

Metrologický postup 3D měření

Bc. Lukáš Vacek

Diplomová práce
2018

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Lukáš Vacek
Osobní číslo: T14792
Studijní program: N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor: Výrobní inženýrství
Forma studia: kombinovaná

Téma práce: Metrologický postup 3D měření

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracujte literární studii na dané téma**
- 2. Proveďte analýzu současného stavu**
- 3. Navrhněte metrologický postup měření**
- 4. Ověřte navržený metrologický postup**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **PERNIKÁŘ, J., TYKAL, M. Strojírenská metrologie II. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 180 s. ISBN 80-214-3338-2.**
2. **CHUDÝ, V., PALENČÁR, R., KUREKOVÁ, E., HALAJ, M. Meranie technických veličín. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 1999. 688 s. ISBN 80-227-1275-2.**
3. **FIALA, A.: Statistické řízení procesů. Prostředky a nástroje pro řízení a zlepšování procesů. VUT v Brně, 1997. ISBN 80-214-0895-2**
4. **Dále dle doporučení vedoucího diplomové práce**

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Milan Žaludek, Ph.D.
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

2. ledna 2018

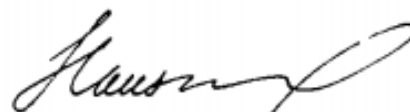
Termín odevzdání diplomové práce:

18. května 2018

Ve Zlíně dne 5. února 2018



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: VACEK LUKÁŠ

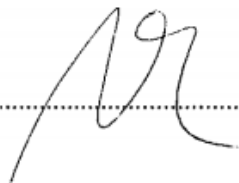
Obor: VÝROBNÍ INŽENÝRSTVÍ

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 15.5.2018



¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlázení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédá k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Téma práce se zabývá řešením měření dílce na 3D souřadnicovém měřicím stroji Axiom too HS společnosti Aberlink a následné vyhodnocení měření pomocí metody statistické analýzy. Vytváří zcela nový měrový program a zkoumá za pomoci opakovatelnosti a reprodukovatelnosti stabilitu procesu a samotného měření. Součástí praktické části je hotový měrový program a jeho vyhodnocení pomocí statistické metody MSA.

Klíčová slova:

Měření, 3D měřicí zařízení, měřicí systém, kontrola, Gage R&R, opakovatelnost, reprodukovatelnost, MSA, SPC, APQP, CMM

ABSTRACT

Thesis deals of the measurement of a piece on the 3D coordinate measuring machine names Axiom too HS and the subsequent evaluation of the measurements using the statistical method. It creates an entirely new measurement program and examines the stability of the process with the aid of repeatability and reproducibility. Part of the practical part is the new measurement program and its evaluation using statistical method MSA.

Keywords:

Measurement, 3D measuring device, measuring system, control, Gage R & R, repeatability, reproducibility, MSA, SPC, APQP, CMM

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Milanu Žaludkovi, že se mne ujal, když mne ostatní odepsali a za pomoc a trpělivost při dokončení této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval všem, kteří nade mnou nezlomili hůl a nadále věřili, že dospěji ke zdárnému konci i přes všechny ty těžkosti a naopak bych se rád vysmál těm, kteří už nevěřili, že školu dokončím.

„Průměrná disertační práce není nic jiného, než přemísťování kostí z jednoho hrobu do druhého.“

(J. Frank Dobie)

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

| | |
|--|-----------|
| ÚVOD | 10 |
| TEORETICKÁ ČÁST | 11 |
| 1 PŘEHLED 3D MĚŘICÍCH STROJŮ | 12 |
| 1.1 HISTORICKÝ VÝVOJ | 12 |
| 2 MĚŘENÍ | 13 |
| 2.1 DEFINICE POJMŮ V METROLOGII | 13 |
| 2.2 NEJISTOTY MĚŘENÍ..... | 17 |
| 3 SOUŘADNICOVÝ MĚŘICÍ STROJ | 20 |
| 3.1 TYP KONSTRUKCE | 20 |
| 3.2 SNÍMACÍ HLAVA | 22 |
| 3.2.1 Snímací hlavy dotykové | 22 |
| 3.2.2 Optické 3D hlavy | 23 |
| 3.3 DOTYKOVÉ SONDY | 24 |
| 3.4 VÝBĚR DOTYKU | 25 |
| 3.4.1 Materiál kuličkového dotyky | 25 |
| 3.4.2 Materiály pro skenovací sondy | 27 |
| 3.4.3 Dříky dotykových sond | 27 |
| 3.4.4 Rozmanitost typů stylů..... | 27 |
| 3.4.5 Průhyb dotyku | 29 |
| 4 KALIBRACE | 30 |
| 4.1 PRŮBĚH KALIBRACE | 30 |
| 4.2 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ KALIBRACI..... | 32 |
| 4.2.1 Použití nesprávných hodnot kalibrátoru..... | 32 |
| 4.2.2 Tolerance formulace kalibrátoru | 32 |
| 4.2.3 Technika přípravy vzorků | 32 |
| 4.2.4 Účinky okolní teploty..... | 32 |
| 4.3 KALIBRACE STYLŮ | 33 |
| 4.4 ČETNOST KALIBRACE | 34 |
| 5 METODY ŘÍZENÍ KVALITY PRODUKTU | 36 |
| 5.1 MODERNÍ PLÁNOVÁNÍ KVALITY PRODUKTU (APQP)..... | 36 |
| 5.1.1 Postup plánování APQP | 37 |
| 5.1.2 Výhody a nevýhody APQP | 39 |
| 5.1.3 PPAP | 39 |
| 5.2 STATISTICKÁ REGULACE PROCESU (SPC)..... | 40 |
| 5.2.1 Shewartovy ovládací diagramy | 41 |
| 5.3 STANDARDNÍ PRACOVNÍ POSTUP (SOP) | 42 |
| 5.4 ANALÝZA SYSTÉMU MĚŘENÍ (MSA) | 43 |
| 5.4.1 Poloha výsledků | 43 |
| 5.4.2 Variabilita..... | 44 |
| 5.4.3 Studie opakovatelnosti a reprodukovatelnosti (Gage R & R)..... | 44 |
| 5.4.3.1 Metoda rozpětí | 45 |
| 5.4.3.2 Metoda založená na průměru a rozpětí..... | 45 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 5.4.3.3 | Metoda ANOVA..... | 48 |
| | PRAKTICKÁ ČÁST | 50 |
| 6 | STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE | 51 |
| 7 | O FIRMĚ..... | 52 |
| 8 | PŘEDSTAVENÍ PŘÍSTROJE..... | 53 |
| 8.1 | TECHNICKÉ SPECIFIKACE..... | 53 |
| 8.1.1 | Měřicí zařízení | 55 |
| 8.1.2 | Ovládací panel..... | 56 |
| 8.2 | SOUŘADNÝ SYSTÉM..... | 57 |
| 8.3 | MOŽNOSTI MĚŘENÍ..... | 57 |
| 8.4 | KALIBRACE | 58 |
| 9 | POSTUP MĚŘENÍ..... | 59 |
| 9.1 | BEZPEČNOSTÍ KVÁDR | 60 |
| 9.2 | VÝBĚR DOTEKOVÉHO MODULU | 60 |
| 9.3 | UPNUTÍ SOUČÁSTI | 61 |
| 9.4 | KALIBRACE SNÍMACÍHO SYSTÉMU | 62 |
| 9.5 | MĚŘENÍ ELEMENTŮ PRO STANOVENÍ ZÁKLADNÍHO SOUŘADNÉHO SYSTÉMU | 62 |
| 9.6 | SNÍMÁNÍ ZBÝVAJÍCÍCH ELEMENTŮ | 63 |
| 9.6.1 | Jednotlivé elementy..... | 64 |
| 9.7 | MĚŘENÍ VYBRANÝCH CHARAKTERISTIK..... | 65 |
| 10 | VYHODNOCENÍ STAVU MĚŘENÍ METODOU MSA | 68 |
| 10.1 | OPAKOVATELNOST A REPRODUKOVATELNOST | 68 |
| | ZÁVĚR | 72 |
| | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY..... | 73 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK..... | 76 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ | 77 |
| | SEZNAM TABULEK..... | 79 |
| | SEZNAM PŘÍLOH..... | 80 |

ÚVOD

Jakost výrobku je v současné době velmi důležitým aspektem, jak pro výrobce konkrétního dílce, tak i pro koncového zákazníka. Tento aspekt se dá ověřovat pomocí různých zkoušek (mechanických, fyzikálních, chemických), nebo podle různých měření (porovnávacích, délkových měření...). Zlepšování metody měření je nutné, jak pro ekonomičnost procesu, tak i pro zrychlení dodávky k zákazníkovi. Firmy bojují se stále rostoucími nároky na rychlé dodání přesného zboží ze strany zákazníka a tak musejí zavádět nové, přesnější, rychlejší postupy.

Měřicí souřadnicové stroje (CMM) se používají ke shromažďování trojrozměrných souřadnic na povrchu obrobku. S prvními tvrdými sondami a později s dotykovým spouštěčem sondy se sběr těchto dat skládal z omezeného počtu bodů, které byly použity ke kalibraci, kontrole procesu nebo vývoji. Dnes shromažďují skenovací sondy data mnohem rychleji než dříve, což umožňuje CMM nejen měřit díly rychleji, ale také analyzovat fyzikální vlastnosti produktu ve větším rozsahu detailu. Tato možnost umožňuje CMM měřit povrch dílu až na úroveň drsnosti povrchu. Pro dosažení této úrovně detailu, musí být hustota dat na povrchu obrobku vyšší než je potřeba pro konvenční inspekční činnosti a nejistota měření výsledků by měla být nízká tak, jak jen je to rozumně dosažitelné.

Tato práce byla vytvořena na základě poptávky zákazníka po přesných datech výrobku, který má v plánu zavést do masové výroby. Data z tohoto měření poskytnou informaci o stavu výrobku a zákazník se poté sám rozhodne, jak s těmito daty naloží. Díky statistickým metodám použitých v této práci bude zhodnoceno, zda nově vytvořený měrový program bude dávat přesná a korektní data a zda bude proces měření ve statisticky zvládnutém stavu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PŘEHLED 3D MĚŘICÍCH STROJŮ

Mezi jednu z nejvýznamnějších inovací v oblasti měření ve strojírenství je bezpochyby zavedení souřadnicových měřicích strojů anglicky CMM (Coordinate Measuring Machines). Z hlediska metrologie inklinují měřicí stroje k měřicím mikroskopům a z hlediska konstrukce k NC frézám. CMM umožňují rychlou a přesnou kontrolu složitých obrobků, přispívají k zabezpečení kvality výroby a tím i ke zvyšování konkurenceschopnosti strojírenských produktů. [9]

1.1 Historický vývoj

První skromné začátky výroby souřadnicových strojů jsou datovány do 50. let 20. století, kdy hned několik firem z různých koutů světa (DEA – Itálie, Ferranti Metrology – Skotsko) představili své první modely v takové podobě, jak je známe nyní. [6]

Zpočátku se CMM omezovaly na metrologickou laboratoř, avšak poměrně rychle se začaly prosazovat také v dílenském prostředí, kde nahradily dřívější konvenční měřicí techniku (ruční odměřování...). Tímto přechodem se však vyskytly nové problémy, jako například kolísání okolních teplot na dílně, otřesy a chvění od ostatních výrobních zařízení, či nepříznivé vlivy chladicích tekutin, které vedly k vývoji jednoduchých CMM, jež mohou obsluhovat i méně kvalifikovaní uživatelé (operátoři výrobních strojů). Ke změnám dochází i ve způsobu snímání měřených rozměrů, z původně dotykového snímání se stále častěji prosazují optické snímací hlavy, umožňující rychlejší měření. Tyto tendence vedly ke vzniku multisenzorových CMM. [9]

Ve svých prvopočátcích sloužila první spínací dotyková sonda, jež byla zavedena v 70. letech minulého století kvůli kontrole specifických rozměrů u letadel, především pro měření obrobků na souřadnicových měřicích strojích. Postupný další vývoj v této oblasti vedl k použití na obráběcích strojích a snímání se stalo přirozenou součástí automatizovaných výrobních procesů na CNC obráběcích centrech. [8]

V současné době patří souřadnicové měřicí stroje k nejrychleji se rozvíjejícím oblastem strojírenské měřicí techniky. Například průměrně každých 10 až 15 let se přesnost výroby zvyšuje o jeden toleranční stupeň (IT). [9]

2 MĚŘENÍ

Metrologie je souhrn všech znalostí a činností souvisejících s měřením a zahrnuje teoretické i praktické aspekty vztahující se k měření bez ohledu na úroveň jejich přesnosti a bez ohledu na oblast vědy a techniky, kde se příslušné problémy řeší. Základním úkolem metrologie je zabezpečit jednotnost a přesnost měření. [17]

2.1 Definice pojmů v metrologii

Měření je dle mezinárodního slovníku pro metrologii proces experimentálního získávání jedné nebo více hodnot veličiny, které mohou být důvodně přiřazeny veličině. [1, str. 48]

Dle referenčního manuálu je *měřidlo* definováno jako libovolné zařízení používané k měření. [31, str. 5]

Metoda měření je generický popis logického organizování činností použitých při měření [1, str. 50]

Postup měření je podrobný popis měření podle jednoho nebo více měřicích principů a dané metody měření založený na modelu měření a zahrnující jakýkoliv výpočet k získání výsledku měření. [1, str. 50]

Preciznost je dle kvalimetrie míra těsnosti shody mezi vzájemně nezávislými výsledky měření získaných za specifikovaných podmínek. Preciznost je složkou nejistoty měření. [3, str. 34]

Dle nové metrologické terminologie se preciznost vztahuje na náhodnou chybu měření a je mírou blízkosti výsledků a číselně vyjadřuje se číselně mírami nepřeciznosti, jako je směrodatná odchylka vypočtená z výsledků získaných opakovanými měřeními vhodného materiálu za specifikovaných podmínek. [2, str. 17]

Farková [2, str. 20] uvádí tyto *specifikované podmínky*:

- Podmínka opakovatelnosti měření - vztahuje se na měření uskutečněné na stejném materiálu jedním analytikem s použitím stejného postupu za stejných podmínek v krátkém časovém období.
- Podmínka mezilehlé preciznosti měření - měření se provádí na stejném materiálu s použitím stejného postupu, ale po delší dobu a různými analytiky, kteří mohou používat různé vybavení.

- Podmínka reprodukovatelnosti měření - vztahuje se na měření uskutečněné na stejném materiálu různými analytiky pracujícími na různých místech.

Výsledek měření je definován jako soubor hodnot veličiny přiřazený měřené veličině společně s jakoukoliv další dostupnou relevantní informací. Výsledek měření je obecně vyjádřen jako jedna naměřená hodnota veličiny a nejistota měření. [1, str. 51]

Princip měření - jev sloužící jako základ měření. [1, str. 49]

Systém měření je definován dle Springer Handbook of metrology and testing jako souhrn měřidel, přípravků, etalonů, metod, operací, personálu, prostředí, softwaru a předpokladů k získání hodnoty. [4, str. 3]

Etalon je dle sborníku technické harmonizace používán jako reference ke stanovení naměřených hodnot veličin a přidružených nejistot měření pro jiné veličiny stejného druhu, čímž stanovuje metrologickou návaznost kalibracemi jiných etalonů, měřidel nebo měřících systémů. [1, str. 91]

Druhy etalonů: kontrolní, kalibrační, porovnávací, hlavní, pracovní, referenční

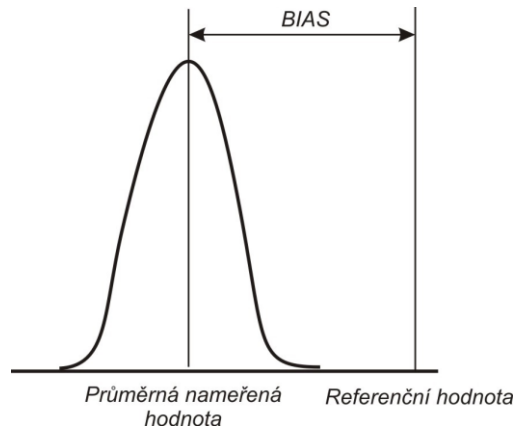
Referenční hodnota veličiny je hodnota veličiny používaná jako základ pro porovnávání s hodnotami veličin stejného druhu [2, str. 5]

Pravá hodnota veličiny je hodnota veličiny, která je ve shodě s definicí veličiny [2, str. 5]

Práh citlivosti je největší změna hodnoty veličiny, která je naměřena a nezpůsobí žádnou zjiřitelnou změnu odpovídající indikace. [1, str. 85]

Přesnost měření je dle nové metrologické terminologie těsnost shody mezi naměřenou hodnotou veličiny a pravou hodnotou měřené veličiny. Popisuje, jak blízko je jeden výsledek měření k pravé hodnotě veličiny. Přesnost je definována dle následujícího vztahu: PŘESNOST = PRECIZNOST + PRAVDIVOST [2, str. 22]

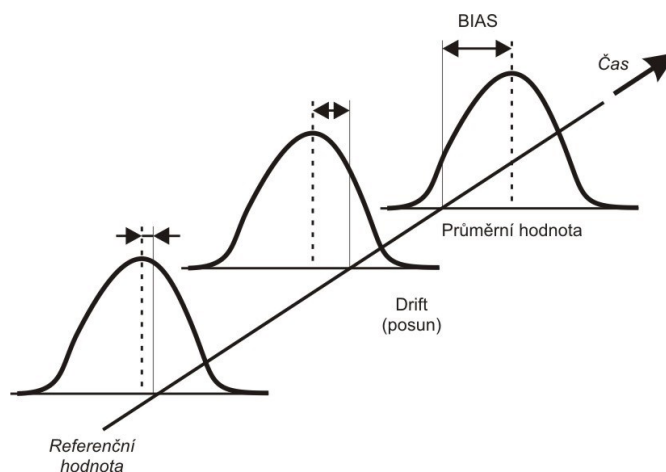
Strannost (bias) – rozdíl mezi pozorovaným průměrem měření a referenční hodnotou měření provedených na jednom jakostním znaku stejného dílu. Bias je definován následujícím vztahem: BIAS = POZOROVANÝ PRŮMĚR – REFERENČNÍ HODNOTA [31, str. 6]



Obr. 1 Zobrazení strannosti [5]

Pravdivost měření je definována jako těsnost shody mezi aritmetickým průměrem nekonečného počtu opakovaných naměřených hodnot veličiny a referenční hodnotou veličiny. Pravdivost je nepřímo úměrná systematické chybě měření, která může být odhadnuta vychýlením měření (bias). [2, str. 13]

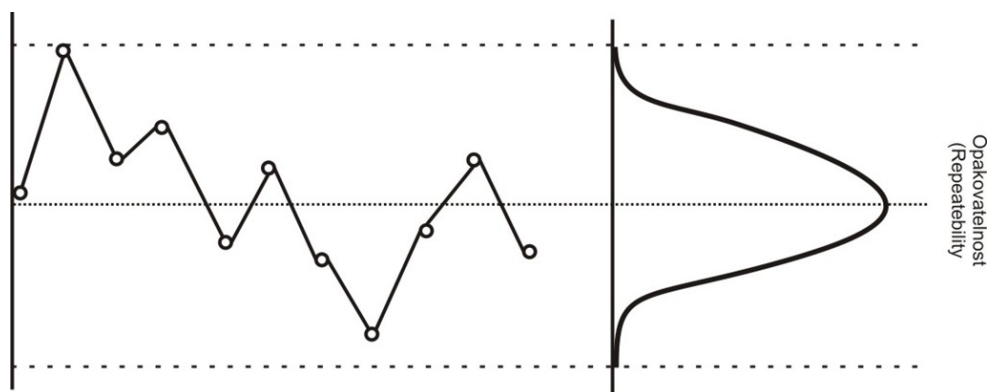
Stabilita – míra, jak dobře je vykonáván měřicí systém v průběhu času. Rozdíl mezi stabilitou a linearitou spočívá v tom, že při stabilitě je měřen pouze jeden díl, jehož referenční hodnota je známa anebo předpokládána. To určuje, jestli se měřicí systém změnil v průběhu času a po mnoha použití. [5]



Obr. 2 Zobrazení stability [5]

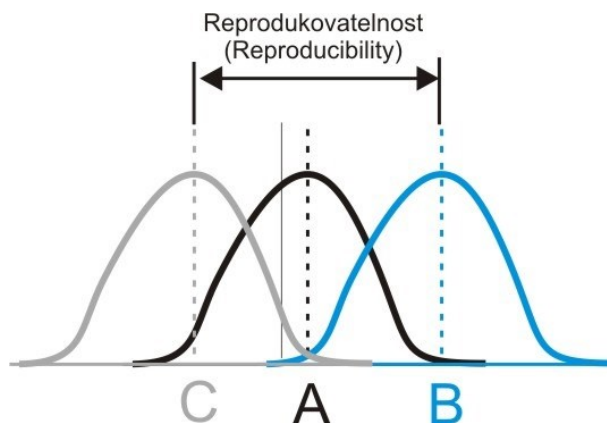
Linearita měří, jak se mění velikost měřicího systému bias přes předpokládaný měřicí procesní rozsah. Test může být vykonán za účelem určit, jestli nelinearita měřicího systému existuje a jestli je významná. [5]

Opakovatelnost je druh preciznosti, u které se očekává, že bude představovat nejmenší rozdíly ve výsledcích. Jedná se o míru variability výsledků, pokud jsou měření provedena na stejném materiálu jedním analytikem, který používá stejnou metodu a zařízení v krátkém časovém rozmezí. [3, str. 34]



Obr. 3 Zobrazení opakovatelnosti [5]

Reprodukovatelnost - variabilita průměrů měření při měření jednotlivých operátorů. Měření je prováděno za stejných podmínek. Operátoři měří na jednom měřicím přístroji stejnou charakteristiku na jednom a tomtéž dílu. [31, str. 55]



Obr. 4 Zobrazení reprodukovatelnosti [5]

Způsobilost systému je dle referenčního manuálu odhadem kombinované variability chyb měření. Jedná se o očekávanou chybu za daných podmínek, použitelnosti a rozsahu systému měření. [31, str. 57]

Citlivost je definována jako nejmenší vstup, který způsobí zjizitelný výstupní signál. Je vždy určena návrhem měřidla. [31, str. 57]

Nejistotou měření rozumíme nezáporný parametr charakterizující rozptýlení hodnot veličiny přiřazených k měřené veličině na základě použité informace. Je to hodnota přiřazená výsledku měření. [1, str. 60]

Návaznost je definována jako vlastnost výsledku měření, pomocí níž může být výsledek vztažen ke stanovené referenci přes dokumentovaný, nepřerušovaný řetězec kalibrací, z nichž každá se podílí svým příspěvkem na stanovené nejistotě. [1, str. 66]

Kalibrace slouží k prokázání návaznosti. Je definována jako činnost, která za specifikovaných podmínek v prvním kroku stanoví vztah mezi hodnotami veličiny s nejistotami měření poskytnutými etalony a odpovídajícími indikacemi s přidruženými nejistotami měření. Ve druhém kroku použije tyto informace ke stanovení vztahu pro získání výsledku měření z indikace. Obvyklý způsob provádění kalibrace je podrobit známé množství veličiny (např. pomocí měřicího rozsahu) procesu měření a sledovat měřicí odezvy v očekávaném pracovním rozsahu. [3, str. 36]

Indikace se rozumí hodnota veličiny poskytnutá měřidlem nebo měřicím systémem. [2, str. 6]

Chyba měření je definována jako naměřená hodnota veličiny mínus referenční hodnota veličiny. [2, str. 12]

Systematická chyba měření je složka chyby měření, představující trvalou nebo předpověditelnou odchylku série opakovaných měření. [2, str. 12]

Náhodná chyba měření je složka chyby měření, představující nepředpověditelnou odchylku série opakovaných měření. [2, str. 12]

2.2 Nejistoty měření

CMM má jak hardwarové, tak i softwarové komponenty, které se podílejí na strojním výkonu. Mezi hardwarové patří sonda, CMM platforma a řídicí obvody. Programová část obsahuje softwarové rozhraní operátora, vyhodnocovací software a software řídicí jednotky. Operátorské rozhraní umožňuje vytvořit plán měření. Vyhodnocovací software interpretuje, shromažďuje a poskytuje data pro posouzení rozměrů obrobku. Operátor vytvoří typický plán měření v počítači a poté jej přenesse do řídicí jednotky. Řídicí software komunikuje s mechanickými systémy CMM pro shromáždění požadovaných dat, která jsou následně předána přes regulátor zpět do PC, kde vyhodnocená schémata vybraná operátorem interpretují data a vrátí výsledky uživateli.

Nejdůležitější charakteristikou je tuhost mechanického systému a schopnost ovládacího systému přikázat osám pohybovat se do správných poloh s vysokou přesností. Filtrování implementované v softwarovém systému je taktéž důležité. CMM skenování může významně ovlivnit prostředí, ve kterém je měření prováděno. Teplota a vibrace jsou nejdůležitější environmentální faktory, které je třeba kontrolovat. [10]

Nejistota měření je dle mezinárodního slovníku pro metrologii definována jako "*nezáporný parametr charakterizující rozptýlení hodnot veličiny přiřazených k měřené veličině na základě použité informace* [1, str. 60]." ISO 14253-2 [20] uvádí deset primárních příspěvatelů k nejistotě měřené charakteristiky:

1. Prostředí
2. Referenční prvek měřicího zařízení
3. Měřicí zařízení
4. Měření nastavení
5. Software a výpočty
6. Metrolog
7. Měření objektu
8. Definice měřené veličiny
9. Postup měření
10. Fyzikální konstanty.

Zdroje environmentální nezávadnosti měření zahrnují teplotu, vlhkost, nečistotu a vibrace přítomné v době měření. Referenční prvek měřicího zařízení označuje stupnici, jíž CMM používá k určení umístění. Materiál stupnice, její uložení a kalibrace může představovat nejistotu měření. Samotné měřicí zařízení je také zdrojem nejistoty, jelikož žádné zařízení není konstruováno s dokonalou geometrií. Použitá konfigurace sondy taktéž přispívá k nejistotě [10].

Měřicí nastavení určuje, jak stabilní měřená část je a zda ji svítidlo zkresluje. Dalšími zdroji nejistot v měření jsou: použitý software, algoritmy používané v softwaru, sám metrolog, který může způsobit nejistotu tepelnou expanzí tělesného tepla na zařízení, měřený objekt, který nikdy nebude dokonale čistý, či snad definice měření.

Určení nejistoty měření CMM je složité nejen kvůli chybě variace ve výše přispívajících faktorech, ale také na mnoha různých měřicích veličinách měřených na CMM včetně rozměrů, umístění a formy. V terminologii ISO jsou všichni, kdo přispívají k nejistotě měření nazýváni ovlivňující veličiny. Ovlivňující veličina je definována jako "*veličina, která při přímém měření neovlivňuje veličinu, která je skutečně měřena, ale ovlivňuje vztah mezi indikací a výsledkem měření* [1, str. 73]". Vliv těchto veličin musí být stanoven v hodnocení nejistoty.

3 SOUŘADNICOVÝ MĚŘICÍ STROJ

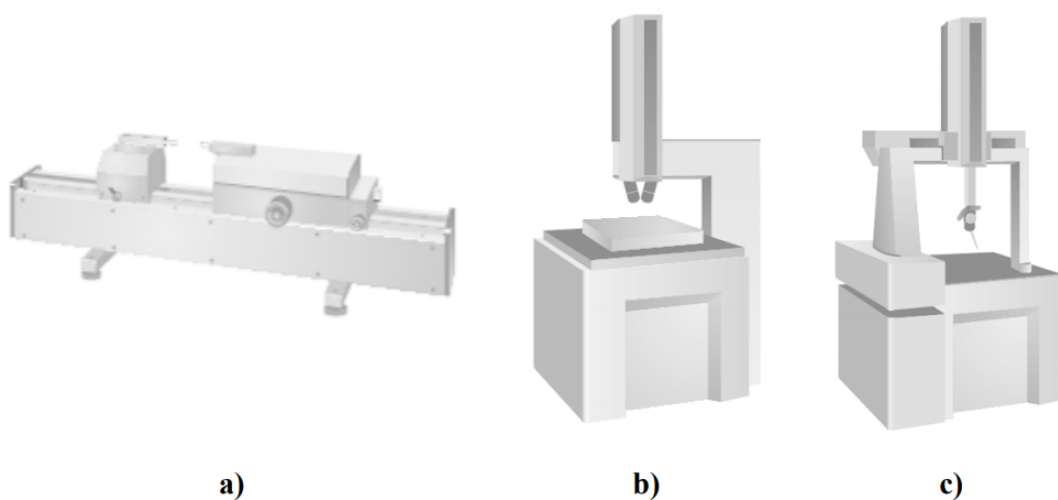
Souřadnicové měřicí stroje (CMM) jsou běžným zařízením, které se používá pro kontrolu komponentů po výrobním procesu. CMM se liší v rozměrech od "stolních" variant až po velké účelové jednotky schopné měřit motorová vozidla a podobné konstrukce. Základní funkce CMM má umožnit umístění „x, y, z“ bodu na povrch měřené součásti. Souřadnicový měřicí stroj obsahuje mnoho dílčích částí:

- vlastní měřicí stroj skládající se ze základního tělesa stroje
- měřicí stůl – zpravidla granitová deska z důvodů velmi vysoké rovinnosti a kolmosti
- posuvové zařízení – velké požadavky na co nejmenší tření a co možná největší tuhost
- měřicí a snímací hlava
- počítačové rozhraní sloužící pro řízení měřicích procesů a pro zpracování výsledků měření
- periferní zařízení pro vstup a výstup dat

3.1 Typ konstrukce

Typy konstrukcí souřadnicového měřicího stroje se dělí na 3 základní skupiny:

- Jednosouřadnicové – pohybují se v jedné ose „x“ a vyhodnocují zpravidla délku
- Dvousouřadnicové – měří ve dvou osách „x, y“, vyhodnocují plochu
- Třísouřadnicové – měření ve třech osách „x, y, z“ (prostor)



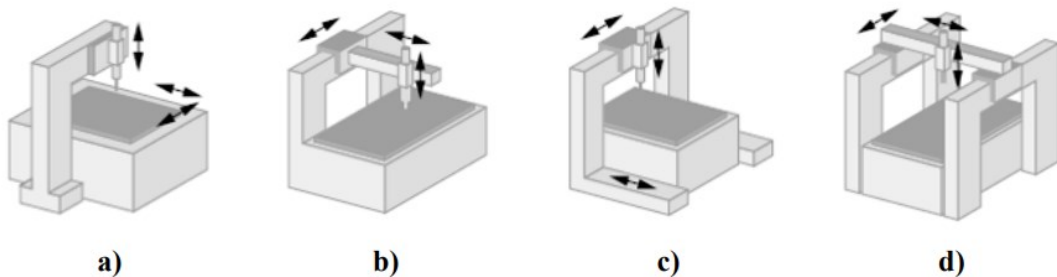
Obr. 5 Typy CMM dle konstrukce [11]

a) jednosouřadnicový CMM, b) dvousouřadnicový, c) třísouřadnicový CMM

V dnešní době jsou nejdůležitějšími měřicími stroji třísouřadnicové, jakožto vrchol měřicí techniky umožňující realizaci měření ve třech navzájem kolmých osách „X, Y, Z“. Z tohoto důvodu jsou takovéto stroje implementovány buď přímo do výroby, nebo do měřivých laboratoří. Fyzické uspořádání CMM se velmi liší, ale všechny typy strojů poskytují způsob pohybu sondy ve třech osách vzhledem k obrobku. Přesnost těchto strojů je až 0,1 μm .

Čtyři základní konfigurace, které se dle ČSN EN ISO 10 360-1 používají nejčastěji:

- Výložníkový typ
- Mostový typ (pohyblivý nebo fixní)
- Stojanový (sloupový)
- Portálový typ



Obr. 6 Typy souřadnicových měřicích strojů [11]

a) stojanový typ, b) výložníkový typ, c) portálový typ, d) mostový typ

Stojanový typ (obr. 3.2a)

- často označován jako univerzální měřicí přístroj namísto CMM
- konstrukce stojanu CMM poskytuje výjimečnou tuhost a přesnost
- tyto stroje jsou zpravidla vyhrazeny pro měřicí laboratoře, nežli do výroby

Výložníkový typ (obr. 3.2b)

- měřicí pinola se pohybuje ve směru osy „y“, kolmo k ose „x“
- měřený předmět se upíná přímo na stůl
- nevýhodou tohoto typu konstrukce je poměrně krátká osa „y“ a nutnost vyvažování, neboť se v ose „y“ mění vyložení pinoly od vodicí plochy
- dobrý přístup k měřenému předmětu – vhodný pro dlouhé úzké součásti

Portálový typ (obr. 3.2c)

- podstavec obrobku je nezávislý na osách x a y
- vyznačuje se velkou tuhostí a vysokou přesností
- toto nastavení umožňuje jezdit po obrobku pomocí sondy
- pro extrémně velké kusy

Mostový typ (obr. 3.2d)

- nejčastěji používaný je typ s pohyblivým mostem
- má stacionární stůl k podepření měřeného obrobku a pohyblivého můstku
- výhoda – snížení efektu ohýbání
- nevýhoda – v tomto provedení může docházet k poskakování (někdy nazvaný fenomén chůze), což může mít vliv na přesnost
- u pevného mostního uspořádání je most pevně připevněn k lůžku stroje, čímž eliminuje fenomén chůze a poskytuje vysokou tuhost

3.2 Snímací hlava

Snímací hlava je jedním z nejdůležitějších komponent 3D měřicího stroje. Závisí na ní veškerá přesnost, tuhost, opakovatelnost měření a vůbec stabilita celého procesu. Snímací hlavy dělíme na dvě různá konstrukční řešení – **dotykové a optické**.

3.2.1 Snímací hlavy dotykové

Snímací sonda je srdcem každého souřadnicového měřicího stroje. Toto zařízení vytvořené speciálně pro dynamiku pohyblivých portálových měřicích systémů generuje v průběhu měření signály. Klíčovým aspektem zápěstí vybaveného servomotory je flexibilita dotyku, který lze vyrovnat v libovolném směru a měnit jí jednotlivé dotykové sondy dle požadovaného stupně přesnosti, délky či tvrdosti. Další možností jsou pevné snímací dotyky, připevněny do snímacího systému napevno v předem připravených konfiguracích ve tvaru talířků, válců či koule. [6] [18]

Ruční nastavování nástrojů, ustavování obrobků a kontrola dílců jsou časově velmi náročné operace, náchylné na chyby obsluhy. Použití sond snižuje náklady na seřizovače nástrojů, drahé upínače a na ruční ustavení obrobku číselníkovými úchylkoměry. Snímání je rychlé a spolehlivé, přičemž odchylky stroje lze automaticky upravit. [8]



Obr. 7 Příklad použití dotykové snímací hlavy [12]

3.2.2 Optické 3D hlavy

Strojové vidění se z hlediska měřicích metod řadí mezi metody bezkontaktní (3D digitalizace) a její motivací pro optické snímání je nahradit lidskou schopnost vnímat zrakem obraz, porozumět mu a interpretovat jej. Přibližně 80 % všech informací vnímá člověk zrakem a strojové vidění je schopno tyto a některé další měřitelné informace obstarat pomocí technických prostředků. Další výhodou je flexibilita, která umožňuje překonfigurování systému často jen pouhým upravením vyhodnocovacího softwaru. [9]

Pomocí optiky a snímače se provede 2D měření rozměrů objektu. Pro měření třetí souřadnice a získání tak digitální 3D podoby reálného objektu se využívá metody triangulace a interference světla (jev vlnové optiky). [8]

Optické kamery společnosti Aberlink vynikají chytrou konstrukcí, kde pomocí magnetického upevnění dovoluje jednoduše vyměnit kameru za měřicí sondu v několika vteřinách, díky čemuž lze použít dotykové i kamerové měření v jednom programu.

V kameře je zabudována telecentrická čočka, která na monitoru dává obraz bez zkreslení. Obsahuje také 16 plně programovatelných LED diod uspořádaných do kruhu okolo objektivu, střídavě bílé a UV LED diody. Bílé diody osvětlují povrch běžným způsobem, zatímco UV diody jsou zde jako důmyslné řešení problémů se spodním osvětlením měřeného dílu. [19]



Obr. 8 Dotyková a optická snímací hlava [19]

3.3 Dotykové sondy

Ve svých prvopočátcích (před více než 45 lety), sloužila první spínací dotyková sonda pro měření obrobků na CMM a až později na obráběcích strojích a CNC centrech přinesl další vývoj sond jejich přirozené zapojení do automatizovaných procesů. Neustálý vývoj a zvyšující se nároky zákazníku nutí ke stále zvyšující se přesnosti a stabilitě v oblasti dotykových sond.

Důvodů, proč v dnešní době využívat dotykových sond je vskutku hodně, ať už eliminace nákladných prostojů stroje, konkurenceschopnost, či jednoduššího pochopení principu měření apod. Použitím dotykových sond lze snížit náklady na ruční ustavování obrobků, na drahé upínače, na náklady spojené se seřizováním strojů a jiných operací náchylných na chybu obsluhy.

Vždy jedna válcová a dvě kulové plochy tvoří kontaktní spínací mechanismus kinematického uspořádání trojic kinematických hnízd, jež k sobě přitlačuje tlak pružiny. Každé kinematické hnízdo má kontakt ve dvou stykových bodech. Šest bodů dotyku, zajišťující vrácení snímacího dotyku na původní místo, jakmile vychýlení pomine, tvoří tedy celý kinematický mechanismus. Definovaná a opakovatelná poloha dotyku po návratu do klidové polohy je základem pro přesné měření. [8]

Karbid wolframu (WC), který je dostatečně odolný proti plastickým deformacím, tvoří kontaktní elementy spínacího mechanismu. Elektronické příslušenství sondy kontroluje velikost elektrického odporu v okruhu vzájemně elektricky propojených kontaktů a při dosažení určité úrovně odporu, se vstupní signál ze sondy přestaví na „rozpojeno“, což znamená, že sonda je v kontaktu s obrobkem. Vychylující síla pro vznik spínacího signálu (desetiny Newtonů) je tak malá, že kinematická hnízda jsou v neustálém fyzickém kontaktu, což umožňuje spolehlivé a opakovatelné měření. [8]

3.4 Výběr dotyku

Běžně používaný poměr při vyhodnocování potřebné přesnosti měření činí 1:5. Tento poměr vyjadřuje nepřesnost souřadnicového měřicího stroje k toleranci rozměru. Ideální poměr je však jiný, 1:10, avšak pro praktické využití bývá až příliš nákladný. Díky tomuto poměru je zajištěno měření s malou nepřesností a podaří-li se tento poměr zachovat, je prakticky jisté, že měření probíhá v požadované přesnosti. [6]

3.4.1 Materiál kuličkového dotyku

V metrologii je na takové sondy jako kinematika, tenzometr a skenování namontován stylus, který působí jako kontaktní místo s obrobkem. Rozmanitost aplikací sond na obráběcích strojích, CMM, srovnávacích měřicích strojích a přenosných ramenech umožňuje správný výběr použití dotyků nezbytných pro efektivní, spolehlivé a přesné měření.

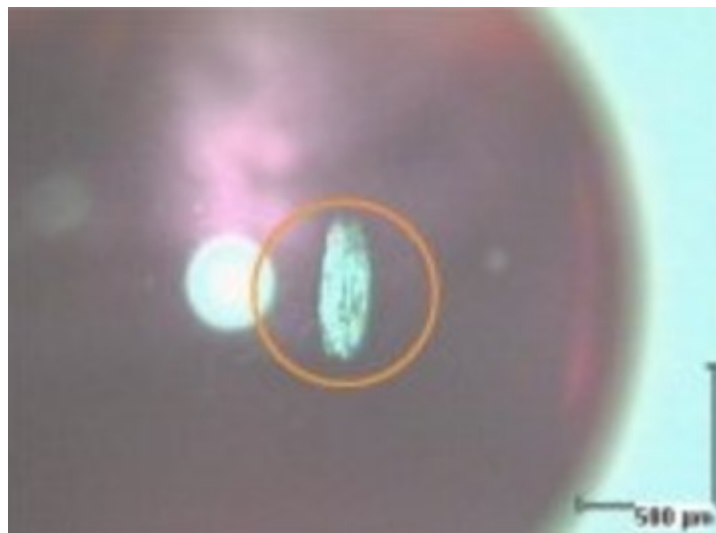
První volbou pro tradiční kinematiku jsou sondy složené z keramického stonku a rubínové kuličky. U CMM je karbid oceli a wolframu vhodný pro kratší stonky, zatímco keramické nebo uhlíkové vlákno vyhovuje lépe delším stonkům. Keramické stonky jsou lehčí než karbid wolframu, mají tuhost srovnatelnou s ocelí a jsou tepelně stabilní, což je ideální pro jejich použití ve strojovém prostředí. [12]

Rubínové kuličky jsou výjimečně tvrdé a hladké, s vynikající pevností v tlaku a odolností proti oděru. Jsou vyráběny na různé stupně přesnosti definované dle jejich tříd (grad), které se vztahují k maximální odchylce kuličky od dokonalé (imaginární) koule. Jakákoli chyba ve sféricitě zvýší nejistotu měření. Dvě nejčastěji používané míry kuliček jsou Grad 5 a Grad 10 (nižší číslo je lepší). Čím přesnější je CMM, tím výraznější je účinek kuličky. Doporučuje se stupeň 5 jako standard, ale nabízí se i stupeň 3 (se sféricitou pouze 0,08 mikronů) pro nejnáročnější aplikace. [12]

Styly pro CMM přenosných ramen musí být robustní, používají proto kuličky zirkonia stupně 5, které jsou vysoce odolné proti zlomení. Kuličky jsou spojeny s vysoce pevnými stopkami z karbidu wolframu pomocí nárazuvzdorného lepidla a tato speciální konstrukce zajišťuje, že kloub je tuhý a prakticky nezničitelný. [12]



Obr. 9 Abrazivní otěr na kuličkovém dotyku [13]



Obr. 10 Adhezivní otěr na kuličkovém dotyku [13]

3.4.2 Materiály pro skenovací sondy

Skenovací sondy, jako je například SP25M společnosti Renishaw, zavádí proměnné, které ovlivňují výběr materiálu kuličky. Skenování vytváří agresivnější povrchovou interakci než dotykové snímání, což má za následek tři problémy: akumulaci nečistot, degradaci lepidla a abrazivní opotřebení. Nečistoty jsou nevyhnutelné, ale lze je snadno odstranit suchým hadříkem bez vláken. Degradace lepidla znamená trvalý přenos materiálu obrobku na kuličku. Tento stav nakonec zhoršuje sféricitu kuličku. Abrazivní opotřebení odstraňuje materiál z koule nebo obrobku. [13]

Rubínová kulička je nejlepší pro většinu skenovacích aplikací, včetně obrobků z nerez a titanu, ale může za extrémních podmínek trpět adhezním opotřebením hliníku. Nitrid křemíku je náhradou za rubín v extrémních hliníkových aplikacích, ale může trpět abrazivním opotřebením nerezové oceli nebo litiny. Zirkonové koule jsou nejlepší pro skenování litinových dílů, ačkoliv karbid wolframu funguje také dobře. [12]

3.4.3 Dříky dotykových sond

Pro vysoce přesné měřicí sondy, zvláště ty, které se používají na měřicích strojích, se doporučuje použít dříky z uhlíkových vláken. Tyto dříky, ať už jsou duté nebo pevné, mají malou hmotnost, což se nejlépe hodí pro citlivé měřicí sondy. Uhlíkové vlákno je nejběžnějším materiálem pro dlouhé dotykové dříky a rozšíření, protože je tuhé, lehké a tepelně stabilní. Tam, kde je potřeba kov – pro spoje, klouby a tak dále – poskytuje titan nejlepší kombinaci lehké hmotnosti, síly, stability a hustoty. [12]

3.4.4 Rozmanitost typů stylů

Rovné styly se obvykle používají pro jednoduché funkce, kde sonda přímo přichází do styku se součástí. Pro specializované aplikace je však k dispozici mnoho alternativ:

Hvězda: Hvězdice s více hroty umožňují efektivní kontrolu extrémních bodů vnitřních prvků, jako jsou skluzavky nebo drážky ve vývrtu, což minimalizuje pohyb sond.

Ukazovátko: Tyto styly jsou ideální pro snímání závitových formulářů či specifických bodů, ačkoli nejsou vhodné pro standardní XY sondování. Radiální koncové ukazovátko lze použít ke kontrole umístění velmi malých otvorů.

Keramické duté kuličky: Tyto velké styly jsou ideální pro snímání hlubokých vývrtů ve směrech X, Y a Z. Sondování s kuličkovým stylusem zprůměruje vliv velmi drsných ploch.

Disk: Disky jsou ideální pro snímání podříznutí a drážkování. Tenčí kotouče vyžadují pečlivé vyrovnání, aby byl zajištěn správný kontakt se součásti. Jednoduchý disk omezuje efektivní snímání pouze na směry X a Y. Snímání ve směru Z nám dovoluje přidání válce s poloměrem, čímž se střed koncového válce poloměru rozprostírá nad průměr sondy.

Válec: Jsou ideální pro snímání otvorů v tenkých materiálech a závitových prvcích a pro nalezení středu otvoru. Kulový konec umožňuje plnou kvalifikaci a sondování ve směrech X, Y a Z.

Vlastní vzory: Vlastní styly jsou také k dispozici pro konkrétní aplikace.



Obr. 11 Hvězdicový stylus [12]



Obr. 12 Stylus tvaru disku [12]

3.4.5 Průhyb dotyku

Několik jednoduchých pravidel pro používání stylu může maximalizovat přesnost pro většinu snímacích aplikací:

- Udržujeme styly krátké a tuhé. Minimální délka hrotu poskytuje optimální výsledky. Delší stylus zesiluje chyby a představuje potenciál přílišného ohýbání.
- Minimalizujeme počet kloubů. Klouby a prodlužovací prvky představují potenciální body ohýbání a vychylování.
- Použijeme silnou stopku. Tlustší dřívky zvyšují tuhost stylu.
- Držíme kuličku stylu co nejširší. Tato strategie snižuje pravděpodobnost falešných spouštěčů způsobených koncovkou, která se dotýká části. Větší kulička zvyšuje efektivní délku sondy a umožňuje větší průměr dřívku, což zvyšuje tuhost dotykového hrotu. [12]

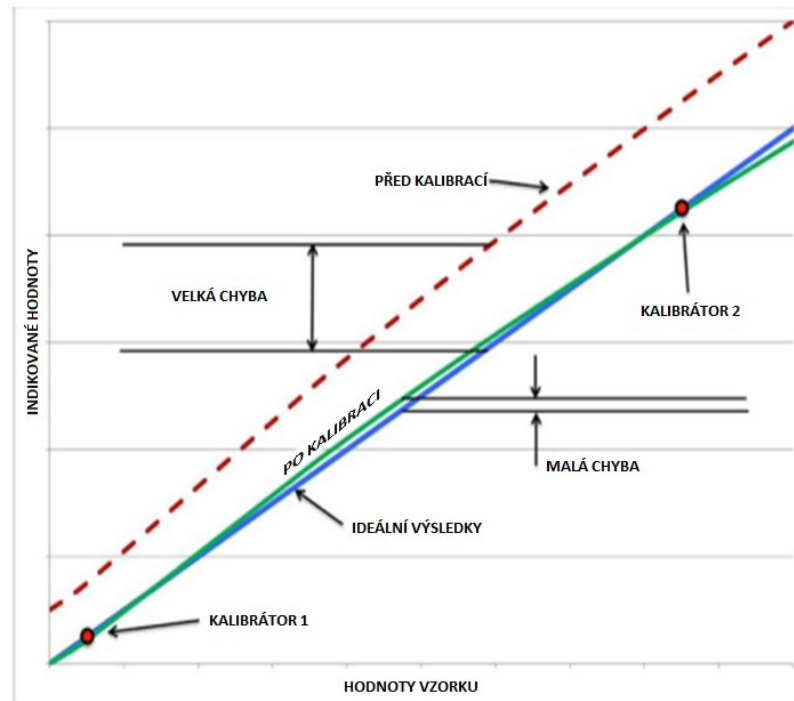
4 KALIBRACE

Kalibrace stroje nebo přístroje je jedním z hlavních procesů používaných k udržení jeho přesnosti. Tento proces slouží ke konfiguraci nástroje, který poskytuje výsledek pro vzorek v přijatelném rozmezí. Odstranění nebo minimalizace faktorů, které způsobují nepřesné měření, je základním aspektem při návrhu přístrojové techniky. Aby bylo možné dosáhnout sledovatelnosti metrologických norem, musí být ke kalibraci přiloženo prohlášení o nejistotě.

Ačkoli se přesný postup může lišit od výrobku k výrobku, kalibrační proces obvykle zahrnuje použití přístroje k testování vzorků jedné nebo více známých hodnot zvaných "kalibrátory". Výsledky se používají k vytvoření vztahu mezi měřicí technikou používanou nástrojem a známými hodnotami. Proces v podstatě "učí" nástroj reprodukovat výsledky, které jsou přesnější než ty, jež by se jinak vyskytovaly. Přístroj poté může poskytnout přesnější výsledky při testování vzorků neznámých hodnot v běžném provozu.

4.1 Průběh kalibrace

Kalibrace se provádí pomocí pouze několika kalibrátorů, aby se zjistila korelace v určitých bodech v rámci provozního rozsahu přístroje. I když by mohlo být žádoucí použít větší počet kalibrátorů pro stanovení kalibračního vztahu nebo křivky, čas a práce spojené s přípravou a testováním velkého počtu kalibrátorů by mohly převážit výslednou úroveň výkonu. Z praktického hlediska je třeba provést kompromis mezi požadovanou úrovní výkonu výrobku a úsilím spojeným s provedením kalibrace. Přístroj bude poskytovat nejlepší výkon, pokud se pro kalibraci použijí mezilehlé hodnoty uvedené ve specifikacích výrobce; zadaný proces v podstatě eliminuje nebo "vynuluje", vnitřní chybu nástroje v těchto bodech. [14]



Obr. 13 Kalibrace pomocí 2 kalibrátorů [14]

Obrázek výše znázorňuje, jak může správně provedená kalibrace zlepšit výkon produktu.

V ideálním případě by produkt produkoval výsledky testů, které přesně odpovídají hodnotě vzorku, bez chyby v každém bodě kalibrovaného rozsahu. Tato křivka byla označena jako "IDEÁLNÍ VÝSLEDKY". Nicméně bez kalibrace může skutečný výrobek produkovat odlišné výsledky zkoušek od hodnoty vzorku s potenciálně velkou chybou. [14]

Kalibrace výrobku může tuto situaci výrazně zlepšit. Během kalibrace se výrobek "učí" pomocí známých hodnot kalibrátorů 1 a 2, jaký výsledek by měl poskytnout. Proces odstraňuje chyby v těchto dvou bodech, čímž se křivka "PŘED KALIBRACÍ" blíží ke křivce „IDEÁLNÍ VÝSLEDKY“, která je znázorněna křivkou "PO KALIBRACÍ". Chyba v libovolném bodě byla mezi kalibračními body snížena na nulu a zbytková chyba v libovolném jiném bodě v rámci provozního rozsahu je v rámci zveřejněné linearitě nebo specifikace přesnosti publikované výrobcem. [14]

4.2 Faktory ovlivňující kalibraci

Správná kalibrace přístroje je důležitá, aby se zabránilo potenciálnímu zdroji chyb a tím i degradaci výsledku. Během a po kalibraci může dojít k několika faktorům, které mohou ovlivnit její výsledek.

4.2.1 Použití nesprávných hodnot kalibrátoru

Důležitým faktorem je pečlivě dodržovat pokyny pro použití během kalibračního procesu. Při nerespektování pokynů a výběru nesprávných hodnot kalibrátoru se nástroj "učí" nesprávně a vzniknou významné chyby v celém provozním rozsahu. Zatímco mnoho nástrojů má diagnostiku softwaru, která upozorňuje operátora, jsou-li kalibrátory testovány v nesprávném pořadí (např. kalibrátor 2 před kalibrátorem 1), může přístroj bez této diagnostiky akceptovat špatné hodnoty z jednoho či více kalibrátorů bez zjištění chyby obsluhy. [14]

4.2.2 Tolerance formulace kalibrátoru

Je důležité používat kalibrátory, které jsou formulovány dle specifikací s pevnou tolerancí od renomovaného výrobce. Existuje tolerance spojená s formulací kalibrátoru / kontroly vlivem normálních změn v procesech přístrojové a řídicí techniky. Tato tolerance může ovlivnit střední hodnotu získanou při použití kalibrátoru. [14]

4.2.3 Technika přípravy vzorků

Stejně jako v případě normálních testů je pro získání nejlepšího výkonu z kalibračního procesu nezbytná dobrá technika přípravy vzorku. Nedodržení technických podmínek, jako je například příprava vzorku příliš brzy po vyhotovení, může zvýšit odchylky ve výsledcích získaných z kalibrátorů testovaných v kalibračním procesu. Tato zvýšená odchylka může mít za následek průměrné hodnoty kalibrátorů, které se liší o několik jednotek od toho, co by mělo vyjít, čímž došlo k chybnému posunu kalibrační křivky, což následně vedlo ke zvýšení chyb pro všechny výsledky. [14]

4.2.4 Účinky okolní teploty

Nutnost pravidelně kalibrovat přístroj na teplotu blízké té, při které bude přístroj pracovat, činí tento úkon taktéž velmi důležitým. Dokonce i při správné kalibraci existují další faktory, které mohou ovlivnit přesnost výsledků. Environmentální faktory, jako je okolní

teplota, mohou představovat chyby, které nemusí být při testování vzorků s neznámými hodnotami snadno patrné. Komponenty používané v přístroji mohou být ovlivněny změnami provozní teploty. Je-li přístroj kalibrován při jedné teplotě a potom pracuje při výrazně odlišné teplotě, může způsobit chybu, která zapříčiní další snížení přesnosti výsledků. [14]

4.3 Kalibrace stylů

Před provedením měření musí být sonda kalibrována pro všechny postupy měření, a to nejprve snímáním kalibrační koule podle pokynů výrobců a sond. Kalibrace vyžaduje použití speciálního programu, který je typicky dodáván s CMM. Kalibrační koule je vyráběna s mimořádnou přesností a její přesné rozměry jsou již zavedeny a zahrnuty v softwaru. Kalibrace stanovuje účinné rozměry součástí sond. Tyto hodnoty jsou uloženy v ovládacím prvku CMM. [12]



Obr. 14 Kalibrace dotykové sondy [12]

4.4 Četnost kalibrace

Jednoduchá odpověď na tuto otázku, i když není velmi užitečná, je "kdy to potřebuje". Z praktického hlediska, denní nebo periodické testování známých hodnot může poskytnout kvantitativní indikaci výkonu přístroje, vycházející z historie. Pokud kontrolní údaje naznačují, že výkon přístroje je stabilní nebo náhodně kolísá v přijatelném rozmezí hodnot, není potřeba rekalibrovat přístroj. Pokud však historické údaje naznačují trend směrem k hraničním přijatelného rozsahu nebo mimo něj, nebo pokud přístroj vykazuje krátkodobý výrazný posun (např. v provozu při jiné teplotě okolí), je třeba provést recalibraci.

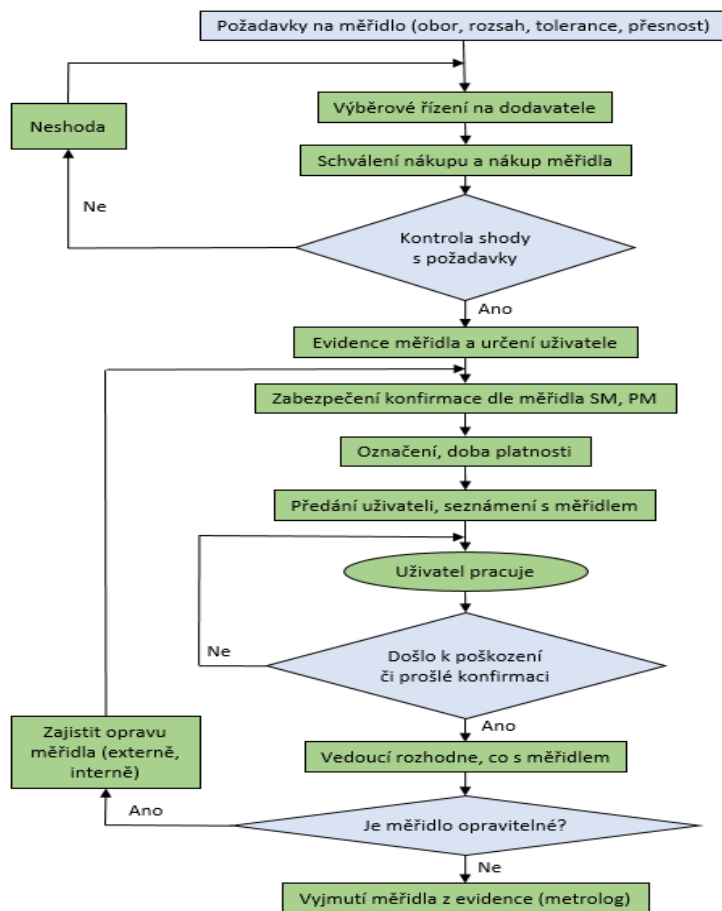
„Měřidla nekalibrujeme proto, aby byla kalibrována, ale proto, aby poskytovala přesné výsledky měření.“ [9]

Zatímco *prvotní kalibrace* slouží pro nově pořízená měřidla, přičemž výchozí metrologický stav tohoto měřidla určují výsledky této kalibrace, *periodická kalibrace* (recalibrace) se provádí během používání měřidla po určitém časovém úseku, zvaném nekalibrační interval. [16]

Pracovní měřidla podléhající periodické kalibraci jsou dle vyhlášky č. 69/1991 Sb. „měřidla, jejichž používání má vliv na množství a jakost výroby, na ochranu zdraví a bezpečnosti i životního prostředí, případně jsou používána za okolností, kdy nesprávným měřením mohou být významně poškozeny zájmy organizace nebo státu“. [15]

Dále tato vyhláška určuje, kdo kalibraci těchto měřidel může provádět:

- metrologické středisko vlastního podniku
- metrologické orgány (český metrologický ústav, autorizované metrologické středisko)
- střediska kalibrační služby akreditována Úřadem
- organizace navázané na etalony metrologických orgánů nebo na etalony zahraničních organizací se srovnatelnou metrologickou úrovní [15]



Obr. 15 Schéma postupu od koupě měřidla až po jeho vyřazení [17]

Metrologická konfirmace je dle norem soubor činností požadovaných pro zajištění toho, aby měřící vybavení bylo ve shodě s požadavky na jeho zamýšlené použití. Metrologická konfirmace obecně zahrnuje kalibraci a ověřování, jakékoli nezbytné seřízení nebo opravu a následnou rekalibraci, porovnání s metrologickými požadavky na zamýšlené použití vybavení, stejně jako jakékoli požadované zapečetění a označení štítkem. [17]

5 METODY ŘÍZENÍ KVALITY PRODUKTU

Všeobecně uznávaným faktem je, že kvalita výrobku znamená rozhodující rys konkurenceschopnosti jakékoli společnosti. Mezi důležité a zároveň kritické faktory patří doba uvedení produktu na trh. Zvýšení konkurence na trhu s produktem může znamenat rozdíl mezi tím, zda být technologickým průkopníkem, či býti společností „jako každá druhá“ v očích spotřebitelů.

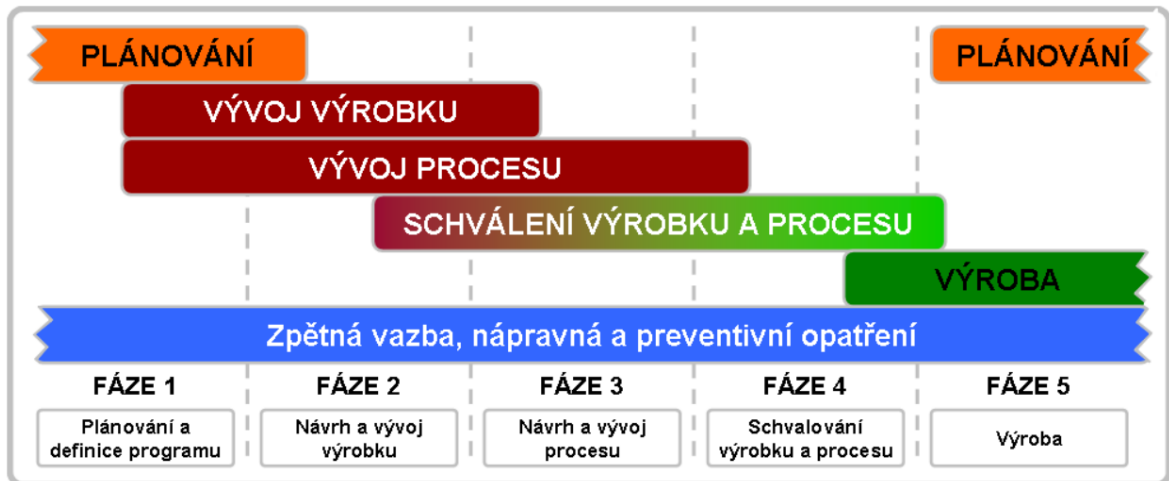
Povědomí o tom, že kvalita nového produktu má zásadní vliv na úspěchu na trhu a ziskovost nového produktu vede veškeré vývojářské skupiny ke zvýšení kvality návrhu, proto byly postupně zavedeny jednotlivé metody řízení kvality produktu.

Akční skupina automobilového průmyslu anglicky AIAG (Automotive Industry Action Group's) je globálně uznávaná organizace založena roku 1982 skupinou vizionářských manažerů ze společnosti Daimler Chrysler, Ford Motor Company a General Motors, za účelem poskytnout otevřené fórum, kde mohou členové spolupracovat na vývoji a podpoře řešení, které zvyšuje prosperitu automobilového průmyslu. Zaměřením AIAG se stalo průběžně zlepšovat obchodní procesy a postupy zahrnující obchodní partnery v celém dodavatelském řetězci. [22]

5.1 Moderní plánování kvality produktu (APQP)

Pokročilé plánování kvality produktu anglicky APQP (Advanced Product Quality Planning) je strukturovaný proces vyvinutý skupinou AIAG pro vývoj nových produktů pomocí křížově provázaných týmů z oblasti designu, strojírenství, výroby, kontroly materiálu, nákupu, kvality, prodeje, terénních servisů, dodavatelů a zákazníků. Pouze včasná a účelná komunikace napříč těmito jednotlivými týmy může ve výsledku přispět k nižším nákladům, pružné reakci na zákaznické požadavky a zjištění, zda produkt splňuje své cíle v oblasti designu, spolehlivosti a kvality. Mezi některé přínosy pokročilého plánování kvality produktu patří:

- Usměrnění zdrojů pro uspokojení zákazníka
- Podpora včasné identifikace požadovaných změn.
- Zabránění pozdějších změn.
- Poskytování kvalitního produktu včas s nejnižšími náklady. [22]



Obr. 16 Harmonogram časového plánu APQP [21]

5.1.1 Postup plánování APQP

1) Plánování a definice programu

Během fáze plánování a definování procesu APQP je pozornost zaměřena na shromáždění zákaznických vstupů a jejich přeměna na cíle návrhu. Projektový tým se snaží pochopit "hlas zákazníka" shromážděním informací. Tyto informace mohou mít formu průzkumu trhu, historických informací o záruce / kvalitě a zkušenostech z týmu. Projektový tým pak musí tyto informace převést na cíle návrhu. Cíle návrhu by měly zahrnovat designové požadavky, cíle spolehlivosti / kvality a předběžné kusovníky. [22]

2) Návrh a vývoj produktu

Projektová a vývojová fáze projektu se točí kolem vývoje vlastností a charakteristik návrhu. V této fázi jsou podniknuty kroky k zajištění toho, aby produkt splnil plán, který byl vyvinut a definován v programové části celkové fáze. Návrh musí uspokojit "hlas zákazníka" a splňovat jakost, spolehlivost, náklady a časové cíle stanovené odpovědným týmem. Hlavní výstup této fáze projektu je soubor inženýrských specifikací a technické výkresy. Tyto výkresy jsou mostem pro komunikaci mezi interními a externími dodavateli. Proto je rozhodující, aby každý aspekt strojírenského výkresu byl správný a šlo jej snadno pochopit. [22]

3) Návrh a vývoj procesu

Třetí fází procesu APQP je návrh a vývoj procesů. Tato fáze cílí na centra vývoje výrobního systému a plánování řízení. Vyvinutý výrobní systém musí být schopen vyrábět výrobky, které splňují požadavky zákazníka.

V kontrolním plánu jsou stanovena měření a zkoušky prototypu, který bude dohotoven k identifikaci potenciálních problémových oblastí během pokračující výroby. [22]

4) Ověření a schvalování produktu a procesu

Hlavním rysem fáze validace produktu a procesu APQP je výrobní zkušební provoz. Tento provoz je charakterizován malým počtem výrobků vyrobených z komponent používaných výrobní zařízení, nástroje a procesy. Tím vyvstává šance pro tým, zhodnotit své plány řízení a kvality výrobků vyhotovených těmito výrobními nástroji. Výrobní zkušební provoz poskytuje informace týmu, dodavatelům a výrobě, což jim umožní dokončit:

- Studie předběžných procesních schopností
- Hodnocení systémů měření
- Konečnou proveditelnost
- Průzkum procesu
- Testování validace výroby
- Schválení výrobní části (PPAP)
- Hodnocení balení
- První způsobilost [22]

5) Posouzení zpětné vazby, nápravná opatření a výroba

I když je tato fáze APQP uvedena jako poslední fáze, jedná se vlastně o pokračující úsilí v rámci celého projektu. Důvod umístění na konci procesu je proto, že většina zpětných vazeb a nápravných opatření probíhá po zkušebním provozu. Cílem této fáze má být převedení informací získaných z měření a testování výrobků ze zkušebního provozu do plánu pro sníženou variaci.

V této fázi, se používají nástroje, jako jsou kontrolní diagramy a Statistická kontrola procesu anglicky SPC (Statistical Process Control) pro měření změny procesu. Procesní měření určují oblasti pro zlepšení a místa, na která se má zaměřit úsilí týmu. V této fázi bude tým vyvíjet plán na snížení variace, nákladů a zlepšení dodávek a služeb. [22]

5.1.2 Výhody a nevýhody APQP

Tři hlavní výhody procesu APQP nad tradičními vývojovými procesy nových produktů je zlepšení kvality výrobků, snížení nákladů na výrobu a minimum problémů s uvedením produktu na trh. Toho lze dosáhnout pouze prostřednictvím zapojení všech týmů zasahujících do procesu souběžně s podporou zákazníků a dodavatelů. Následný proces APQP nutí členy týmu podniknout kroky, které zajistí, že vyvinutý produkt splňuje požadavky zákazníka. [22]

Výhody toho systému však nejsou bez nákladů, neboť APQP je velmi dobře vyvinutým systémem s mnoha požadavky, vyžadující čas, trénink a prostředky k jejich dokončení. Proces APQP vyžaduje disciplínu ze strany projektových týmů a řízení. Manažeři nesmí pod tlakem přeskakovat jednotlivé kroky k rychlejšímu uvedení produktu na trh, protože pokud tak učiní, dojde k ohrožení celého projektu. Vedoucí nemohou očekávat, že jejich týmy automaticky pochopí proces APQP. Členové týmu mají často jen zběžné pochopení zásad kvality. Proto je důležité tyto týmy pravidelně školit, což vyžaduje nejen finanční, ale také časové náklady. [22]

Systém APQP je příliš velký a zdlouhavý pro mnoho společností mimo automobilový průmysl. Jejich výrobky jednoduše nejsou tak složité v konstrukci nebo nejsou tak obtížně vyráběné. Vedení musí vidět přínos tohoto procesu pro jeho zavedení a zvážit, zda se jim vyplatí dostat výrobky na trh rychleji a mít tím výhodu nad konkurencí.

5.1.3 PPAP

Proces schvalování dílů do sériové výroby anglicky PPAP (Production Part Approval Process) byl vyvinut v rámci akční skupiny AIAG jako další proces pro stanovení požadavků nutných k dodržení při schvalování nových dílů do masové výroby. Účelem této metody je prokázání toho, že výrobní podnik správně porozuměl veškerým požadavkům konstrukční dokumentace výrobku spolu se všemi zákaznickými specifikacemi. PAPP deklaruje, že je

výrobní podnik schopen trvale vyrábět výrobek s odpovídající kvalitou vyhovující všem zákaznickým požadavkům. Metoda PPAP ještě vylepšuje metody APQP a pomáhá snížit rizika selhání výroby.

Návrh a výroba produktu není snadné úsilí, takže není překvapující, že proces PPAP je poměrně složitý. Tento podrobný proces se skládá z klíčových prvků, které musí být dodrženy, aby se zajistilo, že výrobní proces bude produkovat kvalitní výrobek.

Zákazník obvykle určí úroveň (Level) předložení. Konkrétně 4. vydání příručky PPAP definuje 5 základních úrovní předložení. Jednotlivé úrovně se liší rozsahem předkládaných dokumentů. [23]

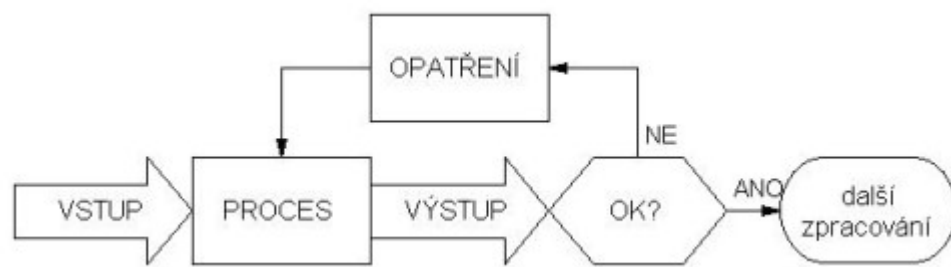
| | |
|-----------------|---|
| Úroveň 1 | Zákazníkovi se předkládá pouze průvodka (a u položek s určeným vzhledem zpráva o schválení vzhledu) |
| Úroveň 2 | Zákazníkovi se předkládá průvodka se vzorky produktu a s omezenými podpůrnými údaji |
| Úroveň 3 | Zákazníkovi se předkládá průvodka se vzorky produktu a úplnými podpůrnými údaji |
| Úroveň 4 | Průvodka a jiné požadavky stanovené zákazníkem |
| Úroveň 5 | Průvodka se vzorky produktu a úplné údaje přezkoumávané na výrobním místě organizace |

Tab. 1 Úrovně předložení PPAP [23]

Výchozí úrovní, jež musí organizace zákazníkovi předložit je úroveň 3, další úrovně jsou možné předkládat pouze na základě požadavku zplnomocněného představitele zákazníka. Výsledkem PPAP je tedy soubor dokumentů předkládaných zákazníkovi s prvním kusem, na základě kterých pak zákazník uvolní díl do sériové výroby. [23]

5.2 Statistická regulace procesu (SPC)

Statistická regulace procesu anglicky SPC (Statistical Process Control) je, jak už název napovídá, regulace procesu. Překládat SPC jako Statistickou kontrolu procesu by bylo velkou chybou, neboť je nutné si uvědomit zásadní rozdíl mezi slovem kontrola a regulace. Zatímco kontrola znamená pasivní pozorování, regulace aktivně ovlivňuje proces za předpokladu, že kontrola nevychází! [24]



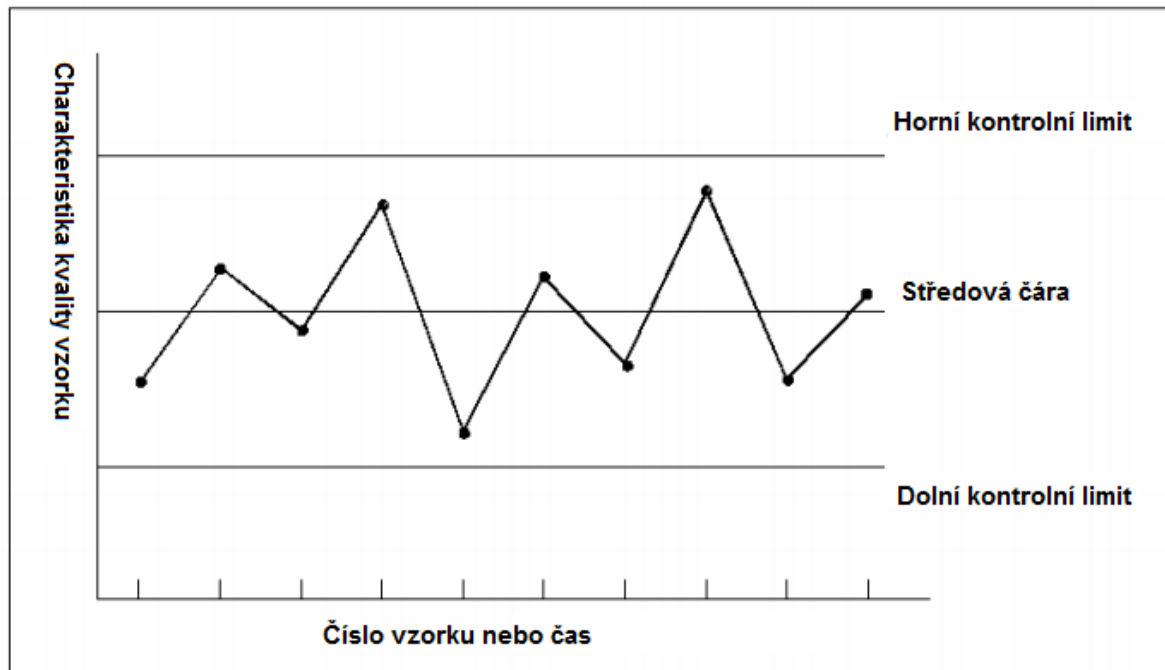
Obr. 17 Diagram postupu procesu [24]

Úkolem SPC je na denní bázi provádět nutné regulační zásahy a reagovat v případě, že některá z kontrol procesu nevyšla. Při SPC je nutné reagovat dříve, nežli zjistíme, že je sledovaný parametr mimo toleranční meze, neboť v tomto procesu nehledáme zmetky! Pokud bychom přeci jen zmetek našli, signalizuje to, že je statistická regulace procesu prováděna zle. Při SPC hlídáme, že je Gaussova křivka (neboli hustota pravděpodobnosti) ukryta s velkou rezervou ve středu tolerancí. [24]

5.2.1 Shewartovy ovládací diagramy

Původcem grafu pro kontrolu statistických procesů je Dr. Walter A. Shewhart. Základní myšlenka tohoto diagramu vyžaduje, aby analytik pravidelně odebíral vzorky z procesu a vypočítal statistické údaje, ke shrnutí chování procesu. Měření jsou vynesena na grafu proti časové nebo pozorovací sérii a porovnávána s kontrolními limity na grafu. Obecný kontrolní Shewartův graf je zobrazen na obrázku 18. Středová čára představuje očekávanou hodnotu charakteristiky kvality během procesu kontroly. Horní kontrolní limit (UCL) a dolní kontrolní limit (LCL) jsou vybrány na základě povahy procesu chování, což znamená pouze určitou pravděpodobnost, že proces spadá do kontrolních mezí. [25]

Kontrolní limity jsou přímo vypočteny z procesních dat. Nutno poznamenat, že kontrolní limity nejsou specifikací stanovenou zákazníkem. Proces řízeného řízení tedy znamená, že produkt splňuje limity specifikací, znamená to pouze to, že chování procesu je konzistentní a předvídatelné. Někdy je častou chybou to, že kvalitní lidé berou zákaznické definice limitu specifikací jako kontrolní limity při používání Shewartových grafů. [25]



Obr. 18 Obecný kontrolní Shewartův graf [25]

Shewhartovy kontrolní diagramy slouží jako nástroj pro detekci abnormální události způsobené zvláštními příčinami a signalizují operátorovy analyzovat problém.

5.3 Standardní pracovní postup (SOP)

Standardní pracovní postup anglicky SOP (Standard Operating Procedure) je zdokumentovaný proces, který předkládá podrobnosti o systému měření pro účely implementace. SOP poskytuje instrukce a standardizuje procesy zapojené do systému měření, aby zajistil, že plní úkoly co nejdůsledněji. Psaný dokument SOP je instrukční zdroj, jenž umožňuje těm, kteří využívají měřicí systém pracovat bez žádosti o další pokyny a vysvětlování. Nezáleží také na tom, kdo měření vykonává. Klade důraz na správné a stejné pořadí kroků a posloupnost jednotlivých činností. Tento postup popisuje kroky v procesu měření, jako jsou kalibrace přístroje, nastavení měřicích přístrojů, seznam metriky měření, metodiky použité pro každou metriku a formát sběru dat, analýzu a reportování. Standardní pracovní postupy jsou také používány pro zajištění reprodukovatelnosti měření u hodnotitelů, protože slouží k minimalizaci lidské chyby, která vyplývá z nekonzistentních postupů měření. [26] [27]

SOP se jako účinný proces implementují do mnoha oborů (medicína, armáda, letectví, atd.), neboť pomáhají snížit riziko toho, že se něco důležitého opomene. Zjednodušeně ře-

čeno je možné SOP implementovat kamkoli, kde je možné popsat proces, posloupnost činností (i například na vaření). Nejvíce se však tento systém používá v místech, kde jde o lidské životy. [27]

5.4 Analýza systému měření (MSA)

Měřicí systémová analýza anglicky MSA (Measurement System Analysis) je systematická, kvantitativní a spolehlivá metoda určená k popisu stability, přesnosti a preciznosti měřicího systému. Jinými slovy MSA vyhodnocuje stav měřicího systému pro určení rozsahu odchylek v rámci procesu měření a vliv variace procesu měření na celkovou variabilitu procesu. Systémy MSA využívají experimentální a matematické metody v procesu definování rozptylu. Vědečtí pracovníci a metrologičtí odborníci se shodují na důležitosti provádět MSA při shromažďování dat a provádění experimentů. Tyto systémy poskytují standardní nástroje pro měření opakovatelnosti experimentů, při jejichž navrhování jsou MSA kritickým prvním krokem, kdy je cílem nastavit rozhodnutí korelace dat včetně regresních analýz potřebných pro statistickou kontrolu procesu. [26]

MSA izolují a prozkoumají dva zdroje variace: *variace dílčí části a změny systému měření*. Pokud je změna měřicího systému velká v porovnání se změnou dílčí části, nemusí systém měření poskytnout užitečné informace. Systém měření může být rozdělen na dvě odlišné konstrukce: dle polohy výsledků a dle variability. [26]

5.4.1 Poloha výsledků

Poloha výsledků je výraz, který popisuje rozdíl mezi skutečnou (pravou) hodnotou a průměrnou naměřenou hodnotou. Pravá hodnota je teoreticky správná hodnota parametru, která je také známa jako hodnota referenčního standardu. Literatura popisuje umístění třemi způsoby: strannost, stabilita a linearita. [1] [26]

Strannost, také známá jako přesnost, je měřítkem vzdálenosti mezi skutečnými hodnotami vzorků a průměrné hodnoty měření. Strannost je systematická chyba součástí měřicího systému. Důležité je si uvědomit, že hodnota tohoto měření je omezena, pokud měříme pouze jednou. Pokud měříme pouze jeden vzorek, tak se výsledné hodnoty v průběhu času mohou změnit. Důležitým faktorem, který může ovlivnit zkreslení, se stává čas. [26]

Stabilita je charakteristická pro popis kapacity měřicího systému na výrobku v delším časovém úseku. [26]

Linearita se týká rozdílu zkreslení v očekávaném provozu (měření) pro měřicí zařízení. To znamená, že uživatelé nemohou obsáhnout konstantní zkreslení v rozsahu celého měření. Zde jsou některé možné příčiny problémů linearity:

- měřicí systém potřebuje kalibraci
- špatná údržba měřicího systému
- problém s operátorem
- teplota
- vlhkost vzduchu
- čistota
- špatný návrh měřicího systému

Měřicí systém by měl být stabilní, zkouáme-li linearitu. [26]

5.4.2 Variabilita

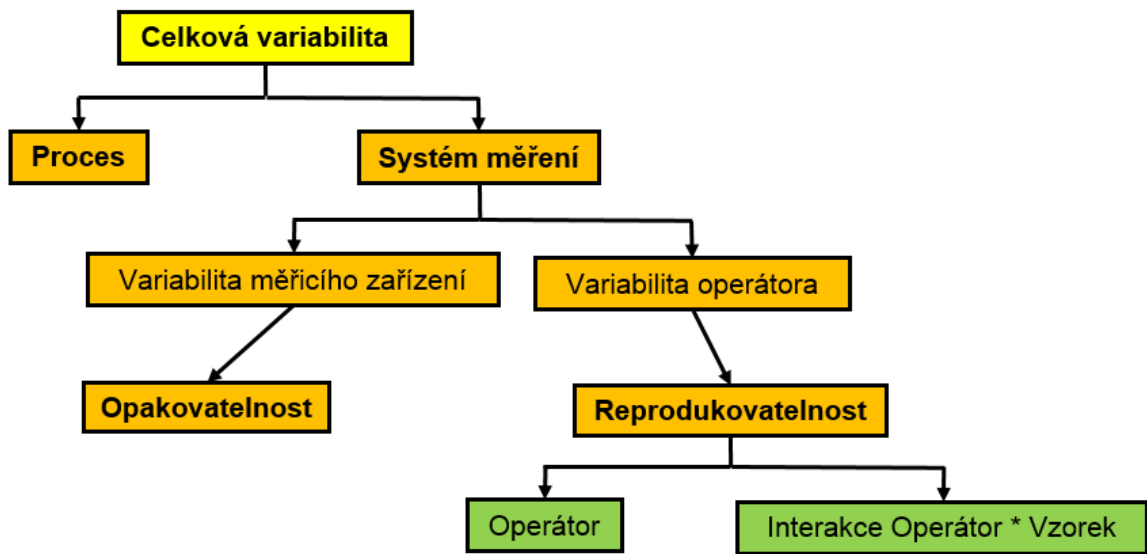
Variabilita, známa též jako přesnost, popisuje šíření naměřených hodnot. Existují dva způsoby, jak popsat variabilitu: opakovatelnost a reprodukovatelnost. V jakékoli studii se pečlivá definice pojmů stává nesmírně důležitou, zvláště když v literatuře neexistuje skutečný konsensus. Tak je tomu i zde v případě termínů opakovatelnost a reprodukovatelnost. Současná studie definuje tyto dva termíny způsobem v souladu s akční skupinou pro automobilový průmysl (AIAG) [1] [26]

5.4.3 Studie opakovatelnosti a reprodukovatelnosti (Gage R & R)

Tato studie se definuje jako metoda, používaná k hodnocení přesnosti měřicího zařízení a zjištění odchylek měřicím systémem. V závislosti na tom, jak byl experiment proveden, existují dva typy Gage R & R studie: experiment Gage R & R křížový, kdy je každá část měřena několikrát každým operátorem a experiment Gage R & R vnořený, v němž každou část měří pouze jeden hodnotitel. Změna systému měření pro opakovatelnost a reprodukovatelnost (známá jako GRR) zní definicí jako "... *odhad kombinované odchylky opakovatelnosti a reprodukovatelnosti.*" [29, str. 56]¹

$$\partial_{GRR}^2 = \partial_{Opakovatelnost}^2 + \partial_{Reprodukovatelnost}^2 \quad (5.1)$$

¹ Gage R&R is an estimate of the combined variation of repeatability and reproducibility.



Obr. 19 Rozdělení celkové variability zaznamenaných dat [28]

Measurement Systems Analysis Reference Manual definuje tři metody použité pro provádění proměnné studie Gage:

- metoda rozpětí
- metoda založená na průměru a rozpětí
- analýza metody rozptylu (ANOVA) [29]

5.4.3.1 Metoda rozpětí

Modifikovaná studie proměnných, jež umožňuje rychlou aproximaci variability měření. Tato metoda poskytuje pouze celkový obrázek měřicího systému; nerozkládá variabilitu na opakovatelnost a reprodukovatelnost. [26]

5.4.3.2 Metoda založená na průměru a rozpětí

Metoda průměru a rozpětí udává přístup, který poskytne odhad opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měřicího systému. Na rozdíl od metody rozpětí, tento přístup umožní dekomponovat postih měřicího systému do opakovatelnosti a reprodukovatelnosti. [26]

Jelikož se v praktické části této práce budu zabývatí právě touto metodou, rozeberu ji důkladněji.

Ačkoli platí, že čím více vzorků, tím lepší a přesnější analýza, bylo vybráno 10 vzorků (z důvodu časové úspory) označených tak, aby toto značení nebylo viditelné pro ostatní operátory. Následně provedou operátoři na každém vzorku několik opakovaných měření v náhodném pořadí a vyznačí naměřená data do výsledkového formuláře – viz příloha P2

Jakmile jsou všechny výsledky vyneseny do výsledkového formuláře, provede se grafická analýza. Zprvė sestrojíme diagram pro průměr pro jednotlivé operátory, který nám poskytne informace o shodě mezi jednotlivými operátory, a zadruhé sestavíme diagram pro rozpětí. Do druhého diagramu se vynáší průměry jednotlivých operátorů, celkový průměr a kontrolní limity (UCL) přičemž pomáhá určit, zda je proces pod statickou kontrolou. Jsou-li průměry všech zúčastněných pod těmito kontrolními limity, vypovídá to, že všichni operátoři měří stejně. Na druhou stranu pokud hodnoty jednotlivých operátorů spadají mimo UCL, je třeba zavést změny, neboť se jeví daný měřicí systém příliš citlivý na techniku měření operátorů.

Nyní přichází na řadu numerická analýza z dat vynesných do formulářů a výpočet opakovatelnosti a reprodukovatelnosti.

Rovnice 5.2 umožňuje vypočítat pro každý díl i operátora průměr a rovnice 5.3 rozpětí.

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n \quad (5.2)$$

$$R = x_{max} - x_{min} \quad (5.3)$$

Do formuláře, do něž se zanesla jednotlivá měření, se následně vypočítají tyto hodnoty pomocí předchozích rovnic:

- průměr všech měření
- průměr průměrů
- rozpětí jednotlivých operátorů
- průměrné naměřené hodnoty pro jednotlivé díly
- průměrné hodnoty pro jednotlivé díly
- rozptyl pro jednotlivé díly

Následně se vypočítá rozdíl nejmenší a největší hodnoty průměru dílu \bar{X}_{DIFF} a průměrný rozptyl všech operátorů značený jako \bar{R} . Pomocí těchto hodnot se určí jednotlivé meze dle rovnic 5.4 a 5.5

$$LCL(R) = \bar{R} \cdot D_3 \quad (5.4)$$

$$UCL(R) = \bar{R} \cdot D_4 \quad (5.5)$$

Koeficient D_3 je 0 pro výběr vzorků vyšší nežli 7 a koeficient D_4 činí pro dva operátory 3,27 a pro tři operátory, zkoumající proces dosahuje hodnoty 2,58.

V dalším kroku následuje výpočet jednotlivých rovnic pro potřebnou analýzu měřících jednotek s vynesemím do výpočtového formuláře - viz příloha P3

Variabilita zařízení

$$EV = \bar{R} \cdot K_1 \quad (5.6)$$

Opakovatelnost operátora

$$AV = \sqrt{(\bar{X}_{DIFF} * K_2)^2 - (EV^2/n \cdot r)^2} \quad (5.7)$$

Opakovatelnost a reprodukovatelnost měřidla

$$GRR = \sqrt{EV^2 + AV^2} \quad (5.8)$$

Variabilita dílu

$$PV = R_p \cdot K_3 \quad (5.9)$$

Celková variabilita

$$TV = \sqrt{GRR^2 + PV^2} \quad (5.10)$$

Porovnáme jednotlivé variability s celkovou variabilitou TV dle rovnic 5.11 – 5.14, čímž získáme přehled o tom, zda je R&R systém v pořádku.

$$\%EV = 100 \cdot (EV/TV) \quad (5.11)$$

$$\%AV = 100 \cdot (AV/TV) \quad (5.12)$$

$$\%GRR = 100 \cdot (GRR/TV) \quad (5.13)$$

$$\%PV = 100 \cdot (PV/TV) \quad (5.14)$$

V závěru se stanovuje numerická metoda citlivost měřicího systému pomocí vzorce 5.15. Číslo ndc se vyjadřuje celým číslem, přičemž výsledek by měl vycházet větší nebo roven hodnotě 5.

$$ndc = 1,41 \cdot (PV/GRR) \quad (5.15)$$

5.4.3.3 Metoda ANOVA

Analýza odchylky rozptylu anglicky ANOVA (Analysis of Variance) je standardní statistickou technikou, kterou lze použít pro analyzování chyby měření a dalších zdrojů variability dat v systému měření. V této metodě lze rozptyl rozložit na čtyři kategorie:

- díly
- operátoři
- interakce mezi díly a operátorem
- chyba replikace díky grafu.

ANOVA je upřednostňována proto, že počítá s chybou operátora k chybě měřidla, zatímco jiné metody chybu měřidla nezahrnují. Ve srovnání s průměrem a rozpětím je metoda ANOVA schopna zvládnout jakékoliv experimentální uspořádání, odhadovat přesnější odchylky a získávat další informace (například interakce mezi díly a účinkem obsluhy) z experimentálních dat. [29]

Podle AIAG je obecné pravidlo pro měřicí systém přijatelnosti následující:

- Systém je přijatelný s chybou menší nežli 10%.
- 10% až 30% chyby naznačuje přijatelnost systémů v závislosti na významu aplikace, nákladů na měřicí zařízení, nákladů na opravu a dalších faktorech.
- Chybu přesahující 30% považujeme za nepřijatelnou a měl by být vylepšen systém měření. AIAG také uvádí, že počet odlišných kategorií, do kterých se měřicí systémy a procesy dělí, by měly být větší nebo 5. [29]

Kromě procenta chyby a počtu odlišných kategorií, AIAG doporučuje, že by v průběhu času měli uživatelé přezkoumat grafické analýzy, pomocí nichž by rozhodli o přijatelnosti měřicího systému. [26]

Závěrem je dobré říci, že MSA považujeme za rozhodující pro shromažďování dat z procesu, kterými jsou řízení procesu nebo schopnost procesu a slouží k potvrzení, že je měřicí systém konzistentní a přesný. Měření přesnosti obvykle probíhá v analytické laboratoři a často se provádí výběrem vzorků, které pokrývají rozsah zájmu a pomocí regresní analýzy k nalezení kalibrační křivky. V praxi nemusí být skutečná hodnota přesně známa, ale náhrada skutečné hodnoty může být nalezena.

V této studii jsem pro vyzkoumání tohoto systému požádal o pomoc dva další pracovníky ze společnosti, ve které jsem měření prováděl, aby provedly měření na stejných kusech, na kterých jsem měřil já a to metodou, kterou jsem pro účely této diplomové práce navrhnul.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

V praktické části této diplomové práce bude popsán postup tvorby programové části práce za pomoci softwaru „Aberlink3D v4“ na souřadnicovém měřicím stroji Axiom too HS, několikanásobné změření důležitých zákaznických rozměrů a následné vyhodnocení jednotlivých výsledků pomocí metody opakovatelnosti a reprodukovatelnosti.

V úvodní části se nachází krátké seznámení s firmou, ve které se měření koná a se strojem, na němž bude měření realizováno. Plastová součást, vybraná pro účely této diplomové práce pochází z dílny firmy zabývající se výrobou součástí pro automobilový průmysl. Tento díl, který nese název Gearbox housing SA s interním číselným označením 915636-104, byl vybrán z důvodu nutnosti vytvoření nového programu (nová revize výkresu) pouze pro 12 klíčových rozměrů, jež jsou důležité pro prvotní pochopení chování dílce. Mezi tyto nejdůležitější charakteristiky měření, jež si určil zákazník, patří průměry děr, rádiusy, délkové rozměry a geometrické tolerance. Tento nový program zajistí rychlejší zpětnou vazbu pro zákazníka, neboť se nejedná o kompletní přeměření veškerých kót na výkrese.

Další fází je určení všech měřitelných elementů, potřebných pro vyhodnocování. Jelikož není k dispozici CAD model součásti, jsou jednotlivé vyhodnocovací charakteristiky určeny z výkresové dokumentace dodané zákazníkem. Následně dochází k samotnému měření součásti a v poslední fázi k vyhodnocení naměřených výsledků.

Cílem praktické části této diplomové práce bylo tedy vytvořit nový program pro měření klíčových rozměrů, které poslouží zákazníkovi jako ukazatel toho, že má proces výroby správně nastaven či nikoli. Dále bylo toto měření zkontrolováno za pomoci statistické metod MSA, zda zvolený postup měření vyhovuje opakovatelnosti a reprodukovatelnosti.

7 O FIRMĚ

Společnost 100% REWORK byla založena roku 2001 jako společnost poskytující služby v oblasti kvality, jejíž pobočky lze najít po celé ČR. Od svého založení se jedná o stoprocentně českou firmu, což působí v dnešní době poměrně vzácně a profiluje se získáváním a následným využíváním zkušeností v oblasti automobilového průmyslu. Svou pozici si získala především nadstandardní technickou podporou, inženýrskou projekční činností a řešením problémů přímo u zákazníka.



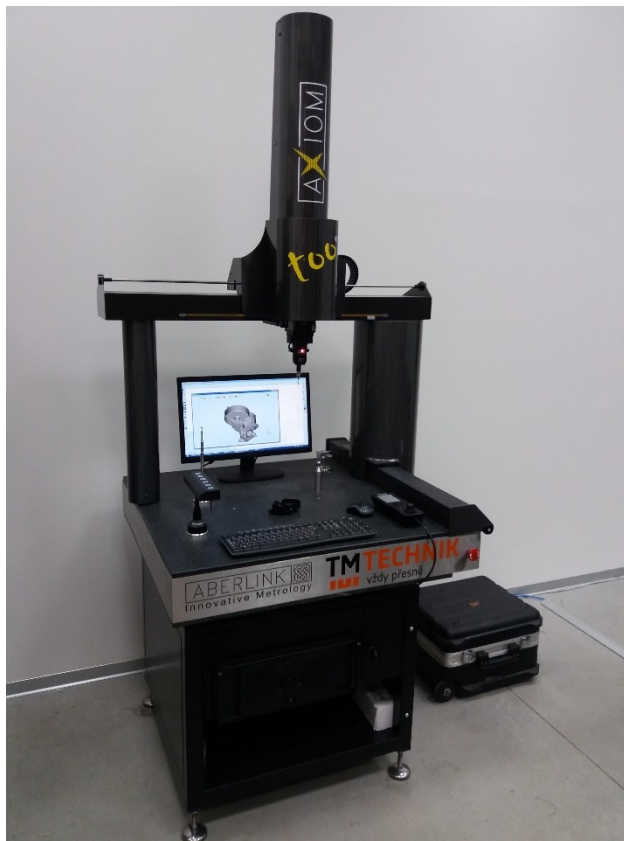
Obr. 20 Logo firmy 100% REWORK

Zpočátku se tato společnost orientovala na vizuální kontrolu dílů přímo na pracovišti zákazníka a na základě získaných zkušeností se postupně vypracovala v plnohodnotného partnera v nabízení školení, auditů, měřicích služeb dle konkrétních požadavků či přímo prodejem měřicích strojů. Mezi zákazníky společnosti patří zejména dodavatelé komponentů pro automobilový, elektrotechnický, energetický i letecký průmysl.

Pobočka v Brně, ve které je téma diplomové práce realizováno, byla otevřena v roce 2014 jako plně vybavené kontrolní měřové středisko, s nejmodernějšími souřadnicovými měřicími stroji pro dotykové a bezkontaktní měření od firem Wenzel či Aberlink.

8 PŘEDSTAVENÍ PŘÍSTROJE

Pro účely této diplomové práce byl použit CNC portálový souřadnicový měřicí stroj s indexovatelnou měřicí hlavicí společnosti Aberlink.



Obr. 21 Axiom too HS [19]

8.1 Technické specifikace

Přístroj Axiom too HS se postupným vývojem stal rychlejší a přesnější než standardní model. Toto zařízení je vybaveno technologií hnacích tyčí vyvinutou na větších strojích, což umožňuje dosahovat ještě většího zrychlení (přibližně o 20%) než standardní varianta, čímž se stává ideálním pro měření s vysokým objemem. Přístroj Axiom too HS pracuje se stupnicí rozlišení 0,1 μm na každé ose a činí jej ideálním při měření těsných tolerancí díky implementovaným nejmodernějším technikám na mapování chyb. [19]

| Rozsah osy (mm) | Vnější rozměr stroje (mm) |
|---------------------------|--|
| X 640 | X 1130 |
| Y 600, 900, 1200, 1500 | Y 900, 1200, 1500, 1800 |
| Z 500 | Z 2320 |
| Přesnost:* | TP20 (2,1 + 0,4L/100) μm TP200 (2,0 + 0,4L/100) μm SP25M (1,8 + 0,4L/100) μm |
| Rozlišení pravítka: | 0,1 μm |
| Optimální teplota:** | 18 - 22 °C |
| Rozsah provozních teplot: | 0 - 45 °C |
| Stůl: | Voštinová hliníkovo-granitová deska Nebo plný granit |
| Nosnost stolu: | 300 kg (voštinová deska) 500 kg (plný granit) |
| Max. vektorová rychlost: | 866 mm/sec (CNC) |
| Max. vektorové zrychlení: | 1200 mm/sec ² (CNC) |
| Spotřeba vzduchu: | 50 l/min |
| Požadovaný tlak vzduchu: | 4 bar |

* Maximální přípustná chyba MPEE podle normy ISO 10360-2 2009 v rámci teplotních limitů definovaných pro optimální rozsah teplot

** Tepelné limity prostředí:

Rychlost změny <1 °C/hod. a <2 °C/24 hod.

Teplotní spád <1 °C/m

Tab. 2 Technické specifikace stroje Axiom too HS [19]

8.1.1 Měřicí zařízení

Stroj používá snímací sondu RTP20 společnosti Renishaw, která dokáže automatické indexování na CNC strojích a umožňuje indexovat od 0° do 90° v ose A a 360° v ose B v krocích po 15° .



Obr. 22 Snímací sonda RTP20

Na tuto sondu je připevněn kompaktní kinematický snímací dotekový modul „TP20 Std Force“ téže společnosti, na níž se magneticky upínají výměnné moduly s jednotlivými doteky, umístěny v zásobníku MCR20 na pracovní desce stolu.



Obr. 23 Zásobník MCR20

8.1.2 Ovládací panel

Nedílnou součástí každého souřadnicového měřicího stroje je, hlavně pro manuální měření, ovládací panel. Ten je propojen se strojem pomocí kabelu a nechán volně k dispozici právě pro manuální měření.

Funkce na ovladači:

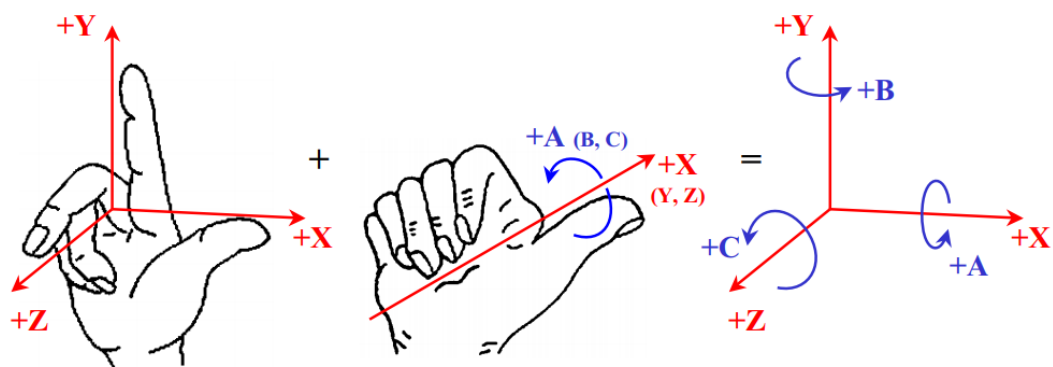
- červené tlačítko pro okamžité zastavení stroje (odpojením přívodu vzduchu)
- dotykový displej s aktuální polohou snímacího dotyku
- potenciometr k ovládání rychlosti pohybu
- levé tlačítko pro pomalé sejmutí bodu
- pravé tlačítko pro definování dráhy objezdu objektu či dílce
- joystick pro pohyb v osách X, Y na němž je otáčením možný posuv v ose Z



Obr. 24 Ovládací panel DEVA

8.2 Souřadný systém

Hlavní předností měření na CMM oproti měření na ručních měřidlech je určení souřadného systému, který popisuje celý průběh měření. Polohu bodu na přímce určují tři čísla jakožto souřadnice. Tento souřadný systém je strojem přepočítán vůči nulovému bodu, který se nachází trochu netypicky, stojíme-li čelem ke stroji, v pravém horním rohu přístroje a je vždy definován výrobcem. Kladný smysl os souřadného systému je dán pravidlem pravé ruky (obr. 22), to v tomto případě znamená, že hodnota X klesá směrem vlevo, hodnota Y klesá směrem k nám a hodnota Z klesá směrem dolů.



Obr. 25 Pravidlo pravé ruky [30]

Chceme-li měřit v CNC režimu, je vždy nutné mít zadán souřadný systém. Volba souřadného systému vychází buďto z výkresové dokumentace, kde je přesně definováno, jak má být natočen nebo si souřadný systém libovolně zvolí přímo měřící technik. Souřadný systém můžeme určit ihned při definování elementů či až po definování elementů potřebných pro jeho úplnost.

8.3 Možnosti měření

Možnosti měření na tomto souřadnicovém měřicím stroji jsou v zásadě dvě a to buďto manuální nebo automatické. První způsob, jednodušší pro představu, kde je třeba ručně nastavit reference a následně napozicovat prvky, které chceme měřit a poté vyhodnotit pomocí softwaru. Druhým a intuitivnějším stylem měření na CMM je automatický způsob, který spočívá v naprogramování potřebného průběhu měření na CAD modelu. Tento způsob má také výhodu v tom, že měřící technik může využít offline režim a ještě před samotným spuštěním sondy, nasimulovat průběh měření, čímž může zamezit různým kolizím či zrychlit měření odstraněním zbytečných přejezdů. V automatickém stylu měření určí měřící technik

pouze manuálně pozici výrobku v rámci měřicího prostoru a poté již vybírá na CAD modelu plochy, body, či jiné elementy, které chce změřit.

V této diplomové práci byl využit první způsob měření, tj. manuální. Důvodem zvolení tohoto stylu snímání byl fakt, že zákazník nedodal potřebný CAD model součásti pro účely této diplomové práce. Nicméně oba styly měření jsou srovnatelně přesné, za předpokladu kvalifikované obsluhy.

8.4 Kalibrace

Na pracovní desce stroje je upnuta do jedné z připravených závitových děr kalibrační koule, sloužící pro tento stroj jako etalon. Pomocí této koule probíhá jednotlivá kalibrace veškerých snímačů a jejich poloh, které budeme v programu používat. Polohu kalibrační koule je třeba zachovat pro veškerá další kalibrování, a pokud je sklopena pod určitým úhlem, zachovat i velikost a směr tohoto úhlu. Pokud není z nějakého důvodu možné ponechat kalibrační kouli na svém místě, je možné si pomoci strojním zaměřením její polohy.



Obr. 26 Kalibrační koule

9 POSTUP MĚŘENÍ

Součástí, se kterou pracuji v praktické části mé diplomové práce, se nazývá Gearbox housing SA. Materiál tohoto dílce je PBT (Polybutylen Terephthalat) s 20% skleněných vláken a slouží jako přípravek pro uchycení ozubených kol a servo-motorku. Celá sestava je poté součástí předních sedadel automobilu a po spojení s dalšími nutnými komponenty ovládá elektrické polohování sedadel. Z důvodu zachování firemního tajemství není možné výkres housingu prezentovat v úplném formátu, proto z něj vyberu pouze některé části.



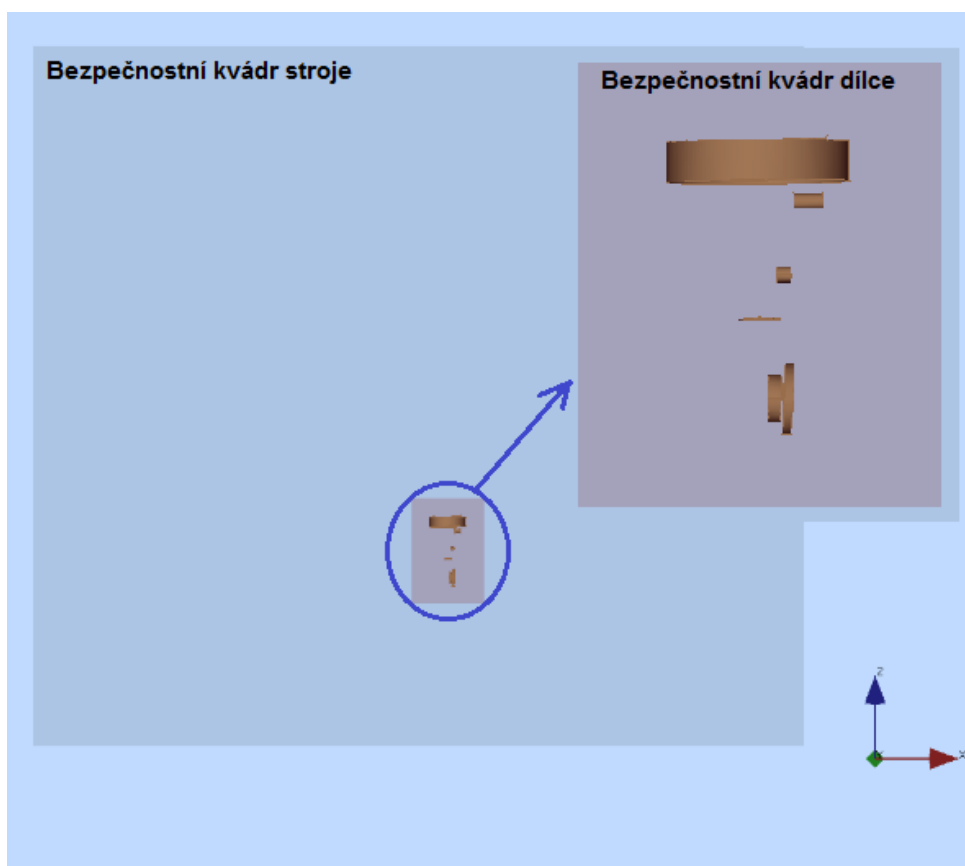
Obr. 27 Gearbox housing SA

Housing se skládá z otvorů, rovin a obecných tvarových ploch. Z výkresové dokumentace vyčteme, že prvky, které kontrolujeme, jsou válcové otvory, kružnice, délkové rozměry a vzájemné polohy jednotlivých prvků v prostoru nebo vůči sobě.

Na součásti je dle výkresové dokumentace celkem 139 měřitelných elementů, z nichž pro účely této diplomové práce bylo vybráno pouze 12 klíčových rozměrů důležitých pro zákazníka. Z těchto elementů následně sestavuji charakteristiky, pomocí nichž se určuje jaká je velikost, tvar nebo poloha elementu s uvedením jmenovitých hodnot a tolerancí (např. průměr otvoru, kolmost nebo rovinnost).

9.1 Bezpečností kvádr

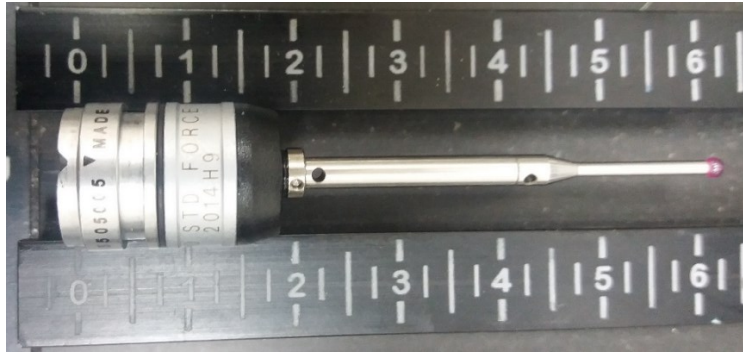
Každá měřená součást musí mít ve stroji nastaven tzv. bezpečnostní kvádr, který vymezuje vzdálenost kolem součásti zajišťující bezkolizní nájezdy, pojezdy a odjezdy kolem součásti. V této oblasti by se neměla vyskytovat žádná překážka, která by zapříčinila zastavení sondy. Bezpečnostní kvádr byl v tomto případě vytvořen automaticky, přičemž byla zadána pouze Off-set vzdálenost v milimetrech, která činila 10 mm. Tato vzdálenost by měla dostatečně zabezpečit bezkolizní měření.



Obr. 28 Bezpečnostní kvádr stroje a dílce

9.2 Výběr dotekového modulu

Veškeré měření bylo realizováno pomocí pouze jednoho snímacího systému, který zaručí dostatečné a rychlé snímání elementů. Měřicím dotekem je v tomto případě rubínová kulička o průměru 2 mm, přičemž celková délka snímacího systému je 40 mm.



Obr. 29 Dotek D: 2.0 x L: 20.0 20mm Extension TP20 Std Force

9.3 Upnutí součásti

Součást byla upnuta do hydraulického magnetického měřicího stativu společnosti HG, který byl uchycen do speciální desky s „T – drážkami“, jež je součástí velkého množství konfigurovatelného příslušenství společnosti Aberlink. Toto řešení bylo zvoleno z důvodu zajištění stabilního, opakovatelného a vhodného upnutí tak, aby měření proběhlo na jedno upnutí, bez nutnosti další manipulace se součástí či přípravkem a aby bylo možné změřit veškeré elementy potřebné pro vyhodnocení charakteristik. Z důvodu členitosti a složitosti dílce, jež není možné umístit vždy naprosto stejně a měřicí technik je vždy nucen před každým měřením provést manuální vyrovnaní součásti. Z výše uvedených důvodů je požadováno vyhodnotit opakovatelnost a reprodukovatelnost celého měřicího systému, jež bude součástí naměřených hodnot.



Obr. 30 Upnutí dílce

9.4 Kalibrace snímacího systému

Jak již bylo naznačeno, před každým měřením je třeba kalibrovat celý snímací systém. V této práci byl použit pouze jeden snímací systém s jedním měřicím dotekem avšak v různých polohách. Veškeré polohy byly pomocí kalibrační koule umístěné na pracovním stole stroje kalibrovány za použití snímače TP20 Std Force. Směrodatná odchylka tohoto snímače tvoří 0,0001 mm.

| A | B | Prumer | Delka | Offset (X,Y,Z) | Posledni overeni | Chyba nul. bodu | Port |
|---|--------|--------|--------|----------------------------------|--------------------|-----------------|---------|
| D: 4.0 x L: 20.0 TP20 Std Force Probe Plate magnetic MH20i | | | | | | | |
| 0.0 | 0.0 | 3.993 | 20.000 | X:0.072, Y:5.684, Z:-182.997 | 20.3.2018 13:45:07 | 0.000 | Port: 3 |
| 90.0 | 30.0 | 3.993 | 20.000 | X:42.741, Y:-71.222, Z:-105.620 | 5.3.2018 13:10:04 | 0.000 | Port: 3 |
| 90.0 | -30.0 | 3.993 | 20.000 | X:-40.372, Y:-72.323, Z:-105.420 | 5.3.2018 13:10:54 | 0.000 | Port: 3 |
| 90.0 | -180.0 | 3.994 | 20.000 | X:-0.827, Y:83.236, Z:-105.743 | 5.3.2018 13:14:20 | 0.001 | Port: 3 |
| 75.0 | -180.0 | 3.993 | 20.000 | X:-0.756, Y:78.931, Z:-127.004 | 5.3.2018 13:15:52 | 0.001 | Port: 3 |
| 45.0 | 90.0 | 3.999 | 20.000 | X:54.763, Y:0.645, Z:-162.867 | 20.3.2018 8:35:43 | 0.007 | Port: 3 |
| 90.0 | 90.0 | 3.994 | 20.000 | X:83.335, Y:1.220, Z:-105.890 | 20.3.2018 13:46:00 | 0.001 | Port: 3 |
| Camera - Magnetic Joint Mounted | | | | | | | |
| 0.0 | 0.0 | 0.000 | 0.000 | X:0.000, Y:0.000, Z:-265.000 | | 0.000 | |
| D:1.0 x L:10.0 50mm Extension TP20 Medium Force | | | | | | | |
| 0.0 | 0.0 | 0.959 | 10.000 | X:0.089, Y:5.712, Z:-222.973 | 22.1.2018 10:40:22 | 0.003 | Port: 4 |
| D: 2.0 x L: 20.0 TP20 Std Force Probe Plate magnetic MH20i | | | | | | | |
| 0.0 | 0.0 | 1.983 | 20.000 | X:0.362, Y:5.506, Z:-182.789 | 22.1.2018 10:41:07 | 0.001 | Port: 1 |
| 90.0 | 90.0 | 1.982 | 20.000 | X:83.071, Y:1.595, Z:-105.691 | 6.2.2018 15:25:59 | 0.001 | Port: 1 |
| 90.0 | -90.0 | 1.984 | 20.000 | X:-82.542, Y:-1.237, Z:-105.431 | 6.2.2018 15:36:40 | 0.002 | Port: 1 |
| D: 2.0 x L: 20.0 20mm Extension TP20 Std Force | | | | | | | |
| 0.0 | 0.0 | 1.985 | 20.000 | X:0.260, Y:5.619, Z:-202.862 | 3.5.2018 12:12:44 | 0.001 | |
| 90.0 | 0.0 | 1.979 | 20.000 | X:1.799, Y:-102.779, Z:-105.383 | 22.1.2018 10:47:34 | 0.003 | |
| 90.0 | -180.0 | 1.986 | 20.000 | X:-1.350, Y:103.117, Z:-105.694 | 22.1.2018 10:48:33 | 0.003 | |
| 90.0 | 90.0 | 1.991 | 20.000 | X:103.191, Y:1.748, Z:-105.877 | 3.5.2018 11:52:47 | 0.001 | |
| 45.0 | 60.0 | 2.000 | 20.000 | X:60.196, Y:-34.754, Z:-176.570 | | - | |
| 30.0 | 0.0 | 1.986 | 20.000 | X:1.248, Y:-46.603, Z:-191.745 | 22.1.2018 13:35:21 | 0.002 | |
| 75.0 | -180.0 | 2.004 | 20.000 | X:-1.237, Y:98.128, Z:-132.105 | 5.3.2018 13:33:39 | 0.008 | |
| 90.0 | -90.0 | 1.986 | 20.000 | X:-102.595, Y:-1.366, Z:-105.560 | 3.5.2018 12:04:22 | 0.002 | |

Obr. 31 Kalibrované doteky

9.5 Měření elementů pro stanovení základního souřadného systému

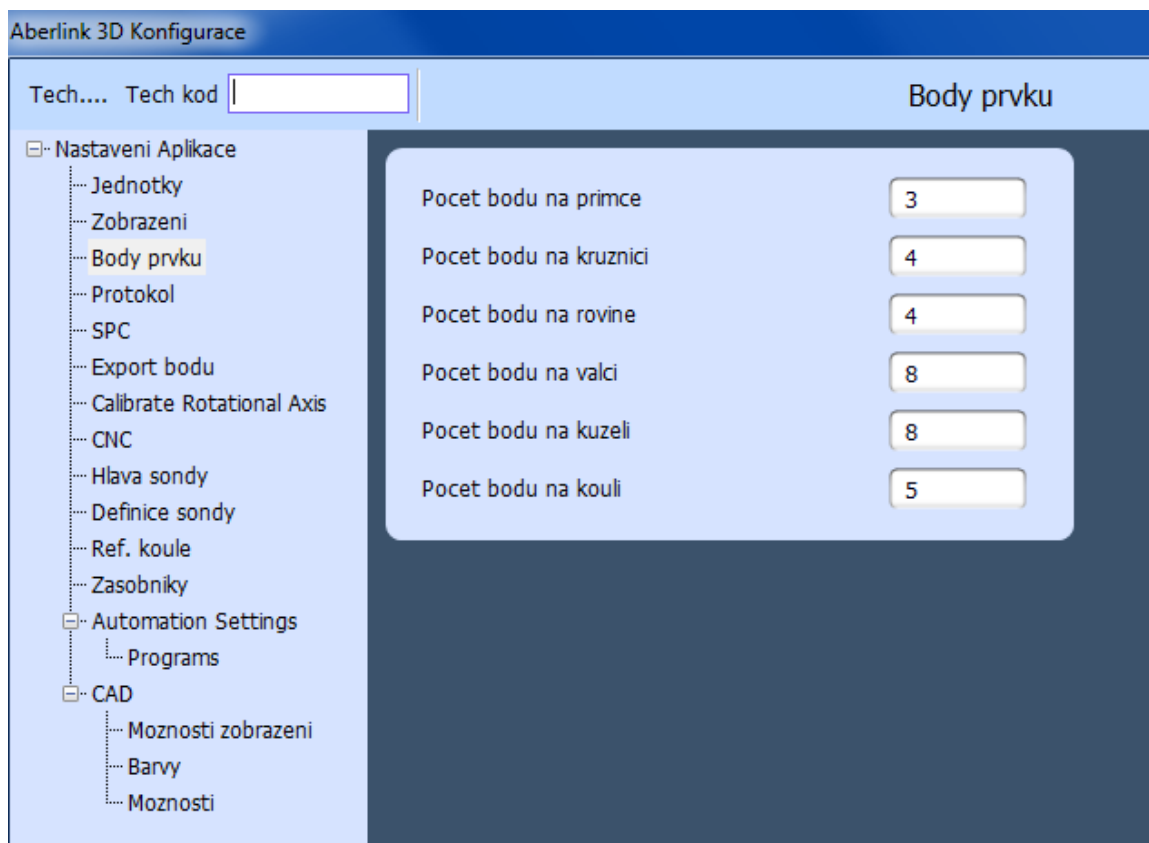
Pro účely této diplomové práce byl základní souřadný systém (ZSS) převzat z výkresové dokumentace tak, aby kopíroval základní součásti, sloužící pro vyhodnocení tolerance tvaru plochy. Jako první jsem použil element „Rovina_1“, čímž jsem definoval nulový bod osy „Z“. Jelikož obě základny (základna A i B) jsou válcového tvaru, měřili se obě stejným způsobem, tj. použil jsem element „Válec_pr. 18,8“, který je na výkrese základnou A a definoval tím počátek souřadného systému pro osy X a Y. Element „Válec_pr. 8,8“, jež reprezentuje základnu B, jsem propojil konstrukční čarou s elementem „Válec_pr. 18,8“ a touto mnou vytvořenou čarou jsem natočil celý příslušný systém. Takto vzniknuvší souřadný systém je úplný a plně odpovídá výkresové dokumentaci.

9.6 Snímání zbývajících elementů

Po definování základního souřadnicového systému je možné určit strategii pro jednotlivé elementy, jež se budou měřit. Výsledný počet měřených elementů je 12 a jedná se o kružnice, roviny a rádiusy. Všechny potřebné elementy byly definovány za pomoci modelu součásti, který byl nahrán do čistého programu. Pro měření kruhových ploch bylo vždy použito minimálně 12 bodů, pro měření rovin 4 body a samostatný bod, reprezentující sebe sama zde použit nebyl.

Na konec program byla přidána parkovací pozice snímacího systému, která původně končila v nedaleké vzdálenosti od bezpečnostního kvádru dílu, na pozici vhodnou k tomu, aby bylo zabezpečeno, že obsluha při výměně dílce nezavadí o sondu, či celou hlavu snímacího systému, čímž by ji mohla poškodit.

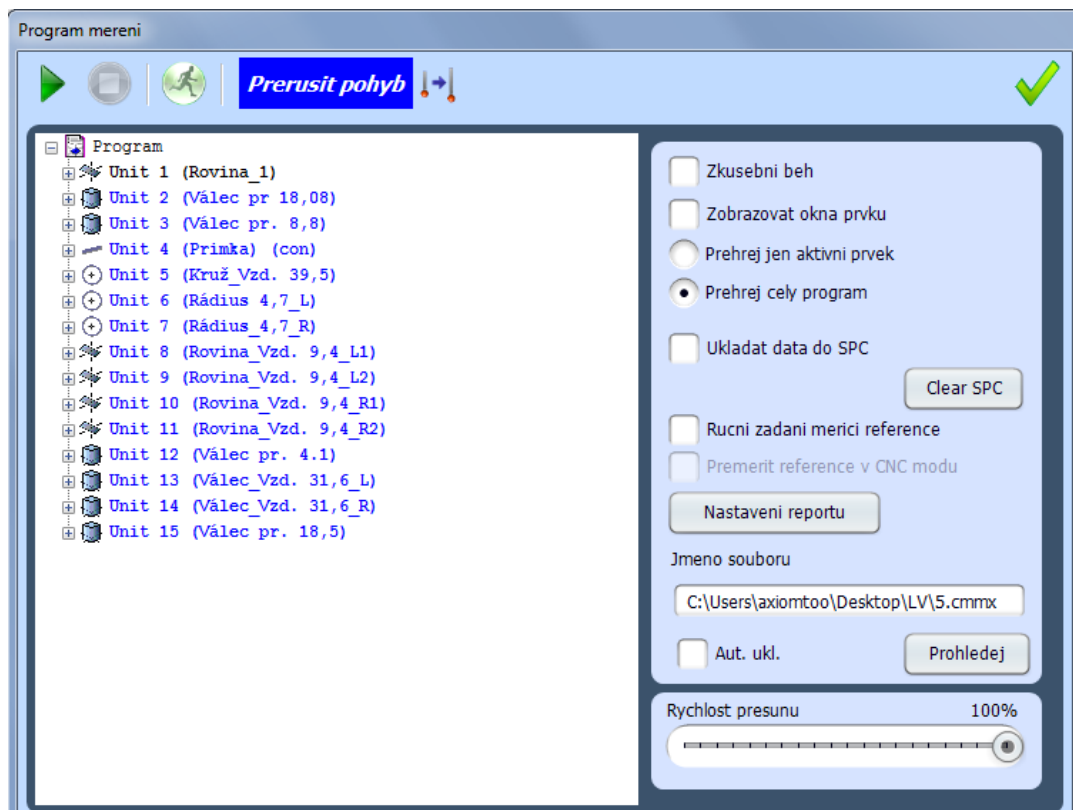
Ač je zde patrný vliv ručního ustavení dílu, činila průměrná doba měření, včetně ručního nasnímání prvotního souřadného systému a celkového spuštění programu až k vytisknutí reportu (do souboru), 2 minuta a 15 vteřin.



Obr. 32 Nastavení minimálního počtu bodů jednotlivých prvků

9.6.1 Jednotlivé elementy

- Rovina_1 – snímání roviny pomocí 4 bodů
- Válec pr. 18,08 – snímání elementu válec ve výškách 7 mm a 15 mm
- Válec pr. 8,8 – snímání elementu válec ve výškách 35 mm a 38 mm
- Přímka – konstr. spojení středů prvků Válec pr. 18,08 a Válec pr. 8,8
- Kruž_Vzd. 39,5 – snímání dvou půlkružnic 6 body na každé straně
- Rádus 4,7_L – snímání půlkružnice ve výšce 10 mm 12 body
- Rádus 4,7_R – snímání půlkružnice ve výšce 10 mm 12 body
- Rovina_Vzd. 9,4_L1 – snímání roviny pomocí 4 bodů
- Rovina_Vzd. 9,4_L2 – snímání roviny pomocí 4 bodů
- Rovina_Vzd. 9,4_R1 – snímání roviny pomocí 4 bodů
- Rovina_Vzd. 9,4_R2 – snímání roviny pomocí 4 bodů
- Válec pr. 4,1 – snímání elementu válec po celé hloubce tohoto prvku
- Válec_Vzd. 31,6_L – snímání elementu válec v hloubce 15 mm a 20 mm
- Válec_Vzd. 31,6_R – snímání elementu válec v hloubce 15 mm a 25 mm
- Válec pr. 18,5 – snímání elementu válec v hloubce 30 mm a 33 mm



Obr. 33 Program měření

9.7 Měření vybraných charakteristik

Jakmile jsou všechny elementy určeny, lze z nich sestavit charakteristiky, které měříme. Veškeré hodnoty se nejprve zobrazí v grafické podobě a odtud se dají přenést do výsledkového protokolu, který poskytne numerické hodnoty měření či přímo do grafického reportu jak je vidno na obrázcích 35 a 36. Vyskytují se zde polohy středů válcových otvorů, geometrické tolerance i délkové rozměry. Určení rozměrů a tolerancí je poslední částí při tvorbě programu. Veškeré zvolené rozměry a tolerance se vyhodnotí ve výsledném protokolu. Chceme-li zapsat k příslušnému rozměru toleranci, stačí otevřít příslušný rozměr a vybrat, o jakou toleranci se jedná a zapsat meze číselně.

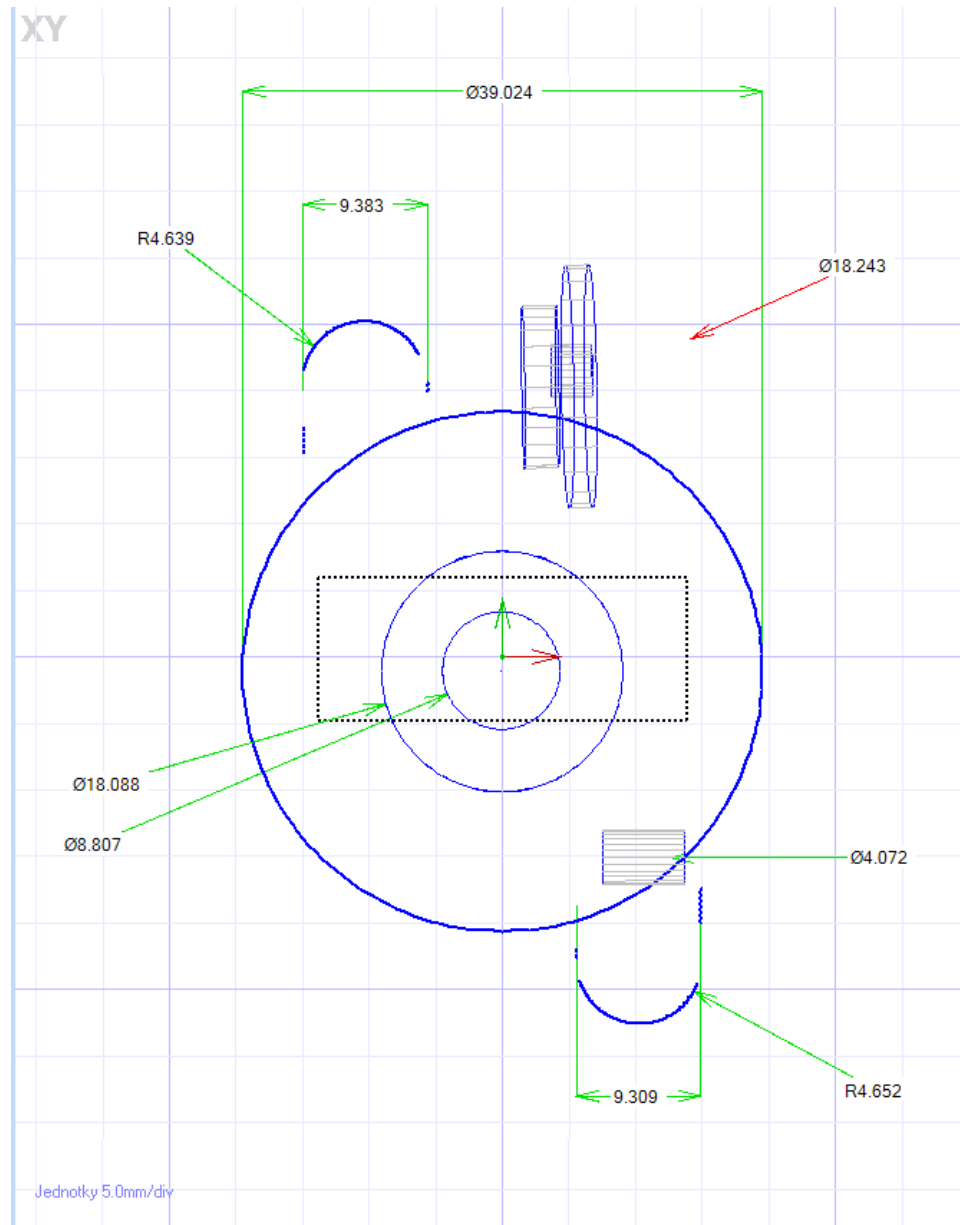
The screenshot shows a software interface for configuring a circular feature. The window title is "Rozmer 1 - Prvek: Unit 2 (Kruh)". The interface is divided into several sections:

- General Information:**
 - Nazev: 8.8mm Kruh
 - Zmerena hodnota: 8.803 (highlighted in green)
 - Nominal: 8.800
 - Odchylna: 0.003 (highlighted in red)
 - Zobrazit: Layer 2
- Tolerance:**
 - Absolutni: Horni mez 8.830, Dolni mez 8.780
 - Relativni: 0.030, -0.020
- Geom. tol.:**
 - Value: 0.026 (highlighted in green)
 - Symmetric Dimension: [empty]
 - Mezni: 0.050, Delka: [empty]
- Kruznice:**
 - Stred (selected), Min, Max
 - Stred, Min, Max
 - Prumer (selected), Radius
- Zakladna:**
 - Pridat, Vycisti

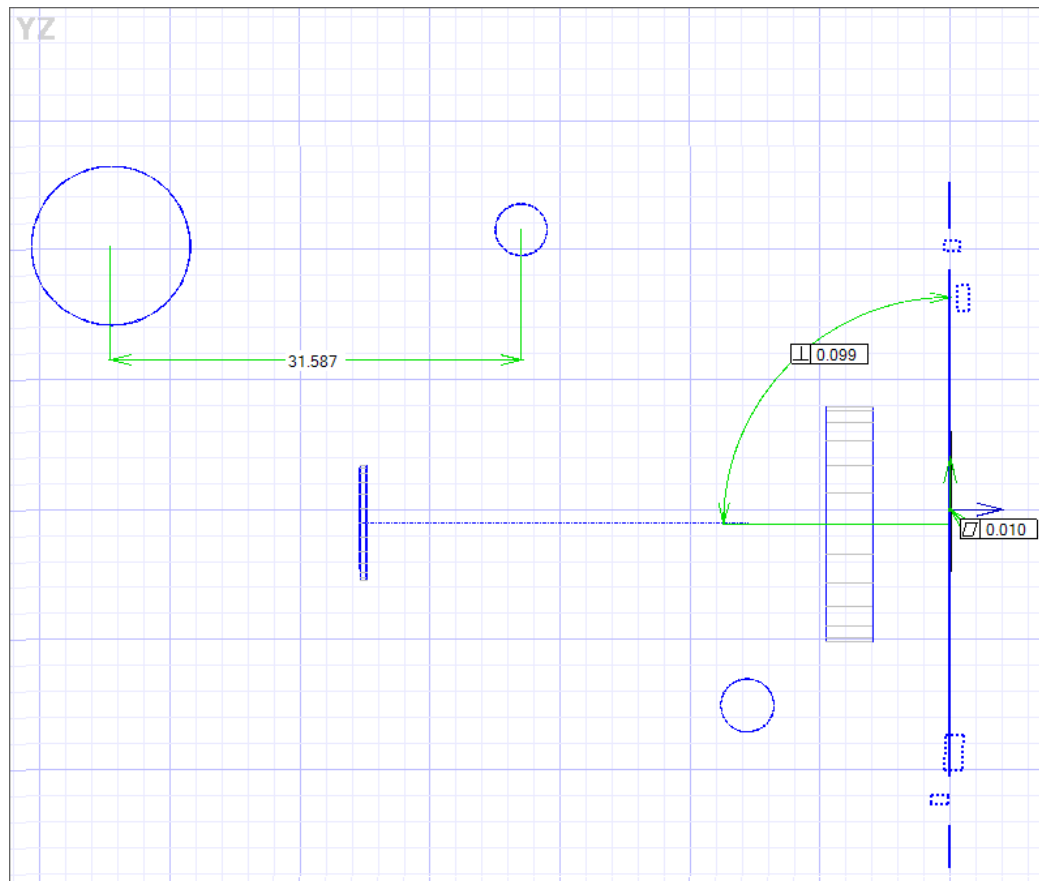
Obr. 34 Zapsání tolerancí v programu

Poté se v programu graficky zbarví tento rozměr červeně, pokud vyjde mimo svou toleranční mez (např. rozměr $\text{Ø}18,5$ mm) anebo zeleně, leží-li hledaný rozměr v tolerančních mezích. Průměry jsou vyhodnocovány jednoduše již v samotném elementu, délkové rozměry pomocí charakteristiky kartézské vzdálenosti a geometrické tolerance buďto přímo v elementu zaškrtnutím příslušné geometrické tolerance či nepřímo pomocí vztažení dvou prvků k sobě. Jelikož jsem již v počátku chytře zvolil souřadný systém, bylo definování tolerancí tvaru plochy možné pouhým zaškrtnutím příslušné značky ve vyhodnocování měření.

Jeden z protokolů s veškerými naměřenými daty je k nahlédnutí v příloze P1. Jak je na protokolu patrné, veškeré rozměry vycházejí v tolerančních mezích kromě jediného, který nevyšel ani jednou za celé měření. Důvod nevyházení rozměru $\varnothing 18,5$ mm není předmětem mého zkoumání, je však signalizací pro zákazníka, aby našel její možnou příčinu pravděpodobně již při výrobním procesu.



Obr. 35 Grafické znázornění výsledků z pohledu XY



Obr. 36 Grafické znázornění výsledků z pohledu YZ

10 VYHODNOCENÍ STAVU MĚŘENÍ METODOU MSA

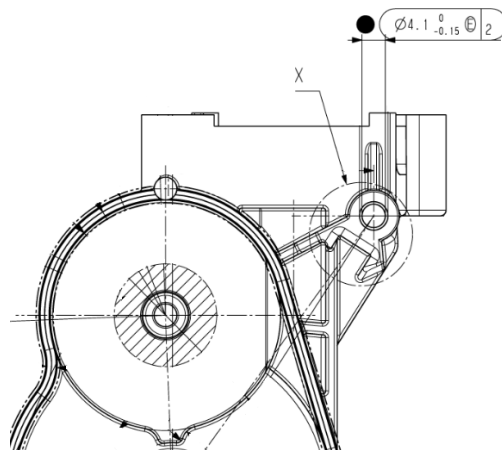
V této části diplomové práce se zaměřím především na výsledky měření. Smyslem metody MSA je, jak už bylo výše zmíněno, analýza toho, zda mnou navržený postup měření splňuje opakovatelnost (variabilitu měřicího systému) a reprodukovatelnost (variabilitu operátora) a kolik z celkové variability způsobuje kolísání vlastního procesu a kolik způsobuje proměnlivost výsledků měření.

Z důvodů již zaběhlé metodiky vyhodnocování měření ve firmě 100% REWORK a přání tuto metodu zachovat, jsem dospěl k názoru, že ona metoda průměru a rozpětí bude plně postačující pro výpověď o tom, jak se chová systém měření. Metoda ANOVA, díky které by společnost byla schopna provádět náročné výpočty zde zavedena nebyla z důvodů absence potřebného statistického softwaru, proto je výhodnější ponechat metodu opakovatelnosti a reprodukovatelnosti, pro jejichž výpočty postačí kancelářský balíček EXCEL.

10.1 Opakovatelnost a reprodukovatelnost

V této části studie budu potřebovat pomoc od dalších dvou pracovníků z firmy, ve které měření probíhá, neboť budu zkoumat variabilitu systému měření, způsobenou rozdílným přístupem k měření stejným měřidlem používaným pro stejné charakteristiky na stejném výrobku.

Pro účely zjištění opakovatelnosti a reprodukovatelnosti byl vybrán rozměr 4,1mm. Tento rozměr byl každým z operátorů přeměřen pomocí stroje Aberlink třikrát na rozsahu výběru 10 kusů. Veškerá data byla zanesena do výsledkového formuláře – viz příloha P4 – přičemž výsledky výpočtů jsou k nahlédnutí na dalším listu přílohy P5.



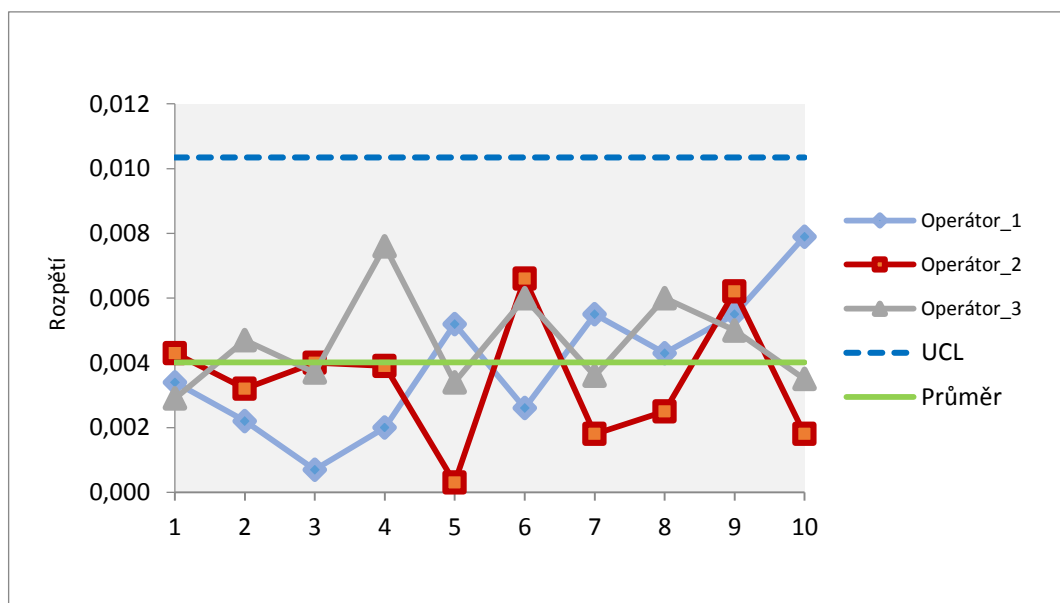
Obr. 37 Výběr rozměru z výkresu

V první řadě byly vypočteny průměry pro jednotlivé operátory a díly dle rovnice 5.2 a následně pro jednotlivá rozpětí dle rovnice 5.3. Tyto hodnoty posloužili k vytvoření diagramu pro průměr (obr. 38) a ke konstrukci diagramu pro rozptyl (obr. 37). Nejprve je však zapotřebí vypočítat meze. Tyto regulační meze jsou považovány za základní rozhodovací kritérium, zda do procesu zasáhnout či nikoliv.

Hodnoty mezí v diagramu rozptylu byly vypočteny z rovnic viz. kap. 5.4.3.2:

$$LCL(R) = \bar{\bar{R}} \cdot D_3 = 4,0639 \cdot 0 = 0$$

$$UCL(R) = \bar{\bar{R}} \cdot D_4 = 4,0639 \cdot 2,58 = 0,0103$$



Obr. 38 Sdružený diagram pro rozpětí

Zda je proces ve staticky zvládnutém stavu určuje diagram rozpětí a jak je vidno z tohoto grafu, proces je stabilní neboť žádná z hodnot se nenachází mimo regulační meze (UCL a LCL). Doporučuje se posuzovat regulační diagram pro rozpětí dříve, nežli diagram pro průměr. Jelikož jsme neshledali žádnou vymezitelnou příčinu, můžeme považovat nalezenou hodnotu průměrného rozpětí za konstantu a náhodný proces za stabilní z hlediska rozptylu.

Hodnoty mezí v diagramu průměru byly vypočteny následovně:

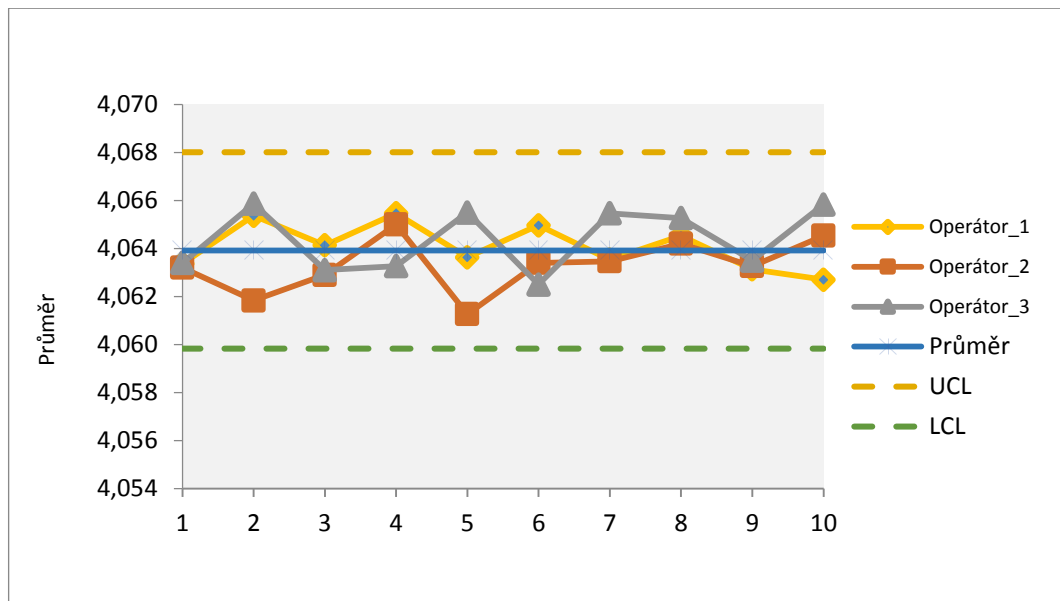
$$LCL = \bar{\bar{x}} - A_2 \cdot \bar{\bar{R}} = 4,0639 - 1,02 \cdot 0,0040 = 4,0598$$

$$UCL = \bar{\bar{x}} + A_2 \cdot \bar{\bar{R}} = 4,0639 + 1,02 \cdot 0,0040 = 4,0680$$

Potřebné hodnoty koeficientů nalezneme v tabulce pro daný rozsah výběru n:

| n | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| A ₂ | 1,88 | 1,02 | 0,73 | 0,58 | 0,48 | 0,42 | 0,37 | 0,34 | 0,31 |
| D ₄ | 3,27 | 2,58 | 2,28 | 2,11 | 2 | 1,92 | 1,83 | 1,82 | 1,78 |
| D ₃ | * | * | * | * | * | 0,08 | 0,14 | 0,18 | 0,22 |

Tab. 3 Tabulka koeficientů



Obr. 39 Sdružený diagram pro průměr

Při pohledu na diagram pro průměr opět vidíme, že žádný z bodů nepřekročil horní či dolní mez a proto můžeme říci, že proces je ve statisticky zvládnutém stavu. Systém měření je tedy vhodný pro stanovení variability mezi díly a nejsou zde žádné významné rozdíly mezi jednotlivými operátory.

Další výpočty zanesené do výsledkového formuláře (příloha P5) byly:

- EV – variabilita zařízení
- AV – opakovatelnost operátora
- GRR – opakovatelnost a reprodukovatelnost měřidla
- PV – variabilita dílu
- TV – celková variabilita

U výše zmíněných byl dále vypočten jejich podíl k celkové variabilitě.

Podíváme-li se na výsledky výše zmíněných rovnic, zjistíme, že procentuální hodnota opakovatelnosti a reprodukovatelnosti %GRR vychází **9,58**, což nám signalizuje, jak je z tabulky níže patrné, že systém měření je přijatelný.

| | |
|-----------------------|---|
| %GRR ≤ 10 | Systém měření je přijatelný |
| 10 ≤ %GRR ≤ 30 | Systém měření může být přijatelný (podle důležitosti aplikace, nákladů na měřidlo, nákladů na opravy) |
| %GRR > 30 | Systém měření je nutno zlepšit |

Tab. 4 Tabulka způsobilosti systému měření

Závěrečným krokem v rámci numerické analýzy je stanovení citlivosti měřicího systému (nebo také počtu různých kategorií), kterou lze spolehlivě rozlišit systémem měření. Jedná se celočíselnou o hodnotu ndc , která nám dle výpočtu vyšla přes hodnotu 14, čímž bohatě splnila podmínku $ndc \geq 5$ a signalizuje, že systém měření je účinný pro analýzu procesu.

ZÁVĚR

Souřadnicové měřicí stroje jsou v současné době velmi důležitou součástí výrobních závodů, linek a měrových laboratoří, neboť se čím dál více zákazníků zaměřuje ve svém oboru na kvalitu a jakost výrobku. Ruku v ruce s tímto trendem jde i požadavek na rychlé uvedení produktu do oběhu. Dodávat rychle a zároveň kvalitně je klíčovým předpokladem úspěšného a dále se rozvíjejícího podniku. Měrové laboratoře a metrologičtí pracovníci mají pro analýzu či vysledování požadované jakosti výrobku k dispozici mnoho nástrojů, ať už v podobě strojů a zařízení či statistických metod a programových balíčků.

Sklobením těchto dvou nástrojů, měření a analýza dat, se právě setkáváme v této diplomové práci, neboť přesně takový požadavek zákazník vznesl. Bylo třeba vytvořit zcela nový měrový program pro již zaběhlou součást, avšak s novou revizí, pro prvotní pochopení chování dílce a následně zjistit, zda je tento program použitelný i v budoucnu a splňuje opakovatelnost a reprodukovatelnost.

V teoretické části této diplomové práce se autor věnoval rozebrání a definování jednotlivých komponent souřadnicového měřicího stroje, dále různých typů konstrukcí a jejich použití. V dalších kapitolách byly představeny některé z mnoha statistických metod, jež jsou v současné době hojně používány a detailněji popsána metoda, se kterou se v praktické části této diplomové práce počítá.

Bylo zjištěno, že vytvořený měrový program na souřadnicovém měřicím stroji Axiom too HS společnosti Aberlink poskytuje věrohodná a správná data, se kterými je však ještě třeba dále pracovat. Tato data poslouží zákazníkovi při rozhodování, zda uvést či nikoliv tento produkt do masové výroby. Z měrového protokolu je patrné, že téměř veškerá naměřená data zákazníkem požadovaných rozměrů odpovídají tolerančním mezím, avšak jeden rozměr z těchto dat vyčnívá. V tuto chvíli je tedy na straně zákazníka, aby rozhodl, jak s danými informacemi naloží. Je-li rozměr, který nevychází důležitý např. pro slícování dvou součástí, je třeba upravit výrobní proces a vytvořit nové kusy k přeměření. Pokud se opravdu tak stane, měrová společnost může dodat nové výsledky takřka obratem, neboť je již vytvořen funkční měrový program, který byl statistickou metodou opakovatelnosti a reprodukovatelnosti shledán způsobilým, neboť oba zkoumané parametry – GRR a ndc – vyšli v požadovaných mezích a tudíž se dá říci, že proces je ve statisticky zvládnutém stavu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Sborník technické harmonizace*, 2010. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví [online]. 2010 [cit. 2016-04-06]. Dostupné z: <http://www.unmz.cz/files/Sborn%C3%ADky%20TH/Terminologie%20v%20oblasti%20metrologie_DEF.pdf>.
- [2] FARKOVÁ, Marta. *Nová metrologická terminologie* [online prezentace]. Brno: Ústav chemie, MU, [cit. 2018-04-06]. Dostupný z: <<http://www.sci.muni.cz/~analchem/files/pdf/terminologie.pdf>>.
- [3] Pokyn Eurachem / CITAC: *Průvodce kvality v analytické chemii*. Pomůcka k akreditaci, Barwick (Ed), třetí vydání 2016. ISBN 978-80-86322-10-0. Dostupný z: <<http://www.eurachem.cz/user-files/files/kvalimetrie-22-final.pdf>>.
- [4] CZICHOS, Horst, Tetsuya SAITO a Leslie SMITH. *Springer Handbook of Metrology and Testing*. 2., nd Edition. Berlin: Springer Berlin, 2011. ISBN 978-364-2166-402.
- [5] BAZANT. *Analýza měřicího systému (MSA)*. In: WordPress.com [online] 2015-07-04 [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <<https://bazant.wordpress.com/2015/07/04/analza-mericho-systmu-msa/>>.
- [6] SCHÖFR, Miroslav. *Měření na souřadnicovém stroji Durumax*. Zlín, 2015. Bakalářská práce (Bc.). Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství, 2015-05-22.
- [7] PALÁSEK, Vítězslav. *Souřadnicové měřicí stroje (CMM) s optickým snímacím systémem a optické CMM*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 59 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Pernikář, CSc.
- [8] LYSÝ, Zbyněk. *Management kalibrace souřadnicového měřicího stroje (SMS)*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 61 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Koška, Ph.D.
- [9] *MM spektrum: Průmyslové spektrum* [online]. Praha, 2008 [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/>>.
- [10] MOOR, Pamela Murray. *Modeling Coordinate Measuring Machine Scanning Operations*. Doctoral Dissertation. Knoxville: The University of Tennessee, 2007. 182 s.

- [11] *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch* [online]. 2011 [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz/019/dokumenty/METROLOGIE_FINAL.pdf>.
- [12] *Production Machining* [online]. 2015 [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: <<https://www.productionmachining.com/>>.
- [13] *Renishaw plc.* [online]. 2018 [cit. 2018-04-08] Dostupné z: <<http://www.renishaw.cz/>>.
- [14] *Advanced Instrument* [online]. 2018 [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <<https://www.ai-companies.com/>>.
- [15] *Zákony pro lidi.cz* [online]. 2018 [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <<https://zakonyprolidi.cz/>>.
- [16] CHOVANEC, Jakub. *Programová podpora metrologického zabezpečení Störi Mantel s.r.o. Zlín*, 2010. Diplomová práce (Ing.). Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství, 2010-05-19.
- [17] CÉZOVÁ, Eliška. *Metrologie v praxi*. Praha, 2006. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav technické matematiky [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <<http://www.statspol.cz/cs/>>.
- [18] *Hexagon Manufacturing Intelligence* [online]. 2017 [cit. 2017-12-03]. Dostupné z: <http://www.hexagonmetrology.cz/Snimaci-hlavy-pro-souradnicove-merici-stroje_539.htm#.WFpA1U2Qy7>.
- [19] *Aberlink Innovative Metrology.* [online]. 2018 [cit. 2018-04-08] Dostupné z: <<https://www.aberlink.com>>.
- [20] ISO 14253-2: 1999, “*Geometrical Product Specifications – Inspection by Measurement of Workpieces and Measuring Equipment Part 2: Guide to the estimation of uncertainty in GPS measurement, in calibration equipment and in product verification,*” International Organization for Standardization, Switzerland.
- [21] *IAA CZ s.r.o.* [online]. 2015 [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <<http://www.rockweb.cz/iaatest/>>.

- [22] RISTOW, Ross. *Incorporating Elements of the Automotive Industry Action Group's (AIAG) advanced Product Quality Planning (APQP) System into Kohler Company's New Product Development Process*. Master Thesis. University of Wisconsin-Stout, 2002. 70 s.
- [23] PETRAŠOVÁ, Ivana. *Proces schvalování dílů do sériové výroby (PPAP)*. Praha: CSJ, 2006. ISBN 80-02-01833-8.
- [24] CHALOUPKA, Jiří. *SPC měřením*. [online] 2008-2010 [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <<http://www.chaloupka-kvalita.cz>>.
- [25] WENCHANG, Chen. *Multivariate Statistical Process Control in Industrial Plants*. Master Thesis. Delft University of Technology, 2005. 96 s.
- [26] LI, Heng. *Developing a Measurement System to Assess Line Profile Retention in 3D Printing*. Master Thesis. Rochester Institute of Technology. 2016. 120 s.
- [27] *Management Mania's Series of Management*. [online]. 2011-2016. [cit. 2018-04-21]. ISSN 2327-3658. Dostupné z: <<https://managementmania.com/cs/>>.
- [28] BEDNÁŘ, Josef. *MSA – Analýza systému měření*. [online]. 2013. [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <<http://www.statspol.cz/cs/wp-content/uploads/2013/05/request2006/prezentace/bednar.pdf>>.
- [29] *Measurement Systems Analysis Reference Manual*. (2010) (4th ed.). Southfield, Michigan: Chrysler Group LLC, Ford Motor Company, General Motors Corporation. Dostupné z: <http://www.rubymetrology.com/add_help_doc/MSA_Reference_Manual_4th_Edition.pdf>.
- [30] KELLER, Petr. *Programování a řízení CNC strojů*. [online]. 2005. [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <http://www.kvs.tul.cz/download/cnc_cadcam/pnc_2.pdf>.
- [31] CORPORATION, DaimlerChrysler. *Measurement systems analysis: reference manual*. 4th ed. Detroit, Mich: DaimlerChrysler, 2010. ISBN 978-160-5342-115.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| | |
|-------|--|
| SMS | Souřadnicový měřicí stroj |
| CMM | Coordinate Measurement Machine = Souřadnicový měřicí stroj |
| NC | Numerical Controlled = číslicové řízení |
| IT | Stupeň přesnosti |
| PC | Počítačové zařízení |
| WC | Karbid wolframu |
| AIAG | Automotive Industry Action Group's |
| APQP | Advanced Product Quality Planning = Pokročilé plánování kvality |
| PPAP | Production Part Approval Process = Proces schvalování dílů do sériové výroby |
| SPC | Statistical Process Control = Statistická regulace procesu |
| UCL | Horní kontrolní limit |
| LCL | Dolní kontrolní limit |
| SOP | Standard Operating Procedure = Standardní pracovní postup |
| MSA | Measurement System Analysis = Analýza měřicího systému |
| ANOVA | Analysis of Variance = Analýza rozptylu |
| GRR | Gage Repeatability and Reproducibility = Opakovatelnost a reprodukovatelnost měřidla |
| AV | Appraiser variability = Opakovatelnost operátora |
| EV | Equipment variation = Variabilita zařízení |
| ndc | Počet kategorií, které lze spolehlivě rozlišit systémem měření |
| PV | Part variability = Variabilita dílu |
| TV | Total variability = Celková variabilita |
| CNC | Computer Numeric Control = počítačově číslicové řízení |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | | |
|---------|---|----|
| Obr. 1 | Zobrazení strannosti [5]..... | 15 |
| Obr. 2 | Zobrazení stability [5] | 15 |
| Obr. 3 | Zobrazení opakovatelnosti [5]..... | 16 |
| Obr. 4 | Zobrazení reprodukovatelnosti [5] | 16 |
| Obr. 5 | Typy CMM dle konstrukce [11]..... | 20 |
| Obr. 6 | Typy souřadnicových měřicích strojů [11]..... | 21 |
| Obr. 7 | Příklad použití dotykové snímáčí hlavy [12]..... | 23 |
| Obr. 8 | Dotyková a optická snímáčí hlava [19] | 24 |
| Obr. 9 | Abrazivní ořez na kuličkovém dotyku [13]..... | 26 |
| Obr. 10 | Adhezivní ořez na kuličkovém dotyku [13]..... | 26 |
| Obr. 11 | Hvězdicový stylus [12]..... | 28 |
| Obr. 12 | Stylus tvaru disku [12]..... | 28 |
| Obr. 13 | Kalibrace pomocí 2 kalibrátorů [14] | 31 |
| Obr. 14 | Kalibrace dotykové sondy [12]..... | 33 |
| Obr. 15 | Schéma postupu od koupě měřidla až po jeho vyřazení [17]..... | 35 |
| Obr. 16 | Harmonogram časového plánu APQP [21] | 37 |
| Obr. 17 | Diagram postupu procesu [24] | 41 |
| Obr. 18 | Obecný kontrolní Shewartův graf [25]..... | 42 |
| Obr. 19 | Rozdělení celkové variability zaznamenaných dat [28]..... | 45 |
| Obr. 20 | Logo firmy 100% REWORK | 52 |
| Obr. 21 | Axiom too HS [19] | 53 |
| Obr. 22 | Snímáčí sonda RTP20 | 55 |
| Obr. 23 | Zásobník MCR20 | 55 |
| Obr. 24 | Ovládací panel DEVA | 56 |
| Obr. 25 | Pravidlo pravé ruky [30]..... | 57 |
| Obr. 26 | Kalibrační koule | 58 |
| Obr. 27 | Gearbox housing SA..... | 59 |
| Obr. 28 | Bezpečnostní kvádr stroje a dílce | 60 |
| Obr. 29 | Dotek D: 2.0 x L: 20.0 20mm Extension TP20 Std Force..... | 61 |
| Obr. 30 | Upnutí dílce | 61 |
| Obr. 31 | Kalibrované doteky..... | 62 |
| Obr. 32 | Nastavení minimálního počtu bodů jednotlivých prvků..... | 63 |

| | | |
|---------|---|----|
| Obr. 33 | Program měření | 64 |
| Obr. 34 | Zapsání tolerancí v programu | 65 |
| Obr. 35 | Grafické znázornění výsledků z pohledu XY | 66 |
| Obr. 36 | Grafické znázornění výsledků z pohledu YZ | 67 |
| Obr. 37 | Výběr rozměru z výkresu | 68 |
| Obr. 38 | Sdružený diagram pro rozpětí..... | 69 |
| Obr. 39 | Sdružený diagram pro průměr | 70 |

SEZNAM TABULEK

| | | |
|--------|---|----|
| Tab. 1 | Úrovně předložení PPAP [23] | 40 |
| Tab. 2 | Technické specifikace stroje Axiom too HS [19]..... | 54 |
| Tab. 3 | Tabulka koeficientů | 70 |
| Tab. 4 | Tabulka způsobilosti systému měření..... | 71 |

SEZNAM PŘÍLOH

P1: MĚROVÝ PROTOKOL

P2: VÝSLEDKOVÝ FORMULÁŘ – STUDIE R&R

P3: VÝPOČTOVÝ FORMULÁŘ – STUDIE R&R

P4: FORMULÁŘ S NAMĚŘENÝMI HODNOTAMI

P5: FORMULÁŘ S VYPOČTENÝMI HODNOTAMI

PŘÍLOHA P1: MĚROVÝ PROTOKOL



Vykres cis. 915636-104 Cislo dilu - Nazev Gearbox housing SA
 Meril VACEK Cislo cav. - Cislo vzor. 1
 Datum 3.5.2018 Material - Poznámky

| Nazev | info | Rozmer (mm [°]) | | | Mez/Tol. (mm [°]) | | | Metoda | Geometricke tolerance | | | Poznámky |
|-----------------|------|---------------------------|----------|---------|-----------------------------|--------|----------|--------|-----------------------|-------|----------|----------|
| | | Nominal | Skutecna | Odchyka | Horni | Dolni | Vysledek | | Skutecna | mez | Vysledek | |
| Valec pr. 18,08 | ∅ | 18,080 | 18,088 | -0,008 | 0,050 | 0,000 | OK | T | | | | |
| Valec pr. 8,8 | ∅ | 8,800 | 8,807 | -0,007 | 0,030 | -0,020 | OK | T | | | | |
| Radius 4,7_L | R | 4,700 | 4,639 | 0,061 | 0,100 | -0,100 | OK | T | | | | |
| Radius 4,7_R | R | 4,700 | 4,652 | 0,048 | 0,100 | -0,100 | OK | T | | | | |
| Vzd. 9,4_L | | 9,400 | 9,309 | 0,091 | 0,000 | -0,200 | OK | T | | | | |
| Vzd. 9,4_R | | 9,400 | 9,383 | 0,017 | 0,000 | -0,200 | OK | T | | | | |
| Vzd. 34,6 | | 31,600 | 31,587 | 0,013 | 0,010 | -0,090 | OK | T | | | | |
| Valec pr. 4,1 | ∅ | 4,100 | 4,072 | 0,028 | 0,000 | -0,150 | OK | T | | | | |
| Vzd. 39,5 | | 39,500 | 39,024 | 0,476 | 0,000 | -0,500 | OK | T | | | | |
| Rovinnost | | | | | | | | T | 0,010 | 0,150 | OK | |
| Kolmost | | | | | | | | T | 0,099 | 0,150 | OK | |
| Valec pr. 18,5 | ∅ | 18,500 | 18,243 | 0,257 | 0,100 | -0,100 | CHYBA | T | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |

Jméno
 Oddělení
 Telefon
 E-Mail
 Datum
 Podpis _____

Customer Decision
 schváleno schváleno s podmínkou odmitnuto, nutno znovu navzorkovat
 Jméno
 Oddělení
 Telefon
 E-Mail
 Datum
 Podpis _____

PŘÍLOHA P2: VÝSLEDKOVÝ FORMULÁŘ – STUDIE R&R

| Studie opakovatelnosti a reprodukovatelnosti R&R | | | | | | | | | | | | | |
|--|--------|-----------------------------|---|---|----------------------|---|---|---------------|---|---|---------------|--|---------------------|
| Číslo dílu | | | | | | | | Operátor A | | | | | |
| Název dílu | | | | | | | | Operátor B | | | | | |
| Název měřidla | | | | | | | | Operátor C | | | | | |
| Typ měřidla | | | | | | | | Datum | | | | | |
| Operátor | Měření | Klasifikace charakteristiky | | | Charakteristika [mm] | | | Specifikace | | | | | |
| | | | | | | | | Rozměr - tol. | | | Rozměr + tol. | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | Dílec | | | | | | | | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | |
| A | 1 | | | | | | | | | | | | |
| | 2 | | | | | | | | | | | | |
| | 3 | | | | | | | | | | | | |
| Průměr | | | | | | | | | | | | | X _a = |
| Rozpětí | | | | | | | | | | | | | r _a = |
| B | 1 | | | | | | | | | | | | |
| | 2 | | | | | | | | | | | | |
| | 3 | | | | | | | | | | | | |
| Průměr | | | | | | | | | | | | | X _b = |
| Rozpětí | | | | | | | | | | | | | r _b = |
| C | 1 | | | | | | | | | | | | |
| | 2 | | | | | | | | | | | | |
| | 3 | | | | | | | | | | | | |
| Průměr | | | | | | | | | | | | | X _c = |
| Rozpětí | | | | | | | | | | | | | r _c = |
| Průměr $\bar{\bar{x}}$ | | | | | | | | | | | | | $\bar{\bar{x}} =$ |
| | | | | | | | | | | | | | R _p = |
| | | | | | | | | | | | | | $\bar{\bar{R}} =$ |
| | | | | | | | | | | | | | X _{DIFF} = |
| | | | | | | | | | | | | | UCL _R = |
| | | | | | | | | | | | | | LCL _R = |

*D₄ = 3,27 pro 2 operátory nebo 2,58 pro 3 operátory; *D₃ = 0 pro výběr více než 7 vzorků

PŘÍLOHA P3: VÝPOČTOVÝ FORMULÁŘ – STUDIE R&R

| Protokol o opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měřidla R&R | | | |
|--|--|---------------------------------|-----------------------------|
| Číslo dílu | | Typ měřidla | |
| Název dílu | | Datum | |
| Název měřidla | | | |
| Provedl/a | | | |
| Analýza měřicí jednotky | | Procento celkové variability TV | |
| Opakovatelnost - Variabilita zařízení (EV) | | | |
| EV | = R * K ₁ | Měření | K₁ |
| = | | 2 | 0,8862 |
| = | | 3 | 0,5908 |
| | | | % EV = 100 (EV/TV) |
| | | | = |
| | | | = |
| Reprodukovatelnost - variabilita operátora (AV) | | | |
| AV | = $\{(x_{DIFF} * K_2)^2 - (EV^2/nr)\}^{1/2}$ | | |
| = | | | |
| = | | | |
| | | Operátoři | K₂ |
| | | 2 | 0,7071 |
| | | 3 | 0,5231 |
| | | | % AV = 100 (AV/TV) |
| | | | = |
| | | | = |
| Opakovatelnost a reprodukovatelnost (R&R) | | | |
| GRR | = $\{(EV^2 + AV^2)\}^{1/2}$ | | |
| = | | | |
| = | | | |
| | | Díly | K₃ |
| | | 2 | 0,7071 |
| | | 3 | 0,5231 |
| | | 4 | 0,4467 |
| | | 5 | 0,403 |
| | | 6 | 0,3742 |
| | | 7 | 0,3534 |
| | | 8 | 0,3375 |
| | | 9 | 0,3249 |
| | | 10 | 0,3146 |
| | | | % GRR = 100 (GRR/TV) |
| | | | = |
| | | | = |
| Variabilita dílu (PV) | | | |
| PV | = $\{(TV^2 - GRR^2)\}^{1/2}$ | | |
| = | | | |
| = | | | |
| | | | % PV = 100 (PV/TV) |
| | | | = |
| | | | = |
| Celková variabilita (TV) | | | |
| TV | = (Upper - Lower) / 6 | | |
| = | | | |
| = | | | |
| | | | ndc = 1,41 (PV/GRR) |
| | | | = |
| | | | = |
| Vyhodnocení | | | |
| % GRR ≤ 10 | R&R OK | ndc ≥ 5 | R&R OK |
| 10 ≤ % GRR ≤ 30 | R&R CRITICAL | | |
| % GRR > 30 | R&R NOT OK | ndc < 5 | R&R NOT OK |

PŘÍLOHA P4: FORMULÁŘ S NAMĚŘENÝMI HODNOTAMI

| Studie opakovatelnosti a reprodukovatelnosti R&R | | | | | | | | | | | | | |
|--|--------|--|--------|--------|----------------------|--------|--------|------------|---------------|------------|---------------|-------------------|--------|
| Číslo dílu | | 915636-104 | | | | | | Operátor A | | Operátor_1 | | | |
| Název dílu | | Gearbox housing SA | | | | | | Operátor B | | Operátor_2 | | | |
| Název měřidla | | 3D CNC - Aberlink Axiom too HS | | | | | | Operátor C | | Operátor_3 | | | |
| Typ měřidla | | CMM | | | | | | Datum | | 03.05.2018 | | | |
| Operátor | Měření | Klasifikace charakteristiky | | | Charakteristika [mm] | | | | Specifikace | | | | |
| | | Průměr | | | 4,10 +0/0,15 mm | | | | Rozměr - tol. | | Rozměr + tol. | | |
| | | | | | | | | | 3,95 | | 4,10 | | |
| Dílec | | | | | | | | | | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | Průměr |
| A | 1 | 4,061 | 4,064 | 4,064 | 4,066 | 4,062 | 4,066 | 4,064 | 4,067 | 4,067 | 4,068 | | 4,065 |
| | 2 | 4,064 | 4,066 | 4,064 | 4,066 | 4,063 | 4,064 | 4,061 | 4,064 | 4,062 | 4,060 | | 4,063 |
| | 3 | 4,065 | 4,066 | 4,065 | 4,064 | 4,067 | 4,065 | 4,066 | 4,063 | 4,061 | 4,060 | | 4,064 |
| Průměr | | 4,0634 | 4,0654 | 4,0641 | 4,0655 | 4,0636 | 4,0650 | 4,0635 | 4,0645 | 4,0631 | 4,0627 | $\bar{x}_a =$ | 4,0641 |
| Rozpětí | | 0,003 | 0,002 | 0,001 | 0,002 | 0,005 | 0,003 | 0,005 | 0,004 | 0,005 | 0,008 | $r_a =$ | 0,004 |
| B | 1 | 4,064 | 4,062 | 4,064 | 4,063 | 4,061 | 4,062 | 4,062 | 4,065 | 4,062 | 4,066 | | 4,063 |
| | 2 | 4,061 | 4,063 | 4,064 | 4,067 | 4,061 | 4,068 | 4,064 | 4,065 | 4,061 | 4,064 | | 4,064 |
| | 3 | 4,065 | 4,060 | 4,060 | 4,064 | 4,061 | 4,061 | 4,064 | 4,063 | 4,067 | 4,064 | | 4,063 |
| Průměr | | 4,0632 | 4,0618 | 4,0629 | 4,0650 | 4,0613 | 4,0634 | 4,0635 | 4,0642 | 4,0633 | 4,0645 | $\bar{x}_b =$ | 4,0633 |
| Rozpětí | | 0,004 | 0,003 | 0,004 | 0,004 | 0,000 | 0,007 | 0,002 | 0,003 | 0,006 | 0,002 | $r_b =$ | 0,003 |
| C | 1 | 4,062 | 4,065 | 4,061 | 4,059 | 4,063 | 4,060 | 4,066 | 4,063 | 4,064 | 4,065 | | 4,063 |
| | 2 | 4,065 | 4,064 | 4,065 | 4,067 | 4,067 | 4,066 | 4,064 | 4,069 | 4,066 | 4,068 | | 4,066 |
| | 3 | 4,064 | 4,069 | 4,064 | 4,064 | 4,066 | 4,062 | 4,067 | 4,064 | 4,061 | 4,065 | | 4,065 |
| Průměr | | 4,0634 | 4,0659 | 4,0631 | 4,0633 | 4,0655 | 4,0625 | 4,0655 | 4,0653 | 4,0635 | 4,0658 | $\bar{x}_c =$ | 4,0644 |
| Rozpětí | | 0,003 | 0,005 | 0,004 | 0,008 | 0,003 | 0,006 | 0,004 | 0,006 | 0,005 | 0,003 | $r_c =$ | 0,005 |
| Průměr $\bar{\bar{x}}$ | | 4,063 | 4,064 | 4,063 | 4,065 | 4,063 | 4,064 | 4,064 | 4,065 | 4,063 | 4,064 | $\bar{\bar{x}} =$ | 4,0639 |
| | | | | | | | | | | | | $R_p =$ | 0,0014 |
| | | $(r_a + r_b + r_c) / (\text{počet operátorů}) =$ | | | | | | | | | | $\bar{\bar{R}} =$ | 0,0040 |
| | | $(\text{Max } x - \text{Min } x) =$ | | | | | | | | | | $X_{DIFF} =$ | 0,0011 |
| | | $\frac{1}{n} \times D_4 =$ | | | | | | | | | | $UCL_R =$ | 0,0103 |
| | | $\frac{1}{n} \times D_3 =$ | | | | | | | | | | $LCL_R =$ | 0,0000 |

* $D_4 = 3,27$ pro 2 operátory nebo $2,58$ pro 3 operátory; * $D_3 = 0$ pro výběr více než 7 vzorků

PŘÍLOHA P5: FORMULÁŘ S VYPOČTENÝMI HODNOTAMI

| Protokol o opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měřidla R&R | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---|--|-----------------------|---|--------|---|--------|---|--------|---|-------|---|--------|---|--------|---|--------|---|--------|----|--------|---|--|
| Číslo dílu | 915636-104 | Typ měřidla | CMM | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Název dílu | Gearbox housing SA | Datum | 03.05.2018 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Název měřidla | 3D CNC - Aberlink Axiom too HS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Provedl/a | Lukáš Vacek | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Analýza měřicí jednotky | | Procento celkové variability TV | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Opakovatelnost - Variabilita zařízení (EV) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $EV = R * K_1$ $= 0,0040 * 0,5908$ $= 0,0024$ | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">Měření</th> <th style="width: 50%;">K₁</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">0,8862</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3</td> <td style="text-align: center;">0,5908</td> </tr> </tbody> </table> | Měření | K ₁ | 2 | 0,8862 | 3 | 0,5908 | $\% EV = 100 (EV/TV)$ $= 100 (0,0024/0,0250)$ $= \mathbf{9,48}$ | | | | | | | | | | | | | | | |
| Měření | K ₁ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 0,8862 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 0,5908 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Reprodukovatelnost - variabilita operátora (AV) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $AV = \{(x_{DIFF} * K_2)^2 - (EV^2/nr)\}^{1/2}$ $= \{(0,0011 * 0,5231)^2 - (0,0024^2 / (10 * 3))\}^{1/2}$ $= 0,0003$ | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">Operátoři</th> <th style="width: 50%;">K₂</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">0,7071</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3</td> <td style="text-align: center;">0,5231</td> </tr> </tbody> </table> | Operátoři | K ₂ | 2 | 0,7071 | 3 | 0,5231 | $\% AV = 100 (AV/TV)$ $= 100 (0,0003/0,0250)$ $= \mathbf{1,40}$ | | | | | | | | | | | | | | | |
| Operátoři | K ₂ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 0,7071 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 0,5231 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| n = počet dílů r = násobnost měření | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Opakovatelnost a reprodukovatelnost (R&R) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $GRR = \{(EV^2 + AV^2)\}^{1/2}$ $= \{(0,0024^2 + 0,0003^2)\}^{1/2}$ $= 0,0024$ | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">Díly</th> <th style="width: 50%;">K₃</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">0,7071</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3</td> <td style="text-align: center;">0,5231</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">4</td> <td style="text-align: center;">0,4467</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">5</td> <td style="text-align: center;">0,403</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">6</td> <td style="text-align: center;">0,3742</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">7</td> <td style="text-align: center;">0,3534</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">8</td> <td style="text-align: center;">0,3375</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">9</td> <td style="text-align: center;">0,3249</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">10</td> <td style="text-align: center;">0,3146</td> </tr> </tbody> </table> | Díly | K ₃ | 2 | 0,7071 | 3 | 0,5231 | 4 | 0,4467 | 5 | 0,403 | 6 | 0,3742 | 7 | 0,3534 | 8 | 0,3375 | 9 | 0,3249 | 10 | 0,3146 | $\% GRR = 100 (GRR/TV)$ $= 100 (0,0024/0,0250)$ $= \mathbf{9,58}$ | |
| Díly | K ₃ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 0,7071 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 0,5231 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 0,4467 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 0,403 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 0,3742 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | 0,3534 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 0,3375 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | 0,3249 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 0,3146 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Variabilita dílu (PV) | | R&R OK | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $PV = \{(TV^2 - GRR^2)\}^{1/2}$ $= \{(0,02500^2 - 0,00239^2)\}^{1/2}$ $= 0,0249$ | | $\% PV = 100 (PV/TV)$ $= 100 (0,0249/0,0250)$ $= \mathbf{99,54}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Celková variabilita (TV) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $TV = (Upper - Lower) / 6$ $= 4,10 - 3,95 / 6$ $= 0,0250$ | | $ndc = 1,41 (PV/GRR)$ $= 1,41 (0,0249/0,0024)$ $= \mathbf{14,652}$ | R&R OK | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Vyhodnocení | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| % GRR ≤ 10 | R&R OK | ndc ≥ 5 | R&R OK | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 ≤ % GRR ≤ 30 | R&R CRITICAL | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| % GRR > 30 | R&R NOT OK | ndc < 5 | R&R NOT OK | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |