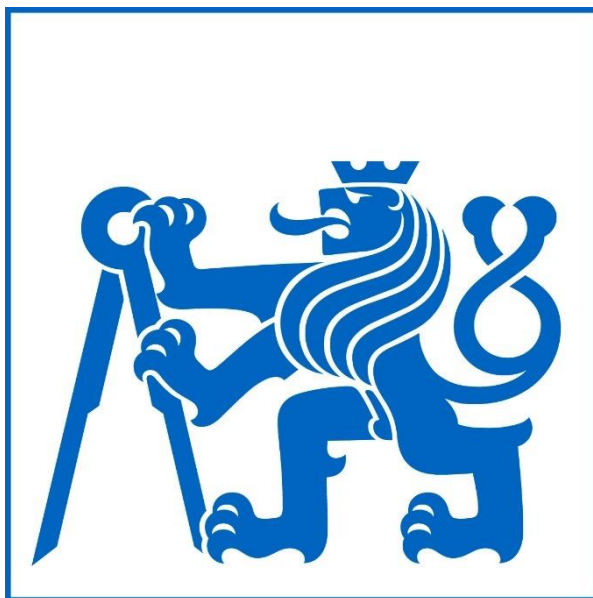


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta strojní**

**Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**



**Možnost zvýšení produktivity měření na CMM v hutním  
provozu**

**Bakalářská práce**

<b>Autor:</b>	Čeněk Hovorka
<b>Vedoucí práce:</b>	Ing. Jan Urban
<b>Studijní program:</b>	B2343 Výroba a ekonomika ve strojírenství
<b>Studijní obor:</b>	2303R014 Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hovorka** Jméno: **Čeněk** Osobní číslo: **474842**  
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:

**Možnosti zvýšení produktivity měření na CMM v hutním provozu**

Název bakalářské práce anglicky:

**Possibilities of increase measurement productivity on CMM in metallurgical operation**

Pokyny pro vypracování:

- 1) rešerše dostupných CMM k měření odlitků
- 2) vhodné snímací systémy pro měření odlitků
- 3) metody pro porovnání různých způsobů měření
- 4) vyhodnocení dat porovnávacího měření

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Jan Urban, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

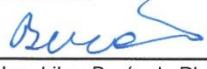
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

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

  
Ing. Jan Urban  
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.

23.6.2020

Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v přiloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 25. 7. 2020



Čeněk Hovorka

## **Poděkování:**

Rád bych tímto způsobem poděkoval pracovníkům měrového střediska GQH-1 hutního provozu Škoda Auto a.s. za pomoc při měření dílu na jejich pracovišti. Nadále bych rád poděkoval za zprostředkování měření od firmy Zeiss s.r.o. vedoucímu aplikačního oddělení Ing. Pavlu Boháčovi. Obě společnosti mi poskytly potřebné informace k vypracování této bakalářské práce.

Nadále bych rád poděkoval Ing. Janu Urbanovi za vedení mé práce a za cenné a podnětné připomínky k jejímu zpracování.

Poslední díky patří mé rodině, která mě podporuje během mého studia a poskytla mi ideální prostředí pro mé studium, a to jak po finanční, tak i psychické stránce.

**Anotace:**

Práce se zabývá problematikou měření odlitků v hutním provozu Škoda Auto. Jedná se o porovnání dotykového a bezdotykového způsobu měření součástek. Cílem práce je zhodnotit současný stav, provést měření oběma způsoby měření a vyhodnotit, který je ekonomicky výhodnější.

**Klíčová slova:**

Kvalita, CMM, souřadnicové měřicí stroje, kontaktní a nekontaktní senzory

**Anotation:**

This Bachelor thesis investigates the measuring castings in the Skoda Auto metallurgical operation. It provides a comparison of the contact and optical sensors measuring components. The objective of the work is to assess the status quo, take measurements both ways of measuring and evaluate which one is more economically advantageous.

## Obsah,

1	Úvod .....	9
2	CMM Technologie .....	10
3	Dělení CMM .....	10
3.1	Kartézské CMM .....	11
3.1.1	Sloupový typ (horizontal arm) .....	12
3.1.2	Mostový typ.....	13
3.1.3	Portálový typ (Gantry) .....	14
3.1.4	Výložníkový typ .....	15
3.2	Nekartézské CMM.....	16
3.2.1	Ruční CMM stroje.....	17
3.2.2	CMM měřicí ramena .....	18
3.2.3	Laser Trackery, Laser Tracery .....	19
4	Extrakce bodů z měřeného dílu .....	20
4.1	Dotykové systémy .....	21
4.1.1	Spínací systémy.....	21
4.1.2	Aktivní snímací systémy .....	22
4.1.3	Otočné a pevné systémy .....	23
4.2	Bezdotykové .....	26
4.2.1	Laserové snímací systémy.....	26
4.2.2	Kamerové snímací systémy.....	27
4.2.3	Senzory monochromatického bílého světla.....	28
5	Postup měření součásti na CMM .....	29
5.1	Seznámení se s výkresovou dokumentací .....	29
5.2	Konfigurace snímače .....	30
5.3	Kvalifikace snímacího systému .....	32
5.4	Upnutí součásti .....	32

5.5	Vyrovnaní měřené součásti .....	33
5.6	Extrakce bodů .....	34
5.7	Vyhodnocení.....	34
6	Praktická část bakalářské práce .....	35
6.1	Současný stav měření ve Škoda Auto.....	36
6.2	Porovnání dotykového a optického měření. ....	39
6.2.1	Měření pomocí dotykových CMM strojů.....	39
6.2.2	Měření bezdotykových CMM strojů .....	40
6.3	Vyhodnocení získaných hodnot.....	42
6.4	Ekonomické zhodnocení investice do optického CMM.....	47
7	Závěr.....	49
	Použitá literatura .....	51
	Seznam obrázků .....	53
	Seznam tabulek .....	54



# 1 Úvod

Díky technologickému pokroku a novým technologiím jsme schopni tvořit čím dál více složitější výrobky a součástky, které jsou schopny díky svým vylepšeným tvarům a lepšímu způsobu zpracování lépe plnit podmínky předepsané např. technology, architektky, statiky a dále. Vytváří se nové výrobní linky, staré se upravují. Cílem výroby je, aby se co nejvíce urychlil výrobní proces a zvýšila se tak její efektivita. Z malosériové výroby se stává velkosériová a z jednotlivých firem se stávají koncerny.

Každý výrobní proces má několik fází a nebudu se tu zabývat všemi, každopádně hlavní fáze tvoří návrh, výkres, příprava výroby, vytvoření součástky a její kontrola. V této práci se podrobněji zaměřím na problematiku její kontroly, a to konkrétně pomocí technologie CMM. Práce se zaměřuje, jak už vyplývá z názvu, na zvýšení produktivity měření na CMM v hutním provozu. V kapitolách níže budou podrobněji vysvětleny rozdíly mezi jednotlivými typy CMM strojů, ale pro jednoduchou představu budu v této práci porovnávat měření na CMM strojích pomocí systémů s dotykovým senzorem a bezdotykovým senzorem.

Cílem této práce je provést analýzu současného stavu vybraného výrobního představitele z výrobního programu společnosti Škoda auto, porovnat způsoby měření dotykovým a bezdotykovým způsobem a vyhodnotit, která z metod je ekonomicky výhodnější vzhledem k požadované přesnosti měření. Během měření na současných strojích vybavených dotykovým snímacím systémem dochází k velkému opotřebení pohonných ústrojích ve strojích v důsledku častých změn směru pohybu ramena s nástrojem na snímání.

Během porovnání měření metody dotykovým a bezdotykovým snímáním se budu zaměřovat především na parametry doby snímání a přesnosti snímání.

## 2 CMM Technologie

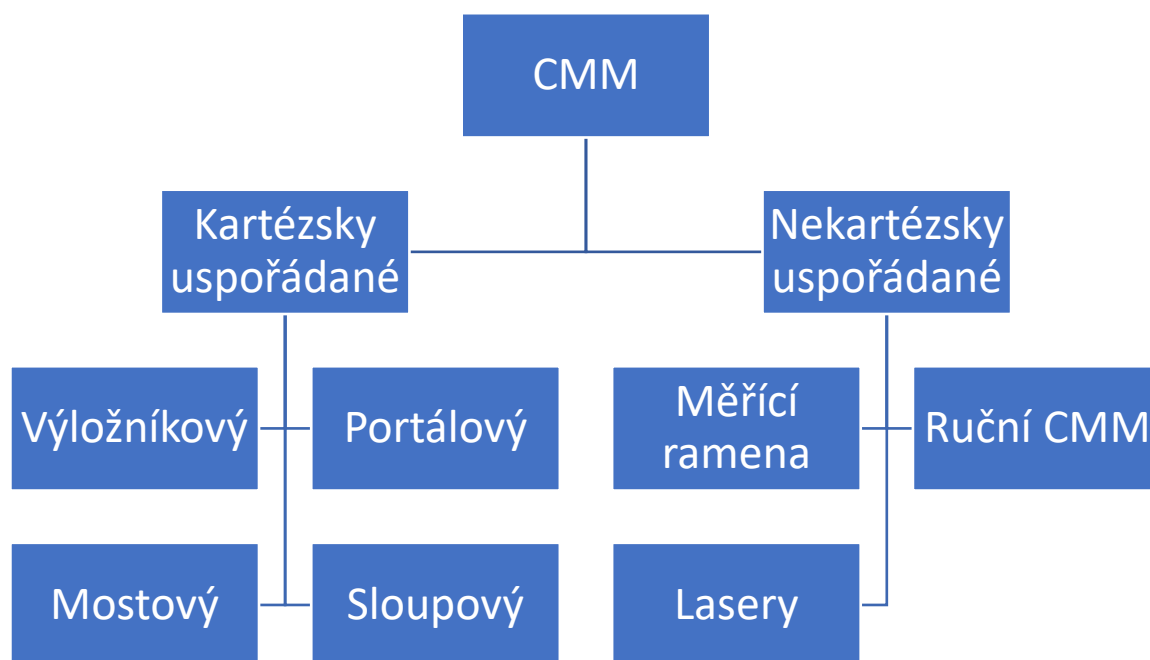
Zkratka CMM (Coordinate measung machine) v překladu znamená souřadnicový měřicí stroj.

V dnešní době nejsou už CMM stroje výsadou pouze automobilového či leteckého průmyslu, nýbrž jsou využívány v mnoha dalších odvětvích, která si vyžadují přesné měření. Jejich výhoda spočívá v přesnosti provedeného měření, opakovatelnosti měření, flexibilitě stroje a rychlosti, kterou je stroj schopen pracovat. Největší přednost je ale v jeho univerzálnosti.

CMM stroj je vybavený snímacím systémem, který je schopen pomocí různých fyzikálních principů zaznamenávat jednotlivé body z měřené součástky, která je umístěná v pracovním prostoru měřicího stroje. Během měření stroj jednotlivé body zaznamenává a ukládá je pro následné zpracování. Každý z těchto bodů má své souřadnice, které jsou vztaženy k základnímu souřadnému systému stroje. Body se následně extrahují z paměti stroje, převedou do počítače a ten je pomocí analytické geometrie matematicky zpracuje. S takto zpracovanými údaji jsme schopni vyhodnocovat jednotlivá kritéria, která si experiment vyžaduje.

## 3 Dělení CMM

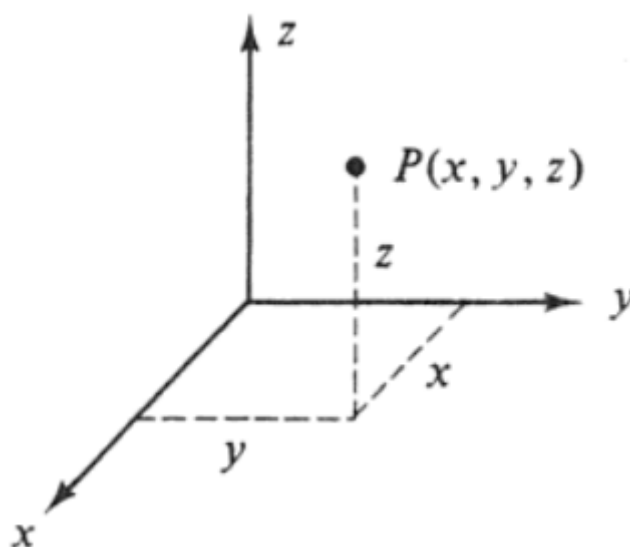
Na základě různých požadavků z průmyslu, které se postupně začínají vyskytovat a dosahují větší konkrétnosti, začalo vznikat více typu CMM strojů. Dle způsobu jejich užití se postupně vyvinulo několik konstrukčních typů CMM strojů. Jednotlivé konstrukční typy se liší konstrukčním uspořádáním pohonných jednotek a oblasti nasazení v praxi. CMM stroje můžeme dělit mnoha různými způsoby, avšak jeden z nepoužívanějších je dle použitého souřadného systému a jaké konstrukce stroje ten souřadný systém využívá.



Obrázek 1 Dělení CMM dle souřadného systému [1]

### 3.1 Kartézské CMM

Jedním z nejrozšířenějších typů zpracovávání souřadnic pomocí CMM stroje je Kartézské uspořádání. Kartézský souřadnicový systém tvoří tři osy, které jsou na sebe navzájem kolmé. Nastavíme si, kde budou nulové souřadnice (tedy počátek souřadného systému) a poté pomocí souřadnic na jednotlivých osách definujeme přesnou polohu bodu v pracovním prostoru. CMM stroje jsou schopny vykonávat lineární pohyby ve směru těchto tří os, na kterých jsou umístěná pravítka, ze kterých se poloha odečítá.



Obrázek 2 Kartézský souřadný systém [2]

### 3.1.1 Sloupový typ (horizontal arm)

CMM stroje sloupového typu jsou ideální pro měření karoserií automobilů nebo jiných podobných rozměrů a tolerovaných částí. Sloupový typ umožňuje měřit i takto veliké součástky díky konfiguraci ramen, kterým můžeme přizpůsobit délku pro měřený dílec. Mezi mnoho konfigurací sloupových CMM strojů patří konstrukce s pohyblivým stolem, pohyblivým sloupe, anebo konstrukce se dvěma rameny. Tato konfigurace využívá jeden sloup pro jednu horizontální osu pohybu a druhý sloup měří druhou. Stejně jako všechny ostatní CMM s pohyblivými stoly, jeho rychlost a přesnost měření závisí na velikosti a hmotnosti součástky. V případě CMM s horizontálním pohyblivým ramenem (Obrázek 3) vede konstrukce s konzolovým ramenem k nízké dynamické tuhosti a relativně velkým chybám podle Abbeho. Konstrukce měřicího systému s dvojitým ramenem se skládá ze dvou identických sad zrcadlových obrazů horizontálních měřících ramen a pohyblivých os, které umožňují současné měření obou stran součásti, což umožňuje vyšší výkon.[3]

Výhodou u všech typů horizontálních ramen CMM je vynikající dostupnost na všechny strany součásti. U této konfigurace jsou typické vysoké rychlosti měření. Nevýhodou je především omezená přesnost. Bohužel vzhledem k délce měřících ramen a výšce celé konstrukce může docházet např. k prohnutí ramen už samotnou váhou ramena, a tak vznikají nepřesnosti. Samotná konstrukce sloupového typu není nijak zvláště robustní a tak k těmto průhybům dochází snadno.[3]

Je normální, že tyto stroje mají velké provozní rozsahy, kde jedna osa může být výrazně delší než další dvě. Konstrukce pohyblivého sloupu nabízí měřicí rozsahy na dlouhé ose, například až 25 000 mm. Relativní úrovně nejistot měření pro sloupové CMM stroje se značně liší. [3]



Obrázek 3 Konstrukce měřicího systému s dvojitým ramenem kontroluje rozměry auta [3]

### 3.1.2 Mostový typ

#### *Pohyblivý mostový typ CMM (moving bridge)*

Hlavním konstrukčním provedením v oblasti CMM strojů je konfigurace pohybující se ho mostu CMM. Má stacionární stůl pro podporu součástky, která má být změřena, a pohyblivý most. U tohoto typu uspořádání stroje může dojít k jevu vybočení (také nazývanému „krokování“). Nohy mostu se mohou pohybovat navzájem jinou rychlostí, což by způsobilo točení mostu. To má vliv na přesnost součástí měřených na různých místech pracovního stolu CMM stroje. Návrh, který implementuje duální řídicí a polohové zpětnovazební systémy pro obě nohy, nebo který pohání pohybující se most ve své středové ose, může tento účinek snížit.[3]

Výhodou uspořádání pohyblivého mostu je to, že ohybový účinek druhé horizontální osy může být značně snížen pomocí dvou nosných sloupů. Konstrukce pohyblivého můstku má malý až střední měřicí rozsah, s relativně malými nejistotami měření. [3]

#### *Nepohyblivý mostový typ CMM (fixed bridge)*

V dalším typu konstrukčního uspořádání CMM s pevným (nepohyblivým) mostem je most pevně připevněn k základům stroje. Je zde deska, na které je obrobek upnutý, a ta zajišťuje jednu osu pohybu. Konstrukční uspořádání typu nepohyblivý most eliminuje jev krokování a poskytuje vysokou tuhost. Tato konstrukce je jedna z nejprodávanějších konfigurací na dnešním trhu především kvůli její přesnosti měření. Bohužel tato konstrukce má i své stinné stránky. Jednou z nich je snížení rychlosti měření, protože stroj musí pohybovat s těžkým

stolem a zároveň s dílcem, který je na něm upnutý. Jelikož se během měření pohybuje i stůl samotný, tak jsou určité hmotnostní limity pro měřený dílec. Hmotnost může způsobovat řadu problému během měření a negativně ho ovlivňovat. Může například dojít k ohýbání samotného stolu, pokud se tento problém předem nevyřeší. Hlavní výhodou konstrukce pevného mostu je velmi tuhá konstrukce. Vzhledem k tomu, že je stůl poháněný ve středu konstrukce a vyhodnocení probíhá také ve středové části, tak je jeho chyba posunu dle Abbeho výrazně snížena oproti konstrukci s pohyblivým mostem. Nevýhodou této konfigurace je potřeba rozšířených vedení pro podporu pohybu dlouhého stolu, protože vyžaduje větší půdorys. [3][9]



Obrázek 4 nepohyblivý mostový CMM stroj [3]

### 3.1.3 Portálový typ (Gantry)

Pro velmi velké díly, které vyžadují měření objemu 10 m<sup>3</sup> nebo více a je u nich požadována velká přesnost, je konfigurace portálového systému nejvhodnější (Obrázek 5). Základ je navržen tak, aby jeho masivní struktura omezila průhyb, který by vyvolal zkreslení výsledků měření. Tímto také zabráníme tomu, aby váha součásti narušovala základnu a způsobovala chyby měření. Často se používají systémy s dvěma pohony (konfigurace master a slave). Softwarová kompenzace se účinně používá ke korekci geometrických zkreslení způsobených

zatížením (cross-Carrier) a teplotními efekty. Výhodou portálového CMM je kromě velkého objemu (např. 25 000 × 6 000 × 4 000 mm) snadný přístup obsluhy ke všem částem v oblasti stroje. Pohyblivá část stroje má menší hmotnost, protože se pohybuje pouze horizontální paprsek, a proto je normálně dosažená přesnost ve středním rozsahu i pro velké měřicí objemy. Tyto CMM stroje sice dosahují vysokých přesností pro měření větších součástek, avšak jejich pořizovací cena je vysoká.[3]



*Obrázek 5 Portálový CMM stroj Zeiss MMZ E [4]*

### 3.1.4 Výložníkový typ

Tento typ CMM stroje má pohyblivé konzolové rameno, které podporuje nosič pro pohyb dovnitř a ven. Nosič podpírá rameno sondy pro vertikální pohyb (Obrázek 6). Část, která se má měřit, se umístí na pevný stůl. Protože stůl neobsahuje vodící dráhy ložisek, lze na něj položit relativně těžké součásti, aniž by to ovlivnilo přesnost měření. Tato konfigurace má obecně lehkou pohyblivou konstrukci pro daný měřicí objem, což ji činí jedinečně pohyblivou. Jde totiž o nejčastěji využívanou konstrukci pro tzv. dílenské stroje, které mohou fungovat v běžných výrobních prostorách a nepotřebují klimatizovanou laboratoř. Vedení pohybů stroje je většinou realizováno kuličkovými šroubovými převody a díky tomu nejsou tak náchylné na nečistotu prostředí, jako je tomu např. u mostových konstrukcí, které využívají aerostatického vedení a třecích převodů, které jsou ale přesnější. Při otevřených třech stranách umožňuje CMM stroj dobrý přístup k obrobku. Kromě toho díky vysoké

propustnosti je tento design oblíbený pro obecné měřicí aplikace. Nevýhoda tohoto CMM stroje spočívá v konzolovém efektu. Respektive pokud support včetně pinoly dorazí až na konec ramene, vzniká průhyb a následně dochází ke zkreslení měření. Pro kompenzaci tohoto efektu byla většina CMM strojů tohoto typu doplněna softwarem korekce chyb. Konzolový design nabízí dlouhý stůl s relativně malým rozsahem měření ve zbývajících dvou osách, což je zvláště vhodné pro měření dlouhých, tenkých dílů.[3][9]



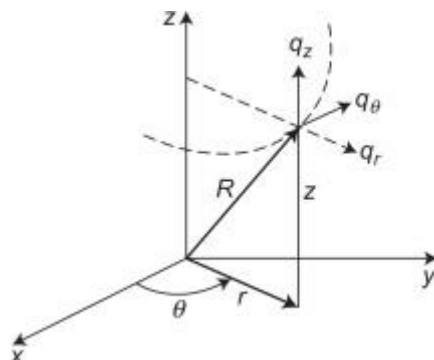
Obrázek 6 Výložníkový typ Zeiss DuraMax [19]

### 3.2 Nekartézské CMM

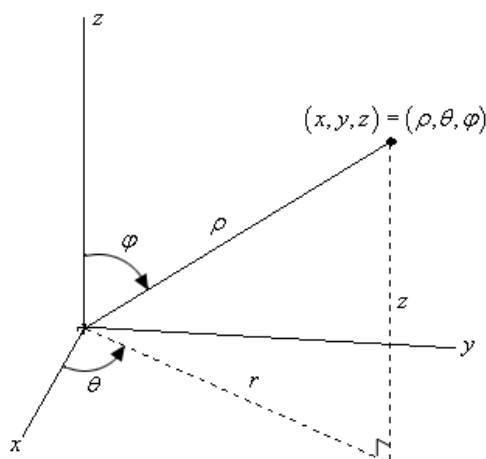
Doposud jsem podrobně popisoval pouze kartézský souřadný systém a konstrukční typy strojů, které tento systém využívají. Tento souřadný systém však není jediný, který se v praxi CMM měření používá. Existují nekartézské souřadné systémy, které se v oblasti průmyslového měření na CMM strojích využívají. Nejčastěji jde o systém cylindrický a sférický. Poloha bodu u cylindrického systému je definována pomocí tří parametrů. Dva parametry se definují v rovině XY pomocí polární souřadnice, která se skládá ze středové úsečky o poloměru  $r$  a úhlu. Třetí parametr určíme jako souřadnici bodu na ose Z. U



sférického systému je bod v prostoru definován pomocí jednoho radiusvektoru a dvou úhlů.  
[5][6]



Obrázek 7 Cylindrický souřadný systém [5]



Obrázek 8 Sférický souřadný systém [6]

### 3.2.1 Ruční CMM stroje

Jak už z názvu vyplývá, jedná se o CMM stroje, které jsou ovládané ručně operátorem. Operátor ovládá pohyby snímací sondy, která zaznamenává naměřené body. Tyto pohyby ovládá např. pomocí páky nebo ovladače. Data získaná touto sondou jsou pomocí softwaru zpracovávána na měřené elementy a charakteristiky dané součástky. Velikou výhodou těchto CMM strojů je jejich přenosnost, resp. povětšinou se jedná o stroje menších rozměrů, které se dají umístit na součástky opravdu velikých rozměrů a vyhodnocovat na nich rozměrové charakteristiky, např. rovinnost apod. Toho využijeme např. u dílců, které jsou svařené a jejich velký objem a hmotnost nedovolují snadnou manipulaci, a tak i umístění do jiných CMM měřících strojů.[3]



*Obrázek 9 ruční CMM stroj - Handyprobe Next [7]*

### 3.2.2 CMM měřící ramena

Jinak také známé jako Articulated arm coordinate measung machines. Využívají sférického souřadného systému. Tento CMM stroj na měření souřadnic se skládá z několika kloubových ramen vybavených úhlovými enkodéry, které se používají k měření souřadnic objektu v prostoru odečtením natočených úhlů kloubových ramen z úhlových kodérů. Na konci ramene je snímací dotyková nebo optická sonda.[3]

Sonda namontovaná na konci kloubového ramene, která se otáčí kolem osy, může měřit body umístěné na obvodu kruhu s poloměrem rovným délce ramene. Kloubové rameno CMM (AACMM) se dvěma spojovacími rameny je teoreticky schopné měřit všechny body umístěné v rovině mezi dvěma soustřednými kruhy. Zde se používá slovo „teoreticky“, protože tento závěr platí pouze tehdy, jsou-li všechna ramena spojena geometrickými čarami a všechny klouby mohou být reprezentovány geometrickými body. Skutečná měřitelná zóna je menší.[3]

Díky různým možnostem upínání těchto strojů jsou i tyto CMM stroje přenositelné a můžeme tedy ramenou připnout například přímo na měřenou součástku a využít ji tedy i jako základnu. Jejich výhodou je tedy velký pracovní prostor a mnoho možností polohování. Tento stroj je řízený opět operátorem, který vede rameno se sondou. Nedosahuje se zde velké přesnosti měření vzhledem k množství kloubů, které jsou na stroji umístěné. [3]



Obrázek 10 AACMM měřící rameno ROMER [8]

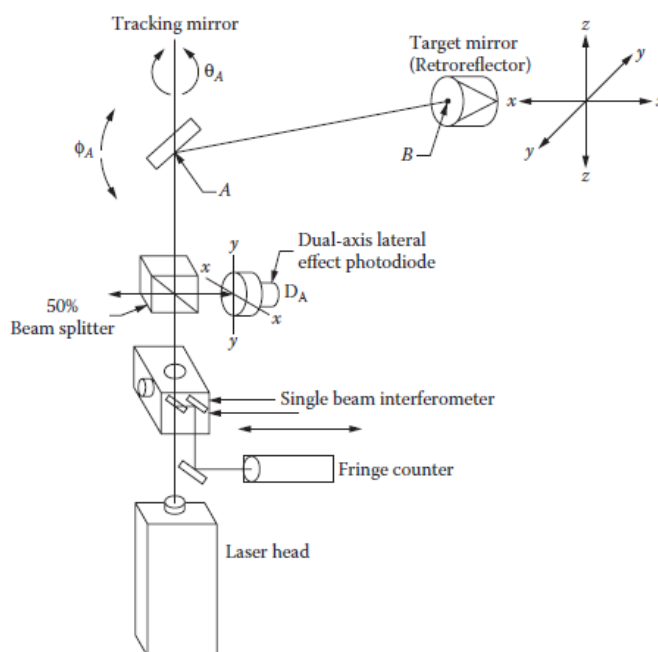
### 3.2.3 Laser Trackery, Laser Tracery

Do této oblasti spadají vlastně všechny optické CMM stroje. Můžeme zmínit např. laser tracery a v dnešní době nejvíce využívané a nejpřesnější (z hlediska strojů CMM určených pro měření velkých součástí) laser trackery. Tyto systémy se používají především na měření velkých dílců, na které nejsou kladeny velké nároky na jejich přesnost měření. Většina těchto systémů je snadno přenosná a mobilní. Jejich velkou výhodou oproti dotykovým CMM strojům je jejich skenovací rychlost. Tyto systémy využívají již výše zmíněného sférického souřadného systému. Princip jejich fungování spočívá v principu laserové triangulace a interferometru.[3]

#### *Princip fungování Laser Trackeru*

Pracovní princip laserového sledovacího systému je znázorněn na Obrázku 11. Cílové zrcadlo je měřený objekt. Cílové zrcadlo se pohybuje podél objektu, který má být měřen, nebo se pohybuje s pohybujícím se objektem. Laserový paprsek emitovaný z laserové hlavy je děličem paprsků rozdělen na dva paprsky. Jeden prochází rozdělovačem paprsků, následně je odražen rohem referenční krychle a vrací se zpět k rozdělovači paprsků. Další paprsek jde do sledovacího zrcátka a je odražen terčem zpět a vrací se do sledovacího zrcátka. Když má cíl pohyb ve směru kolmém na dopadající paprsek, má odražený paprsek paralelní posun, který je snímán fotodiodou s postranním efektem, která přijímá část zpětného paprsku odraženého rozdělovačem paprsku. Vysílá signál do servomechanismu pro otáčení sledovacího zrcadla, dokud paprsek odražený od sledovacího zrcadla nepřejde do středu cíle.

Většina zpětného paprsku prochází rozbočovačem paprsků a vrací se zpět k interferometru s jedním paprskem. Tento paprsek interferuje s paprskem odraženým rohem referenční krychle a okrajové počítadlo převádí interferenční signál na elektrický signál a počítá počet interferenčních proužků. Tímto způsobem interferometr vždy sleduje pohyb cíle a měří změnu vzdálenosti mezi středem otáčení sledovacího zrcadla a středem cílového zrcadla. [3]

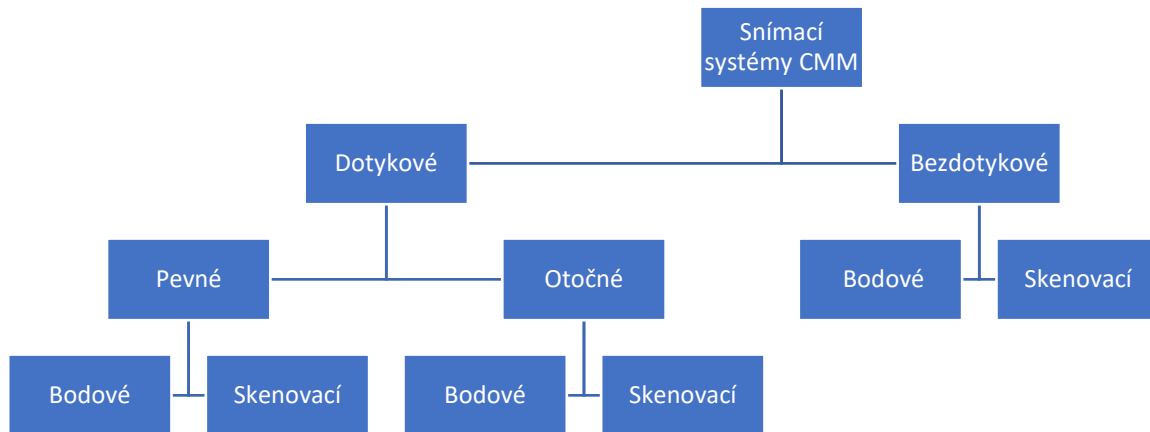


Obrázek 11 Princip fungování laserového trackeru [3]

## 4 Extrakce bodů z měřeného dílu

Doposud jsem popisoval jednotlivé druhy CMM strojů a souřadné systémy, které využívají. Nyní pozornost přesunu na snímací senzorku, která je pro měření nepostradatelná, neboť skrze ni jsme schopni extrahovat z povrchu dílu měřené body, které při měření následně zpracováváme. Snímače můžeme dělit například na dotykové a bezdotykové snímače. Snímače dotykové se dělí především na pevné a otočné, a to podle jejich způsobu pohybu. Pokud bychom chtěli tyto systémy rozdělit ještě jinak, tak můžeme například využít toho, že některé systémy pracují v režimu, kdy snímají jednotlivé body, anebo mají naopak skenovací

režim, při kterém zaznamenávají celé křivky a plochy měřeného dílce. Tyto způsoby rozdělení můžete vidět v níže uvedeném schématu (Obrázek 12).



Obrázek 12 Dělení snímacích systémů CMM [1]

### 4.1 Dotykové systémy

Tento typ snímacího systému využívá při extrakci bodů přímého fyzického kontaktu snímače s měřeným dílem. Všeobecně se udává, že tyto systémy mají znatelně vyšší přesnost než systémy bezdotykové. Systémy, které pracují na principu dotyku, nejsou závislé na osvětlení v prostoru, kde je dílec měřený. Na rozdíl od optických systémů nemá dotykový systém problém se snímáním povrchu, který je lesklý. U lesklých povrchů při snímání bezdotykovém dochází ke špatnému odrazu vysílaného paprsku, přijímač to nepřesně vyhodnocuje a dochází k chybám měření. Rychlost snímání jednotlivých bodů je zase naopak znatelně pomalejší než u systému bezdotykových. Tyto systémy se využívají hlavně tam, kde je potřeba dosáhnout vysoké přesnosti a opakovatelnosti měření.[1]

#### 4.1.1 Spínací systémy

Jedná se o nejjednodušší konstrukční typ dotykových snímacích systémů. Základní mechanismus snímání se sestává ze tří válcových tyčí, které jsou přitlačovány proti pářům

kuliček. Tato akce omezuje všech šest stupňů volnosti doteku tak, aby se po vychýlení vždy vrátila do stejné polohy. Elektrický obvod je vytvořen prostřednictvím kontaktů tak, že spouštěcí signál je generován vždy, když je dotek odkloněn v jakémkoli směru a rozpojí minimálně jednu z trojice kontaktů. Tento spouštěcí signál upozorní počítač, aby zaznamenal aktuální polohu stroje v jednotlivých osách v okamžiku kontaktu. Tyto souřadnice se poté uloží pro následné použití. Konstrukce sondy umožňuje, aby se dotek po následujícím kontaktu odklonil, což CMM poskytne čas na zpomalení. Když se dotek vrací zpět, pružinová síla způsobí opětovné usazení stylu. Tento mechanismus umožňuje sondě detekovat povrchy s mikrometrickou přesností.[10]

Hlavním problémem spojeným s kinematickým návrhem dotykových spínacích sond je to, že geometrie kontaktů má za následek mírně odlišné kontaktní síly potřebné ke spuštění sondy v závislosti na směru, ve kterém se dotek a povrch setkávají. Tato změna vede k různým stupňům ohybu doteku mezi okamžikem, kdy se dotýká obrobku, do okamžiku, kdy je generován spouštěcí signál. Tato výchylka způsobená kontaktními silami před spouštěcím signálem se nazývá předběh. Rozsah této výchylky závislý na směru je znám jako předběhová variace. Předběžný pohyb doteku lze přizpůsobit kalibrací sondy proti kalibrované referenční kouli. Protože předběh se může lišit podle směru snímání, je nutné sondu kvalifikovat ve stejném směru jako směr zamýšleného měření. [10]

Pokroky v konstrukci sond pomohly tento účinek snížit. Použitím tří vysoce citlivých tenzometrů umístěných v sondové hlavě umožňuje detekovat kontaktní síly, které se vytvářejí mezi dotekem a obrobkem. V takových provedeních je spouštěcí signál generován při velmi malé síle, která je konzistentní ve všech směrech, čímž se snižuje chyba způsobená silami závislými na směru.[10]

Tento systém snímání zaznamenává pouze jednotlivé body, a to jedním dotykem, tzn. že se pouze vyhodnocuje, zdali došlo k dotyku, nebo nedošlo. Poté přístroj opět odjede a dotýká se na jiném místě. Tento systém je tedy z hlediska produktivity málo použitelný. [10]

### 4.1.2 Aktivní snímací systémy

Mnoho vysoce přesných souřadnicových měřicích strojů využívá aktivní snímací systém. Tento systém (Obrázek 13) sestává ze tří rovnoběžných mechanismů pružin (tzv.

paralelogramů), které mají ve směru měřicích os v rozmezí odchylek obvykle  $\pm 3$  mm. Pohyby v každém směru jsou zachycovány induktivním měřicím systémem. Každý paralelogram je sevřen ve své neutrální poloze; nulové body indukčních měřicích systémů jsou nastaveny do této polohy. Pohybový cívkový systém generuje měřicí sílu, když je v kontaktu s obrobkem. Jakmile se sondážní systém nastaví do téměř nulové polohy, jsou souřadnice počítače a digitalizované zbytkové vychýlení hlavy sondy (skenovací jednotka) přeneseny do počítače. Při vysokorychlostním pojezdu je hlava sondy předem vychýlena ve směru snímání. Tím je zajištěno, že hlava sondy může být zastavena v rámci svého vychylovacího rozsahu v případě kontaktu nebo kolize. Hlavním rozdílem od spínacího systému snímání je to, že měření aktivním snímacím systémem je statické, což má za následek značné zvýšení přesnosti. Aktivní snímací systémy pracují buď ve volně se pohybujícím režimu (pracují ve všech třech osách současně), nebo v sevřeném režimu, přičemž se neměřené osy sevrou.[10]

Tento systém je schopen body zaznamenávat kontinuálně, na rozdíl od systému spínacího. To velice zefektivňuje rychlost měření. Tento systém se využívá hlavně pro měření přesných tvarových ploch.



Obrázek 13 Snímací hlava Zeiss [11]

#### 4.1.3 Otočné a pevné systémy

Otočné systémy můžeme nazývat i indexovatelné. Na pinolu můžeme díky systému upínání upnout i otočné senzorové hlavy. Tyto systémy fungují na principu dvou na sebe kolmých

rotačních os, podél kterých se je hlava schopna natočit, abychom byli schopni měřit různé tvary dílců. Buďto se poloha nastaví manuálně operátorem a dále se již nemění, nebo jsou v systému motory, které pracují v symbióze se softwarem, který řídí nastavení polohy senzoru. V takovém případě je senzor plně programovatelný a pohyb senzoru probíhá v automatickém režimu. To označujeme jako motorické dotykové snímací systémy. [12]

Tyto snímače mají pouze jeden měřící dotek. výhodou je možnost použití jednoduché konfigurace snímačů. Nevýhodou u otočných systému je jejich měřící přesnost. Vzhledem k tomu, že je zde více motorů, tudíž i více možností ke vzniku vůle, dochází ke ztrátě přesnosti měření. Nižší přesnost měření je také způsobená motorickým natáčením. Každá z rotačních os snímací hlavy má svou chybu, která se v čase načítá a roste. Dnes tento problém řeší právě konstrukce hlavy REVO 5, která má tyto chyby kompenzovat složitým, velmi přesným optickým algoritmem, který je založený na principu interferometru.[12]

Tyto systémy otočné sondy můžeme využít například pro měření komponentů karoserií či svařenců (kvůli tvarové složitosti nelze měřit pevným snímacím systémem. Pro příklad jsem zvolil hlavu sondy Renishaw REVO 5. Po instalaci Renishaw REVO 5 na pinolu, která je schopna automaticky měnit orientaci sondy, umožňuje měřit obrobky, které obsahují mnoho různých, tvarově složitých elementů. Kromě použití dalších sond, které je možné díky systému v CMM strojích vyměnit, umožňuje realizovat plnou automatizaci měření různých forem obráběných dílů. [12]





*Obrázek 14 Sonda Renishaw Revo 5[13]*

Pevné snímací systémy, jak už z názvu vyplývá, mají pevnou konstrukci. Jedná se o to, že na pinole umístěný snímač je pevný a pohyby dělá stroj, nikoliv snímač. Pevné snímací systémy mají řadu výhod. Díky jejich pevné konstrukci zde nevzniká tolik vůle a nepřesností měření kvůli absenci dalších kloubových spojení. To zásadně zvyšuje přesnost měření, a tedy i zajišťuje lepší výsledky. Další výhodou je možnost využít snímací hlavy s více senzory. Tuto výhodu zase neguje obtížnější kvalifikace snímače. [12]



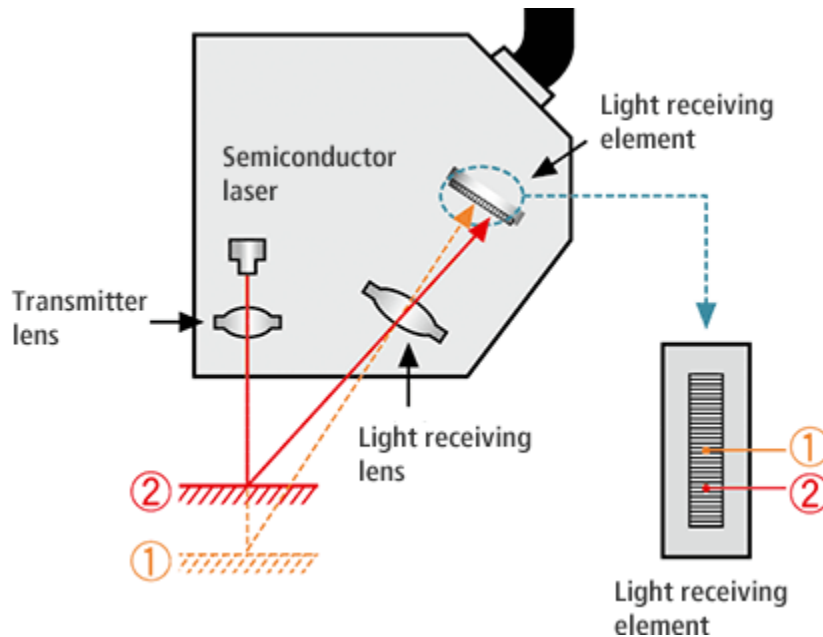
Obrázek 15 Snímací hlava MMP310 s více snímači(vlevo) a s jedním snímačem(vpravo) [12]

## 4.2 Bezdotykové

Trend ve vývoji senzorů je zaměřen na bezkontaktní optické senzory. Kombinují prvky optiky, videa a laserových technologií. Mohou sbírat až 20 000 datových bodů za sekundu. V kombinaci s výkonnými matematickými výpočty lze provádět rychlou analýzu velkého množství naměřených dat.

### 4.2.1 Laserové snímací systémy

Příkladem bezkontaktní sondy je sonda, která může využívat principu laserové triangulace. Laserové triangulační snímače využívají pro zdroj světla diodu, CMOS, anebo CCD snímač, optickou čočku a signálový procesor. Během měření touto metodou se na povrch měřeného objektu zaměřuje světelný paprsek, který vytvoří odraz. Ten zaznamenává snímač na zařízení. Vzhledem k tomu, že během měření se vzdálenosti objektů mění, tak i úhel dopadu a odrazu prochází změnou. Tuto změnu zaznamenává právě přijímač světla na zařízení. Známe-li tedy vzdálenost přijímače vzhledem ke zdroji světla a pozici odraženého světelného bodu na přijímači, pak signálový procesor vypočítá vzdálenost měřeného dílce od přístroje. [14]



Obrázek 16 Princip laserové triangulace [14]

Protože laserová sonda nezpůsobuje žádné zkreslení povrchů obrobku, je vhodná pro kontrolu pružných a jemných materiálů. Typické aplikace takových systémů zahrnují měření sedadel a přístrojových desek v automobilech, plastových výlisků, hliněných modelů a modelů rychlého prototypování. Laserové sondy mohou získávat velice přesné informace o rozměrech obrobku, ale je třeba poznamenat, že pro určité typy materiálu obrobku by mohly vznikat chyby měření způsobeny jejich optickými odrazovými vlastnostmi. [14]

#### 4.2.2 Kamerové snímací systémy

Tyto systémy jsou vhodné pro měření dílců s velmi malými rozměry, anebo obsahující dvourozměrné geometrické prvky. Jsme s nimi schopni snímat i díly z měkkých materiálů, jako například z plechu, pryže nebo plastu. Obecně se optické systémy nepoužívají pro aplikace s vysokou přesností a kamerové snímací systémy jsou omezeny velikostí a rozlišením obrazu kamery. Optické snímací systémy v dnešní době využívají minimálně dvou a více kamerových snímačů. Tyto kamery snímají objekt z různých úhlů současně a díky tomu se vyhodnocuje vzdálenost a hloubka měřeného objektu. [10]

Bezkontaktní skenovací metody lze kombinovat s analogovým skenováním, aby se rozšířila aplikace CMM tak, aby zahrnovala kontrolu malých složitých částí. Většina výrobců CMM dnes nabízí multisenzorové systémy, které zahrnují kontaktní a

bezkontaktní měřicí zařízení. Multisenzory jsou stroje, které nabízejí možnost plynulé kombinace přesného dotykového měření a měření malých velmi malých elementů optickým systémem CNC režimu. Používá se pro díly, které mají část elementů měřitelné dotykem a část již neměřitelné dotykem. Zde pak přepneme na optiku. Nejčastěji proto nacházejí uplatnění v elektrotechnickém průmyslu. Jednou z klíčových výhod multisenzorového systému je flexibilita provozu, kterou dává tento systém uživateli. Díly, které vyžadují kontaktní a bezkontaktní měření, mohou být kontrolovány na stejném stroji a nemusí být přenášeny z CMM do samostatného bezkontaktního snímacího systému, což usnadňuje z ekonomického hlediska kontrolu.[10]



Obrázek 17 Optický senzor Zeiss ViScan [15]

### 4.2.3 Senzory monochromatického bílého světla

Snímání probíhá pomocí chromatického senzoru bílého světla, který zaznamená bodovou vzdálenost. Funguje na principu vysílání a přijímání signálu jako ostatní systémy. Za pomoci optických vláken se ze zdroje bílého světla do optické sondy pohybuje světelný signál. Bílé světlo se pomocí čoček a využitím chromatické aberace v optické sondě rozloží na jednotlivé ohniskové vzdálenosti celého viditelného spektra. Jednotlivé rozložené ohniskové vzdálenosti se promítají do rozsahu měření daných senzorů. Následně se do prostoru pro

měření vloží měřený dílec, na který senzor promítne paprsky světla o jednotlivých vlnových délkách. Následně se odrazí ta vlnová délka, která je nejostřejší a dokonale odražená. Tato vlnová délka putuje zpět do spektrometru, který vyhodnotí na základě její největší intenzity přesnou vzdálenost měřeného bodu. [16]

Tento senzor může ve skenovacím režimu vygenerovat rastrový obraz měřeného dílce. Během měření nasnímá velké množství bodů a hustota těchto naměřených bodů pomáhá vykreslit přesnou topografii měřeného povrchu. Ze získaných výsledků měření jsme schopni vyhodnotit například rovinnost a drsnost povrchu a zároveň třeba změřit základní geometrické prvky. Výhodou tohoto snímacího systému je, že díky více vlnovým délkám, které vysílá, je schopen změřit jakýkoliv druh materiálu, ať už je tmavý, anebo je třeba i lesklý. Tento systém se aplikuje především při měření malých nebo snadno deformovatelných součástek. [16]



Obrázek 18 Otočný senzor Zeiss s bílým světlem [17]

## 5 Postup měření součásti na CMM

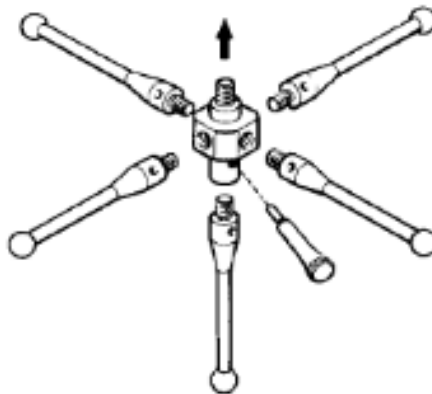
### 5.1 Seznámení se s výkresovou dokumentací

Vzhledem k tomu, že CMM stroje slouží k měření komponentů, tak je potřeba nejprve analyzovat technickou dokumentaci daného měřeného dílce. Po vytvoření výkresové dokumentace konstruktérem přechází práce na technologa. Ten musí analyzovat výkresovou

dokumentaci a podrobně se seznámit s měřenými charakteristikami na výkrese. Následně navrhne, které charakteristiky bude zařízení schopno změřit a které ne. To bude záležet na volbě snímacího systému. Po vybrání snímacího systému se určí optimální poloha dílce, který bude potřeba změřit a způsob upnutí během měření na stroji. CMM stroje jsou po správném nastavení schopné změřit mnoho charakteristik a pomocí softwaru je i vyhodnotit. Pro představu, může se jednat např. o charakteristiku kruhovitosti, kde např. snímací sonda objede snímačem dílec a vytvoří protokol, ve kterém může být jedním ze způsobů vykreslení výsledků měření graf, kde se zaznamenává povrch kruhu.

### 5.2 Konfigurace snímače

Jak už jsem zmiňoval výše, je potřeba, aby metrolog stanovil způsob provedení měření. Jednou z podstatných částí v tomto kroku je volba snímače/snímačů, které budou toto měření provádět. Jak jsme si již uvedli v předešlé kapitole, tak existují snímací systémy dotykové a bezdotykové. Nejprve je tedy nutné se rozhodnout, který ze systémů využijeme. Pokud budeme potřebovat menší přesnost a rychlejší provedení, tak bychom se nejspíše klonili k bezdotykovým snímacím systémům. Hojně se využívají při měření větších dílců, kde není vyžadovaná velká přesnost. Pokud bychom naopak potřebovali docílit vysoké kvality měření, pak bychom využili dotykových snímacích systémů.



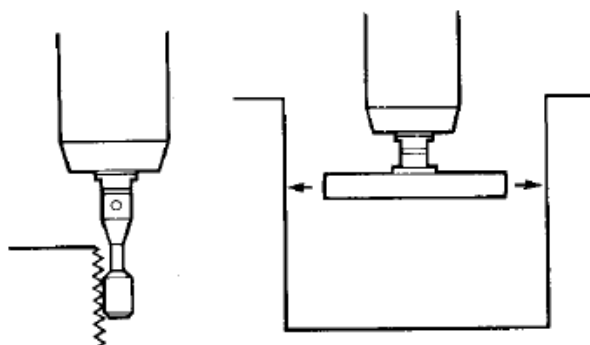
Obrázek 19 Snímací hlava s pěti snímači [10]

U dotykových systémů se dotykový snímač může sestavit podle potřeb metrologa. Snímače jsou povětšinou velice dobře modifikovatelné, a tak se nabízí spousta možností, jak je sestavit. I zde se ale vyskytují omezení. Vztahují se k hmotnosti a maximální délce vyložení snímače. Např. Snímací hlava Zeiss VAST Gold má maximální povolenou hmotnost snímací konfigurace 600 g a 800 mm maximální délku vytažení snímače včetně všech prodloužení.

Snímací systém je povětšinou dodáván ve stavebnicové formě, která obsahuje upínací talířek, kostku, prodloužení a dotek. Na kostce jsou jemné závity, do kterých se našroubuje prodloužení se snímacím dotekem. Je tedy možná přimontovat na kostku pět snímacích doteků, nebo ale třeba jen tři či jen jeden. [9][10]

Nejčastěji se jako koncové tvary doteku používají kuličky. U tohoto tvaru doteku platí pravidlo, že je lepší volit co největší možný průměr kuličky, a to z důvodu drsnosti povrchu. Pokud zvolíme kuličku s větším průměrem, pak jsme schopni odfiltrovat část textury povrchu. Samozřejmě ale musíme velikost průměru kuličky přizpůsobit požadavkům měření. Pokud bychom chtěli měřit například díru o průměru 3 mm, tak nám senzor o průměru 5 mm bude asi k ničemu. Je tedy potřeba přizpůsobit jak velikost snímače, tak i určit délku prodloužení pro snímač. Pokud nepotřebujeme měřit nějaké velké hloubky, pak je nejlepší, aby prodloužení bylo co možná nejkratší a nedocházelo tak velkým průhybům. Mimoto je i zde více materiálu. Způsobuje to větší hmotnost snímací hlavy. To má negativní vliv na dynamiku a přesnost snímání. Cílem je tedy udělat sestavu co nejkratší a kuličky co možná největší. [9][10]

Existuje ale i spousta dalších tvarů doteků, které můžeme použít. Ve své podstatě při jejich volbě u nich platí stejná pravidla, která jsou uvedena výše. Tyto jiné tvary doteku se používají především pro měření parametrů, které by se kuličkovým tvarem doteku měřily obtížně, nebo bychom je nebyli schopni změřit vůbec. Mezi tyto tvary patří například diskové (talířky) a nebo válcové. [9][10]



Obrázek 20 Nalevo válcový tvar a napravo talířový tvar doteku [10]

### 5.3 Kvalifikace snímacího systému

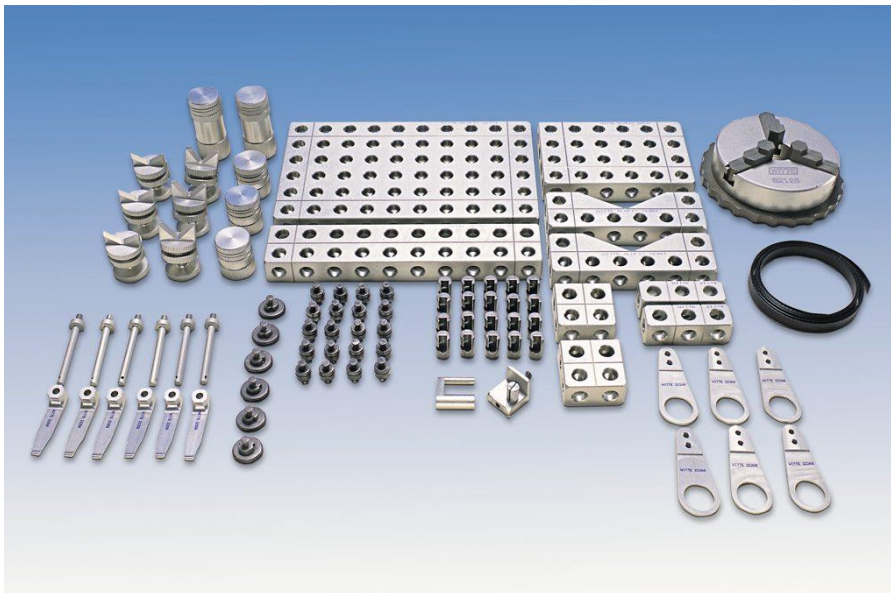
Kvalifikace snímacího systému je nezbytným krokem v procesu měření. Jde o definici přesné polohy kuliček snímacího systému v jednotlivých osách stroje vůči nulovému bodu snímací hlavy, který je reprezentován polohou středu kuličky referenčního snímače. Součástí kvalifikačních dat je i údaj o orientaci každého ze snímačů, jeho značení, průměru konkrétních kuliček a hodnotě přitlačné síly pro každý ze snímacích dotek v případě, že se jedná o aktivní snímací systém. Kvalifikace se provádí skrze kvalifikační artefakt. Tímto artefaktem je nejčastěji kvalifikační koule s velmi přesným průměrem, který zaměříme referenčním snímačem. Tím získáme geometrický vztah mezi referenčním snímačem a kvalifikačním artefaktem. Následně pak do snímací hlavy upneme kvalifikovaný snímač a ručně ho navedeme ve směru dříku na vrchlík kvalifikačního artefaktu. Poté se spustí CNC režim, který na kvalifikační kouli nasnímá předepsaný počet bodů ve dvou úrovních přitlačné síly (nejčastěji se jedná o hodnoty 200 mN a 400 mN). Tím získáme přesnou polohu mezi středem kvalifikované kuličky a nulovým bodem snímací hlavy. Zároveň je vypočítána i směrodatná odchylka ze snímaných bodů, která reprezentuje chybu příslušného snímače. Tato chyba by měla být co nejmenší (u laboratorních strojů je ideální mezi 0,1 – 0,3  $\mu\text{m}$ ). Pokud je tato chyba vyšší než 0,5  $\mu\text{m}$ , pak je snímač nepoužitelný. [1]

### 5.4 Upnutí součásti

Už jsme si definovali snímače, jejich tvar a polohu. Nyní bychom se podívali na měřené součástky. Pro dobrou kvalitu měření a možnost reprodukce měření je potřeba zvolit vhodné upnutí měřeného dílce na plochu pracovního prostoru CMM stroje. Od tohoto upnutí se vyžaduje, aby se s dílcem nemohlo pohnout, a tak se nenarušil proces měření, který spočívá v geometrických vazbách jednotlivých elementů. Posunem bychom tyto vazby porušili. Zároveň toto upnutí musí být dostatečně šetrné, aby nedošlo k poškození (např. otlacením sklíčidel) měřeného dílce. Měřený dílec bychom měli upnout do takového místa, kde bude mít CMM stroj dobré podmínky pro jeho měření, tedy dobrý přístup pro dotek. Pokud je to možné, volí se takové upnutí, které dovolí změřit měřený dílec na jedno upnutí, aby tak nedošlo k nepřesnosti měření, které vznikají během změny upnutí dílce. Pokud to možné není, volíme způsob upnutí, kdy je potřeba co nejméně tyto upnutí měnit. [10]



Nyní tedy ke způsobům upnutí. Ty se nikterak významně neliší od běžných způsobů upínání obrobků, například při frézování. Upnutí měřeného dílce můžeme provést například pomocí svěráků, upínek, kleštiny, sklíčidel apod. Může se použít i technologie, kde se k upnutí využívá podtlak či elektromagnet. Pokud nemůžeme použít konvenční způsob, tak se mohou nechat vyrobit přípravky jednoúčelové. Ty se používají hlavně v sériové výrobě. Mohli bychom je použít například pro upnutí bloku motoru, který má celkem nepravidelný tvar. Pak je zde ještě možnost upnutí pomocí přípravků, které jsou modulární a dají se přestavovat. V podstatě se jedná o stavebnici, která povětšinou obsahuje základní desku, kostky, upínací prvky, stojny spojovací apod. U tvorby obou druhů přípravků (jednoúčelové a modulární) se vyžaduje velká přesnost, úzké tolerance. Většinou jsou tyto přípravky celkem nákladné na výrobu.[10]



Obrázek 21 Modulární upínací prostředky [18]

### 5.5 Vyrovnání měřené součásti

Když už se nám povedlo součástku upnout, tak je ale ještě třeba součástku vyrovnat. Tento úkon musíme provést vždy před každým měřením. Vyrovnáním dojde ke stanovení počátku a určení orientace lokálního souřadného systému měřené součástky vůči pracovnímu prostoru CMM stroje. K tomuto vyrovnání se užívají referenční elementy výrobku, díky kterým odebereme všech šest stupňů volnosti. Šest stupňů se vlastně skládá ze tří hlavních os X, Y, Z (podle kartézského souřadného systému) a 3 rotačních pohybů kolem těchto 3 os. Pokud se

odebere všech šest stupňů volnosti, pak je definována přesná poloha součástky v pracovním prostoru stroje. [11]

K tomuto vyrovnaní se používají jednotlivé metody rozdělené níže.

- Standartní metoda (metoda 3-2-1) – Nejčastěji užívaná, vhodná pro dílce bez tvarových ploch s vhodnými základnami. Nejprve si definujeme primární prostor. Ten můžeme definovat pomocí definování 3D elementu. Tím může být například 3D přímka, rovina, válec atd. Tím také odebereme hned tři stupně volnosti. Následuje rotační nebo rovinné vyrovnaní během kterého definujeme kolmou geometrii na primární prostor a tím dojde k odebrání dalších dvou stupňů volnosti. Nakonec definujeme nulové počátky jednotlivých osových směrů. To nám odebere i poslední stupeň volnosti
- RPS body (Reference Point Systém) – Jedná se o systém, který využívá tzv. referenční body, díky kterým jsme schopni kontrolovat vzájemnou polohu dílů.
- 3D Připisování (Best-fit) – Této metody se často užívá u dílců se složitou tvarovou plochou, kde není možno provést standartní vyrovnaní, protože zde chybí elementy, které bychom k těmto plochám mohli stáhnout. Jednou z nejčastějších metody je metoda, kdy se během snímání bodů ze součásti tyto body připisují na referenční CAD model za pomoci iteračních algoritmů např. metody nejmenších čtverců.[11]

### 5.6 Extrakce bodů

Jak už jsem již zmiňoval v předešlých kapitolách, tak metrolog musí zvolit strategii měření. Během tohoto měření CMM stroj zaznamenává jednotlivé body a tyto body ukládá. Nicméně jejich zaznamenávání se musí již dopředu definovat, aby přístroj věděl, kolik bodů je třeba určit. Matematicky je definován minimální počet potřebných bodů k definování elementu. Pro vyhodnocení tvaru potřebujeme více než je minimální počet bodů k definici elementu. Čím více bodů získáme, tím je výsledek měření lépe popsán pro vyhodnocení, avšak to znamená delší čas snímání. Proto se hledá kompromis mezi časem snímání a počtem nasnímaných bodů. Často už samotný výrobce udává ideální počet bodů, které jsou třeba pro vyhodnocení rozměrů apod.[3] [10]

### 5.7 Vyhodnocení

Díky extrakci bodů jsme získali data, které nyní musíme zpracovat, například pomocí Gaussovy metody nejmenších čtverců, která nám pomůže vypočítat elementy. Dojde zde

k aproximaci měřených bodů určitou geometrií. Výsledný výpočet bychom měli volit podle předpokládaného účelu měřené součástky. Např pro vyhodnocování součástek kružnicového či válcového tvaru bychom využili metody vepsaných nebo opsaných kružnic. Pro uložení hřídele bychom využili metodu maximální opsané kružnice, u náboje bychom užíli metody minimální vepsané kružnice. [10]

Po výpočtu těchto elementů musí dojít k následné eliminaci odlehlých hodnot, které jsou nejspíše chyby měření. Ty mohou vznikat vlivem vibrací během měření, nečistot na měřeném dílci apod. Vzhledem k tomu, že tyto body nejsou s velkou pravděpodobností „skutečné“, tak je potřebujeme vyřadit, abychom předešli zkreslení výsledku měření. Často se využívá systém eliminace 3,00/3,00 který v podstatě říká, že se odstraní 3% naměřených bodů uvnitř měřeného dílce a 3% vně. [10]

Poslední etapa vyhodnocení měření spočívá ve vyhodnocení prvků. Porovnávají se tolerované (jmenovité) hodnoty a hodnoty naměřené. Z tohoto porovnání se dozvíme, zdali daný prvek odpovídá předepsaným hodnotám, je potřeba upravit, nebo je to zmetek. Jmenovité hodnoty jsou dané ve výkresové dokumentaci a často i zároveň v modelu CAD.[10]

Ke všem těmto vyhodnocovacím procesům se často využívá různých softwarů. Například firma Zeiss používá SW Calypso, Siemens NX CMM, Hexagon metrology OC-DMIS CMM apod. Software na konci celého měření a vyhodnocování vytvoří protokol, ve kterém se shrne výsledek měření. Zdali měřený dílec vyhovuje dle předepsaných hodnot a často se vytvoří i grafické zpracování měřených elementů, kde můžeme vidět pravý (naměřený) tvar. [10]

## 6 Praktická část bakalářské práce

Nyní se dostávám do části bakalářské práce, kde budu vyhodnocovat výsledky měření na CMM strojích a pokusím se nastínit základní rozdíly, aby byly patrné změny v měření pomocí dotyku a pomocí bezdotykových senzorů.

Na začátek je tedy nutné uvést, proč zde porovnáváme dotykové a bezdotykové měření. Jedním z hlavních důvodů je ten, že ve výrobním hutním závodě Škoda Auto se využívá dotykové měření na CMM strojích na odlitcích, které si Škoda Auto sama odlévá pomocí jedné z nejpřesnějších metod, metodou vysokotlakého lití. Jelikož samotný odlitek má řadu

funkčních částí, které se musí nadále zpracovávat, obrábět, brousit apod, tak samotný odlitek obsahuje přídavky na obrábění. Pro přídavky nejsou v žádném případě tak vysoké nároky na přesnost jako na finální produkt, který vznikne následným zpracováním produktu. Vznikla tedy úvaha, že by se dalo využívat jiné metody měření tohoto odlitku. Vzhledem k tomu, že se rozměrová kontrola provádí ve formě bodového měření, které je časově náročné a nevhodné pro pohonné jednotky strojů, které neustálou změnou směru rychloposuvů pohyblivých částí stroje vyžadují častější servisní zásah.

### 6.1 Současný stav měření ve Škoda Auto

Na začátku bylo jedním z cílů práce zhodnotit současný stav měření v podniku Škoda Auto. V současné době se měření jednotlivých dílců provádí v měrovém středisku hutního a kovárenského provozu, které je vybaveno řízením vnitřního klimatu vzduchu, aby byly zachovány stejné podmínky měření pro všechny měřené dílce. Stroje jsou umístěny na speciálních základech, které zamezují další šíření vibrací v podlaze. V místnosti, kde se provádí měření, je vzhledem k charakteru výroby dbáno na maximální možnou čistotu prostředí.

Firmy Škoda Auto pro svá měření využívá CMM strojů od firmy Zeiss. Jednotlivé stroje jsou vybaveny dotykovým snímacím systémem. Firma Škoda Auto využívá pro svá měření tři CMM strojů. Jedná se o stroje Zeiss Contura G2, Zeiss Prismo 7 a Zeiss Prismo 10, který se používá především pro rozměrnější díly.



Obrázek 22 Zeiss Prismo 7



Obrázek 23 Zeiss Prismo 10

Všechny tyto stroje jsou vybaveny aktivním snímacím systémem VAST a jsou řízeny pomocí softwaru Calypso. Z hlediska měření odlitků je zde ještě využívána na SW nadstavba programu Calypso, a to je SW HOLOS. Co se týče samotného měření, tak to je prováděno převážně bodovým režimem snímání, kde průměrná doba měření je v řádech desítek minut. Časově nejnáročnější jsou kompletní rozměrové analýzy odlitků, kde jedno měření může trvat v řádu až jednotek hodin.

Bodové měření má vliv nejen na čas měření, ale i na technický stav stroje. Vzhledem k tomu, že měrové středisko využívá CMM strojů s pohyblivým mostem a bodovým režimem snímání, dochází ke značnému namáhání pohonných jednotek stroje, a to především kvůli neustálým změnám směru rychloposuvů při bodovém snímání. To generuje vyšší servisní náklady než při měření v skenovacím režimu. Zároveň ale ani skenovací režim není vhodný z důvodu kvality povrchu výkovku či odlitku, neboť je díl podstatně hrubý.

Aby se snížila časová náročnost měření a zároveň se snížili servisní náklady na údržbu stroje, tak se uvažuje o aplikaci optického snímacího systému bodů, např. laserscaneru. Cílem této práce je tedy porovnávat přesnost a produktivitu jednotlivých metod snímání na vybraném dílu.

Jedná se o odlitek skříně spojkového mechanismu, kterou si vyrábí firma Škoda Auto sama. Odlitek je v základním stavu po odstranění vtoků a z hlediska měření jde o rozměrovou kontrolu výrobku před odesláním na obráběcí operace. Samotný díl je hodně členitý a obsahuje přídavky na obrábění. Místy se na dílci mohou vyskytovat i malé otřepy na hranách. Měření probíhá za upnutí do jednoúčelového přípravku, který je určen pouze pro tento typ dílu.



*Obrázek 24 Upnutí skříně spojkového mechanismu ve Škoda Auto*

## 6.2 Porovnání dotykového a optického měření.

### 6.2.1 Měření pomocí dotykových CMM strojů

Dosavadní měření pomocí dotykových CMM strojů má své kladné, ale i záporné stránky. Pokusím se zde vyjmenovat ty hlavní a krátce je rozvést.

#### **Přesnější metody měření**

Všeobecně jsou dotykové způsoby měření o mnoho přesnější v řádech mikrometrů. Důvodem vyšší přesnosti je fyzický kontakt mezi snímačem stroje a měřeným dílcem. Měření s vysokou přesností je potřebné hlavně pro součásti, které dále navazují na další součástky. Jako příklad bych třeba uvedl otvor, do kterého umístíme ložisko, hřídel, popř. místo, na které vkládáme těsnění a jiné.

#### **Nezávislosti na typu měřeného povrchu**

Dotykové stroje nejsou citlivé na osvětlení, takže nemusí být stálá světelnost v místě (povětšinou v laboratoři), kde dané měření probíhá. Nadále pro tyto stroje nejsou problematické lesklé a transparentní povrchy, které mohou ovlivňovat lom světla při jejich měření.

#### **Jednoduchost programování programu měření**

Dotykový způsob měření je podstatně jednoduchý na vytvoření programu, podle kterého budeme vyhodnocovat jednotlivé charakteristiky na měřeném dílci.

#### **Možnost měření hlubokých otvorů**

Díky tomu, že dotykové CMM stroje mají širokou škálu dotykových senzorů, ze kterých si můžeme vybírat ty, které budou ideální na měření jednotlivých charakteristik. Pak tedy můžeme zvolit například ty, které mají dostatečné prodloužení pro to, abychom byli schopni měřit i hluboké dutiny, které jsou těžko přístupné pro jiné měřicí způsoby.

To jsou ve zkratce výhody dotykových CMM strojů, Je tedy ale potřeba se také podívat na negativy těchto strojů jako jsou:



### **Doba měření**

Jednou z hlavních nevýhod měření dotykem je doba, kterou stroj stráví měřením výrobku. Stroj totiž musí pomocí pohonů fyzicky dojet na měřené místo a zde se dotknout bodu, který chceme měřit. To stojí firmu velké peníze, protože to prodlužuje dobu měření.

### **Namáhání pohonných jednotek**

Jak už bylo zmíněno výše, stroj musí za pomoci pohonů dostat měřicí senzor až na místo, kde se musí dotknout měřeného bodu. To znamená mnoho pohybů stroje. Čím více pohybů se uskuteční, tím dochází ke většímu opotřebení pohonných jednotek a převodových jednotek stroje. Zde přichází v potaz i samotná váha např. portálu. Čím větší je hmotnost součástek, které se uvádí do pohybu, tím je větší potenciální a kinetická energie, která má za následek větší opotřebení v důsledku brždění a znovuvvedení do pohybu stroje.

### **Nedostatek naměřených hodnot**

Při měření odlitku se nemůže používat skenovací režim dotykového CMM stroje, protože je povrch hrubý. Pokud bych využili skenovacího režimu, dostali bychom do kontaktu měřicí senzor s povrchem, který by v podstatě fungoval jako abrazivo. Senzor by se podstatně rychle opotřeboval, a to by mělo za následek zvýšení nákladů. Proto se využívá bodového měření, které ale získá podstatně méně informací nežli skenovací režim. Samotná charakteristika by se následně zpracovávala z méně bodů, a to by vedlo ke špatnému vyhodnocení měřených charakteristik.

#### **6.2.2 Měření bezdotykových CMM strojů**

Nyní bych naopak rád zhodnotil výhody a nevýhody bezdotykových způsobů měření na CMM strojích, konkrétně to budu vztahovat ke stroji LineScan od firmy Zeiss, který mi pro můj výzkum firma Zeiss poskytla, resp. výsledky z měření tímto strojem.

### **Rychlost měření**

Jednou z největších výhod tohoto systému měření je rychlost, kterou je schopen tento systém snímat body. Systém LineScan je schopen za pomoci paprsku najednou zaznamenat 640 bodů najednou a s jeho vzorkovací frekvencí až 400 Hz za sekundu je tedy schopen



nasnímat přes 15 360 000 bodů za jednu minutu. To je naprosto neuvěřitelný výsledek a v porovnání s dotykovým způsobem naprosto nepoměrný rozdíl.

### **Detailnější popis dílu**

Jak už jsem zmiňoval výše, tak bezdotykový systém zaznamená obrovské množství dat bodů. Umožní tedy vytvořit o mnoho detailnější popis dílu, který je snímán.

### **Menší dynamické namáhání pohonů stroje**

Na rozdíl od dotykového měření, které probíhá způsobem „VPŘED, DOTYK (IHNE D ZASTAVIT), ZPĚT“, během snímání bezdotykovým systémem je pohyb stroje plynulý. Povětšinou nenastávají rychlé změny směru pohybu a stroj a jeho pohonné jednotky jsou tak méně opotřebovávány. To jde samozřejmě ruku v ruce s nižšími náklady na servis stroje.

Bohužel i zde zmíněné výhody mají svá úskalí a je nutné je brát v potaz, pokud člověk uvažuje o komplementaci tohoto zařízení do svého provozu.

### **Složité programování pro tvarově složité díly**

Pokud bychom chtěli proces měření pomocí bezdotykových metod aplikovat ve větší míře, bude nutné vytvořit program, který bude řídit CMM stroj tak, aby správně nasnímal všechny důležité body pro vytvoření charakteristiky měřených tvarových součástí. To ovšem zahrnuje u dílů, které jsou tvarově složité, obtížnou přípravu programu. Snímací jednotka LineScan je schopna měřit v rozsahu 50mm v z-ové ose. Vzhledem k tomuto faktu a také k tomu, že systém funguje na principu laseru (ten obsahuje vysílač paprsku a přijímač odraženého paprsku) je potřeba, aby pracovník správně naprogramoval program, aby se paprsek mohl odrazit tak, aby ho přijímač opět zaznamenal.

### **Dosahuje menší přesnosti**

Oproti dotykovému způsobu snímání není bezdotykový systém tak přesný, jako dotykový. Tento systém měří konkrétně s přesností na 20 mikrometrů a s odchylkou 5 mikrometrů.

### **Citlivost na lesklý a transparentní povrch**

Laserový bezdotykový systém je velice citlivý na volbu měřeného povrchu. Pokus se jedná o matný, neprůsvitný povrch, pak v tomto ohledu problém většinou nevzniká. Horší situace

nastane v momentě, kdy se tímto systémem má měřit povrch, který je lesklý nebo transparentní. V důsledku lámání světelných vln na povrchu a uvnitř povrchu může vznikat více odražených paprsků a tyto paprsky pak senzor špatně vyhodnocuje. Proto pro takovéto typy povrchu není vhodný laserový systém bezdotykového měření.

Tímto jsem ve zkratce shrnul výhody a nevýhody jednotlivých systému a nyní Vám ukáži získané hodnoty během měření jednotlivými způsoby.

Dílec, který byl pro toto měření vybrán, je skříň spojkového mechanismu. Povrch tohoto dílce je matný, protože se jedná o neobrobený odlitek. Dílec je velice tvarově složitý a rozměrově podstatně veliký. Díl můžete vidět na Obrázku 25.



*Obrázek 25 Skříň spojkového mechanismu během dotykového měření na CMM stroji Zeiss*

### 6.3 Vyhodnocení získaných hodnot

Vzhledem ke skutečnosti, že jsme pro účely bakalářské práce využívali dílec, který se reálně vyrábí ve Škoda Auto a některé informace jsou klasifikovány jako interní, tak Vám předložím pouze některé získané hodnoty a v rámci zachování firemního “know-how” jsem nucen i změnit označení měřených charakteristik.

Jednou z prvních charakteristik bylo vyhodnocení rovinnosti, v Tabulce 1 můžete vidět porovnání jednotlivých hodnot při použití jiné měřicí techniky. Podle obou dvou způsobů je měřený dílec v povoleném tolerančním poli. Diskutovat o tom, které měření je přesnější, by nebylo úplně jednoduché, takže ho slovně komentovat dále příliš nebudu. Každopádně z Tabulky 1 je patrné, že hodnota naměřena pomocí dotykové metody si více blíží ke jmenovité hodnotě, které se mělo dosáhnout. Rozdíl mezi měřením metodou dotykovou a bezdotykovou je přibližně 0,0029 mm, což pro dílec ve fázi odlitku není nikterak veliký rozdíl.

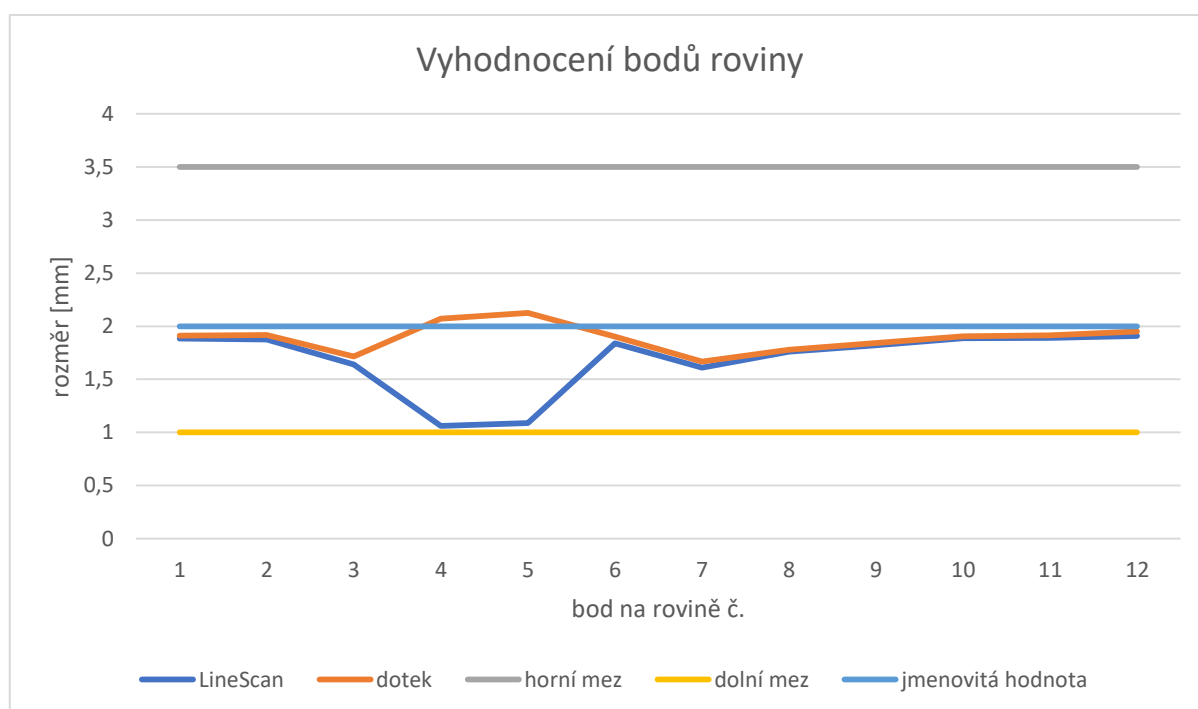
Vyhodnocení rovinnosti	naměřené hodnoty		jmenovitá hodnota [mm]	Rozdíl a dotyku [mm]
	pomocí [mm]	LineScan pomocí dotyku [mm]		
dosedací plocha těsnění		0,022	0,019	0
				-0,003

Tabulka 1 Vyhodnocení rovinnosti

Nadále jsem snímal jednotlivé body plochy, ze kterých se skládá plocha, která dosedá na další dílec, kterým se v této práci nebudeme zabývat. Jak je patrné z hodnot v Tabulce 2, tak jsou místa (konkrétně bod č. 4 a č. 5), kde se hodnoty diametrálně odlišují. Tento rozdíl mohl být způsoben například otřepem na měřeném dílci. Zde se ale názorně vykresluje, jak moc se mohou lišit hodnoty jednotlivých snímacích metod. Zbytek hodnot v tabulce je víceméně stejný. Jak můžete ale vidět na grafu v Obrázku 26, tak i když se hodnoty u bodu č.4 a 5 lišily, tak jsou stále v tolerančním poli.

Vyhodnocení bod na rovině č.	naměřené hodnoty pomocí LineScan [mm]	naměřené hodnoty pomocí dotyku [mm]	jmenovitá hodnota [mm]	Rozdíl LineScanu a dotyku [mm]
1	1,884	1,912	2	0,028
2	1,875	1,917	2	0,042
3	1,639	1,717	2	0,078
4	1,061	2,070	2	1,009
5	1,087	2,124	2	1,037
6	1,839	1,901	2	0,062
7	1,610	1,666	2	0,056
8	1,761	1,780	2	0,019
9	1,821	1,842	2	0,021
10	1,888	1,904	2	0,016
11	1,891	1,915	2	0,024
12	1,907	1,950	2	0,043

Tabulka 2 vyhodnocení bodů roviny



Obrázek 26 vyhodnocení bodů roviny graficky

V dalším porovnání (Tabulka 3) jsem si zvolil vyhodnocení charakteristiky kruhovitosti. Budu to posuzovat na otvoru, který je určený pro osazení ložiskem. Jak je patrné z tabulky, tak pomocí dotykové metody jsme stále v tolerančním poli pro tento element. Bohužel bezdotykovou metodou jsme už ale mimo toleranční pole. Během měření charakteristiky kruhovitosti využívá dotykový systém nasnímání pár bodů a z toho vytvoří charakteristiky, naproti tomu bezdotykový systém v tomto případě nasnímal několik desítek bodů a tedy lépe popisuje reálný stav povrchu a z těchto získaných bodů dokáže vytvářet charakteristiku kruhovitosti. Nutno na druhou stranu zmínit, že jsem byl nucen v důsledku nedostatku naměřených bodů optickým systémem (jednalo se o otvor) posunout vyhodnocovanou kružnici o pár milimetrů směrem ven, abych měl více hodnot, ze kterých mohu kruhovitost vyhodnotit. Otvor by měl mít rozměry stejné, ale tato charakteristika tedy nebyla vyhodnocena přímo ze stejného místa, což zase její relativnost trochu zpochybňuje.

Vyhodnocení kruhovitosti	naměřené hodnoty pomocí LineScan [mm]	naměřené hodnoty pomocí dotyku [mm]	jmenovitá hodnota [mm]	Rozdíl LineScanu a dotyku [mm]
otvor pro ložisko hřídele	47,597	46,965	46,8005	-0,642

Tabulka 3 vyhodnocení kruhovitosti

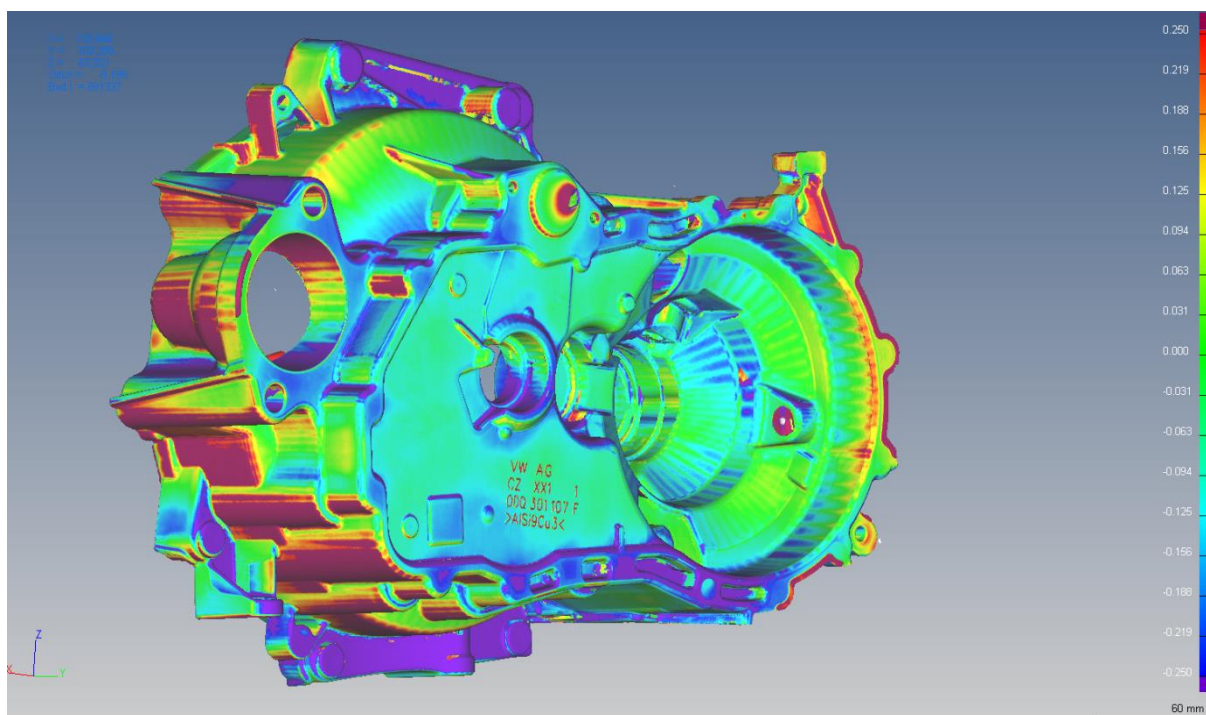
Posledním údajem, který jsem se rozhodl vyhodnocovat bylo měření síly stěny. Chtěl jsem na tomto měření předvést, že rozdíly mohou být opravdu velké v závislosti na zvolené metodě. Jak můžete vidět v Tabulce 4, tak hodnoty naměřené pomocí dotykové metody jsou vždy v toleranci a trůfám si tvrdit, že jsou vcelku přesné. Naproti tomu hodnoty naměřené bezdotykovou metodou jsou všechny mimo toleranční pole a v tomto případě by byl výrobek označen za zmetek. Není zcela jasné vysvětlení, čím je takovýto rozdíl způsoben. Domnívám se půjde o zaznamenaný lokální extrém celé plochy. Kdyby se měřený bod posunul do jiné polohy bylo by možné dostat jinou hodnotu s ohledem na hrubost plochy. K čemuž se i přikláním, jelikož odchylky vypočtené v teplotní barevné mapě dílu tuto chybu nepotvrzují.

Vyhodnocení síly stěny	naměřené hodnoty pomocí LineScan [mm]	naměřené hodnoty pomocí dotyku [mm]	jmenovitá hodnota [mm]	Rozdíl LineScanu a dotyku [mm]
Síla stěny v bodě A	2,035	3,054	3	1,019
Síla stěny v bodě B	2,950	4,002	4	1,052
Síla stěny v bodě C	2,976	3,988	4	1,012

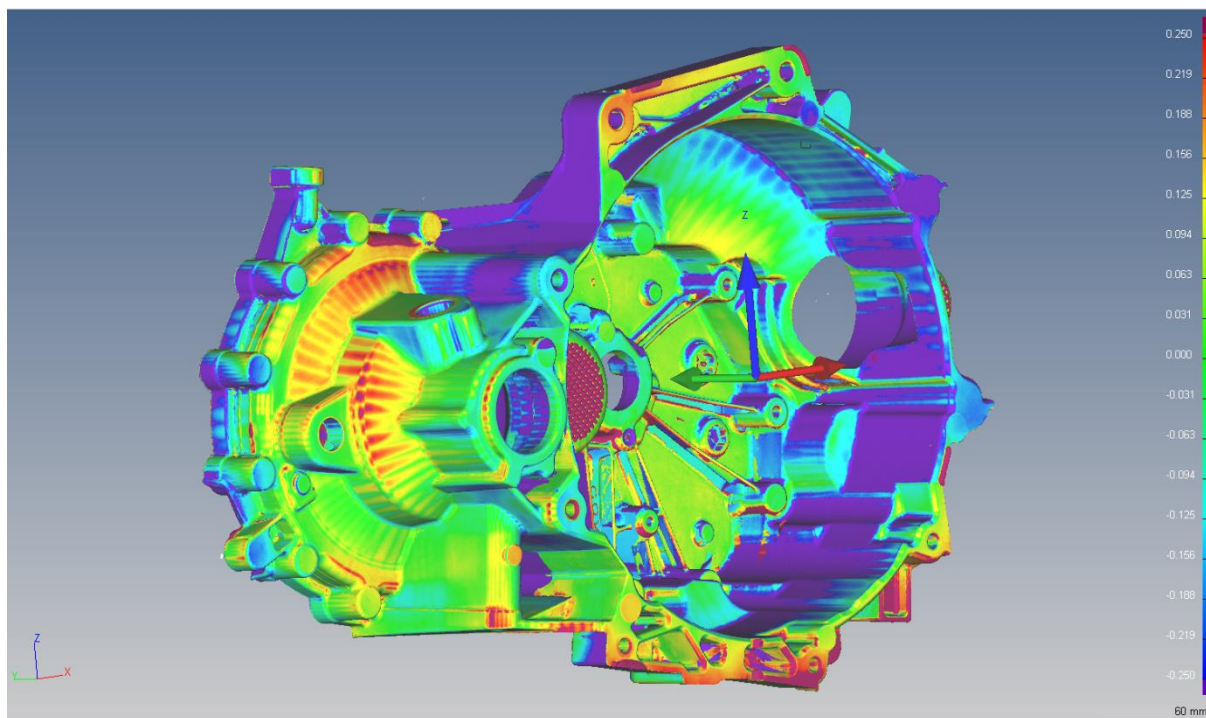
Tabulka 4 vyhodnocení síly stěn

## Možnost zvýšení produktivity měření na CMM v hutním provozu

Díky tomu, že jsem využíval vyhodnocovací systém Calypso 2019, který mi i umožňuje výsledky zpracovávat, tak jsem si vytvořil „Barevnou mapu“, na které vidíme, kde naměřené výsledky pomocí LineScan systému odpovídají modelu a kde naopak neodpovídají. Na barevné mapě můžete vidět, že hodnoty, které se blíží k červené barvě, tak zde je materiál oproti CAD modelu v kladných hodnotách a naopak místa, která se blíží k modré barvě, tak zde je materiál v záporných hodnotách.



Obrázek 27 Naměřené hodnoty pohled od převodovky



Obrázek 28 Naměřené hodnoty pohled od spojky

Jak je z Obrázků 27 a 28 patrné, tak v některých částech měřeného dílce se hodnoty podle CAD modelu shodují s hodnotami, které byly pomocí LineScanu naměřeny, ale jsou i místa, kde se tyto hodnoty vůbec neshodují. V některých měřených místech příliš nevadí, pokud je materiálu více, nežli je předepsáno, avšak nedochází k obrábění celého dílu spojkové skříně a tak hodnoty, které jsou měřeny na místech, které už dále nebudou spojeny s dalšími komponentami, by měly odpovídat CAD modelu, protože k jejich dalšímu zpracování formou úběru materiálu nedochází.

Celková doba měření dotykovým způsobem na CMM stroji pro tento dílec je téměř přesně 30 minut. V těchto 30 minutách není započítaný čas na výměnu a upnutí měřeného dílce, tento čas však zanedbám pro lepší přehlednost vyhodnocení.

Celková doba měření bezdotykovým způsobem na CMM stroji za použití LineScanu je přibližně 8 minut. Zde rovněž zanedbám časy potřebné na výměnu a upnutí měřeného dílce.

## 6.4 Ekonomické zhodnocení investice do optického CMM

Jedním z předpokladů nasazení takovéto snímací techniky je i přijatelná doba návratnosti investičních prostředků do této technologie snímání. V oblasti Automotive je v průměru



uváděná maximální doba návratnosti do jednoho roku od pořízení. Mé zhodnocení bude pouze v hrubých číslech, neboť nemám dostatek podkladů na celkové vyhodnocení. Rozhodl jsem se tedy využít pro mě dostupných zdrojů a provést jednoduchou kalkulaci pro více možností investice do tohoto vybavení a návratnosti investice.

Vycházím ze základních informací o ceně za jednu hodinu práce na stroji. V ceně je zahrnut stroj, jeho opotřebení a jeho obsluha. Jedná se přibližně o částku 1500 Kč/hod.

Údaje o přesném počtu měřených dílců v závodě Škoda Auto mi nejsou známy, a tak budu uvažovat počet 10 dílců za směnu. Ve firmě funguje třísměnný provoz, tedy za jeden den je potřeba naměřit 30 spojkových skříní.

Jednoduchou úvahou dojdeme k výpočtu ceny měření jednoho dílce dotykovou a bezdotykovou metodou.

$$\frac{60 \text{ minut}}{30 \text{ minut}} = 2 \text{ dílce za hodinu dotykovou metodou}$$

$$\frac{60 \text{ minut}}{8 \text{ minut}} = 7,5 \text{ dílce za hodinu bezdotykovou metodou}$$

Po další kalkulaci zjistíme cenu měření jednoho dílce jednotlivými metodami

$$\frac{1500 \text{ CZK}}{2} = 750 \text{ CZK za měřeního jednoho dílce dotykovou metodou}$$

$$\frac{1500 \text{ CZK}}{7,5} = 200 \text{ CZK za měřeního jednoho dílce bezdotykovou metodou}$$

	1 směna	1 den	1 rok
náklady na měření dotykem v CZK	10 * 750 = 7 500	3 * 7 500 = 22 500	365 * 22 500 = <b>8 212 500</b>
náklady na měření bezdotykově v CZK	10 * 200 = 2 000	3 * 2 000 = 6000	365 * 6 000 = <b>2 190 000</b>

Tabulka 5 Výpočet nákladů na měření

Má kalkulace vychází z předpokladu, že by výroba probíhala každý den v roce včetně svátků.

Nadále jsem pro účely kalkulace sháněl přibližné pořizovací náklady na jednotlivé segmenty bezdotykových CMM strojů. Hodnoty jsem získal, avšak jsou v EUR, takže je pomocí aktuálního kurzu eura (26,39 CZK/EUR) přepočítám. Dosazení můžete vidět v Tabulce 6.



Komponenty	Cena v EUR	Cena V CZK
CMM stroj ZEISS CONTURA G3	135 000	3 562 650
ZEISS LINESCAN	35 000	923 650
ZEISS T-SCAN	60 000	1 583 400

Tabulka 6 Pořizovací náklady bezdotykových CMM a jejich komponent

Vzhledem k vypočítaným pořizovacím nákladům nyní můžeme spočítat návratnost investice do Bezdotykových CMM systémů. Pro porovnání jsem vložil i pořizovací cenu za bezdotykový snímací systém od firmy Zeiss T-SCAN. Tento systém nevede CMM stroj, ale pracovník sám, popř. naprogramované robotické rameno. Návratnost investice počítám vzhledem k ušetřeným nákladům za rok oproti dotykové metodě, tedy 6 022 500 CZK. Zhodnocení investice do nového vybavení laboratoře můžete vidět v Tabulce 7.

Komponenty	Návratnost investice
CMM stroj ZEISS CONTURA G3	7 měsíců
ZEISS LINESCAN	2 měsíce
ZEISS T-SCAN	4 měsíce

Tabulka 7 Návratnost investice

## 7 Závěr

Na začátku práce jsem si jasně stanovil cíle, kterých jsem chtěl touto prací dosáhnout. V rámci této práce jsem vypracoval stručný souhrn informací týkajících se CMM strojů pracujících na dotykovém a bezdotykovém systému snímání. Naopak v rámci praktické části už jsem zpracovával za pomoci firmy Škoda Auto a.s. a Zeiss spol. s r.o. pod vedením svého vedoucího bakalářské práce Ing. Jana Urbana jednotlivá data, která jsem získal během měření vybraného dílu od společnosti Škoda Auto. Konkrétně se jednalo o skříň spojového mechanismu. Na vybraném dílu (odlitku skříně) jsem provedl měření jak dotykovým způsobem, tak bezdotykovým způsobem snímání. Následně jsem vyhodnocoval jednotlivé způsoby. Z hlediska časové náročnosti měření je vhodný bezdotykový způsob měření. Čas měření jedné součástky pomocí bezdotykového způsobu trvalo 8 minut naproti dosavadním 30 minutám dotykovým způsobem. Bohužel snímací systém, který jsme použili od firmy Zeiss

nebyl úplně optimální pro měření takto složitých dílů. Díl obsahuje řadu elementů, které bezdotykový systém špatně snímá, např. hluboké otvory. Navíc snímací hlavice LineScan je schopna zaznamenávat bodu pouze do určité hloubky od snímače. Měření takto složitého dílu by bylo složitě proveditelné z důvodu velkého množství poloh senzoru pro snímání. Avšak pro díly, které mají méně složitý tvar, pozvolnější změny tvarů a jsou všeobecně jednodušší je naopak LineScan naprosto ideální volba, protože skenováním získáme detailnější popis skutečného tvaru výrobku oproti stávajícímu stavu. Firma Zeiss pak poskytuje vhodnější řešení, jak takto tvarově složitě dílce měřit. Jedná se o metodu měření pomocí fotoproužkové projekce, kterou vykoná stroje GOM ATOS 5X. Tato metoda zvládá i složitější tvary měřených dílců, avšak vyhodnocení měření na tomto stroji nebylo součástí této bakalářské práce. Před případným pořízením a nasazením do provozu doporučuji provést podobné porovnávací měření. Z hlediska ekonomického zhodnocení na teoretickém příkladě jsem spočítal, kolik by za pomoci bezdotykového snímání stálo nasnímání jednoho dílce metodou dotykovou a bezdotykovou. Cena bezdotykového snímání jednoho dílce je zhruba 26 % ceny za dosavadní měření dotykovým způsobem. Za ušetřené peníze oproti snímání dotykově by se investice do nového stroje a snímače navrátila během devíti měsíců fungování nového stroje. Naměřené parametry na jednotlivých strojích se ve většině případů až na pár výjimek dramaticky nelišily a ve fázi odlitku se neklade důraz na extrémní přesnost. Během snímání pomocí bezdotykového snímače docházelo k mnohem menšímu opotřebení pohonných a převodových mechanismů, protože nedocházelo k tolika změnám směru pohybu během měření. Mohu tedy závěrem říci, že pokud bychom využili systému LineScan pro jednodušší součástky nebo systému fotoproužkové projekce pro složitější součástky, tak by se to z hlediska snížení nákladů a urychlení výroby firmě Škoda Auto vyplatilo.

## Použitá literatura

- [1] BERÁNEK, Libor. Průmyslová metrologie. Praha 6: Nakladatelství ČVUT, Fakulta strojní, ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE, 2018.
- [2] Coordinates. Learning about electronics [online]. 2018 [cit. 2020-01-27]. Dostupné z: <http://www.learningaboutelectronics.com/Articles/Cylindrical-to-cartesian-rectangular-coordinate-converter-calculator.php>
- [3] HOCKEN, Robert J. a Paulo H. PERIERA. Coordinate measuring machines and systems - second edition. CRC Press, 2012. ISBN 978-1-57444-652-4.
- [4] Gantry CMM with large measuring range. ZEISS [online]. 2020 [cit. 2020-01-30]. Dostupné z: <https://www.zeiss.se/metrology/products/systems/coordinate-measuring-machines/large-cmms/mmz-e.html>
- [5] Cylindrical Coordinate System. ScienceDirect [online]. Elsevier B.V, 2020 [cit. 2020-01-27]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/cylindrical-coordinate-system>
- [6] Spherical Coordinates. Paul's Online notes [online]. Paul Dawkins, 2020 [cit. 2020-01-27]. Dostupné z: <http://tutorial.math.lamar.edu/Classes/CalcIII/SphericalCoords.aspx>
- [7] Portable Coordinate Measuring Machine: Handyprobe Next. AZOMATERIALS [online]. 2020 [cit. 2020-01-27]. Dostupné z: <https://www.azom.com/equipment-details.aspx?EquipID=6876>
- [8] A Portable Measuring Arm for High-End 3D Applications. Engineering.com [online]. 2020 [cit. 2020-01-27]. Dostupné z: <https://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/11347/A-Portable-Measuring-Arm-for-High-End-3D-Applications.aspx>
- [9] PROF. ING. JAN MÁDL, CSC. Základy technologie II. Praha 6: Nakladatelství ČVUT, 2012. ISBN 978-1-57444-652-4.
- [10] FLACK, David. Measurement Good Practice Guide No. 43 CMM Probing. National Physical Laboratory, 2001.

- [11] ZEISS ACADEMY METROLOGY SENSOR COOKBOOK. Qualifying ZEISS Sensors. ZEISS [online]. 2020 [cit. 2020-01-30]. Dostupné z: <http://docplayer.net/97755924-Zeiss-academy-metrology-sensor-cookbook-qualifying-zeiss-sensors-reading-sample.html>
- [12] Probes for Coordinate Measuring Machines [online]. Mitutoyo Corporation, 2020, , 56 [cit. 2020-1-29]. Dostupné z: <https://www.mitutoyo.co.jp/eng/support/service/catalog/01/E16005.pdf>
- [13] Renishaw Revo 5-axis Measuring System. WPI [online]. Willrich Precision Instruments, 2020 [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: <https://willrich.com/product/renishaw-revo-5-axis-measuring-system/>
- [14] An Introduction to Laser Triangulation Sensors. AZOSENSORS [online]. 2020 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.azosensors.com/article.aspx?ArticleID=523>
- [15] ViScan. ZEISS [online]. 2020 [cit. 2020-02-20]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/senzory/viscan.html>
- [16] VOJÁČEK, Antonín. Velmi přesné optické měření s konfokálními snímači. Automatizace.hw.cz [online]. 2011 [cit. 2020-02-20]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/komponenty/velmi-presne-opticke-mereni-s-konfokalnimi-snimaci.html>
- [17] Otočný senzor s bílým světlem ZEISS DotScan. ZEISS [online]. 2020 [cit. 2020-02-20]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/senzory/dotscan.html>
- [18] ALUFIX. WITTE [online]. 2020 [cit. 2020-02-05]. Dostupné z: <https://www.witte-barskamp.com/modular-fixturing-systems/alufix-classic-alufix-eco/>
- [19] ZEISS DuraMax Production CMM Machine. MSI Viking [online]. MSI Viking, 2020 [cit. 2020-02-20]. Dostupné z: <https://www.msi-viking.com/ZEISS-DuraMax-Production-CMM-Machine>

## Seznam obrázků

Obrázek 1 Dělení CMM dle souřadného systému [1] .....	11
Obrázek 2 Kartézský souřadný systém [2] .....	11
Obrázek 3 Konstrukce měřicího systému s dvojitým ramenem kontroluje rozměry auta [3] .	13
Obrázek 4 nepohyblivý mostový CMM stroj [3] .....	14
Obrázek 5 Portálový CMM stroj Zeiss MMZ E [4] .....	15
Obrázek 6 Výložníkový typ Zeiss DuraMax [19] .....	16
Obrázek 7 Cylindrický souřadný systém [5] .....	17
Obrázek 8 Sférický souřadný systém [6] .....	17
Obrázek 9 ruční CMM stroj - Handyprobe Next [7] .....	18
Obrázek 10 AACMM měřící rameno ROMER [8] .....	19
Obrázek 11 Princip fungování laserového trackeru [3] .....	20
Obrázek 12 Dělení snímacích systémů CMM [1] .....	21
Obrázek 13 Snímací hlava Zeiss [11] .....	23
Obrázek 14 Sonda Renishaw Revo 5[13] .....	25
Obrázek 15 Snímací hlava MMP310 s více snímači(vlevo) a s jedním snímačem(vpravo) [12] .....	26
Obrázek 16 Princip laserové triangulace [14] .....	27
Obrázek 17 Optický senzor Zeiss ViScan [15] .....	28
Obrázek 18 Otočný senzor Zeiss s bílým světlem [17] .....	29
Obrázek 19 Snímací hlava s pěti snímači [10] .....	30
Obrázek 20 Nalevo válcový tvar a napravo talířový tvar doteku [10] .....	31
Obrázek 21 Modulární upínací prostředky [18] .....	33
Obrázek 22 Zeiss Prismo 7 .....	37
Obrázek 23 Zeiss Prismo 10 .....	37
Obrázek 24 Upnutí skříňe spojkového mechanismu ve Škoda Auto .....	38
Obrázek 25 Skříň spojkového mechanismu během dotykového měření na CMM stroji Zeiss	42
Obrázek 26 vyhodnocení bodů roviny graficky .....	44
Obrázek 27 Naměřené hodnoty pohled od převodovky .....	46
Obrázek 28 Naměřené hodnoty pohled od spojky .....	47

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Vyhodnocení rovinnosti .....	43
Tabulka 2 vyhodnocení bodů roviny .....	44
Tabulka 3 vyhodnocení kruhovitosti .....	44
Tabulka 4 vyhodnocení síly stěn .....	45
Tabulka 5 Výpočet nákladů na měření .....	48
Tabulka 6 Pořizovací náklady bezdotykových CMM a jejich komponent .....	49
Tabulka 7 Návratnost investice .....	49