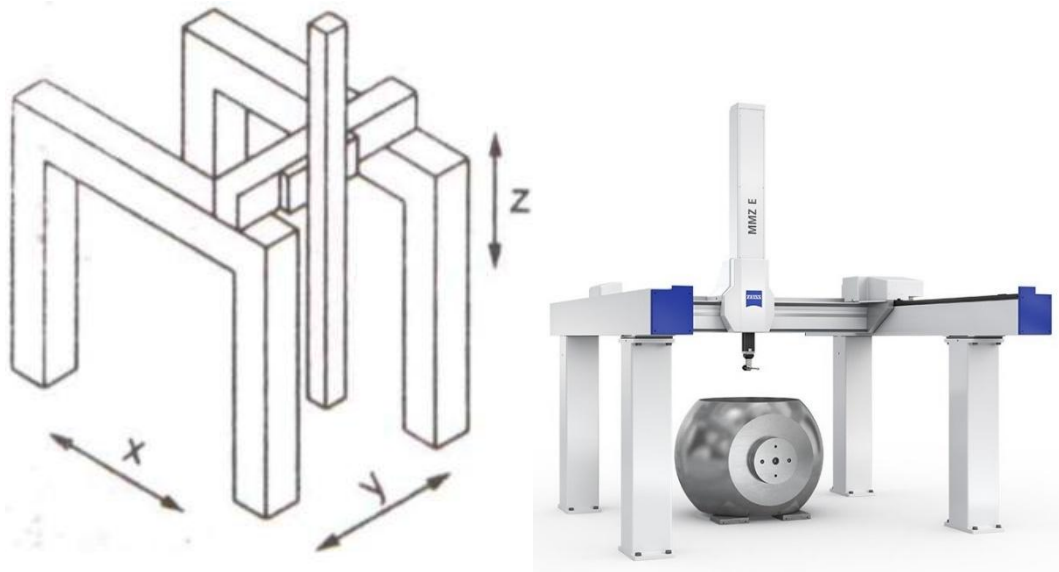
**Obrázek 3: Ilustrační obrázek z normy ISO 10 360-1 a Zeiss Carmet**

### 2.1.1.2 Mostové CMM

Pohyb části se snímací hlavou realizuje pohyb v ose z. Část se snímací hlavou se pohybuje po mostu a tím je realizován pohyb v ose y. Celá soustava se pohybuje na dvou vyvýšených vedeních (osa x) na protějších stranách základny CMM, na které je měřený díl.

Tyto CMM se užívají v provozech, kde je zapotřebí měřit těžké díly velkých rozměrů (lisovací formy, velké klikové hřídele...), obvykle nad  $10\text{m}^3$ , při zachování relativně vysoké přesnosti. Při montáži mostového CMM se většinou instalace do měřicího centra pohybuje v řádu týdnů, protože je třeba vytvořit podloží přímo na místě. Až po vytvoření podloží se sestaví celé CMM a následuje kalibrace.

Příkladem tohoto druhu CMM je např. Zeiss MMZ E, u něhož se udává chyba měření délky  $E_0$  v  $\mu\text{m}$  od 2.0 do  $2.8 + L/400$  (dle užití konfigurace). (1) (2) (6) (4)



**Obrázek 4: Ilustrační obrázek z normy ISO 10 360-1 a Zeiss MMZ E**

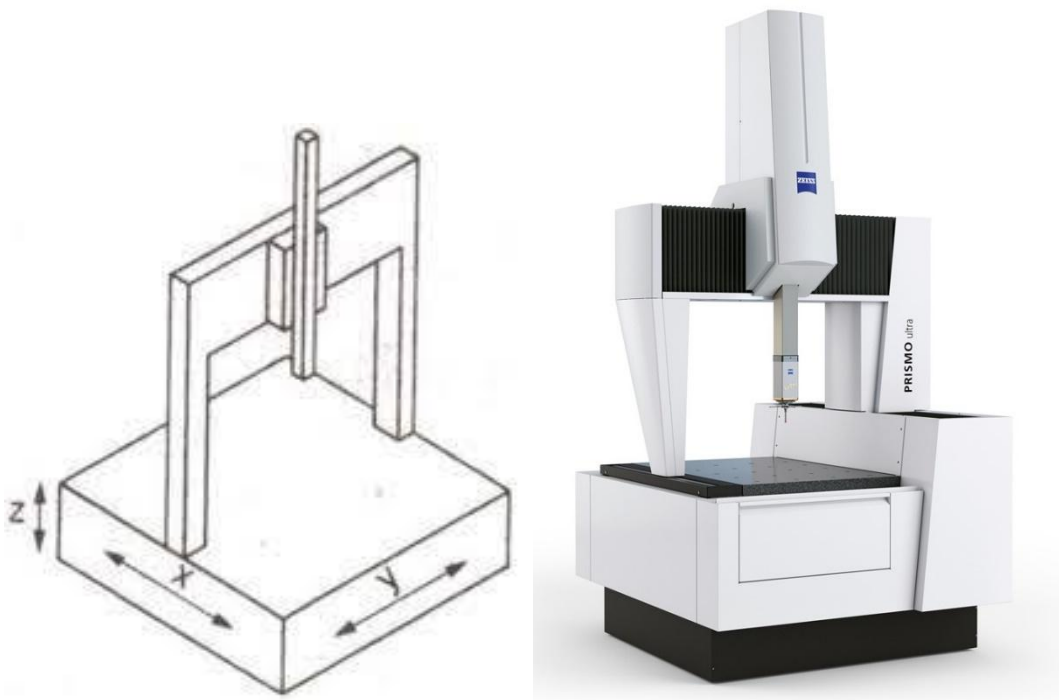
### **2.1.1.3 CMM s pohyblivým portálem**

Pohyb celého portálu realizuje pohyb v ose x, pohyb části se snímací hlavou po portálu realizuje pohyb v ose y a pohyb této části reprezentuje pohyb v ose z.

Tyto CMM jsou používány pro měření malých a středních dílů (bloky motorů, ozubená kola...) s vysokou přesností a vysokou produktivitou měření.

Portálové CMM mají velkou výhodu toho, že se zakoupí CMM a po odborné instalaci (obvykle do doby jednoho týdne) jsou schopny provozu.

Příkladem tohoto CMM je např. Zeiss Prismo, u něhož se udává chyba měření délky E0 v  $\mu\text{m}$   $0,9 + L/350 \mu\text{m}$ . Tento měřicí stroj je nejspíše nejnakupovanějším CMM na trhu. (1) (2) (6) (4)



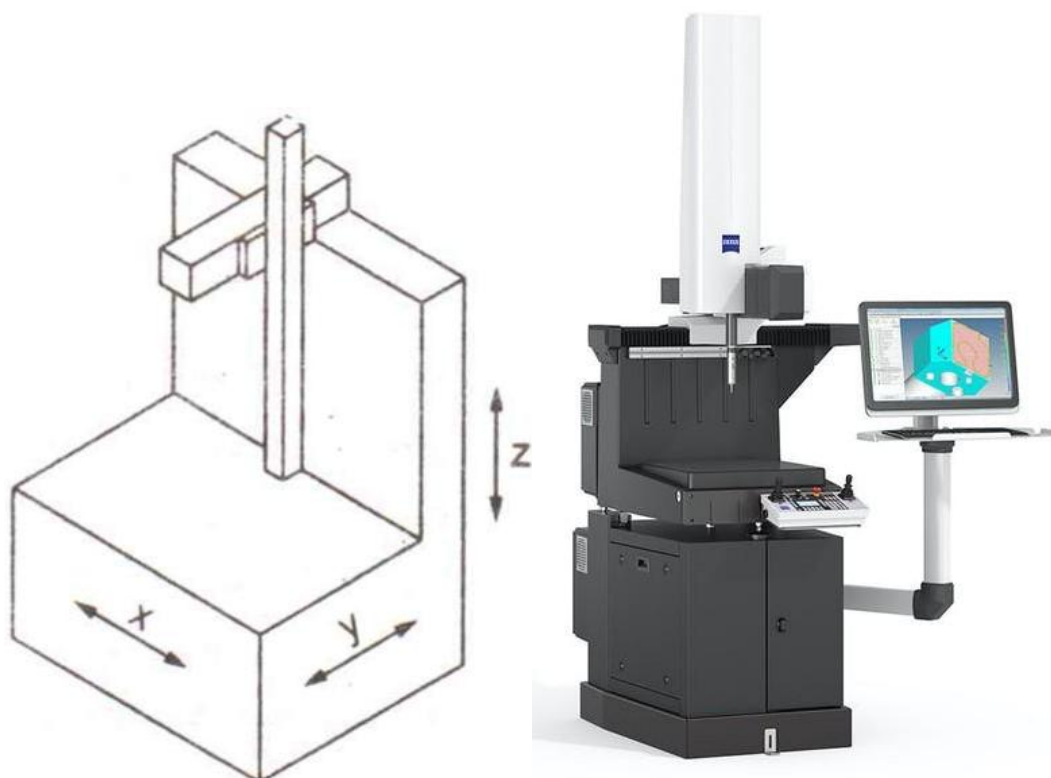
**Obrázek 5: Ilustrační obrázek z normy ISO 10 360-1 a Zeiss Prismo**

#### **2.1.1.4 Výložníkové CMM**

Pohyb části se snímací hlavou realizuje pohyb v ose z, pohyb této části po výložníku realizuje pohyb v ose y a pohyb této celé soustavy po vedení realizuje pohyb v ose x.

Tyto CMM slouží k měření malých dílů (jednoduché malé svařence, obrobky z CNC...) se střední přesností a střední produktivitou měření. Je možné je využívat i přímo v dílenském provozu. Stejně jako u portálových CMM jsou velmi rychle po zakoupení schopny provozu.

Příkladem tohoto CMM je např. CMM Zeiss DuraMax, u něhož se udává chyba měření délky E0 v  $\mu\text{m}$  od 2,2 do 3,9 + L/100 až 300 a vysoká teplotní stabilita v rozsahu +18°C až +30°C. (1) (2) (6) (4)



**Obrázek 6: Ilustrační obrázek z normy ISO 10 360-1 a Zeiss DuraMax**

## **2.1.2 Nekartézsky uspořádané CMM**

### **2.1.2.1 Laser tracker**

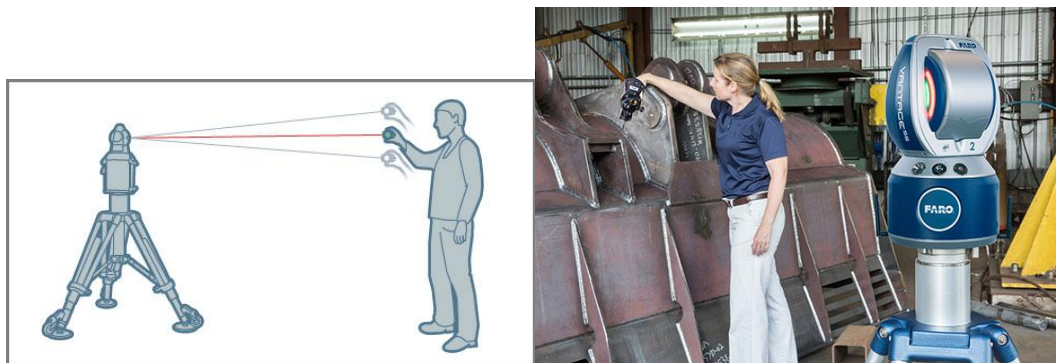
Je CMM, které změřením polohy koutového odražeče přiloženého na měřený díl v souřadném systému extrahuje bod. Terč musí přikládat obsluha a tracker ho musí mít stále zaměřený, nebo ho po přiložení vyhledat. Tímto způsobem je možné přesně měřit velké díly (montážní haly, křídla letadel...).

Principem laser trackeru je, že laser neustále sleduje polohu koutového odražeče. Během toho odečítá polární souřadnice (jedna vzdálenost a dva úhly – elevace a azimut) natočené hlavy. Vzdálenost měří pomocí: lineárních interferometrů (IFM) nebo měření absolutní vzdálenosti tzv. ADM (Absolute Dimension).

IFM využívají světelné interference paprsku odráženého z koutového odražeče zpět do hlavy.



ADM využívá měření doby letu paprsku z hlavy do koutového odražeče a zpět. Příklad tohoto CMM je Leica absolute tracker ATS600, u něhož se udává maximální chyba  $300\mu\text{m}$  na 60 metrech. (1) (2) (10) (12)



**Obrázek 7: Laser tracker snímající polohu dotyku a Laser tracker v provozu**

### 2.1.2.2 Laser radar

Je CMM, které pomocí snímacího systému identifikuje části dílu určené k měření a za pomoci laseru změří polohu dotyku. Díky tomuto uspořádání není zapotřebí optického terče. Je využíván v silně automatizované výrobě, např. namontování daného CMM na roboty pro měření aut na výrobní lince. Využití může být omezeno obtížemi při měření lesklých či transparentních povrchů.

Funguje na principu výpočtu doby letu impulsu vytvořeného odrazem laseru od povrchu dílu. Díky znalosti úhlu elevace a azimutu dopočítá polohu bodu na povrchu dílu (v polárních souřadnicích). Příklad tohoto CMM je APDIS MV4x0 Laser Radar, u něhož se udává maximální chyba  $29\mu\text{m}$  na 2 metrech. (1) (2) (8) (12)



**Obrázek 8: Schéma lase radaru snímajícího polohu dotyku a Laser radar začleněný do výrobní linky**

### 2.1.2.3 Měřicí ramena

Měřicí ramena využívají k určení měřeného místa fyzické řízení. Nejčastěji je na konci ramena přímo umístěno držadlo, které operátor vezme do ruky, spouští na držadle a určí jaký bod, popř. oblast dílu, extrahovat. Je to CMM využívané při potřebě velké mobility a jednoduché obsluhy CMM. Může být využíváno výjezdním technikem, který si nemůže dovolit používat velké výkonné CMM. Další výhoda spočívá v jednodušší přípravě při měření menšího počtu kusů (oproti náročné přípravě např. portálového CMM).

Příklad tohoto CMM je MCAx S, u něhož je rozsah maximálního dosahu od 2 do 4,5 metrů. (1) (2) (12) (14)



***Obrázek 9: Měřící rameno s dotykovým snímacím systémem ovládané operátorem***

#### **2.1.2.4 Výpočetní tomografie**

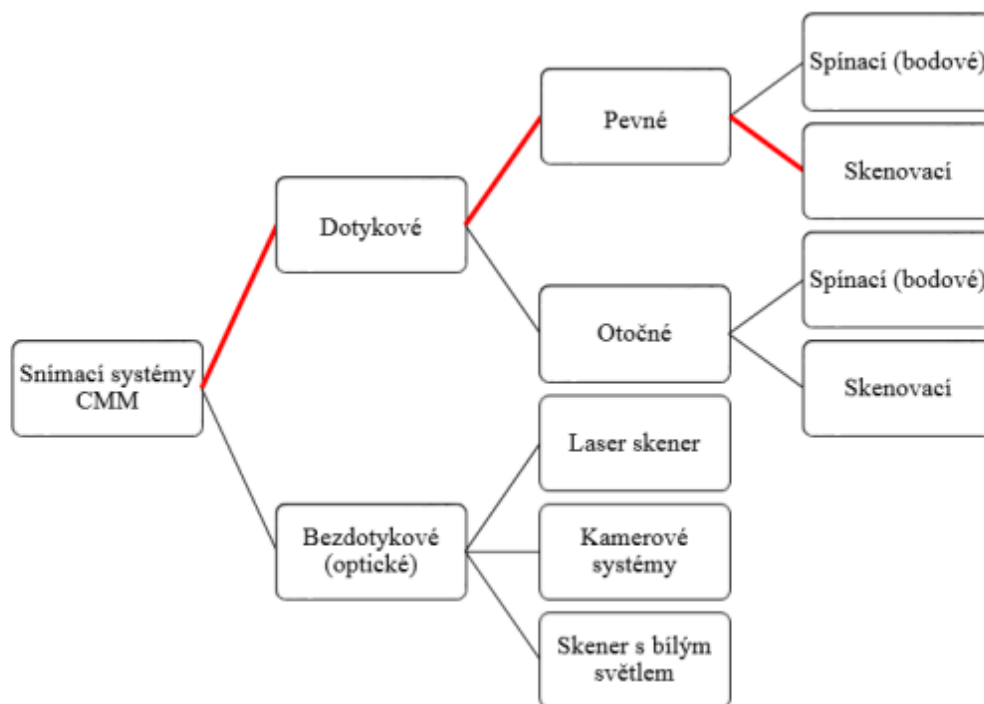
Je technikou radiografického 3D zobrazení dílů. Za pomoci detektoru zachytí ionizující záření a vytvoří stínový snímek. Za pomoci stínových snímků a detekčních systémů vytvoří 3D obraz měřeného dílu. Způsob snímání nespadá do dotykového ani optického. Umožňuje snímání informací o povrchu i vnitřku součásti. Touto metodou snímání lze zjistit přesné informace o objemu a struktuře např. je tato metoda využívána pro zjišťování kvality spojů a porézności materiálu. Příkladem tohoto CMM je Zeiss Metrotom. (2) (6) (8)



***Obrázek 10: Zeiss metrotom***

## 2.2 Snímací systémy užívané v CMM

CMM využívají k extrakci bodů snímací systémy. Tyto systémy se základně dělí na dotykové a bezkontaktní. Další dělení se provádí dle schématu na obrázku. CMM může být konstruováno s jedním snímacím systémem, možností výměny snímacího systému nebo s několika snímacími systémy (multisenzorový CMM).



**Obrázek 11: Rozdělení snímacích systémů CMM**

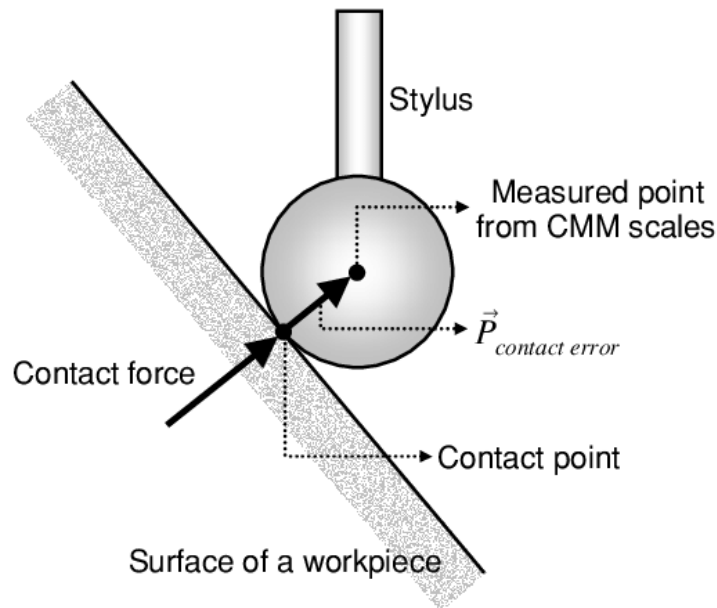
Volba vhodného snímacího systému je prováděna porovnáním vlastností snímacích systémů a jejich vhodností pro daný úkol. Vlastnosti konkrétních snímacích systémů závisí především na fyzikálním principu extrakce bodů.

V následující kapitole je cílem popsat snímací systémy užívané na CMM s důrazem na dotykové snímací systémy. Vzhledem k tématu této práce a k tomu, že pro měření úchylek kruhovitosti, válcovitosti a přímosti vnitřního elementu dílu se hodí pouze dotykové snímací systémy. (1) (2) (23)

### 2.2.1 Dotykové snímací systémy

Fungují na principu fyzického kontaktu měřicí sondy s povrchem. Tyto snímací systémy (sondy) jsou tvořeny: dotykem - snímacím tělesem (elementem), který je přímo v kontaktu s měřeným dílem, snímacím mechanismem, který obstarává za-

znamenání polohy extrahovaného body, a mezikusem (nejčastěji dříkem) nesoucím snímací těleso.



**Obrázek 12: Schéma odměření polohy reálného bodu dotyku**

CMM zná polohu středu, poloměr snímacího elementu a normálový vektor (vektor je poskytnut z CAD modelu) kontaktu. Díky tomuto je schopen dopočítat přesnou polohu dotyku.

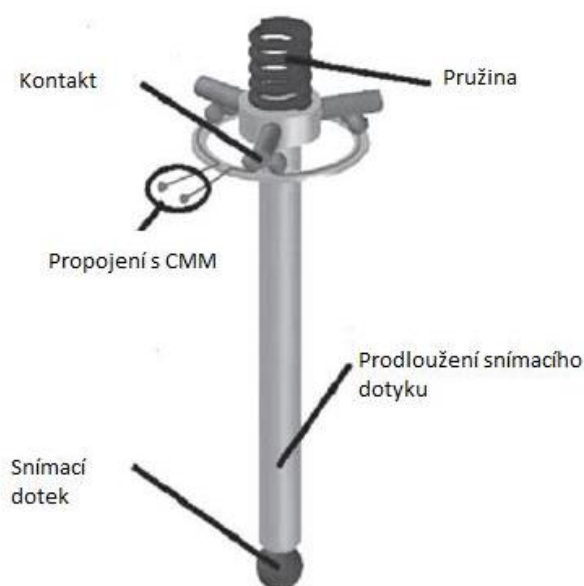
Tvar a velikost snímacího konkrétního snímacího tělesa se volí v závislosti na aplikaci měření. Pro správnou volbu je třeba uvážit tvar měřené plochy a měřené charakteristiky. Nejčastěji se setkáme s kuličkou, talířkem, diskem a válečkem.

Dotykové systémy jsou v průmyslové praxi děleny na spínací a skenovací. (2)  
(16) (19)

### 2.2.1.1 Spínací snímací systémy

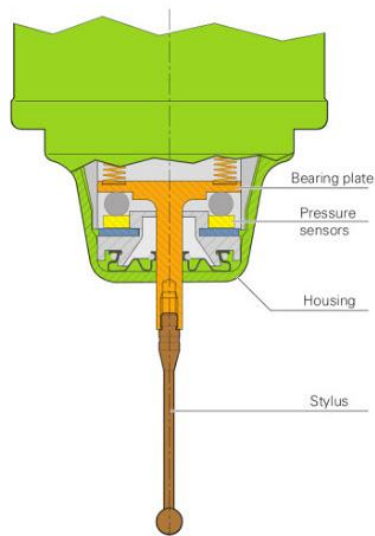
Principem je, že při kontaktu sondy s povrchem dílu je pohyb CMM zastaven a je odečtena hodnota souřadnic odměřovacím systémem stroje. Výstupem je logická 0 či 1 a následné odečtení souřadnic dotyku. Tyto spínací systémy extrahují pouze jednotlivé body, jsou tedy využívány pro méně komplexní metrologické úlohy, při kterých tato vlastnost není omezujícím faktorem (např. jednoduché prizmatické prvky dílů). Nejčastěji je dřík uložen na 3 bodech. Dělí se na kinematické a tenzometrické.

Kinematické snímací systémy zaznamenají dotyk tím, že se rozpojí mechanismus, který je tvořen třemi válečky (jeden po  $120^\circ$ ). Každý váleček je uložen na dvou kuličkách. Rozpojením tohoto mechanismu dojde k rozpojení elektrického obvodu, respektive dojde ke změně odporu. Mechanismus se vrací do neutrální polohy silou pružiny, síla dotyku tedy musí být vyšší nežli přítlačná síla pružiny. Jde o sondy relativně levné, jejich nevýhodou je měnlivost sil dotyku v různých směrech dotyku snímacího tělesa s povrchem dílu. Z toho plyne, že jsou nepřesné. (2) (16) (19)



**Obrázek 13: Schéma kinematického spínacího systému**

Tenzometrické snímací systémy fungují na stejném principu jako výše zmíněné kinematické, ale sílu dotyku měří tenzometry (většinou 3, každý po  $120^\circ$ ). Po překročení určité síly je extrahován bod dotyku. Oproti kinematickým snímacím systémům jsou tenzometrické přesnější (dokáží pracovat s měnlivostí sil dotyku). Potřebují nižší síly pro zaznamenání dotyku, ale jsou dražší nežli kinematické systémy. Jsou mnohem přesnější a častěji užívané v praxi. (2) (24) (30)



**Obrázek 14: Schéma tenzometrického snímacího systému**

### 2.2.1.2 Skenovací snímací systémy

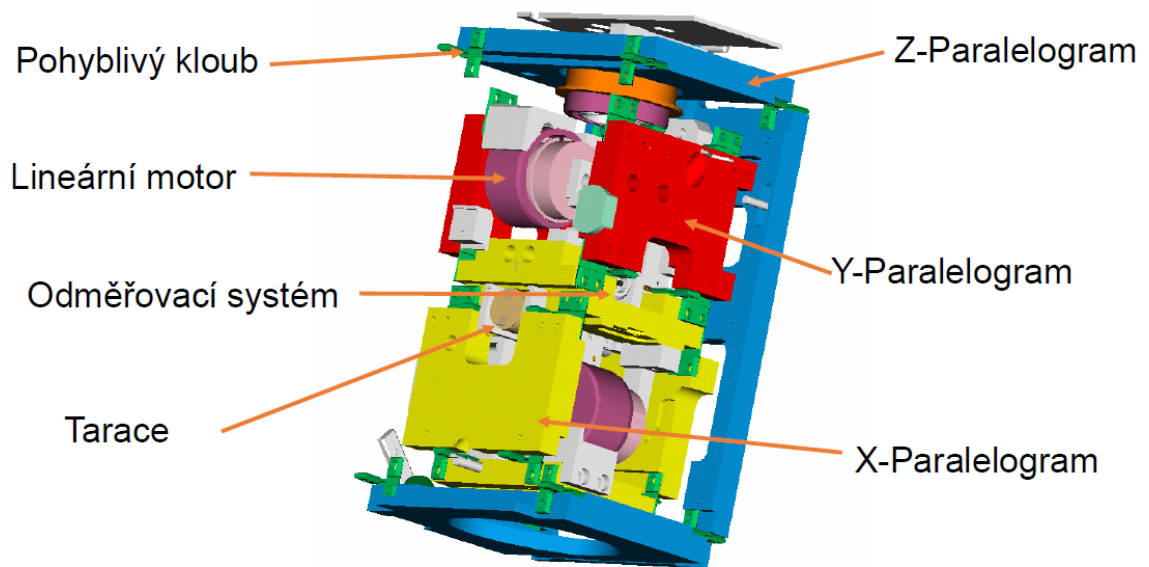
Jsou považovány za systémy modernější konstrukce, přičemž jsou schopny extrakce jak diskretních bodů, tak spojitého skenování bodů. Mohou být využívány pro měření a vyhodnocování geometrických charakteristik u složitějších ploch např. ozubených kol, lopatek rotorů... Jsou rychlejší a většinou i přesnější než spírací systémy. Počet snímaných bodů se pohybuje ve stovkách až tisících, závisí na nastavení CMM při měření.

Skenování probíhá v rozsahu všech 3 os (tzv. freefloating režim), nebo s uzamčenou jednou či více osami, které jsou zrovna nečinné. Může totiž dojít ke skluzu po např. šikmé ploše (tzv. slip effect), což by vneslo nepřesnost do měření.

Kvůli skenování už neplatí, že se CMM po dotyku s dílem zastaví, ale naopak se většinou pohybuje dál - při zachování kontaktu snímacího elementu (konstantní přitlačné síly) s dílem. To je zajištěno vazbou mezi odměřovacím systémem a pohonem CMM, který pohybuje samotnou sondou.

Dle způsobu generování přitlačné síly se sondy dělí na aktivní a pasivní.





**Obrázek 15: Aktivní pevná skenovací hlava**

Aktivní (pouze od firmy Zeiss) jsou ty, které mají sílu nastavitelnou a její velikost nezávisí na velikosti výchylky způsobené dotykem. Měřicí síla je umožněna různými způsoby, např. lineárními motory.

Pasivní mají měřicí sílu generovanou mechanickým elementem, například pružinou, tím pádem je velikost síly závislá na velikost výchylky způsobené dotykem.

Skenovací systémy jsou tvořeny třemi nad sebou uloženými paralelogramy, jejich účel je lineární vychýlení (aby bylo odměření přesné) při dotyku v jedné ose, proto jsou 3 (osy X, Y a Z). (2) (4) (6) (7)

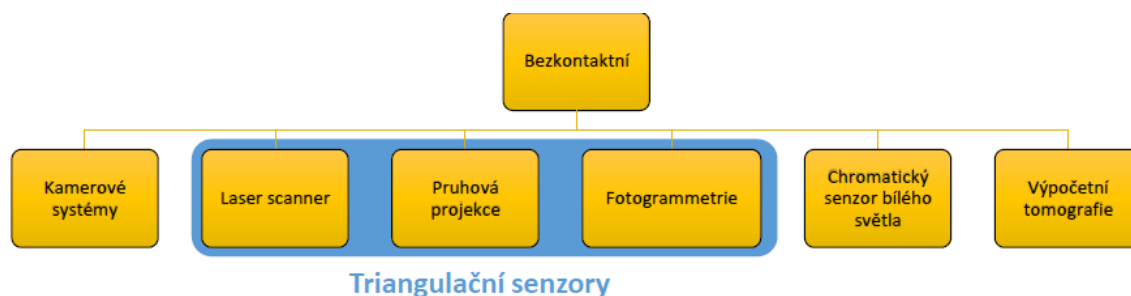
### 2.2.2 Bezdotykové

Není vyžadován fyzický kontakt mezi sondou a měřeným povrchem. Jsou to systémy rychlejší nežli kontaktní snímací systémy. Bývají voleny, pokud je snímání všech žádaných bodů obtížné nebo nemožné za pomoci dotykových snímacích systémů. To nastane hlavně v případech, že je měřený díl příliš velký, měkký nebo křehký. Velkou výhodou je i velmi nepravděpodobná kolize snímače s dílem.

Limitace dotykových snímacích systémů vyplývá hlavně z jejich fyzikální podstaty, např. příliš lesklé a transparentní povrchy znemožňují snímání a je třeba použít zmatňovacích laků. Také mají nižší přesnost než dotykové snímací systémy.

Při optickém skenování lze narazit na obtíž, že 3D objekt je transformován do 2D formátu. Aby nebyly důležité informace ztraceny, jsou využívány metody: triangulace, optická interference světla a měření doby letu světla. (2) (4) (6) (7)

Dělíme je dle schématu na obrázku.



**Obrázek 16: Rozdělení bezkontaktních snímačů**

### 2.2.2.1 Kamerové snímací systémy

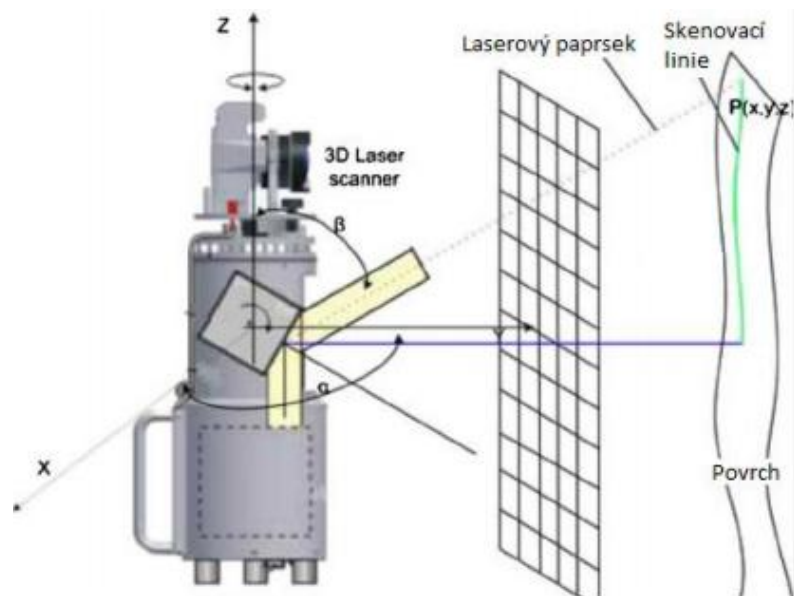
Kamerové snímací systémy se užívají v případě potřeby měření dílů, které mají malé či nevýrazné 2D geometrické prvky. Další užití nacházejí u měkkých dílů (pryž, plast, kevlar...). Příkladem těchto systémů je senzor HP-C-VE, který najde využití hlavně u měření drobných geometrických prvků a snadno deformovatelných dílů. (2) (12) (11)



**Obrázek 17: HP-C-VE Vision Sensor**

#### **2.2.2.2 Laser scanner**

Laser scanner funguje na principu vysílání laserového paprsku na povrch dílu. Paprsek se při kontaktu odrazí zpět a při návratu do scanneru je vyhodnocen. Vzdálenost je poté určena podle doby letu paprsku. Zakřivení povrchu dílu je zjištěno z úhlu, pod kterým se paprsek vrací do scanneru. Z těchto informací je software schopen určit polohu bodu dotyku paprsku s tělesem. Díky pohybu scanneru okolo dílu, či naopak, je laser scanner schopen naskenovat celý povrch měřeného dílu. (2) (10) (15)



**Obrázek 18: Schéma funkce laser scanneru**

### 2.2.2.3 Pruhová projekce

Proužková projekce funguje na principu toho, že na povrch měřené součásti jsou projektorem promítány proužky světla a pomocí kamery (či kamer) je objekt snímán. Souřadnice bodů jsou určovány podle úhlů svíraných mezi paprsky na povrchu součásti. Přesnějšího měření lze dosáhnout promítáním různých vzorů rozdílných od pruhů. (2) (6) (7)

Příkladem tohoto senzoru je Zeiss COMET.



**Obrázek 19: Zeiss COMET**

#### **2.2.2.4 Fotogrammetrie**

Fotogrammetrie je optickou měřicí metodou. Za jejího užití lze zjistit tvar, rozměr a polohu geometrického prvku či dílu. Nosičem informace je světlo. Funguje na principu pořízení několika obrazových záznamů (nejčastěji foto). Z těchto záznamů software zrekonstruuje 3D měřeného objektu. Výstupem mohou být: souřadnice, geometrické parametry či grafické formy, např. mapy a obrazy. Příkladem tohoto senzoru je Viva TS 11. (2) (7) (8)



**Obrázek 20: Viva TS11**

#### **2.2.2.5 Interferometry bílého světla**

Interferometrie bílého světla je interferometrická měřicí metoda, která používá světlo s velkou šířkou spektra. Je používána na především na měření vzdálenosti. Tato metoda slouží především k proměřování výškových profilů technických předmětů. Tato metoda dosahuje, jako jedna z mála metod na měření povrchů, nejistot okolo  $1\mu\text{m}$ . Jako zdroj se využívají především různé druhy LED (Light-Emitting Diode) diod. Příkladem tohoto senzoru je Hexagon metrology PRETI-TEC. (2) (22)



**Obrázek 21: Hexagon metrology Precitec**

## 3 Postup měření na CMM

Měření na CMM má pevně dané pořadí operací při měření nového dílu.

### 3.1 Analyzování výkresové dokumentace

Na základě výkresové dokumentace a charakteru samotného dílu se volí vhodná technologie.

Analyzování výkresové dokumentace je prvním krokem při měření dílu a odvíjí se od něho další kroky měření.

Ve výkresové dokumentaci konstruktér určí požadované parametry dílu a na CMM se po výrobě tyto parametry kontrolují. Na CMM jsou především měřeny rozměrové charakteristiky, geometrické tolerance tvaru a polohy a profil povrchu.  
(2)

### 3.2 Volba upnutí dílu

Díky znalosti výkresové dokumentace může být zvolena vhodná metoda upnutí. Volba upnutí a konfigurace snímacího systému úzce navazují a je třeba je řešit v návaznosti na sebe.

Upnutí je voleno tak, aby zvolenému snímacímu systému byly zpřístupněny všechny měřené charakteristiky a díl nebyl deformován. Vhodného upnutí dílu se dosahuje pomocí speciálních přípravků (v případě složitých tvarů), svěráků, upínek atd.

Svěráky se používají pro běžné součásti, jsou velmi univerzální. Ukazují se být nedostatečnými, pokud by bylo zapotřebí upnout komplexní díly.





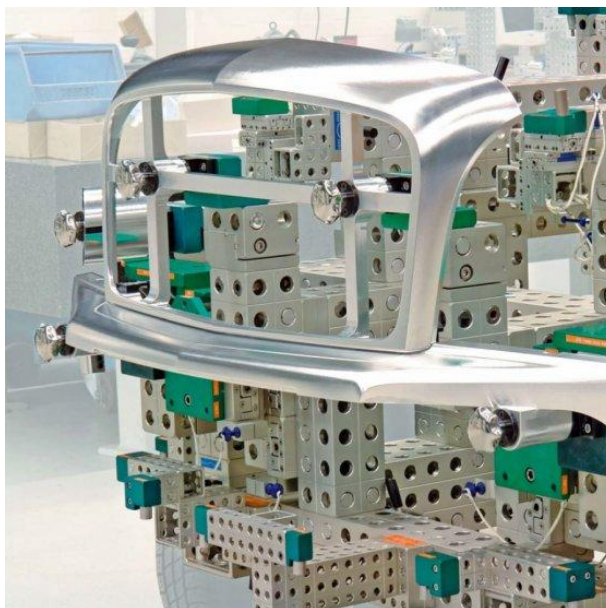
**Obrázek 22: Svěrák pro CMM**

Specializované přípravky se využívají, pokud je příliš složité díl upnout do strojního svěráku či pomocí upínací stavebnice, ale musí se vzít v úvahu, zda se vyplatí. Takovéto přípravky se tedy vyrábí pouze pro takové série dílů, aby se investice do přípravku vrátila.



**Obrázek 23: Příklad užití měřicího přípravku na měření světlometů**

Upínací stavebnice, např. Alufix, mohou do velké míry nahradit specializované přípravky. Jsou ve výsledku levnější než specializované přípravky, ovšem stavba upnutí může trvat dlouho a při velké variabilitě měřených dílů může negativně ovlivnit efektivitu měrového střediska. (2)



**Obrázek 24: Příklad použití alufixu**

### 3.3 Konfigurace snímacího systému

Konfigurací snímacího systému je rozuměn tvar, rozměr a tuhost snímacího systému a tvar snímacího elementu. Nejlepší přesnost bude mít vždy krátký a tuhý snímací systém. Komponenty dotykového snímacího systému se dodávají ve formě stavebnice (upínací talířek, kostka, prodloužení a snímací element). Požadovaná konfigurace je poté složena metrologem.

Nejčastěji se setkáme s jedním snímačem nebo uspořádáním do hvězdy. Koncové dotyky jsou nejčastěji rubínové kuličky (viz. kapitola dotykové snímací systémy). Jednotlivé snímače mají omezení, co se týče max. hmotnosti a max. délky prodloužení. V měřícím systému můžeme jednotlivým dotykům přiřadit název.

Jednotlivé snímací systémy mají omezení hmotnostní, odsazení do strany či možného nevyvážení. (2)





**Obrázek 25: Příklady snímacích doteků a konfigurací**

### **3.4 Kvalifikace snímacího systému**

Kvalifikace se ideálně provádí při každém sestavení nové konfigurace případně zapnutí CMM, lze také nastavit určité časové intervaly kvalifikace např. jednou týdně (za směnu). Zajišťuje informaci o poloze dotyku vzhledem k referenčnímu snímači a o rozměru snímacího elementu.

Při tomto procesu se používá kalibrační koule s malou chybou tvaru (0,1 mikrometru) umístěná na stole CMM, jejíž rozměry jsou známé a zapsané v softwaru CMM.

Poloha kalibrační koule je nejprve zaměřena referenčním snímačem. Následuje její zaměření v identické poloze jednotlivými dotyky, které má být kvalifikováno. Každý dotyk používané konfigurace snímačů (rozměr a poloha) je tak vždy přepočítáván vzhledem k referenčnímu snímači. (2)

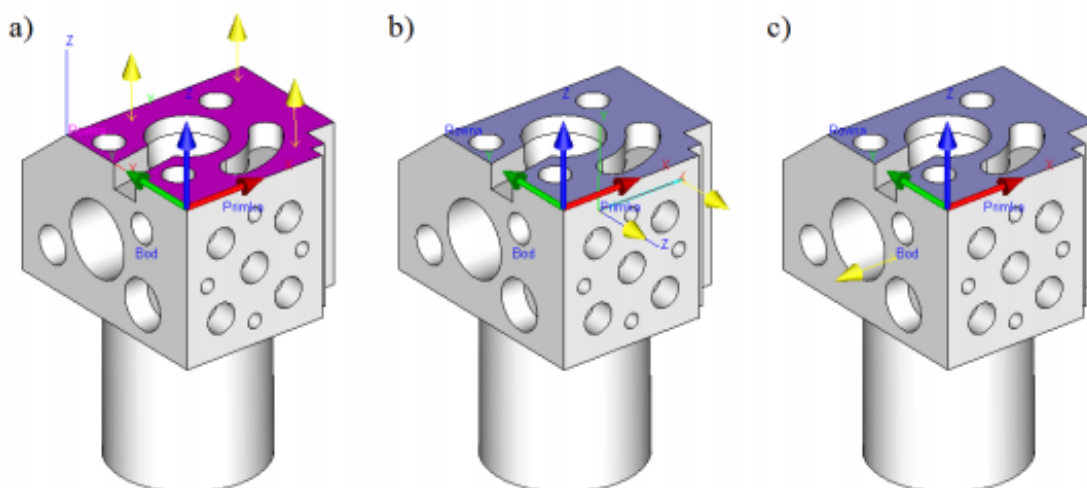
### **3.5 Vyrovnání**

Jedná se o určení polohy a orientace měřeného dílu v měřicím prostoru a určení lokálního souřadnicového systému součásti. V softwaru Calypso je používáno několik základních metod vyrovnání: standardní s využitím základních geometrických prvků (3-2-1), 3D připasování, RPS a P6.

Každé těleso v prostoru má šest stupňů volnosti. Těleso může rotovat kolem tří os (3 stupně), které jsou na sebe kolmé a tvoří kartézský souřadný systém (X, Y, Z). Dále se těleso může pohybovat po směru těchto os (3 stupně). Součet výsledných možností pohybu dává 6 stupňů volnosti. (2) (15) (16) (23)

### 3.5.1 Standardní metoda

Nebo také zarovnání na geometrické prvky tzv. 3-2-1. Vychází z bodů se jmenovitými souřadnicemi určenými 3 až 6 elementy. Pro nastavení souřadného systému určujeme, které souřadnice elementu jsou pevné, a které volné. Zde je jedna souřadnice třikrát dána pevně, druhá souřadnice dvakrát a třetí jednou. Díky tomuto počtu pevně daných elementů lze odebrat 6 stupňů volnosti. (2) (13) (16) (9)

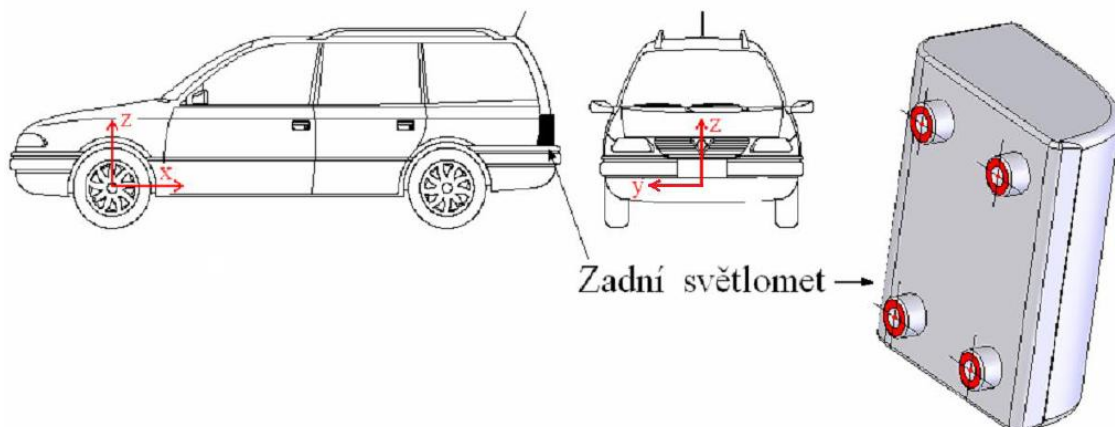


**Obr. 3.1** Určení a) roviny, b) přímky a c) bodu na součásti

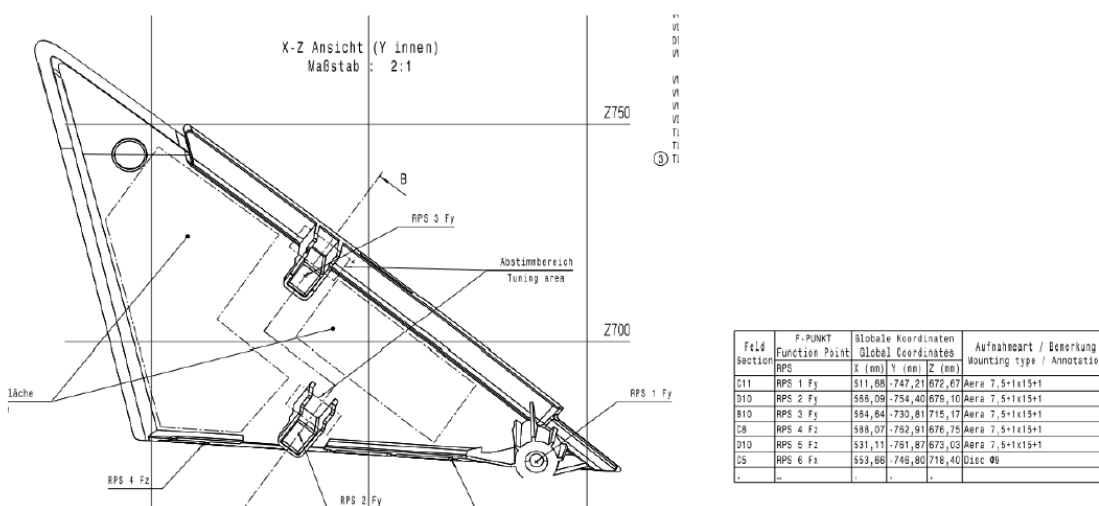
### ***Obrázek 26: Možné užití metody 3-2-1 na cvičném tělese***

### 3.5.2 Systém referenčních bodů – RPS

Je používán především v automobilovém průmyslu. Vyrovnání RPS (Referenzpunktsystem, Reference point system) vychází z normy VW 01055. Systém RPS je založen na vytvoření souřadnicového systému, ve kterém rozměry budou odpovídat rozměrům v souřadném systému zavedeném pro celkovou sestavu. Například pokud by byl u automobilu souřadnicový systém s počátkem uprostřed přední nápravy a měřil by se pouze zadní světlomet, tak naměřené body budou mít polohu uvedenou vzhledem k souřadnému systému na přední nápravě. (2) (9)



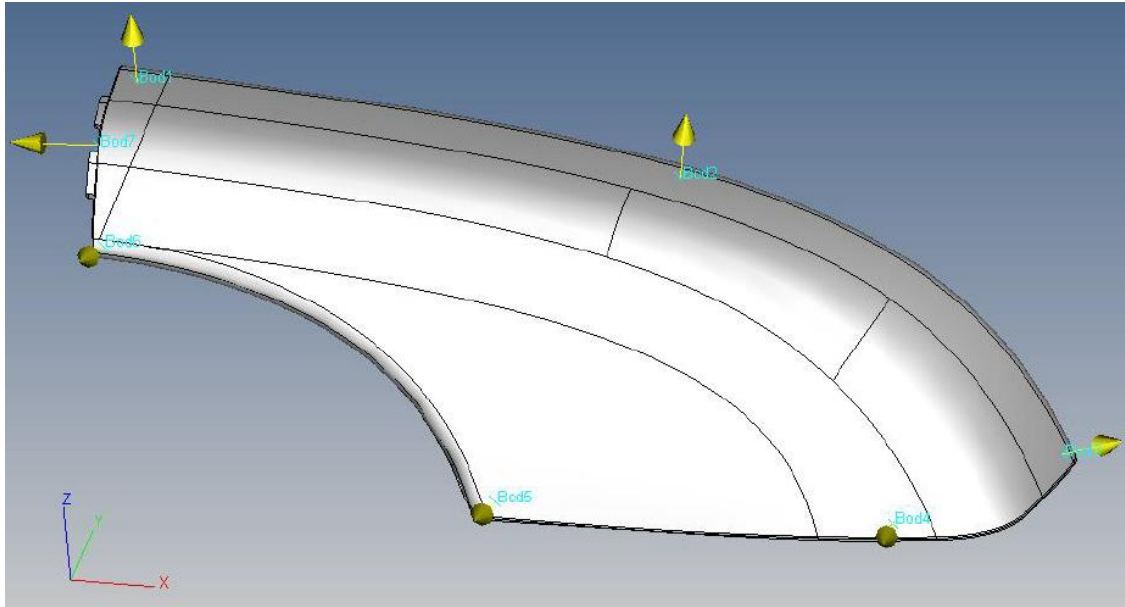
**Obrázek 27: Naznačení principu vyrovnání RPS**



**Obrázek 28: Tabulka rozměrů u vyrovnání RPS**

### 3.5.3 3D přizpůsobení (best fit)

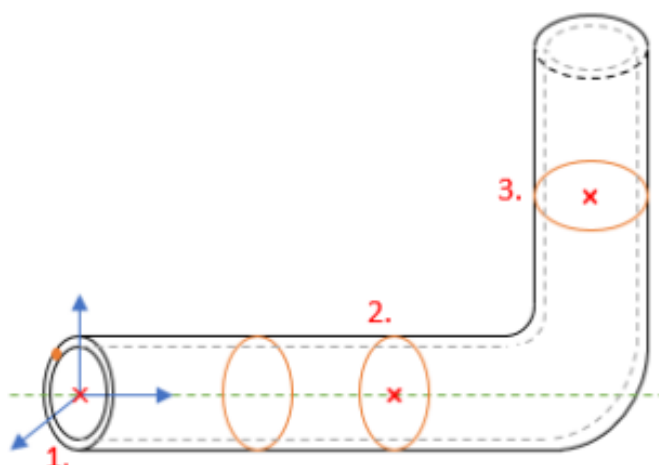
Metodu 3D přizpůsobení pro početní vyrovnání měřeného dílu užíváme, pokud nejsou jednoznačně stanoveny vztažné elementy. Tato metoda je vhodná pro měření volných tvarů. Díky velkému množství bodů sejmutých při vyrovnání vypočte software vzhledem k CAD modelu ideální polohu souřadného systému, a tak zaručí optimální přizpůsobení pro geometrii měřeného dílu. (2) (9)



**Obrázek 29: Příklad zvolených bodů pro 3D připasování**

#### **3.5.4 Metoda P6**

Počátek systému je stanoven prvním bodem. Přidáním druhého bodu tyto dva body definují hlavní osu. Třetí bod určí otáčení kolem hlavní osy. Používá se především u měření rotačních součástí např. trubek. (2) (9)



**Obr. 3.10** Vyrovnání součásti metodou P6

### **Obrázek 30: Příklad užití metody P6 u trubky**

#### **3.6 Extrakce bodů a výpočet geometrických prvků**

Extrahování bodů (nasnímání bodů na povrchu součásti snímacím systémem pomocí souřadnic  $x, y, z$ ) ovlivňuje tzv. strategie měření – typ dráhy, hustota a počty snímaných bodů, rychlost snímání.

Vzhledem k tomu, že skenování je náchylné k zanesení chyb do měřených výsledků, je nutné používat nástroje pro eliminaci odlehlých hodnot a veškeré kontinuálně snímané body filtrovat.

Z extrahovaných bodů vypočítáváme geometrické prvky (elementy), každý prvek má minimální počet požadovaných bodů, kterými je definován. V praxi je ovšem měřeno vždy více bodů, proto je nutné využívat různé výpočetní metody těchto prvků. (2) (9)

#### **3.7 Vyhodnocení měřených charakteristik dílu**

V okamžiku kdy je z extrahovaných bodů vypočítán geometrický prvek zvolenou metodou, může z vyhodnocena celá řada charakteristik (rozměr, poloha chyba tvaru). Tyto měřené hodnoty jsou dále porovnávány s hodnotami jmenovitými a jejich tolerancemi.

Výsledky jsou dnes běžně exportovány do modulu informačního systému pro řízení výrobních procesů.

Při vyhodnocování se porovnávají rozměry a geometrické specifikace naměřeného dílu s předepsanými požadavky na díl. Výstupem měření je měřicí protokol, ve kterém se vyhovující hodnoty znázorní v zeleném rámečku a nevyhovující v červeném. (2)



## 4 Strategie měření při kontrole dílů na CMM

V praxi jsou nejčastěji využívány CMM s dotykovým snímacím systémem, ať už se využijí pevné či rotační snímací systémy. Rotační se užívají kvůli své flexibilitě při měření velmi členitých součástí, v případech, že je zapotřebí více tvarů snímacích elementů. Pevné se využijí v případě, kdy se musí zachovat velká přesnost. V této práci se budeme zabývat měřicími programy, které využívají pevných měřicích systémů pro zachování vysoké přesnosti.

Pojem měřicí strategie zahrnuje volitelné parametry jako: dráha snímacího elementu, skenovací rychlost, počet bodů (vzdálenost bodů od sebe), parametry filtru (pro filtrování nasnímaných bodů), eliminace odlehlých bodů a způsob výpočtu geometrických charakteristik.

Měřicí strategii určuje programátor CMM ve formě tzv. plánu měření. Správnost měřicího plánu je podstatně ovlivněna volbou měřicí strategie. Je nutné, aby zvolená měřicí strategie byla vhodná pro specifický úkol, a tím pádem schopná poskytnout reálný obraz o stavu měřeného dílu.

Pro zvýšení produktivity měření při zachování správnosti měření se hlavně optimalizují parametry rychlosti skenování a vzdálenosti bodů. Nicméně pokud budeme požadovat, abychom vyextrahovali stále stejný objem informací, tak je zapotřebí měnit pouze rychlost skenování. Nadále je možné produktivitu zvýšit úpravou neměřicích drah (přejezdy a bezpečné polohy), změnou snímací hlavy či zlepšením počítačového vybavení.

### 4.1 Tvar snímací dráhy

Tvar snímací dráhy určuje dráhu, již vykoná měřicí element po měřeném povrchu. Volí se pro jednotlivé geometrické prvky měřeného dílu. Dráha je volena na základě typu geometrického prvku, jeho umístění a účelu pro nějž prvek měříme.

Metodu pro jeden geometrický prvek můžeme volit z několika možností, pro účely této práce následují možnosti v softwaru Calypso. Na obrázku lze vidět, jaké geometrické prvky mohou být měřeny jednotlivými měřicími dráhami. (2) (9)

<b>Path generation method</b>	<b>Features</b>
Circle Path	Circle, Cylinder, Cone, Sphere
Large (radial) circle path	Torus
Small (axial) circle path	Torus
Circle on Plane	Plane
Linear paths	Cylinder
Line Auto Path	2D Line

**Obrázek 31: Vhodně tvary drah pro charakteristiky**

## 4.2 Rychlost skenování

S vyšší rychlostí skenování se rychleji mění směr normálového vektoru, normálový vektor ovlivňuje výpočet bodu dotyku. Díky tomu se např. při měření průměrů (kruhovitosti) budeme potýkat s nepřesnostmi při klesajících měřených průměrech z důvodu náročnějšího řízení CMM. Při rostoucí rychlosti pohybů částí CMM bude růst jejich setrvačnost, což se také negativně projeví na měření. Tyto vlivy se mohou dále projevovat ohýbáním snímacího systému, tedy vznikem dalších nepřesností.

Proto je zapotřebí znát vliv dynamických účinků na přesnost měření použitého CMM. Při tvorbě měřicího plánu musí být zvolen vhodný kompromis mezi rychlostí skenování (produktivity měření) a přesností (opakovatelností) měření.

## 4.3 Vzdálenost bodů

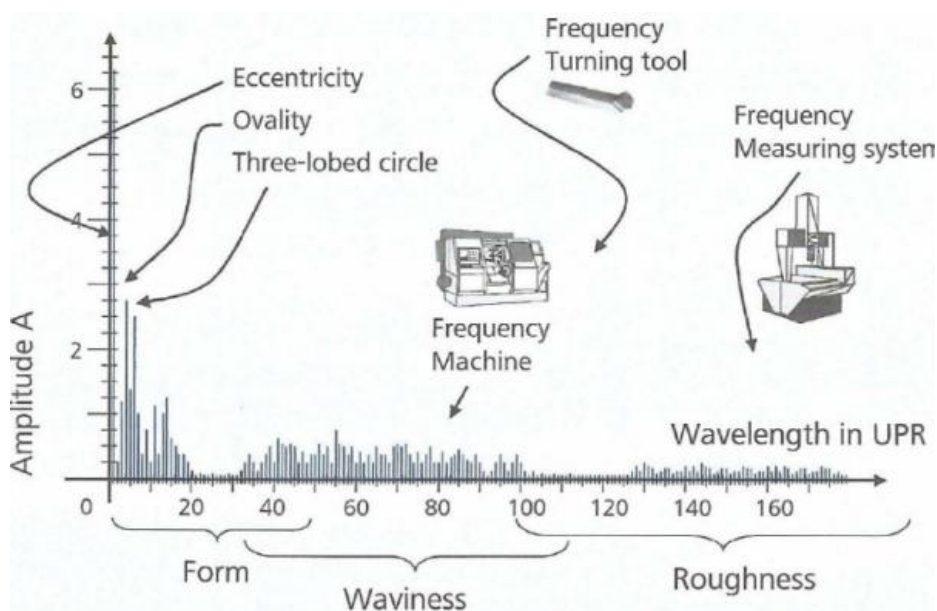
Při měření na CMM se s vyšším počtem naměřených bodů při použití optimální strategie měření dostáváme blíže k reálnému tvaru dílu. Vyšší počet bodů nám umožní lépe postihnout tvar měřeného dílu.

Pokud se uvede za příklad měření kruhovitosti či válcovitosti, bylo prokázáno několika studii, že je zapotřebí mnohem vyšší počet bodů, než je uváděno pro definování válce, popř. kruhu pro vyhodnocení geometrické tolerance.

## 4.4 Filtry

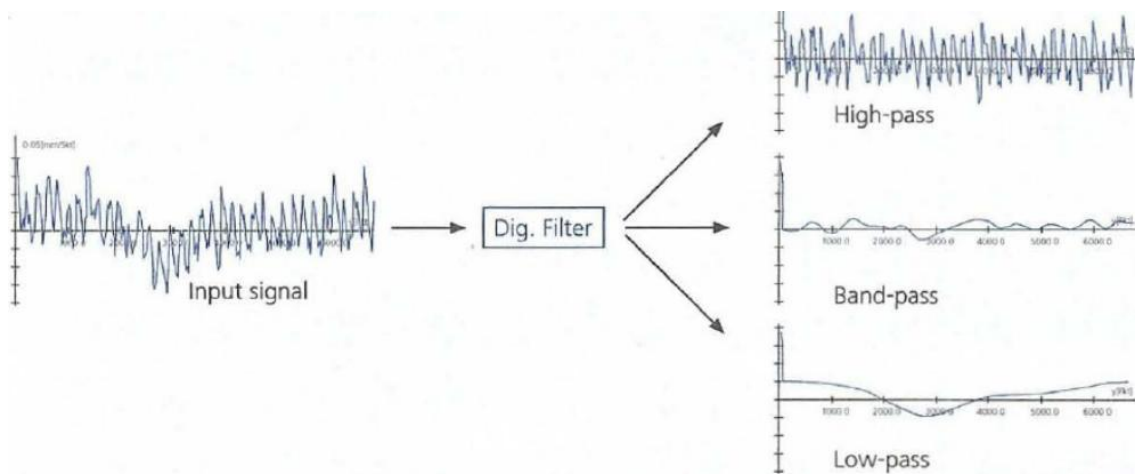
Filtry jsou používány pro eliminování harmonického obsahu měření. Většina měření bude mít vždy více harmonických obsahů lišících se od sebe jak vlnovou délkou tak amplitudou. Tento obsah je udáván v upr (undulation per revolution ne-

bo vln/ot - zvlnění na otáčku), tedy v počtu vrcholů např. na kruhovém profilu. Čím vyšší bude počet upr, tím se jedná o jemnější stopu na dílu. Například 20 upr bude způsobeno celkovou vadou tvaru dílu, 80 upr bude způsobeno vibracemi obráběcího stroje (soustruhu) a 140 upr bude znázorňovat profil povrchu dílu.



**Obrázek 32: Možné příčiny vlnitosti**

Filtry se tedy používají pro oddělení určitých rozsahů upr za účelem zkoumání určitých vlivů na výrobu dílu. Dělí se na low pass (nízkopásmový - ponechá chyby tvaru), high pass (vysokopásmový - ponechá vlivy profilu povrchu dílu.) a band pass (pásmový - ponechá vlnitost, tedy nedokonalosti povrchu, vzniklé nedostatečnou tuhostí soustavy stroj nástroj obrobek).



**Obrázek 33: Druhy filtrů**

Parametry filtru jsou voleny při tvorbě měřicího plánu, vybrané mohou být hodnoty upr popsané v normě ISO 4291(15, 50, 150, 500, 1500upr). Čím vyšší filtr, tím musí být vyšší počet naměřených bodů. Doporučené hodnoty průměru dílu ku upr ku počtu bodů lze nalznout v různých doporučujících tabulkách. Díky nastavené hodnotě upr jsme schopni ovlivnit velikost základní délky nebo tzv. cut-off, ta je volena z následující normalizované řady: 0,08 - 0,25 - 0,8 - 2,5 - 8,0 mm. Správná volba je velmi důležitá pro opakovatelnost měření. Zásady pro volbu základní délky podle GPS jsou obsažena v ČSN EN ISO 4288 a její velikost závisí především na výšce a rozteči nerovností profilu. (2) (18) (19) (20)

Critical wavelength	Probing points per mm	Step width
$\lambda_c$ [mm]	1 / [mm]	[mm]
0,25	> 28	0,0357
0,80	> 8,75	0,1143
2,5	> 2,8	0,357
8	> 0,875	1,143

Recommended filter setting and number of measuring points for flatness and straightness measurements

Form & waviness		
Form including chatter marks, e.g. noise		
Workpiece diameter [mm]	Critical wave number [UPR]	Probing points/circumference
bis 8	50	> 350
> 8 bis 25		
> 25 bis 80	150	> 1050
> 80 bis 250	500	> 3500
> 250	1500	> 10500

Only Form		
Standard form measurement, e.g. wear/pairing		
Workpiece diameter [mm]	Critical wave number [UPR]	Probing points/circumference
Up to 8	15	> 105
> 8 bis 25		
> 25 bis 80	50	> 350
> 80 bis 250	150	> 1050
> 250	500	> 3500

Only waviness		
periodic profile components, e.g. chatter mark size		
Workpiece diameter [mm]	Critical wave number [UPR]	Probing points/circumference
bis 8	15-150	> 350
> 8 bis 25		
> 25 bis 80	50-500	> 1050
> 80 bis 250		
> 250	150-1500	> 10500

**Obrázek 34: Tabulky doporučených poměrů hodnoty**

Limitní hodnoty na počty bodů pro zvolené UPR a požadavek na maximální velikost snímače vzhledem k velikosti měřeného prvku udává norma ISO 12181-2 viz tabulka níže. (2) (7) (8)

**Tabulka 1: ISO 12181-2**

<b>Longwave-pass filters</b>		
<b>Filter transmitting from 1 UPR to:</b>	<b>Minimum number of sample points:</b>	<b>Minimum <math>d:r^{1)}</math> ratio</b>
15	105	5
50	350	15
150	1050	50
500	3500	150
1500	10500	500

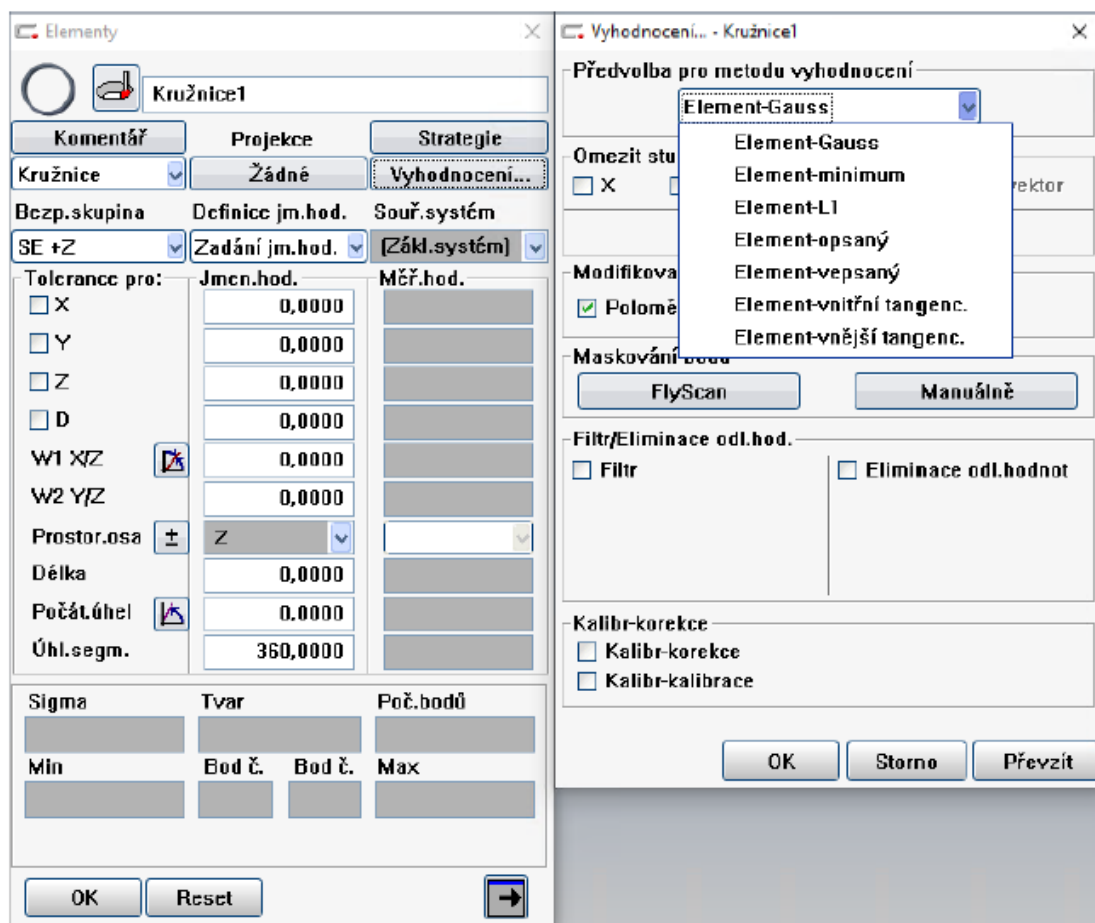
1) The  $d:r$  ratio is the ratio between the diameter  $d$  of the reference circle and the radius  $r$  of the stylus tip. If the  $d:r$  ratio is less than the value stated, the high UPR undulations of the feature within the transmission band will be distorted by the influence of the stylus tip.

#### **4.5 Eliminace odlehlých bodů**

Používá se pro eliminaci bodů, které byly zaznamenány buď chybou měření nebo vlivem měřicího prostředí, např. nečistoty na povrchu. Odlehlý bod se identifikuje tak, že se bod nachází mimo pásmo naměřených bodů o určený násobek směrodatné úchyly (nejčastější 3násobek). Parametry eliminace jsou voleny při tvorbě měřicího plánu. (2)

#### **4.6 Způsob výpočtu geometrických charakteristik**

Při kontrole dílu je možné, že je zapotřebí se podívat na naměřená data z několika různých úhlů pohledu, aby bylo možné určit potřebná data a z nich vyvodit vhodný závěr. Tyto různé „pohledy“ umožňují rozdílné způsoby výpočtu geometrických charakteristik.



**Obrázek 35: Okno metody vyhodnocení pro kružnici - Calypso**

**Tabulka 2: Tabulka vhodných metod připasování pro geometrické charakteristiky**

Tab. 1 Použitelnost metod připasování

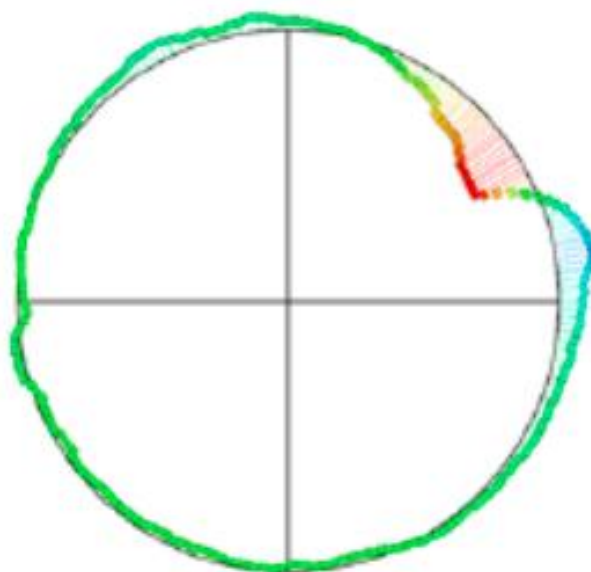
ELEMENT	GAUSS	MINIMUM	ELEMENT L1	OPSANÝ / VEPSANÝ	TANGENCIÁLNÍ
KRUŽNICE	X	X	X	X	X
KOULE	X	X	X	X	X
VÁLEC	X	X	X	X	X
KUŽEL	X	X	X	X	X
ROVINA SYMETRIE	X	X	X	X	X
2D PŘÍMKA	X	X	X		X
3D PŘÍMKA	X	X	X		
TORUS	X		X		
ELIPSA	X				
OBDELNÍK	X				
PODÉLNÝ OTVOR	X				
BOD	X				

LSC (Least Square Circle), neboli také Gaussova metoda. Tato metoda nejdříve určí tvar a velikost konkrétní geometrické charakteristiky, až druhotně součet

čtverců odchylek od charakteristiky. Poté je zapojena výpočtová metoda, která minimalizuje sumu těchto čtverců. Zabývá se jí norma ISO 4291.

Tato metoda je rozsáhle vyžívána neboť byla v rámci měřicích software implementována jako první, dále také poskytuje stabilní výsledky i v případě, že měřené body nejsou filtrovány.

Velmi podobnou metodou je metoda elementu L1. U metody elementu L1 jde o minimální součet absolutních hodnot odchylek. Vyhodnocení je nenáročné a výsledky jsou jednoznačné. Metoda element L1 není citlivá na odlehlé hodnoty.

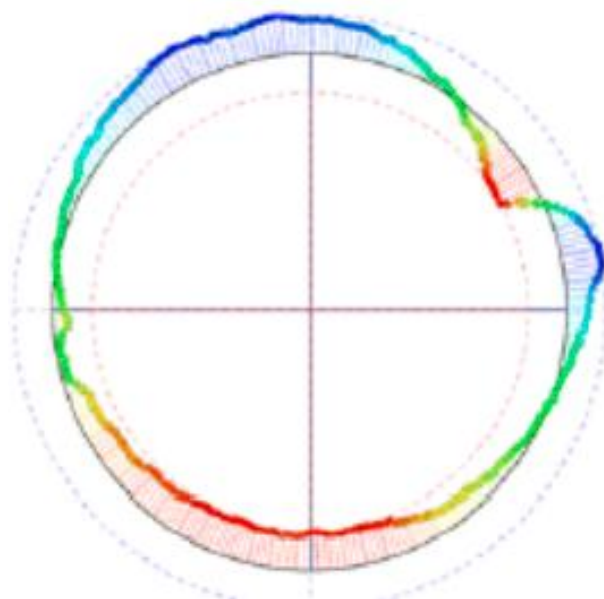


**Obrázek 36: Příklad LSC (Gaussovy) metody**

MZC (minimum zone circles), nebo také metoda kritéria minima, jsou prakticky dvě soustředné kružnice obklopující naměřený profil s nejmenšími radiální vzdálenostmi. Tato metoda je citlivá na odlehlé hodnoty. Pro správné vyhodnocení je doporučeno vysoký náměr bodů, jejich filtrace a eliminace odlehlých hodnot.

Této metody je možné užít pro měření vnitřních i vnějších charakteristik.



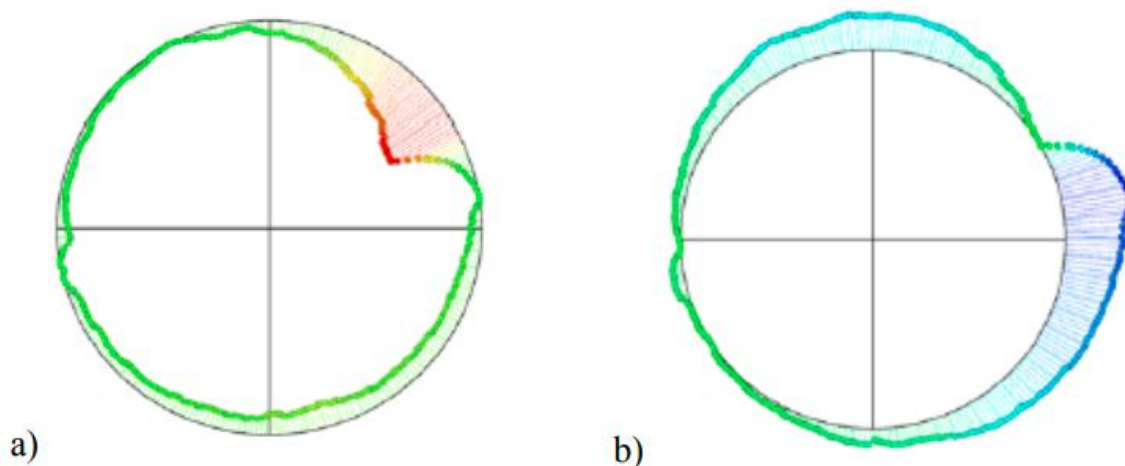


**Obrázek 37: Příklad MZC metody**

Metoda maximálního vepsaného/minimálního opsaného elementu, také nazývána MIC (Maximum Inscribed Circle)/MCC (Minimum Circumscribed Circle). Tato metoda potřebuje nejdříve najít střed a poloměr kruhu, tak aby odchylky bodů od vypočtené charakteristiky byly minimální. Postup výpočtu charakteristiky je znázorněn na obrázcích.

Principem této metody je, aby žádný bod neležel mimo vytyčené kružnice. Každý element musí být tak velký, jak je velké bodové rozhraní nasnímaných bodů (ať už nejmenší opsaný nebo největší vepsaný element).

Použití této metody přizpůsobení je užíváno v praxi pro výpočet rozměru a polohy středu geometrického prvku kružnice. MIC metoda je použita pro výpočet rozměru díry a MCC u výpočtu rozměru hřídele.



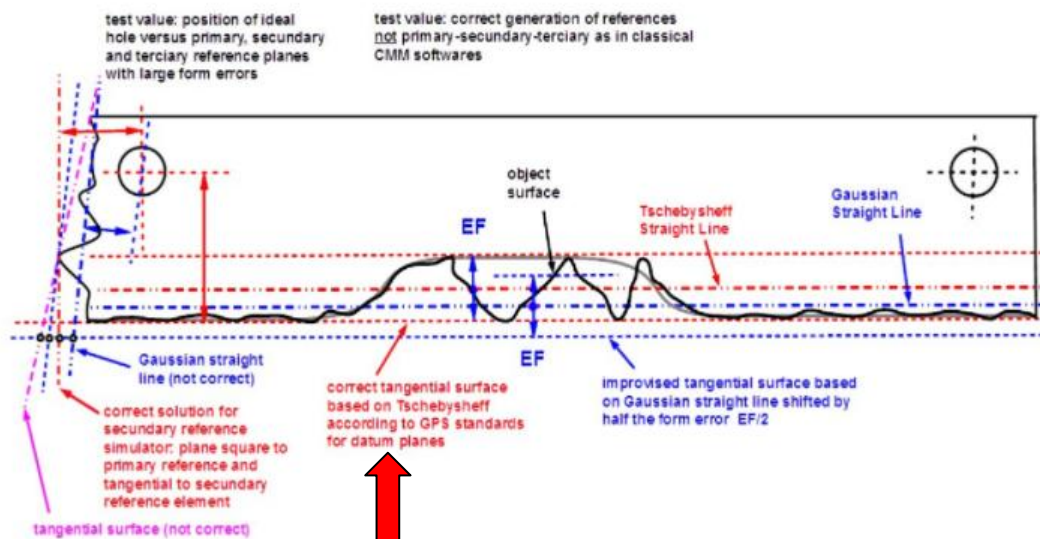
**Obrázek 38: Příklad metody a) min opsaného/ b) max vepsaného elementu**

(a) Point cloud	(b) Inner convex hull	(a) Point cloud	(b) Convex hull
(c) Max distance points	(d) Invalid combination	(c) Max distance points	(d) Search for 3 <sup>rd</sup> point
(e) Second max dis. points	(f) Final circle	(e) Second max. dist. points	(f) Final circle (Reject if point outside circle)

**Obrázek 39: Postup výpočtu maximálního vepsaného a minimálního opsaného kruhu**

Další metoda je metoda tangenciálního elementu vnější/vnitřní, při této metodě leží tangenciální element mimo měřený element. Všechny naměřené hodnoty se nachází mimo největší vepsaný element nebo uvnitř nejmenšího opsaného elementu. Tato metoda je citlivá na odlehlé hodnoty, je tedy zapotřebí eliminovat odlehlé hodnoty.

Nejčastěji je užitá při vyhodnocování roviny použité pro základnu tolerance. (2)  
 (13) (16)



**Obrázek 40: Příklad metod výpočtu, šipkou vyznačena metoda tangenciálního elementu**

## 5 Vliv jednotlivých parametrů na produktivitu a přesnost měření

V této kapitole bude shrnuto poznání z několika prací o vlivu rychlosti snímání bodů a jejich počtu na produktivitu a přesnost měření.

### 5.1 Vliv rychlosti snímání

V experimentu (26) bylo měření prováděno při stálém počtu měřených bodů na válcovém dílu. Měření bylo prováděno za cílem zjištění vlivu rychlosti na měření přímosti na válcové ploše. Měření bylo prováděno na stroji Zeiss Prismo. Pro 1000 bodů se měnila měřicí rychlost od 5 do 20 mm/s při kroku 5 mm/s.

Výsledky zobrazené v tabulce níže ukázaly, že se zvyšující se rychlostí klesá chyba přímosti. Poměr mezi minimem a maximem je 50%. Tento závěr popisuje realitu jen částečně, protože zpravidla lze s navyšováním rychlosti snímání očekávat nárůst chyby tvaru. Nejpravděpodobnější je, že se díky relativně nízkým rychlostem v experimentu nedostali na úroveň, kde by chyba tvaru začala stoupat.

**Tabulka 3: Výsledky experimentu 19**

*Table 2. Results of the study on the influence of scanning speed on measurement results of straightness deviations*

No.	Scanning speed [mm/s]	Sampling points number	Straightness deviation STRt [mm]
1.	5	1000	0,0062
2.	10	1000	0,0060
3.	15	1000	0,0051
4.	20	1000	0,0044

V experimentu (25) se během měření porovnávaly následující parametry: index způsobilosti měřidla ( $C_g$ ), kritický index způsobilosti měřidla ( $C_{gk}$ ) a výběrová směrodatná odchylka ( $s_g$ ). ( $T$  - šířka tolerančního pole). Měření bylo prováděno za účelem zjištění vlivu rychlosti skenování a průměru měřeného průměru na chybu kruhovitosti. K měření byl použit stroj Zeiss Prismo a měřené díly byly kalibrační kroužky s maximální chybou kruhovitosti 0,02mm a tolerancí rozměru  $\pm 0,01$ mm. Rozměry kroužků byly 5, 20, 50 a 75mm a rychlosti skenování byla od 2 do 40 mm/s s krokem 2mm/s.

Index způsobilosti měřidla  $C_g$  se vypočte podle vztahu:

$$C_g = \frac{0,2 * T}{6 * s}$$

Kritický index způsobilosti měřidla  $C_{gk}$  se vypočte podle vztahu:

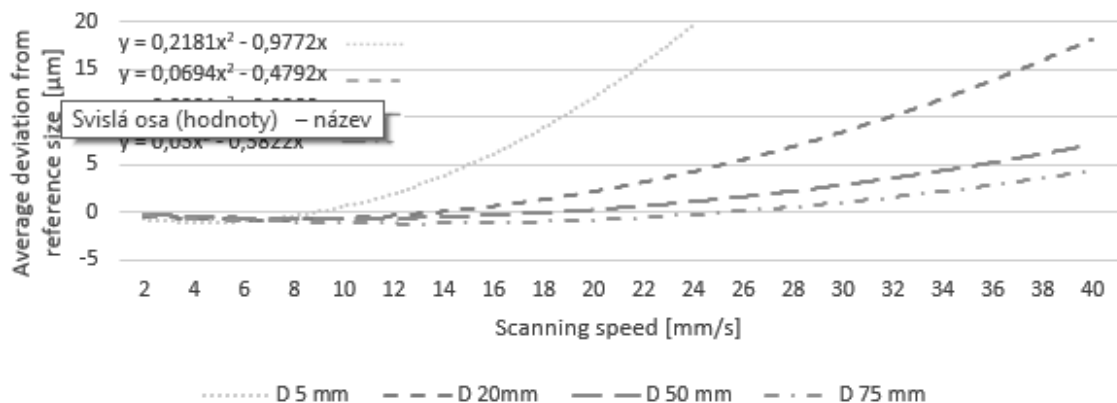
$$C_{gk} = \frac{0,1 * T - [x_g^- - x_m]}{3 * s_g}$$

Výběrová směrodatná odchylka se vypočte podle vztahu:

$$s_g = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_g^-)^2}$$

Výsledky experimentu ukázaly rychlejší nárůst odchylky u menších průměrů než u těch větších. Znalost tolerance průměru ukazuje chybnost měření při překročení:

- 10 mm/s u Ø5 mm
- 18 mm/s u Ø20mm
- 26 mm/s u Ø50mm
- 32 mm/s u Ø75mm

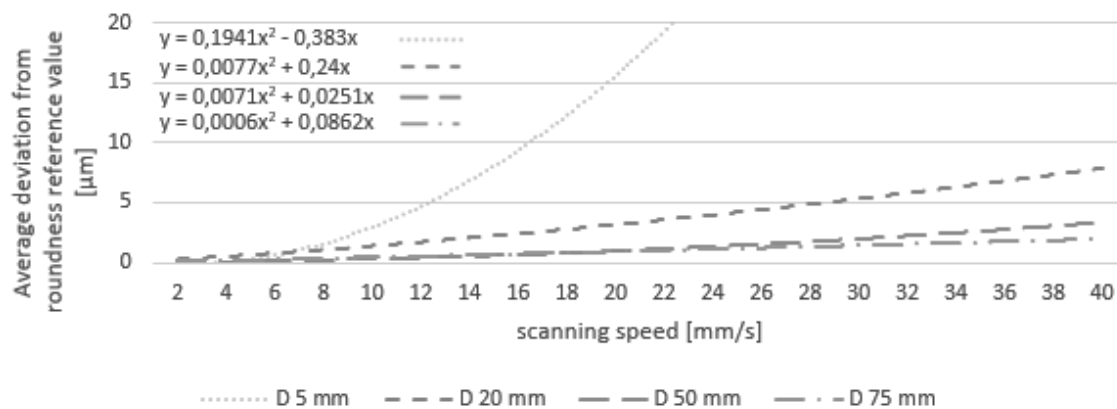


**Obrázek 41: Tabulka zobrazující průměrnou chybu měření průměru**

Dále výsledky experimentu ukázaly rychlejší nárůst chyby kruhovitosti u menších průměrů než u těch větších. Znalost tolerance kruhovitosti ukazuje chybnost měření při překročení:

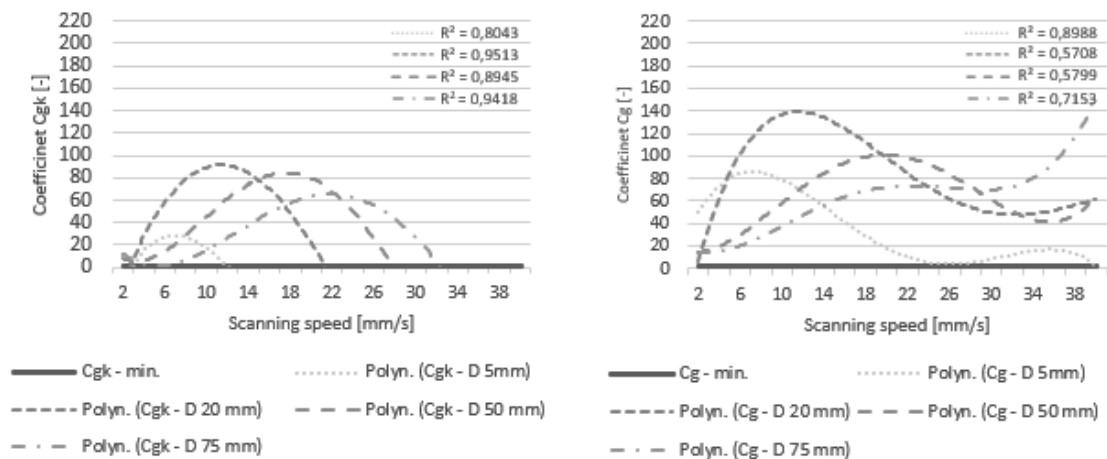
- 8 mm/s u Ø5 mm
- 12 mm/s u Ø20mm

- 28 mm/s u Ø50mm
- 30 mm/s u Ø75mm

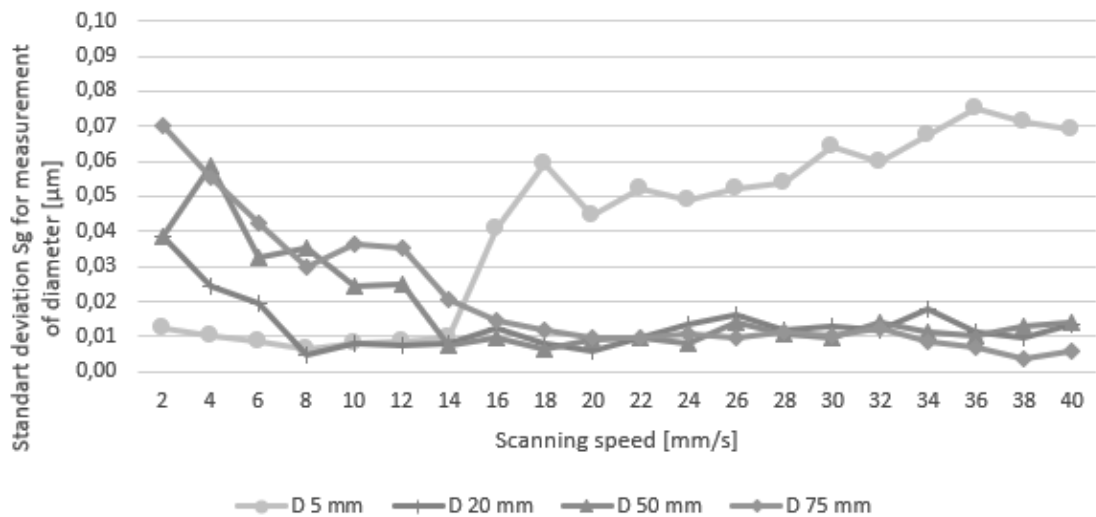


**Obrázek 42: Tabulka zobrazující průměrnou chybu měření kruhovitosti**

Hodnoty  $C_g$  získané z měřených hodnot ukazují poměr mezi přesností a tolerancí, bez zásahu lidského faktoru je opakovatelnost stále dobrá. Hodnoty  $C_{gk}$ , které ukazují přesnost měření, ukazují maximální rychlost pro určité diametry. Velké rozdíly mezi  $C_g$  a  $C_{gk}$  jsou dány  $s_g$ .



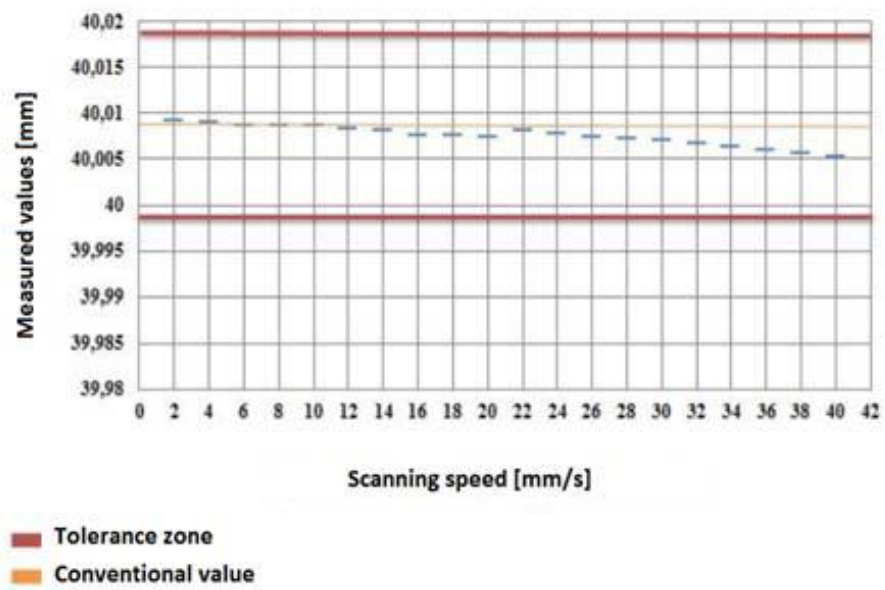
**Obrázek 43: Tabulka Cg a Cgk**



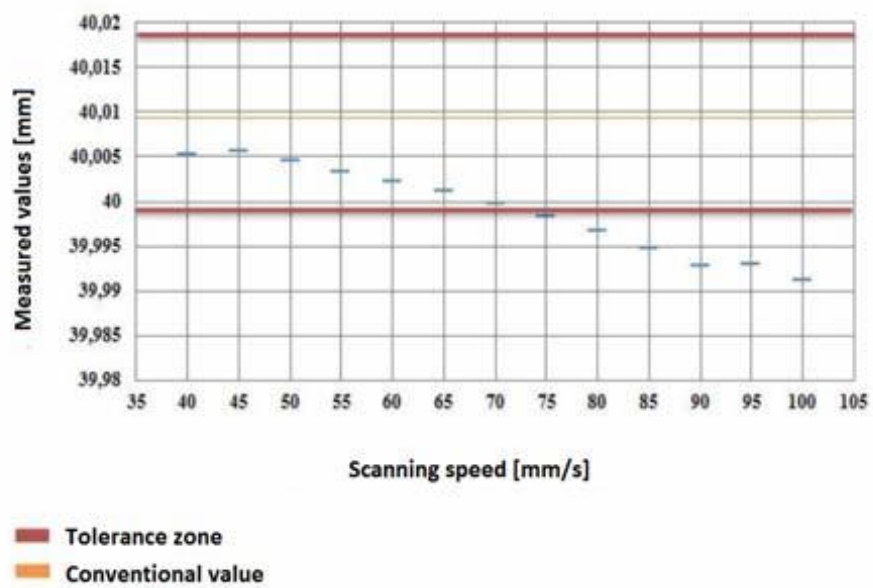
**Obrázek 44: Tabulka sg**

V experimentu (28) bylo provedeno 37 měření při rychlostech: od 2 do 40mm/s při kroku 2mm/s, od 45 do 100mm/s při kroku 5mm/s a od 110 do 150mm/s při kroku 10mm/s. Měřeným dílem byla součást s vnitřním průměrem  $\varnothing 40,009\text{mm}$  o vysoké kvalitě povrchu.

Výsledky experimentu ukazují, že při měření vnitřního průměru se se zvyšující rychlostí zvyšuje chyba průměru díky zmenšení počtu naměřených bodů a zvýšení setrvačných sil působících na stroj.

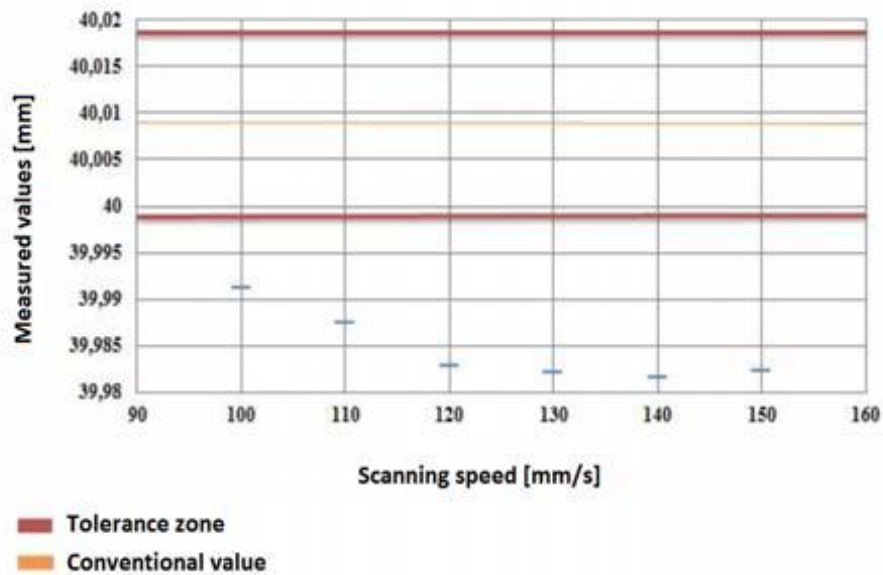


Obrázek 45: Tabulka naměřených hodnot při rychlostech 2-40mm/s



Obrázek 46: Tabulka naměřených hodnot při rychlostech 40-100mm/s





**Obrázek 47: Tabulka naměřených hodnot při rychlostech 100-150mm/s**

Veškeré experimenty v této kapitole poukázaly na to, že při měření je pro správnost velmi důležitá rychlost skenování. Při překročení vhodné rychlosti se zmenšuje hodnota  $C_{gk}$ , což ukazuje na nedostatečnou přesnost měření. Rychlost skenování se musí volit v návaznosti na konkrétní velikost a složitost měřené charakteristiky.

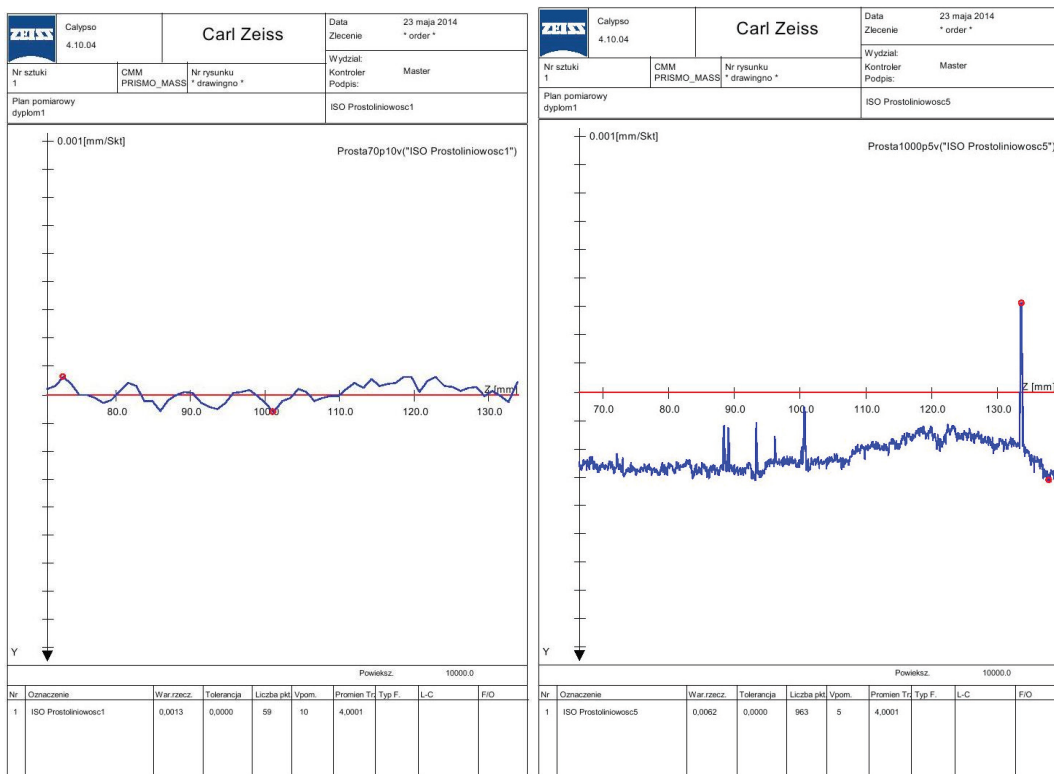
## 5.2 Vliv počtu bodů

V experimentu (26) bylo měření prováděno při stálé rychlosti skenování (10mm/s) na válcovém dílu. Měření bylo prováděno za cílem zjištění vlivu počtu snímaných bodů na měření přímosti na válcové ploše. Měření bylo prováděno na stroji Zeiss Prismo. Počet snímaných bodů byl: 70, 140, 350, 700 a 1000 bodů. Pro příklad jsou níže uvedeny protokoly pro 70 a pro 1000 bodů.

Snižováním počtu bodů se ztrácí určité informace o měřené charakteristice, konkrétně v tomto experimentu může (díky tabulce uvedené níže) být určen ideální počet bodů. Pokud porovnáme hodnoty chyby přímosti u různých počtů bodů vidíme, že po překročení 350 bodů jsou výsledky téměř stejné. Z toho lze vyvodit, že pro každou charakteristiku nastane chvíle, kdy počet bodů nemá dále smysl navyšovat.

**Tabulka 4: Výsledky měření experimentu 19**

Scanning speed [mm/s]	Sampling points number	Straightness deviation STRT [mm]
10	70	0,0013
10	140	0,0044
10	350	0,0061
10	700	0,0067
10	1000	0,0062



**Obrázek 48: Protokol pro 70 bodů (vlevo), protokol pro 1000 bodů (vpravo)**

## 6 Optimalizace plánu měření

Optimalizace měřicího programu je realizována za účelem snížení variability měřicího procesu, či zrychlení chodu měřicího programu. Experimenty provedené pro účel této práce jsou zaměřeny na zvýšení způsobilosti procesu měření.

Variabilita měření je nedílnou součástí, přičemž podstatnou je míra variability měření vůči šířce tolerančního pole (T). Tato míra je udávána koeficientem způsobilosti ( $C_g$ ), který udává opakovatelnost měření.

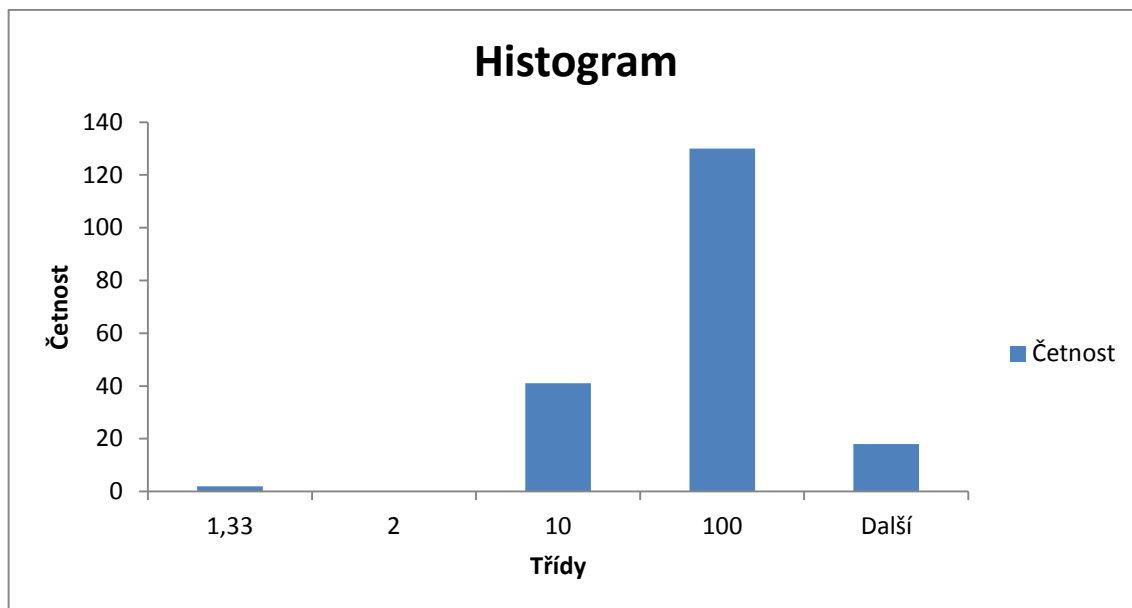
Měřicí proces je způsobilý, pokud je  $C_g$  vyšší než 1,33, pokud se vyžaduje vyšší způsobilost procesu, je tato hodnota se zvýšena na 1,67

### 6.1 Zhodnocení původního plánu měření

Zadaný plán měření byl vytvořen pro měření bloku motoru. Zadaný program byl opakovaně desetkrát spuštěn a to za účelem získání dostatku dat pro analýzu měření. Ze získaných dat byly vypočteny v Microsoft Excel výběrová směrodatná odchylka ( $s_g$ ), šířka tolerančního pole a koeficient způsobilosti  $C_g$ . Z vypočtených dat byly vybrány ty charakteristiky, u nichž se  $C_g$  blížil hodnotě 2. K vybrané charakteristice byla snaha najít podobnou charakteristiku (dále jen char.) pro srovnání (u některých char. nebylo možné najít podobnou). V měřicím programu byly nekonzistentní parametry u stejných či podobných charakteristik, např. se jednalo o aktivaci filtru, eliminace odlehlých hodnot či nastavené počty bodů.

**Tabulka 5: Tabulka četností**

Třídy (cca)	Četnost
1,33	2
10	41
100	130
Další	18



**Obrázek 49: Histogram Cg**

Výběr byl proveden ze základního počtu charakteristik 191. Vybráno jich bylo 13.

**Tabulka 6: Tabulka zkoumaných charakteristik (žlutě vyznačeny vybrané charakteristiky) barevně vyznačeny příbuzné charakteristiky**

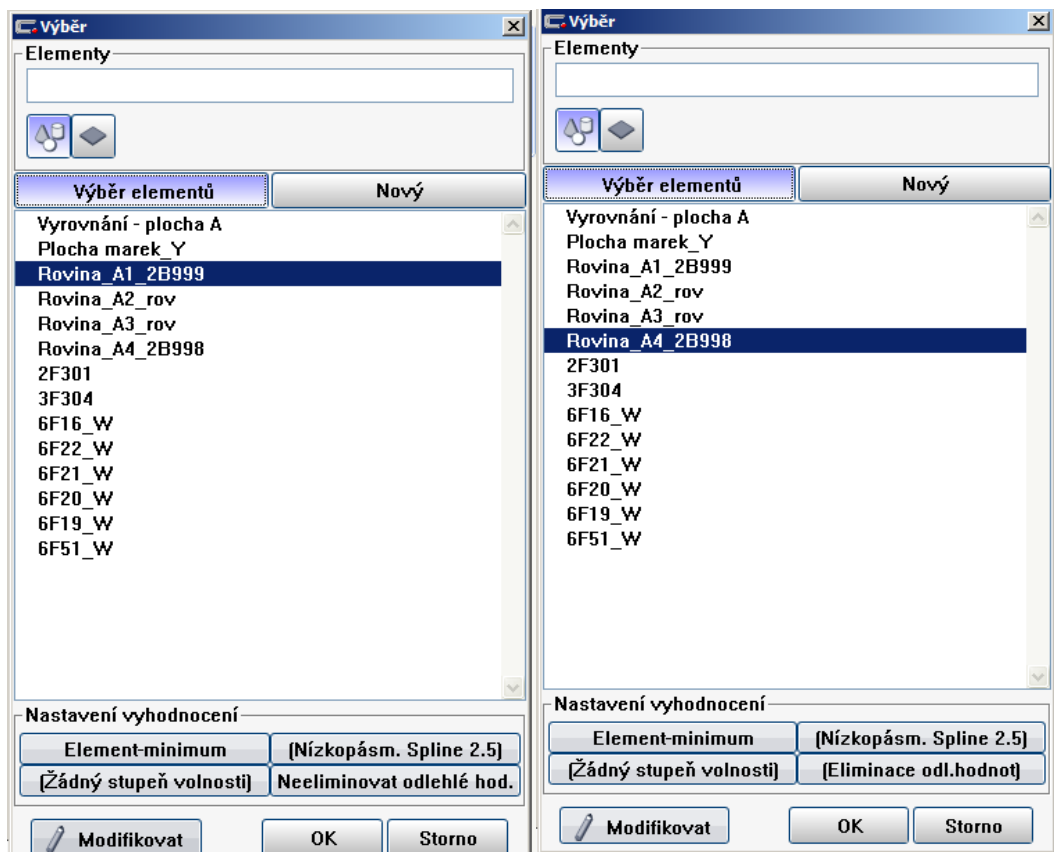
Charakteristika	Směrodatná odchylka	Šířka tolerance pole	Koeficient způsobilosti Cg
Rov.A1_2B999	0,00074	0,05	2,26
Rov.A4_2B998	0,00015	0,05	11,10
2B999_Průměr	0,00004	0,018	15,12
Kruhovitost_2B999_INFO	0,00024	0,009	1,25
Poloha_2B998	0,00149	0,1	2,23
2B998_Průměr	0,00004	0,018	16,80
Kruhovitost_2B998_INFO	0,00010	0,009	2,90
2F999_A1_X	0,00231	0,4	5,78
2F999_A1_Y	0,00440	0,4	3,03
2F999_A1_D	0,00972	0,4	1,37
2F999_B1_X	0,00277	0,4	4,81
2F999_B1_Y	0,00469	0,4	2,84
2F999_B1_D	0,00061	0,4	21,97

#### 6.1.1 Rov.A1\_2B999

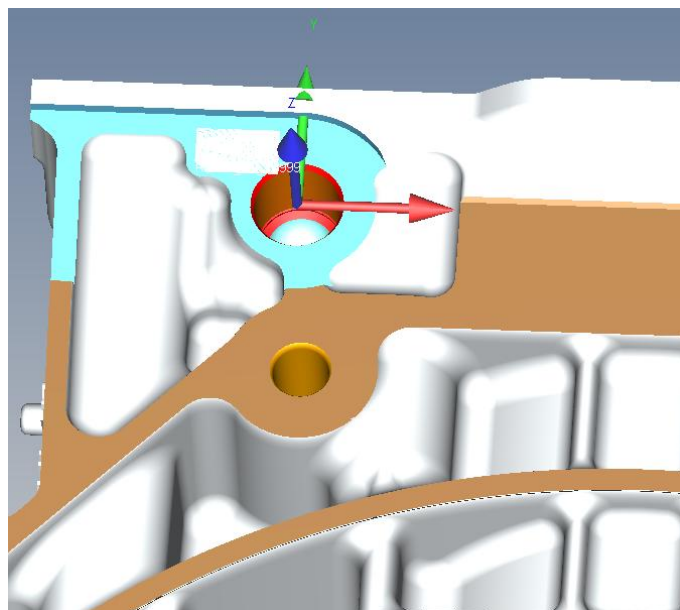
Rov.A1\_2B999 je analyzovaná char. a char. s ní související je Rov.A4\_2B998.

Při analýze nastavení bylo objeveno:

- eliminace odlehlých hodnot zapnuta u Rov.A4\_2B998, ale vypnuta u Rov.A1\_2B999



**Obrázek 50: Rov.A1\_2B999 (vlevo) Rov.A4\_2B998 (vpravo)**



**Obrázek 51: Rov.A4\_2B998**

V závislosti na analýze původních parametrů a výsledků měření byly provedeny tyto změny:

- zapnutí eliminace odlehlých hodnot u Rov.A4\_2B998 a Rov.A1\_2B999

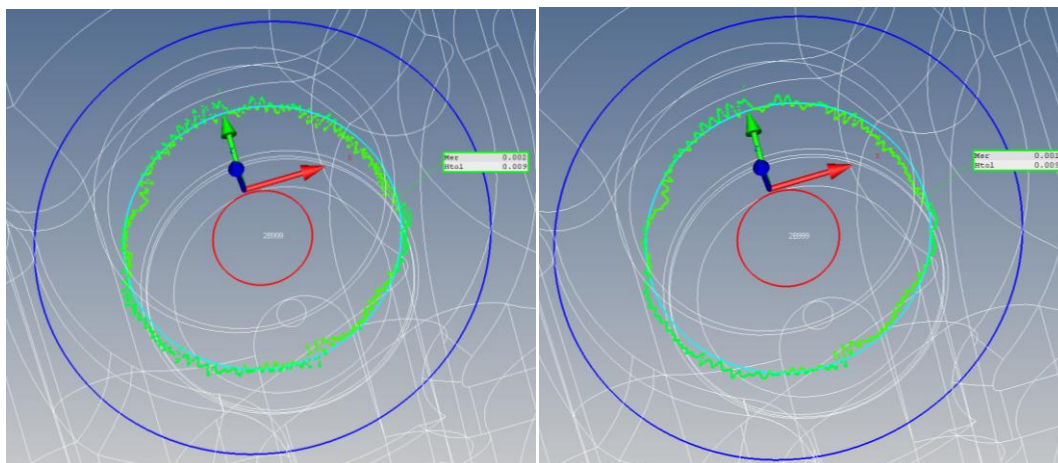
Zapnutí eliminace napomůže odfiltrování hodnot zanesených do měření např. nečistotami či chybou CMM.

### 6.1.2 Kruhovitost\_2B999\_INFO, Kruhovitost\_2B998\_INFO a Poloha\_2B998

Kruhovitost\_2B999\_INFO, Kruhovitost\_2B998\_INFO a Poloha\_2B998 jsou analyzované char. s nimi související je char. Poloha\_2B998.

Při analýze nastavení bylo objeveno:

- filtr pro Kruhovitost\_2B999\_INFO byl vypnut
- filtr pro Kruhovitost\_2B999\_INFO byl 150 vln/ot
- filtr pro ostatní char. je 50 vln/ot a byl zapnut
- u 2B997, 2B996 (podobné char.) se použilo 1500 bodů namísto 500



**Obrázek 52: Vlevo filtry vypnut, Vpravo filtr zapnut pro Kruhovitost\_2B999\_INFO**

V závislosti na analýze původních parametrů a výsledků měření byly provedeny tyto změny:

- zapnutí filtru pro Kruhovitost\_2B999\_INFO (50 vln/ot)
- upravení filtru pro Kruhovitost\_2B999\_INFO na 50 vln/ot

### 6.1.3 2F999\_A1 a 2F999\_B1

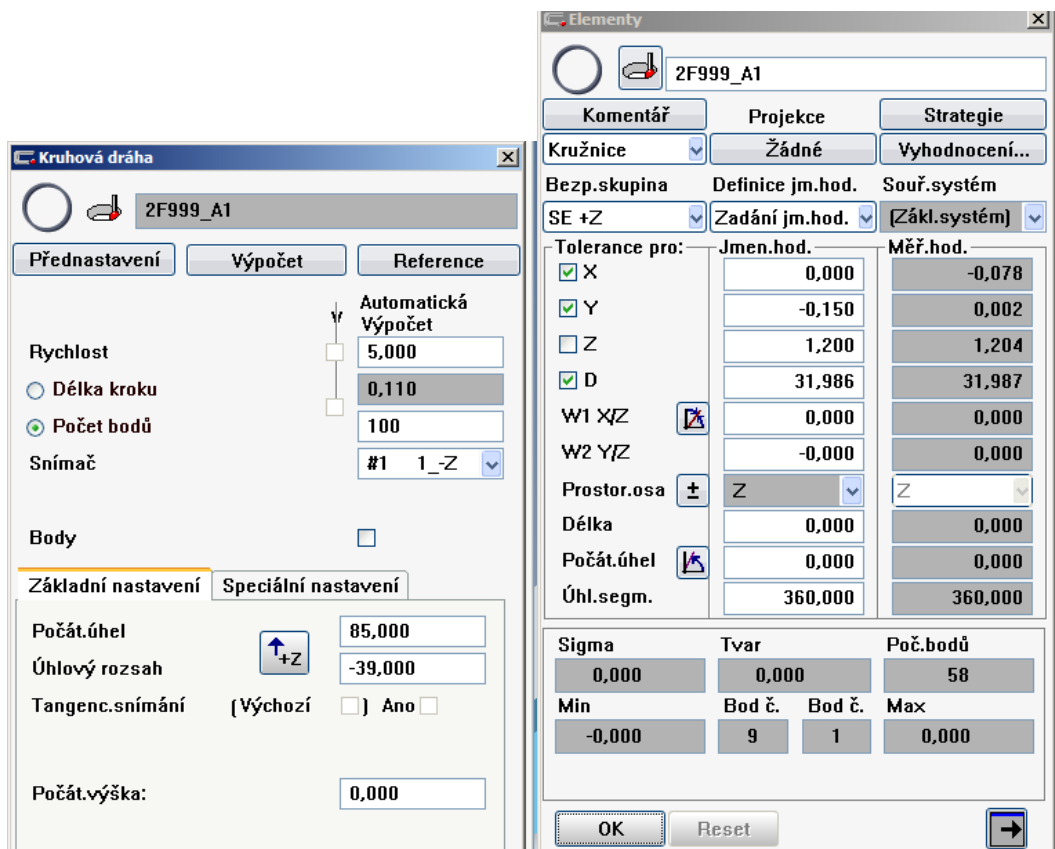
U těchto char. byly analyzovány vždy všechny tři zkoumané aspekty (X, Y a D).

Při analýze nastavení bylo objeveno:

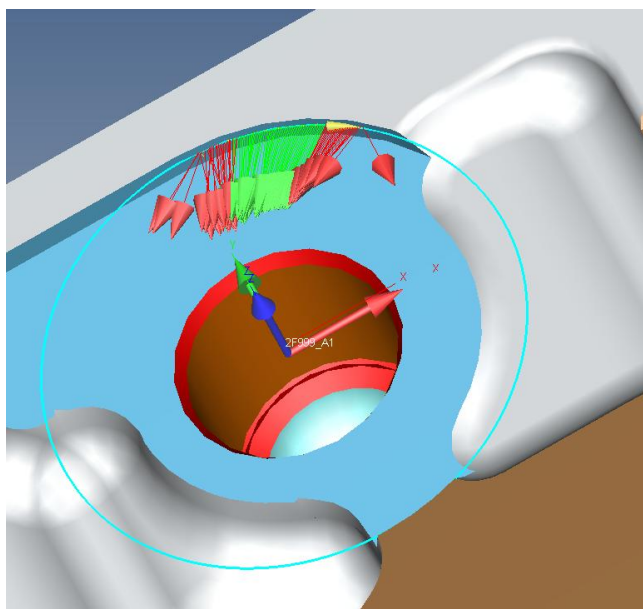
- využití pouze malé úhlové výseče rádiusu pro skenování
- nesjednocený počet bodů na úhlovou výseč

- 2F999\_A1 naměřeno 58 bodů, nastaveno bylo 100 bodů na úhlové výseči 39°
- 2F999\_B1 naměřeno 100 bodů, nastaveno bylo 200 bodů na úhlové výseči 34°

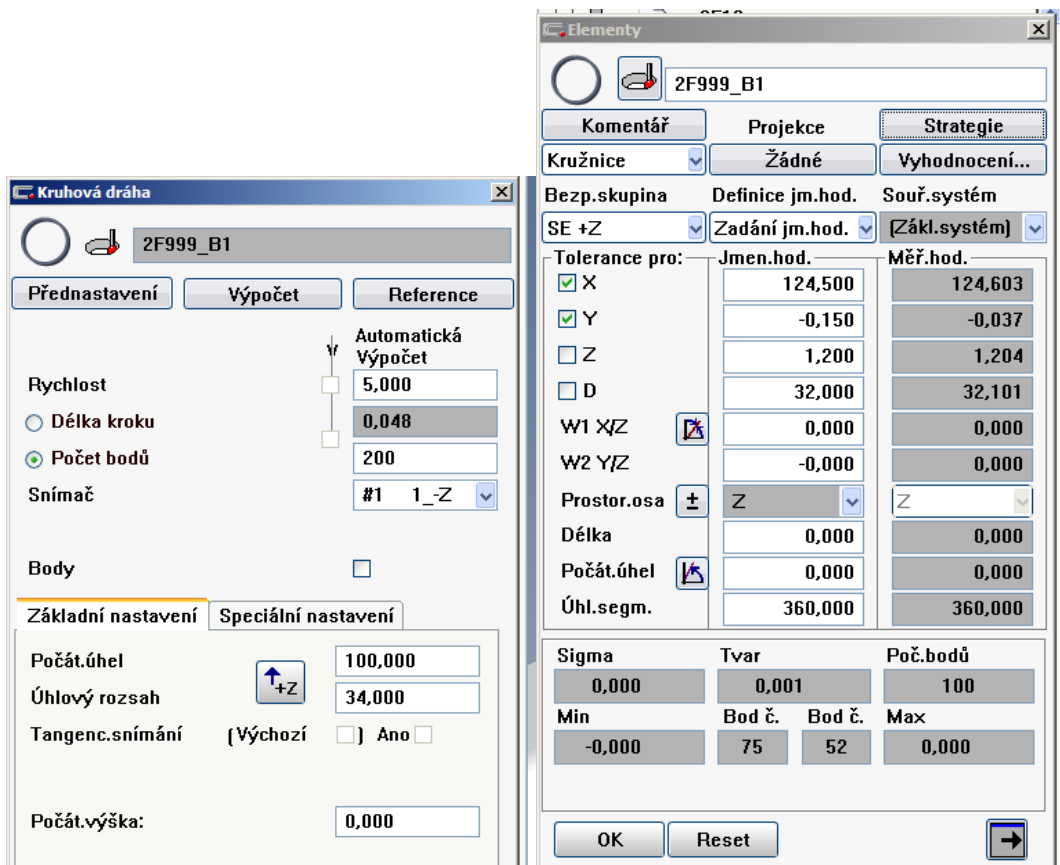




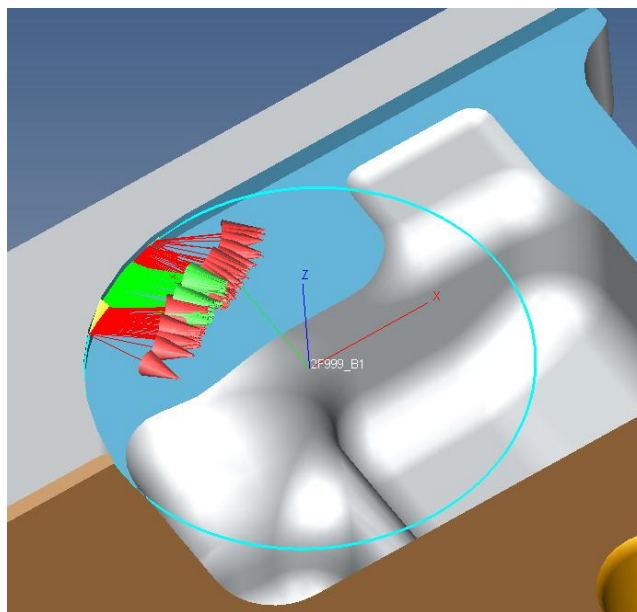
**Obrázek 53: Původní nastavení 2F999\_A1**



**Obrázek 54: 2F999\_A1**



**Obrázek 55: Původní nastavení 2F999\_B1**

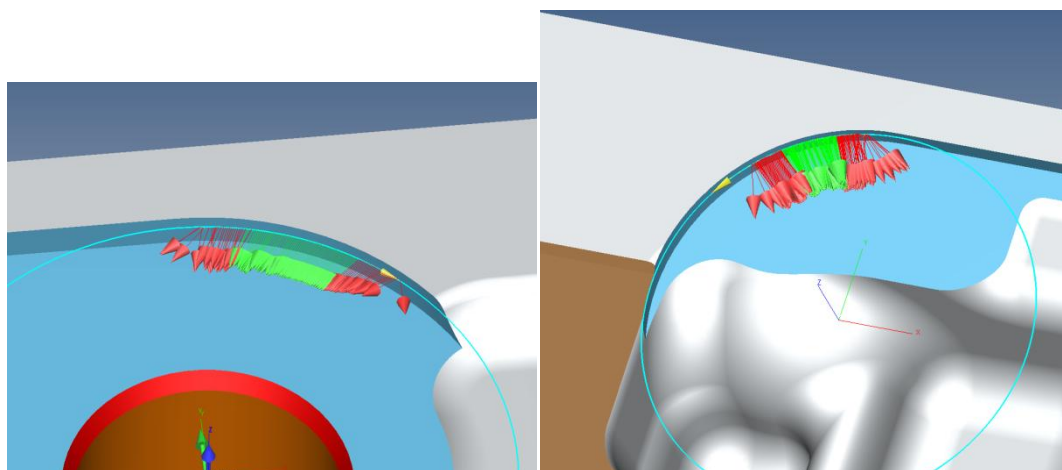


**Obrázek 56: 2F999\_B1**

V závislosti na analýze původních parametrů a výsledků měření byly provedeny tyto změny:

- 2F999\_A1 bylo provedeno zvětšení úhlové výseče a zvýšení počtu bodů o 100

- 2F999\_B1 byl poupraven počáteční úhel, tak aby CMM najelo už do rádiu a ne přesně na jeho začátek



**Obrázek 57: Upravené 2F999\_A1 a 2F999\_B1**

## 6.2 Zhodnocení optimalizovaného plánu měření

Změny byly provedeny za účelem zvýšení způsobilosti měření a sjednocení parametrů u stejných či podobných char. Po provedení deseti opakování chodu programu byly data extrahovány do Microsoft Excel.

Po ukončení experimentu byly v Microsoft Excel vypočteny směrodatná odchylka (s) a koeficient způsobilosti  $C_g$ . Tyto vypočtené hodnoty byly následně srovnány s vypočtenými parametry z prvního Excelu.

**Tabulka 7: Tabulka zkoumaných charakteristik (žlutě vyznačeny vybrané charakteristiky, červeně ty, které se zhoršily pod hodnotu  $C_g = 2$ )**

Charakteristika	koeficient způsobilosti $C_g$ 1	koeficient způsobilosti $C_g$ 2
Rov.A1_2B999	2,26	4,59150837
Rov.A4_2B998	11,10	4,946284677
2B999_Průměr	15,12	7,081885786
Kruhovitost_2B999_INFO	1,25	3,560149397
Poloha_2B998	2,23	7,455463195
2B998_Průměr	16,80	6,583581523
Kruhovitost_2B998_INFO	2,90	10,57058829
2F999_A1_X	5,78	3,042979494
2F999_A1_Y	3,03	1,437865549
2F999_A1_D	1,37	0,622912111
2F999_B1_X	4,81	2,403847148
2F999_B1_Y	2,84	1,53720948
2F999_B1_D	21,97	7,368501491

**Tabulka 8: Tabulka vyčnívajících hodnot**

Characteristic	1	2	3	4	5
Rov.A1_2B999	0,0022	0,0033	0,0033	0,0031	0,0031
Rov.A4_2B998	0,0017	0,0025	0,0029	0,0027	0,0027
2B999_Průměr	14,0081	14,0083	14,0083	14,0083	14,0084
Kruhovitost_2B999_INFO	0,0011	0,0014	0,0013	0,0013	0,0014
Poloha_2B998	0,0457	0,0469	0,0465	0,0468	0,0466
2B998_Průměr	14,0075	14,0078	14,0078	14,0078	14,0078
Kruhovitost_2B998_INFO	0,0010	0,0009	0,0010	0,0009	0,0010
2F999_A1_X	-0,0837	-0,0845	-0,0774	-0,0846	-0,0829
2F999_A1_Y	-0,0067	-0,0101	0,0026	-0,0108	-0,0062
2F999_A1_D	32,0083	32,0128	31,9833	32,0174	32,0075
2F999_B1_X	124,5550	124,5601	124,5767	124,5706	124,5665
2F999_B1_Y	0,0499	0,0410	0,0155	0,0263	0,0318
2F999_B1_D	31,9254	31,9223	31,9192	31,9241	31,9246

6	7	8	9	10	Průměrná hodnota
0,0030	0,0026	0,0025	0,0031	0,0025	0,0029
0,0028	0,0026	0,0027	0,0025	0,0030	0,0026
14,0084	14,0083	14,0084	14,0084	14,0084	14,0083
0,0013	0,0014	0,0014	0,0014	0,0014	0,0013
0,0476	0,0467	0,0465	0,0466	0,0463	0,0466
14,0079	14,0078	14,0079	14,0079	14,0079	14,0078
0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010
-0,0733	-0,0849	-0,0883	-0,0851	-0,0880	-0,0833
0,0158	-0,0110	-0,0170	-0,0105	-0,0168	-0,0071
31,9581	32,0176	32,0328	32,0183	32,0316	32,0088
124,5693	124,5678	124,5677	124,5681	124,5680	124,5670
0,0253	0,0302	0,0312	0,0308	0,0304	0,0312
31,9236	31,9241	31,9256	31,9251	31,9248	31,9239

Jelikož se některé hodnoty dostaly do oblasti  $C_g=2$ , tak u těchto charakteristik proběhla analýza naměřených hodnot a pomocí průměrné naměřené hodnoty byly vyznačeny hodnoty s největší odchylkou od průměrně hodnoty.

Chyba při měření mohla vzniknout kvůli nevhodnému nastavení rychlosti snímání snímání. Kvůli příliš vysoké rychlosti byl stroj donucen eliminovat body na začátku a na konci měřené úhlové výseče. Nejspíše se do měření promítli nepřesnosti spojené s obtížným řízením CMM v tak malém rádiu příliš vysokou rychlostí.

## **7 Proces temperace dílů v rámci měření (zdroj variability díl)**

Aby mohl být díl měřen, musí celému procesu měření předcházet proces temperace. Ten zajistí, aby měl měřený díl teplotu požadovanou pro měření (20-22°C), tzn. teplotu blízkou teplotě standardní, která je 20°C. Díly mají být dle systému ISO GPS ideálně kontrolovány právě za standardní teploty, druhým možná ještě důležitějším požadavkem pro přesné měření na CMM je stabilita výše zmíněné teploty, neboť samotný rozdíl teplot od standardní teploty lze kompenzovat pomocí teplotních korekcí na základě koeficientu teplotní roztažnosti daného materiálu. Ve výrobním procesu jsou díly před kontrolou ohřívány v rámci procesu čištění v ultrazvukových pračkách.

### **7.1 Časová náročnost procesu**

Doba temperace závisí na materiálu, rozměrech a počáteční teplotě dílů. V závislosti na rozměrech a materiálu dílu je temperace nejdelší částí měřicího procesu. Například pasivní temperace klikové hřídele při počáteční teplotě 44°C trvá 180min.

Temperace může být pasivní (dílna se nechá v místnosti se stejnou teplotou jako má měřicí středisko), nebo nucená (vložením dílu do temperační místnosti).

Temperační místnost může mít významně nižší teplotu než měřové středisko, nucené proudění vzduchu nebo obojí. Tyto aspekty napomáhají k rychlejšímu procesu temperace. Rychlejšímu ochlazení součásti se může například napomoci napolohováním dílu tak, aby proud chladného vzduchu vnikal do větších dutin dílu namísto toho, aby proudil pouze na povrchu dílu.

### **7.2 Stanovení temperačních křivek**

Temperační křivka je grafem teplotního gradientu dílu, viz experiment.

#### **7.2.1 Popis experimentu stanovení temperačních křivek**

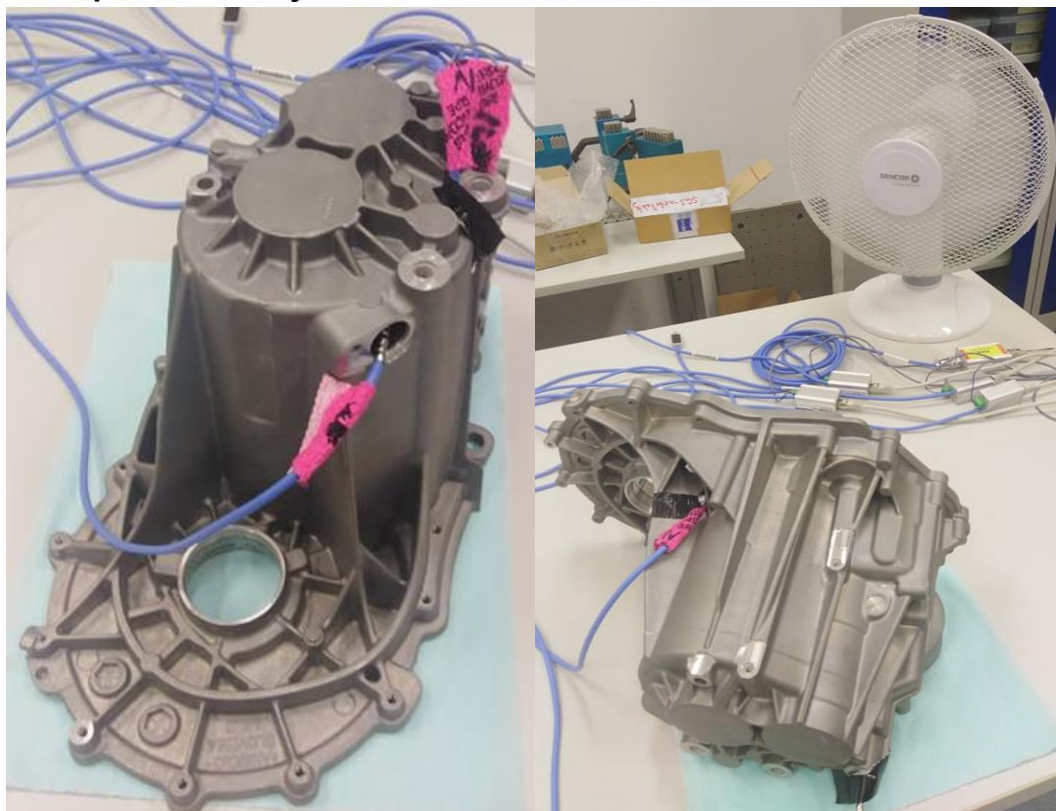
Měření průběhu teplotního gradientu měřených dílů probíhalo v měřicím středisku Fakulty strojní ČVUT v Praze. K ohřátí dílů byla užitá komorová pec nastá-

vena na 100°C, při průběžných kontrolách (interval kontrol cca20min) teploty dílu se díl vyjmul z pece při překročení 60°C.

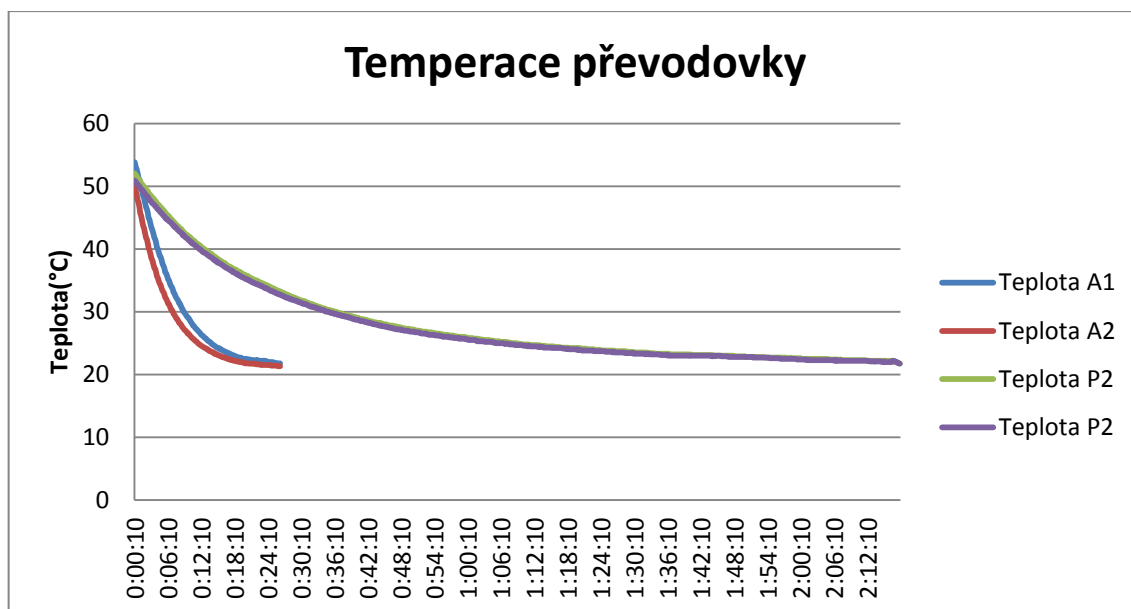
Po vyjmutí se díl přemístil do klimatizovaného měrového střediska (21,7°C). Na každý díl byla připevněna 2 teplotní čidla, která snímala teplotu dílu. Měřicí zařízení bylo schopno měřit dva díly najednou a navíc ještě jedno čidlo snímající vlhkost a teplotu místnosti. Teplotní čidla byla připevněna lepicí páskou, pokud nebyla schopna zachovat kontakt s povrchem dílu.

Toto měření se opakovalo dvakrát pro každý díl. První varianta s pasivní temperací, to znamená díl byl volně ponechán na desce stolu. Druhá varianta obsahovala nucenou cirkulaci vzduchu za užití kancelářských větráků. Snímání teploty probíhalo do okamžiku dosažení teploty 22°C. Výstupem tohoto měření jsou dvě sady grafů znázorňující průběh teplotního gradientu dílů a potřebný čas při pasivní a při aktivní temperaci. Čidla u pasivní temperace značena Px a u aktivní temperace Ax.

## 7.2.2 Temperační křivky

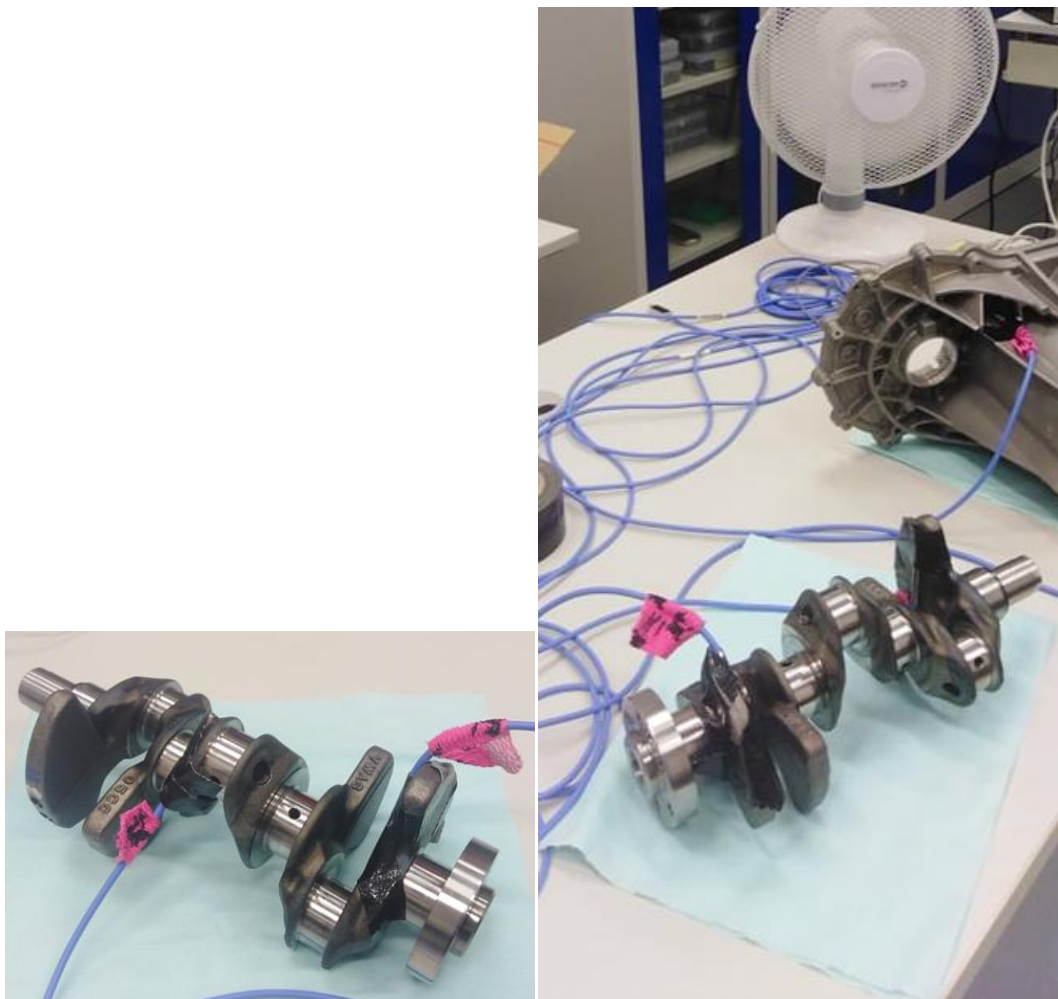


Obrázek 58: Pasivní (vlevo) a aktivní (vpravo) temperace převodovky

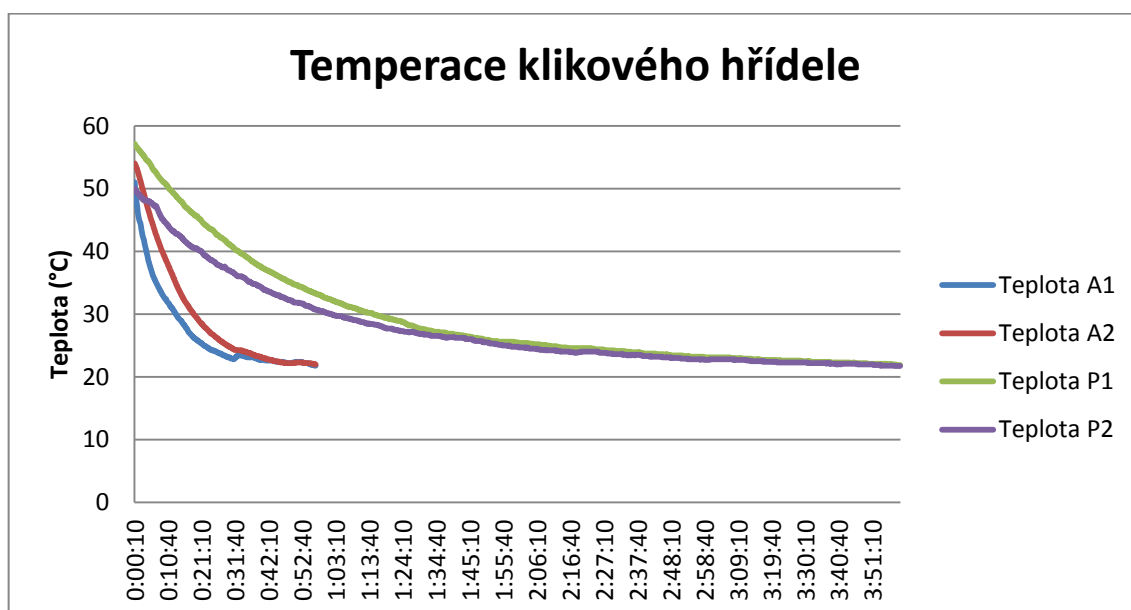


Obrázek 59: Graf temperace převodovky

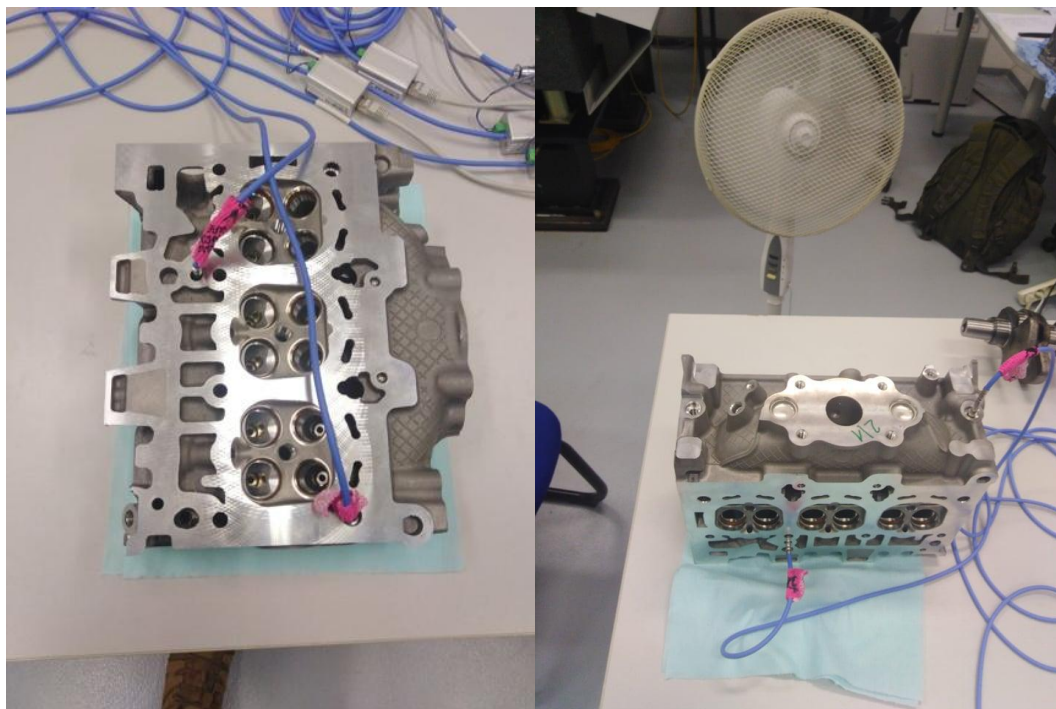




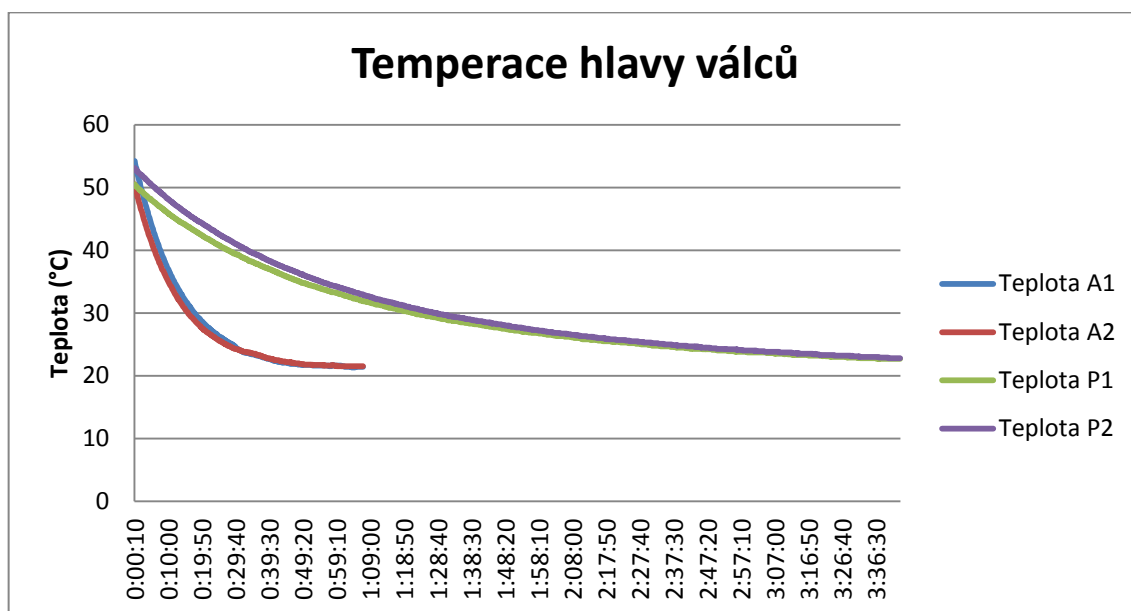
**Obrázek 60: Pasivní (vlevo) a aktivní (vpravo) temperace klikové hřídele**



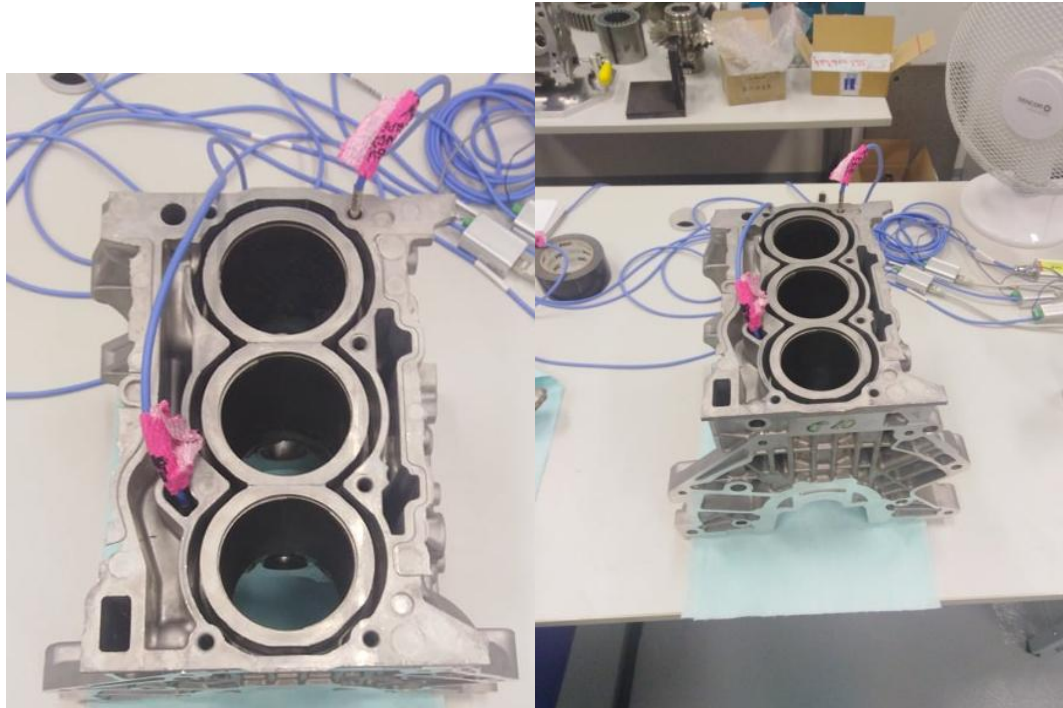
**Obrázek 61: Graf temperace klikového hřídele**



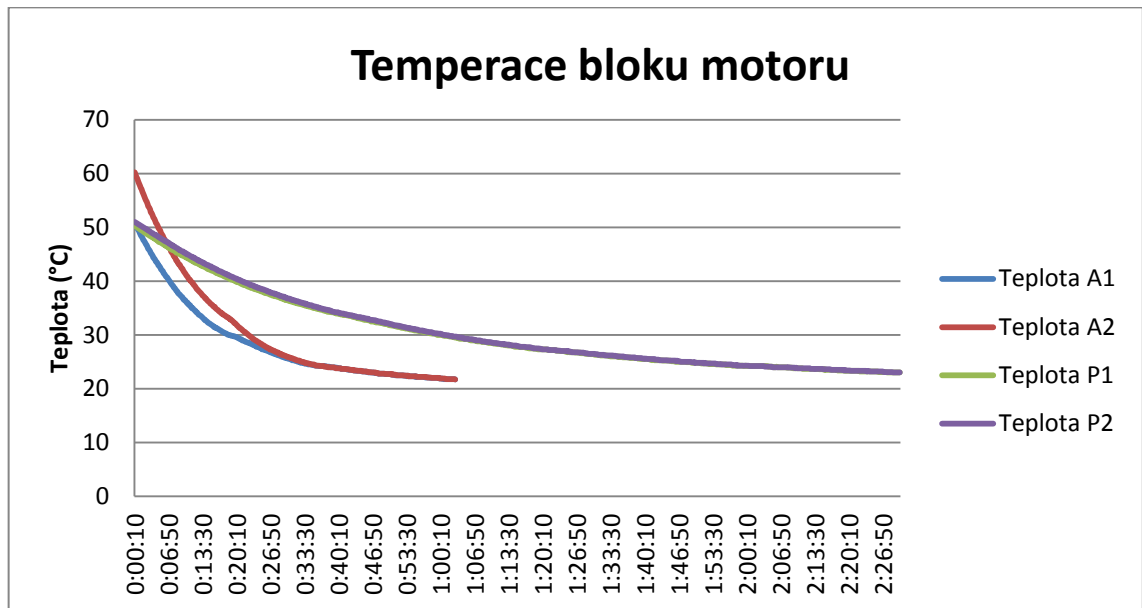
**Obrázek 62: Pasivní (vlevo) a aktivní (vpravo) temperace hlavy válců**



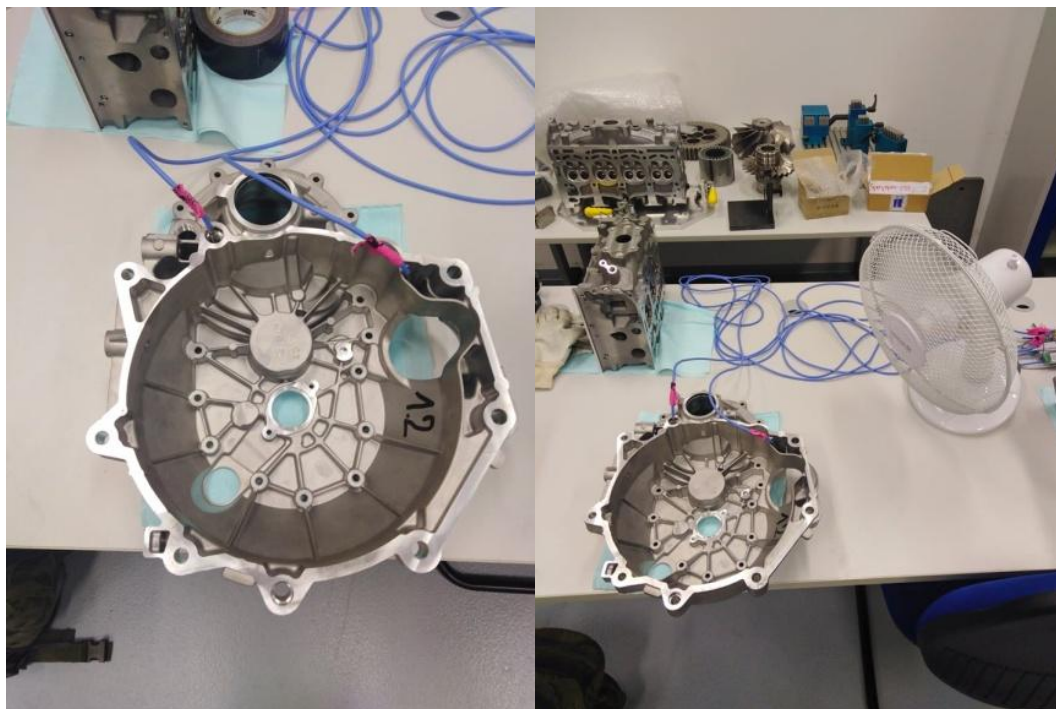
**Obrázek 63: Graf temperace hlavy válců**



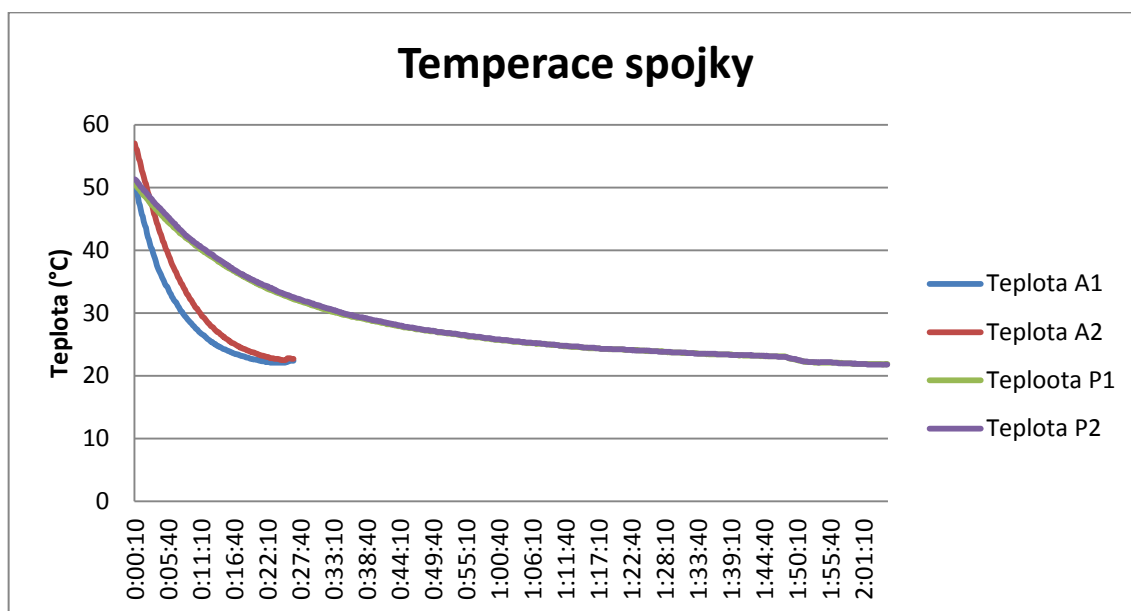
**Obrázek 64: Pasivní (vlevo) a aktivní (vpravo) temperace bloku motoru**



**Obrázek 65: Graf temperace bloku motoru**



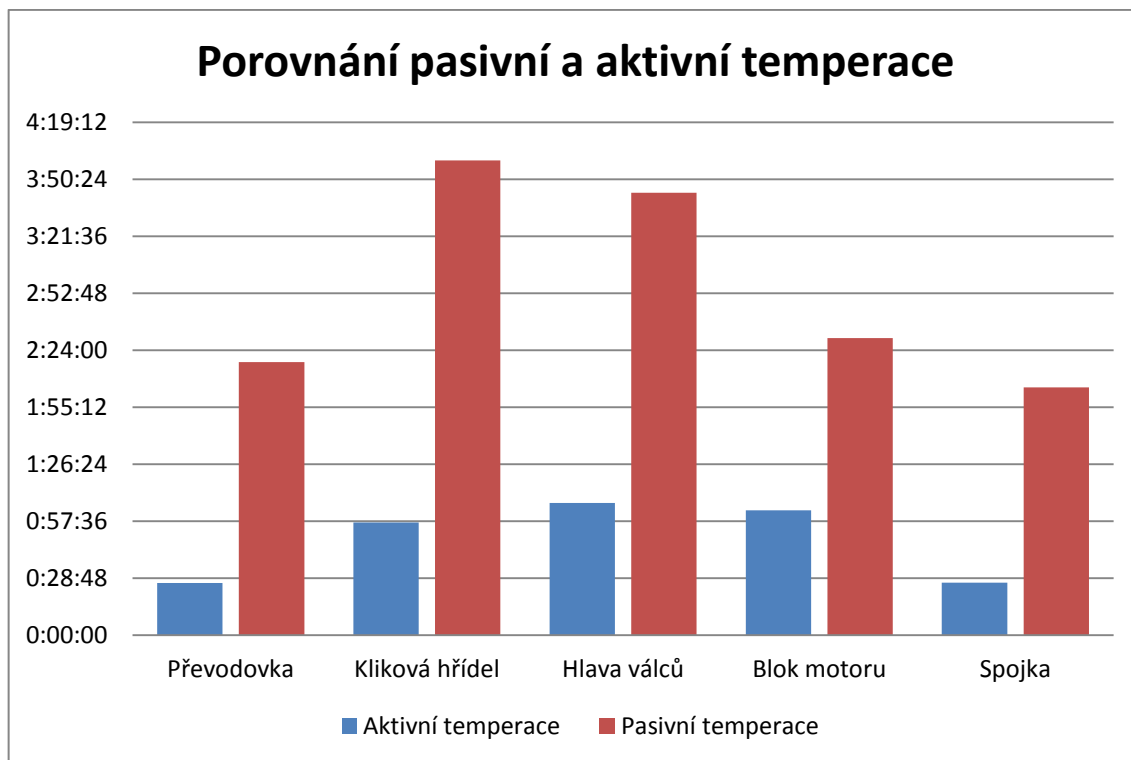
**Obrázek 66: Pasivní (vlevo) a aktivní (vpravo) temperace skříně spojky**



**Obrázek 67: Graf temperace spojky**

### 7.2.3 Výsledek experimentu

Při porovnání aktivní a pasivní temperace bylo zřejmé, že i při použití pouhých kancelářských větráků se čas sníží řádově o stovky procent. Nejrychlejších časů bylo docíleno při nasměrování proudu vzduchu do dutin dílů.



**Obrázek 68: Graf porovnání aktivní a pasivní temperace**

**Tabulka 9: Časy temperace**

	Aktivní temperace	Pasivní temperace	Rozdíl časů temperace
<b>Převodovka</b>	0:26:20	2:18:00	1:51:40
<b>Kliková hřídel</b>	0:56:50	3:59:50	3:03:00
<b>Hlava válců</b>	1:06:50	3:43:30	2:36:40
<b>Blok motoru</b>	1:03:00	2:30:10	1:27:10
<b>Spojka</b>	0:26:30	2:05:10	1:38:40

## 8 Závěr

V první části byla popsána podoba aktuální souřadnicové měřicí techniky užívané pro běžné úkony v průmyslové metrologii. Byly popsány druhy konstrukce, které se prvotně dělí na kartézské a nekartézské. Větší pozornost byla vzhledem k tématu této práce věnována kartézským CMM. Uvedené a popsané kategorie kartézských CMM jsou: stojanové, mostové, portálové a výložníkové. U nekartézských byly uvedeny a popsány kategorie: laser tracker, laser radar, měřicí ramena a výpočetní tomografie.

Dále byly popsány snímací systémy běžně užívané na CMM. Základní rozdělení systémů je dotykové a bezdotykové. V dotykových snímacích systémech byly popsány spínací a skenovací systémy. Pro téma této práce jsou více relevantní systémy skenovací. V bezdotykových snímacích systémech byly uvedeny tyto podkategorie: kamerové snímací systémy, laser scanner, pruhové projekce, fotogrammetrie a interferometrie bílého světla.

V další části této práce byl popsán proces měření na CMM od přípravy až po vyhodnocování. Aspekty měření byly popisovány v tomto pořadí: analyzování výkresové dokumentace, volba upnutí měřeného dílu, konfigurace snímacího systému, vyrovnání, extrakce bodů, výpočet geometrických prvků a vyhodnocování měřených charakteristik. Podrobněji byly popsány pouze způsoby vyrovnání. Byly zmíněny metody vyrovnání: standardní, RPS, best fit a P6.

Další část byla věnována strategii měření na CMM, speciálně u CMM s dotykovým snímacím systémem. Pro pochopení případné chyby měření je totiž zásadní pochopit rozličné možnosti měřicí strategie, kterou určuje obsluha CMM. Blíže specifikovány byly: tvar snímací dráhy, rychlost skenování, vzdálenost měřených bodů, filtry, eliminace odlehlých bodů a způsob výpočtu geometrických charakteristik.

V nadcházející části byly popsány vlivy různých rychlostí snímání a různých počtů snímaných bodů na měření. Podklady pro tuto část byly brány z experimentů provedených jinými autory.

V další části byla popsána optimalizace zadaného plánu měření. Při analýze naměřených hodnot s původní strategií byla zjištěna různorodost nastavené strategie u stejných či podobných charakteristik. Úpravy spočívaly hlavně v zapnutí eliminace odlehlých hodnot, zapnutí filtrů a sjednocení počtu bodů na úhlovou úseč a v celkovém sjednocení strategie pro stejné či podobné charakteristiky. Úspěšnost experimentu se posuzovala dle koeficientu  $C_g$ , který u některých charakteristik (konkrétně: 2F999\_B1\_Y, 2F999\_B1\_X, 2F999\_A1\_D, 2F999\_A1\_Y) byl vypočten stále v oblasti  $C_g=2$ . Pro tyto charakteristik proběhla následná analýza naměřených hodnot. Při analýze byly identifikovány hodnoty s velkou odchylkou od průměrné hodnoty. Chyba při měření mohla vzniknout kvůli nevhodnému nastavení rychlosti snímání snímaní. Kvůli příliš vysoké rychlosti byl stroj donucen eliminovat body na začátku a na konci měřené úhlové výseče. Nejspíše se do měření promítli nepřesnosti spojené s obtížným řízením CMM v tak malém rádiu příliš vysokou rychlostí. Jelikož analýza dat probíhala až po skončení experimentu, tak nebylo možné provést opakované měření s nově optimalizovanou strategií. Optimalizace plánu jakožto celek vedla ke zlepšení opakovatelnosti měření.

V dalších měření platí pro volbu strategie zanechat obdobné strategie pro stejné či podobné charakteristiky a provádět kontrolu měření například pomocí  $s_g$  a  $C_g$  popř. ještě  $C_{gk}$ . A snížení rychlosti u menších radiusů.

V poslední části byly stanoveny temperační křivky pro zadané součásti: blok motoru, převodovka, kliková hřídel, hlava válců a spojka. Temperovalo se z teploty 50°C (teplota dílu po procesu čištění při vyndání z ultrazvukové pračky) na teplotu 22°C (21,7°C byla teplota měrového střediska ČVUT). Při experimentech bylo provedeno jak pasivní temperování, tak temperování s nuceným proudem vzduchu (za pomoci dvou kancelářských větráků). Při srovnání časů byla doba aktivní temperace o 150 - 450% rychlejší. Menších rozdílů bylo dosaženo u masivnějších dílů jako např. blok motoru a hlava válců. Při aktivní temperaci se jako efektivnější ukázalo směřování proudu vzduchu do dutin dílů. Aktivní temperace napomáhá efektivitě měrového střediska, lze se díky ní lépe vyhnout velkému rozdílu teplot mezi vnitřkem a vnějškem dílu.

## 9 Bibliografie

1. HOCKEN, Robert J. a Paulo H. PEREIRA. *Coordinate measuring machines and systems* [online]. Second edition. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2012 [cit. 2021-7-29]. Manufacturing engineering and materials processing. ISBN 9781420017533.
2. , Ing. Libor Beránek, Ph.D. *Strojírenská metrologie*. ČVUT Praha, 2020.
3. *ISO 10 360-1. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) - Část 1: Slovník*. 1. Praha: Česká metrologická společnost, 2001.
4. , David Flack. *Good Practice Guide No. 41 - CMM measuring strategies*. 2. Teddington: National Physical Laboratory, 2001. ISBN ISSN 1368-6550.
5. *Kalibrační postup KP 1.1.3/02/13 SOUŘADNICOVÝ MĚŘICÍ STROJ (CMM)*. 1. Praha: Česká metrologická společnost, 2013.
6. *Zeiss* [online]. [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/home.html?vaURL=www.zeiss.cz/metrologie>
7. *Renishaw* [online]. [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/>
8. *Průmyslové spektrum*. [Online] [Citace: 1.. červen 2021.] <https://www.mmspektrum.com/temata/vyroba-a-technologie/metrologie-kontrola-jakosti>.
9. *Calypso basics*. 5. Zeiss, 2013. ISBN 61212-2011002.
10. Ing. Prokop Martin. Co je laserový tracker a jak se s ním měří? *Automa*. 2009, **2009**(1), 3.
11. Leica absolute tracker ATS600. <https://www.hexagonmi.com/>. [Online] [Citace: 1.. červen 2021.] <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/laser-tracker-systems/leica-absolute-tracker-ats600>.
12. <https://www.nikonmetrology.com/>. *Nikon*. [Online] [Citace: 1. červen 2021.] <https://www.nikonmetrology.com/en-us/3d-metrology/large-volume-metrology-apdis-mv4x0>.



13. Jan Zelinka, Lenka Čepová, Bartosz Gapiński, . *The Effect of a Stylus Tip on Roundness Deviation with Different Roughness*. [online]. Ostrava, 2019 [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-18682-1\\_12](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-18682-1_12). Referát. Technical University of Ostrava.
14. <https://www.nikonmetrology.com/>. *Nikon*. [Online] [Citace: 1.. červen 2021.] <https://www.nikonmetrology.com/en-us/3d-metrology/manual-3d-scanning-mcax-s>.
15. Omelková, Bc. Jitka. *In-line rozměrová kontrola kvality s využitím CMM a jednoúčelových měřicích stanic*. Praha, 2019. Diplomová práce. ČVUT.
16. Müller, Marek. *Vliv produktivity kontroly na CMM na způsobilost procesu měření*. Praha, 2015. Bakalářská práce. ČVUT.
18. Rouček, Bc. Jan. *Optimalizace strategie měření na CMM s ohledem na maximální produktivitu a opakovatelnost*. Praha, 2019. Diplomová práce. ČVUT.
19. Tomšů, Bc. Ivana. *Optimalizace strategie měření na CMM pro měření přesných tvarových specifikací s využitím otočného stolu*. Praha, 2020. Diplomová práce. ČVUT.
20. Stránský, Ondřej. *Možnost optimalizace plánů měření využívaných pro kontrolu dílů na*. Praha, 2021. Diplomová práce. ČVUT.
21. Hrbková, Eliška. *Problematika měření obecných tvarových ploch s využitím CMM*. Praha, 2021. Bakalářská práce. ČVUT.
22. Dragančev, Simeon. *Strategie extrahovaných bodů při měření na souřadnicových měřicích strojích*. Praha, 2020. Bakalářská práce. ČVUT.
23. Purkart, Martin. *Využití souřadnicové měřicí techniky v oblasti kontroly*. Praha 2018. Diplomová práce. ČVUT.
24. Tvrdek, Michal. *Návrh automatizovaného měřicího pracoviště s průmyslovým robotem*. Brno 2013. Diplomová práce. VUT
25. Jan Urban, Libor Beránek, Michal Koptiš, Jan Šimota, Ondřej Košťák. *Influence of CMM Scanning Speed and Inspected Feature Size on an Accuracy of Size and Form Measurement*. Praha ČVUT, 2020. ISSN 1213–2489.

26. Stępień, Krzysztof. *An analysis of influence of sampling strategy and scanning speed on estimation of straightness and flatness deviations with CMMs*. Kielce : Kielce University of Technology, 2015. ISSN 2392-0327.

30. Jae-jun Park<sup>1</sup>, Kihwan Kwon<sup>2</sup> and Nahmgyoo Cho. *Development of a coordinate measuring machine (CMM) touch probe using a multi-axis force sensor*. Seoul : Samsung Advanced Institute of Technology, 2006. ISSN 2380–2386.

30. Zdenko Guniš, MSc. - Juraj Vagovský, MSc. - 1Augustín Görög, assoc. *EFFECT OF SCANNING SPEED ON THE ACCURACY OF*. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2013. ISSN 1336 - 5967.