



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY**

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**ZVÝŠENÍ EFEKTIVITY KONTROLY RAMENE TANKOVACÍ  
NÁDRŽE**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Kateřina Sobotková**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.**

**BRNO 2019**

# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Studentka:	<b>Bc. Kateřina Sobotková</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní stroje, systémy a roboty
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Zvýšení efektivity kontroly ramene tankovací nádrže

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Implementace procesu neustálého zlepšování v hlavních nebo podpůrných procesech průmyslových podniků je významným faktorem konkurenceschopnosti. Velká variabilita měření a kontroly vyráběných komponentů je stále diskutovanou problematikou také v automobilovém průmyslu, neboť i zde neustále narůstají požadavky na přesnost vstříkovaných komponentů. Práce je zaměřena na zvýšení efektivity kontroly vyráběných komponentů.

### Cíle diplomové práce:

Popis současného stavu řešené problematiky a používané technické prostředky.  
Systémový rozbor problematiky, analýza příčin neshod u posuzovaných výrobků.  
Návrh a zdůvodnění zvoleného způsobu řešení zadaného úkolu.  
Plánování experimentu/postupu práce.  
Statistické zpracování a vyhodnocení výsledků experimentu/postupu práce.  
Vlastní závěry a/nebo doporučení.

### Seznam doporučené literatury:

MILITKÝ, Jiří a Dana KŘEMENÁKOVÁ. Metrologie a řízení jakosti. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-242-6.

PERNIKÁŘ, Jiří a Miroslav TYKAL. Strojírenská metrologie II. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-3338-8.

TICHÁ, Šárka a Ivan MRKVICA. Vybrané kapitoly ze strojírenské metrologie: učební text. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2709-4.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce zahrnuje návrh nového postupu kontroly plastového komponentu tankovací nádrže. Teoretická část pojednává o potenciálních zdrojích chyb a nejistot vznikajících při samostatném měření. Dále se věnuje charakteristice dostupných CMM zařízení a rozboru metod posuzování přijatelnosti plánu měření. Součástí praktické části je systematický rozbor současného stavu a návrh nového řešení pomocí programu vytvořeného na souřadnicovém stroji. Výstupem práce je porovnání obou variant.

## **ABSTRACT**

The diploma thesis consists of a new design of a controlling procedure for a plastic component of a tank. Its theoretical part deals with the potential sources of errors and uncertainties arising from the measuring itself. It also deals with the characteristics of available CMM devices and includes an analysis of the methods assessing the acceptability of the measurement plan. The practical part analyses systematically the current state and proposes a new solution using a program created using a coordinate machine. A comparison of both variants is presented as an output of the thesis.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Souřadnicový měřicí stroj, analýza příčin a následků, analýza systému měření, systematické chyby, náhodné chyby, nejistoty měření, měřicí laboratoř

## **KEYWORDS**

Coordinate measuring machine, Cause Consequence Analysis, Measurement system analysis, systematic errors, random errors, measurement uncertainties, measuring laboratory



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

SOBOTKOVÁ, Kateřina. *Zvýšení efektivity kontroly ramene tankovací nádrže*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2019, 95 s., Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Blecha, Ph. D.



## **PODĚKOVÁNÍ**

Chtěla bych poděkovat panu doc. Ing. Petru Blechovi, Ph. D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování této diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat svým rodičům za trpělivost a bezmeznou podporu ve studiu.





## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracovala samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce doc. Ing. Petra Blechy, Ph. D.

V Brně dne 23. 5. 2019

.....  
Bc. Sobotková Kateřina



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>PŘEDSTAVENÍ SPOLEČNOSTI</b> .....	<b>17</b>
2.1	Vstřikování plastových komponentů do aut .....	17
2.2	Měřicí laboratoř .....	20
2.2.1	Všeobecné požadavky .....	20
2.2.2	Konstrukční požadavky .....	21
<b>3</b>	<b>MĚŘENÍ</b> .....	<b>23</b>
3.1	Veličina .....	23
3.2	Měření .....	23
3.3	Použité statistické pojmy .....	23
3.3.1	Střední hodnota .....	24
3.3.2	Rozptyl hodnot .....	24
3.3.3	Směrodatná odchylka .....	25
3.3.4	Variační koeficient .....	25
3.3.5	Normální (Gaussovo) rozdělení .....	25
3.3.6	Odhady parametrů .....	26
3.3.7	Četnost .....	27
3.4	Přesnost měření .....	28
3.4.1	Stabilita .....	28
3.4.2	Strannost .....	29
3.4.3	Linearita .....	29
3.4.4	Opakovatelnost .....	30
3.4.5	Reprodukovatelnost .....	30
3.5	Chyby měření .....	31
3.5.1	Absolutní a relativní chyby .....	32
3.5.2	Náhodné chyby .....	32
3.5.3	Systematické chyby .....	32
3.5.4	Hrubé chyby .....	33
3.6	Nejistoty měření .....	34
3.6.1	Standartní nejistota typu A .....	34
3.6.2	Standartní nejistota typu B .....	34
3.6.3	Kombinovaná standartní nejistota .....	35
3.6.4	Rozšířená standartní nejistota .....	35
<b>4</b>	<b>SYSTÉMOVÁ ANALÝZA</b> .....	<b>37</b>
4.1	Analýza příčin a následků .....	37
4.2	Analýza systému měření (MSA) .....	38
4.2.1	Metoda rozpětí .....	40
4.2.2	Metoda průměrů a rozpětí .....	40
4.2.3	Metoda rozptylu ANOVA .....	43
<b>5</b>	<b>MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ</b> .....	<b>45</b>
5.1	Vlastnosti měřicích zařízení .....	45
5.1.1	Statické vlastnosti .....	45
5.1.2	Dynamické vlastnosti .....	46
5.1.3	Informační vlastnosti .....	46
5.2	Kalibrace .....	47

5.3	Ověřování .....	48
5.4	Měření délek .....	48
5.5	Souřadnicové měřicí stroje .....	49
5.5.1	Typy souřadnicově měřicích strojů .....	49
5.5.2	Konstrukční prvky .....	51
5.5.3	Měřicí systémy .....	52
5.5.4	Snímací systémy .....	53
5.5.5	Metody měření na SMS .....	56
5.5.6	Kontrola přesnosti měření .....	57
5.5.7	Software pro SMS .....	57
<b>6</b>	<b>SOUČASNÝ STAV .....</b>	<b>59</b>
6.1	Kontrolovaný díl .....	59
6.2	Upínací přípravek .....	60
6.3	Plán měření .....	61
6.4	Systémový rozbor .....	63
6.5	Vyhodnocení podle R&R studie .....	65
<b>7</b>	<b>NÁVRH ŘEŠENÍ .....</b>	<b>67</b>
7.1	Optiv performance 443 .....	67
7.2	Plánování experimentu .....	68
7.3	Plán měření .....	72
7.4	Systémový rozbor .....	74
7.5	Vyhodnocení podle R&R studie .....	75
<b>8</b>	<b>STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ .....</b>	<b>77</b>
8.1	Porovnání opakovatelnosti operátorů .....	77
8.2	Porovnání reprodukovatelnosti zařízení .....	78
8.3	Porovnání rozložení naměřených hodnot .....	79
8.4	Snížení nejistoty měření .....	81
8.5	Zvýšení kapacity stroje .....	81
8.6	Časová úspora .....	82
<b>9</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>83</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>85</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK .....</b>	<b>91</b>
11.1	Seznam tabulek .....	91
11.2	Seznam obrázků .....	91
11.3	Seznam použitých zkratk a symbolů .....	93
<b>12</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>95</b>
	Příloha 1 – Hodnoty $d_2^*$ pro rozdělení průměrného rozpětí (MSA) [44] .....	I
	Příloha 2 – Protokol na sběr údajů a vyhodnocení MSA .....	II
	Příloha 3 – Analýza příčin a následků současného stavu .....	III
	Příloha 4 – Záznamový arch současného postupu měření .....	IV
	Příloha 5 – Kompletní návodka nového postupu měření .....	V
	Příloha 6 – Protokol ze SMS stroje .....	VI
	Příloha 7 – Opakovatelnost operátora B při měření zákaznických rozměrů .....	VII
	Příloha 8 – Opakovatelnost operátora C při měření zákaznických rozměrů .....	VIII

# 1 ÚVOD

V posledních letech zaznamenává automobilový průmysl velký nárůst produkce. Bohužel, v mnoha případech nedokáže jít kvalita ruku v ruce s kvantitou. Mnohdy za ní výrazně pokulhá. Ve snaze zlepšit jakost výrobků dodávaných na trh jsou vyvíjeny stále nové a modernější způsoby kontroly a měření.

Cílem této diplomové práce je návrh nového systému měření plastového tankovacího ramene u automobilů. V prvních kapitolách seznamuje čtenáře s prostředím firmy, teoretickými pojmy a vybranými nástroji kvality. Popis těchto pojmů je důležitý pro pochopení celé problematiky. Zároveň slouží k posouzení rozdílu mezi současným stavem a navrhovaným systémem měření. Hlavní podmínkou pro zavedení plánovaného způsobu kontroly do procesu je dosažení co možná největšího snížení chyby měření. V mnoha případech přináší největší nejistotu člověk a proto je ve snaze jeho konání při měření co nejvíce omezit. K tomu by měl výrazně napomoci program vytvořený na souřadnicovém měřicím stroji.



Obr 1) Ukázky kontrolovaných dílů



## 2 PŘEDSTAVENÍ SPOLEČNOSTI

Firma ITW Pronovia s.r.o. je jednou ze skupiny celosvětově známých výrobních závodů skrývajících se pod zkratkou ITW (Illinois Tool Works). Tento celek byl založen v Chicagu a od roku 1912 obchoduje na mezinárodním trhu. K dnešnímu datu zaměstnává okolo 49 tisíc zaměstnanců v 57 zemích, které jsou znázorněny na Obr 2). Jedná se o předního výrobce spotřebních zařízení pro spoustu průmyslových odvětví, jako je stavebnictví, strojírenství, chemický průmysl, potravinářský průmysl, a především automobilový průmysl. Zaměstnanci při vývoji a inovaci spolupracují se zákazníky a kolegy z mezinárodních automobilek jako jsou Audi, BMW, Ford, Renault, Škoda a další. [21]



Obr 2) Prodejní a výrobní místa společnosti ITW [20]

Od roku 1992 se ve Velké Bíteši rozkládá společnost zahrnující tři divize, a to divize Powertrain plastic, Body and Fuel, které se na počátku nového tisíciletí staly součástí komplexu ITW. Tento podsystem nadnárodní firmy produkuje plastové výlisky, konkrétně části spalovacích motorů, kliky a komponenty do tankovací soustavy osobních i nákladních automobilů. [21], [38]

### 2.1 Vstřikování plastových komponentů do aut

Divize Fuel je nejvíce se rozšiřující částí na území České republiky. V loňském roce tento úsek vyhrál okolo dvaceti nových projektů, pro které je nezbytné zajistit dostatečnou kvalitu sériové výroby. Převážná většina automobilových komponentů je v současnosti produkována vstřikováním z termoplastů. [24]

Vstřikováním je nazýván proces výroby, při němž dochází ke vstříknutí požadovaného množství materiálu do uzavřené dutiny kovové formy při velké rychlosti a za vysokého tlaku. Vstřikování je jednou z nejrozšířenějších metod zpracování plastů a lze zpracovávat téměř všechny druhy termoplastů. K produkci jednotlivých částí tankovací soustavy ve Velké Bíteši



se používají termoplasty na bázi polypropylenu, konkrétně Hostacom, Noryl a Grillon. Tyto materiály jsou složitým komplexem potrubí v podobě vysušených granulátů dopravovány ze skladu do jednotlivých lisů. Dále dochází k jejich natavení a následnému vstříknutí do předem uzavřené formy. Vstříknutá tavenina do uzavřeného prostoru okamžitě předává svoje teplo do stěn formy a pomocí chlazení rychleji tuhne. Během tohoto procesu dochází k nežádoucímu smršťování a zmenšování objemu dílu, na kterém mohou vznikat různé defekty v podobě sraženin nebo propadlin. Tvorbě vad lze předcházet správným nastavením dotlaku, kterým se dá kompenzovat úbytek objemu výlisku. Poté dojde k uvolnění šneku a otevření formy. [24]

Výhodami vstřikování jsou krátký čas, možnost lisování složitějších dílů, jednoduchá automatizace výroby a velká variabilita využívaných materiálů. Mezi hlavní nevýhody patří vysoká pořizovací cena stroje a neúměrná velikost vstřikolisu vůči finálnímu výlisku. Na lisovně ITW se nachází 87 lisů od výrobců Netstal a Victory. Stroj od výrobce Nestal je zobrazen na Obr 3). [24]



Obr 3) Vstřikolis Synergy 2400 [30]

Ústřední intencí divize Fuel je výroba a inovace tankovací sestavy do automobilů. Koncepce tohoto celku se dá rozdělit na dvě varianty podle přítomnosti nebo naopak nepřítomnosti tankovacího víčka. Verze s uzávěrem je spíše záležitostí minulosti. Značně novější je varianta bez jakéhokoliv šroubovacího uzávěru, což ocení především cíloví vlastníci jednotlivých vozů. Tento způsob konstrukce je na Obr 4). Na benzínové pumpě už majitele nečeká žádné nepříjemné překvapení v podobě škrábanců na laku od zavěšeného víčka nebo ztráty samotného víčka či benzínového nebo naftového zápachu na rukou. Tento způsob je rychlejší, pohodlnější a čistší. [17], [18], [21]



Obr 4) Palivový systém s bezvíčkovým uzavíráním nádrže [17]

Palivový komplex obsahuje mnoho designově složitých plastových komponentů. Firma klade intenzivní důraz na každou jednotlivou součást. Jedním z takových dílů je i tankovací rameno, které slouží k uzavírání nádrže. Pomocí tzv. osky je pohyblivě uloženo v muldě a na jeho klipech je nasazeno víčko. Někteří rameno mohou obsahovat díl s pracovním názvem Tappet, který spolu s protikusem Lock Push-push slouží k uzamknutí nádrže. Zamykací části jsou uvedeny na obrázku Obr 5). Dále mohou být opatřeny gumovým těsněním. To společně s víkem zabraňuje nevídanému vniknutí nečistot nebo nežádoucímu prosáknutí vody do nádrže. Ze zákaznického hlediska je nejdůležitější estetický vzhled. Jakékoliv pochybení v podobě propadliny, boule či nerovnoměrného vystředění víčka může být důsledkem výrobního defektu tankovacího ramene, a proto je nezbytně nutné pro tyto výlisky zajistit co největší kvalitu. [17], [18]



Obr 5) Zamykací komponenty [19]

## 2.2 Měřicí laboratoř

Z pohledu kvality na dílně probíhá pouze vizuální kontrola produkovaných kusů. Podrobnější a přesnější kontrola jakosti a k ní potřebné měření probíhá v měřicí laboratoři. Měřicí místnost musí splňovat určité požadavky a zákony, jako jsou například požadavky pro ochranu spotřebitele či požadavky na životní prostředí. Měřicí místnost v ITW Pronovia s.r.o. je vybavena velkým množstvím různých měřicích a testovacích zařízení od základních posuvných měřidel, mikrometrů, hloubkoměrů a dutinometrů, až po složitější souřadnicové měřicí stroje a testovací komory. [12], [15], [40]

### 2.2.1 Všeobecné požadavky

Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky je mimo jiné pověřeno i správou legislativy v metrologii. Vydává zákony a vyhlášky v oblasti obchodu, průmyslu a plánování. Nejzávažnější zákon je č. 505/1990 Sb., který upravuje práva a povinnosti fyzických osob, právnických osob a orgánů státní správy v oblasti zaručení správnosti a jednoty měření a používaných měřidel. Dále je nutné se řídit zákonem č. 20/1993 Sb. o normalizaci a vyhláškou č. 345/2002 Sb. dle které podléhají veškerá měřidla povinnosti kalibrace a ověřování. V automobilovém průmyslu musí být laboratoř akreditována normami ČSN EN ISO 9001 a nově dle normy IATF 16949. Akreditaci zkušebních a kalibračních laboratoří v České republice provádí Český institut pro akreditaci (ČIA). Dále určuje kvalifikační nároky na posuzovatele a pracovníky a podílí se na jejich odborném zaškolení. [6], [12], [15]

Norma ČSN EN ISO 9001 uvádí požadavky na kompetentnost managementu jakosti. Podle sedmé kapitoly podléhá každá společnost povinnosti stanovit adekvátní procesy kontroly vyráběných dílů, které zajišťují shodu produktu se stanovenými požadavky. Měřicí zařízení, na nichž je kontrola prováděna musí být pravidelně kalibrována a ověřována pomocí etalonů, které vznikly v návaznosti na mezinárodní nebo národní etalony. Kalibrační záznamy musí být evidovány. Dále nesmíme zapomenout měřidla řádně označit a chránit proti poškození, či znehodnocení během manipulace a skladování. Používá-li firma k revizi software je povinna prokázat jeho způsobilost. Článek č. 8 se zabývá zaznamenáváním, analýzou a zlepšováním. Výrobek je možné uvolnit pouze v případě prokázání shody s danými požadavky. Osoba odpovídající za uvolnění produktu musí být náležitě proškolená. Důležité je data monitorovat a dále analyzovat v závislosti na spokojenosti zákazníka, trendech procesů a produktů, shodě s požadavky i na dodavatelích. [12]

Pro automobilový průmysl navazuje na normu ČSN EN ISO 9001 sborník IATF 16949, který je doplněn specifickými požadavky. Kapitola sedm je rozšířena o požadavek na řízení změn. Firma je povinna specifikovat proces řízení změn a jeho ověřování. Zákazník musí schválit každou změnu ovlivňující jeho požadavky. Před začátkem sériové výroby musí společnost předložit potvrzení o kompetenci danou součástí vyrábět. Následující změna je zaměřena na komunikaci se zákazníkem. Podstatné informace je nutné předávat v jazyce a formátu, který udává zákazník. Oproti předchozí uvedené normě je kladen větší důraz na prevenci chyb. Odstranění vad ve stadiu vývoje je pro sériovou výrobu zásadní, protože v pozdější fázi je časově a finančně nákladné. Odlišné jsou taktéž v systému kontroly produkovaných dílů. Pro každý způsob měření je třeba provést statistickou studii, většinou dle kritérii zákazníka. V ITW se k posouzení vhodnosti způsobu měření používá studie MSA, která je podrobněji popsána ve páté kapitole. [15]

Přidaný je i článek zahrnující požadavky na interní a externí laboratoře. Laboratoře jsou povinné odpovídat určité technické způsobilosti. Rozsah je dán činností laboratoře a prostředky, kterými tuto činnost provádíme. Jednotlivá měřidla jsou evidována a pravidelně kalibrována externí akreditovanou laboratoří dle normy ČSN ISO 17025. Výsledky přezkoumání jsou uloženy v databázi měřidel a měřidlo je opatřeno kalibrační známkou. Měřicí zařízení musí být dále vybaveno pracovním postupem, který je v souladu s technologickou specifikací. Vzorke určené k měření je nutné nechat v prostředí laboratoře uložené dostatečně dlouhou dobu, aby došlo ke správné tepercaci na laboratorní teplotu. Tímto opatřením eliminujeme vliv tepelné roztažnosti na výsledky měření. Důležité jsou také požadavky na kvalifikované personální obsazení pracovních míst. [15]

### 2.2.2 Konstrukční požadavky

Velmi podstatným nárokem na měřicí laboratoř jsou samostatné prostory. Pro spolehlivé a přesné měření délkových, úhlových, geometrických a silových rozměrů musí být splněno několik důležitých bodů, jako je kupříkladu teplota, která by se měla pohybovat okolo  $20\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$ , pro nepřesnější měření je dovoleno  $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ . Dalšími zásadními faktory jsou relativní vlhkost, která musí být  $40\% \pm 15\%$ , akceptovatelná hlučnost do 50 dB a intenzita umělého světla 80-100 lx. [15], [40]

Laboratorní prostory by v nejlepším případě měly být daleko od těžkých provozů, silnic a železničních tratí. Podlahy by měly být od okolních stěn správně odizolovány, aby nedocházelo k přenosu vibrací a otřesů. Měřicí přístroje je nutné uložit na podloží z pružného materiálu. Podstatná je též bezprašnost laboratoře, která se dá zajistit pomocí speciálního nátěru stěn, použitím bezprašné podlahy, dodržováním vysoké čistoty a přezouváním či převlékáním zaměstnanců. [40]



## 3 MĚŘENÍ

Metrologie má pro podnik nemalý význam především v oblasti zvyšování jakosti a technického rozvoje firmy. Jedná se o vědní disciplínu, která zahrnuje veškeré poznatky a činnosti spojené s měřením. Zabývá se měřením různých veličin v mnoha oblastech vědy, hospodářství, průmyslu a státní správy. Pro sjednocení a zjednodušení orientace v metrologii se používá několik následujících pojmů.

### 3.1 Veličina

Veličina je vlastnost zkoumaného jevu, tělesa anebo látky, u které lze kvalitativně a kvantitativně určit její hodnotu. Odměřované hodnoty lze začlenit do dvou skupin, a to na hodnoty pravé a konvenčně pravé. V případě pravé hodnoty mluvíme o hodnotě, která odpovídá definici dané veličiny a byla by určena zcela přesným měřením. Tím pádem ji nelze spolehlivě určit, a proto je v metrologii zaváděn pojem konvenční hodnoty, který je přisuzován zkoumané veličině podle úmluvy s tím rizikem, že nejistota obdržení vyšetřované hodnoty je zanedbatelná. Mimo měřené veličiny vstupuje do procesu měření také ovlivňující veličina, která má vliv na konečný výsledek, ale její zkoumání není hlavním úkolem daného zaznamenávaného děje. [6], [7], [40]

### 3.2 Měření

Měření je experimentální činnost, jejíž úkolem je dle jedné či více odměřených hodnot určované veličiny stanovit její co možná nejpřesnější hodnotu. Proces měření zahrnuje srovnání veličin, stanovení počtu snímaní, popis pozorované charakteristiky vzhledem k adekvátnímu použití výsledků, postup a podmínky měření a popis kalibrace systému. Přesnost měření je rovna velikosti shody mezi naměřeným výsledkem a pravou (konvenčně pravou) hodnotou. [6], [40]

Posloupnost následujících genericky popsanych činností během procesu měření je označována jako metoda měření, která je exaktněji popsána postupem měření. Naměřené hodnoty jsou nazývány výsledky měření. Může se jednat o hodnotu indikovanou přístrojem nebo průměrnou hodnotu za podmínek opakovatelnosti. Dále může být výsledek nekorigovaný či korigovaný neboli navýšený o velikost korekce. Ke kompletnímu výsledku musí být přiložena informace o nejistotě měření. [6], [7], [40]

### 3.3 Použité statistické pojmy

Ke správnému určení výsledku měření a nejistot, kterým je daný výsledek zatížen nestačí pouze jedno měření. Proces měření je nutné při stejných podmínkách opakovat vícekrát. Tím se utvoří soubor hodnot stejného druhu, který je používán k následovnému statistickému zpracování. Obsahuje-li soubor všechny statistické jednotky je nazýván základním statistickým souborem. Rozsah základního souboru může být konečný nebo nekonečný a označuje se  $N$ . Jednotlivé prvky jsou označovány písmenem  $a_i$ , aritmetický průměr se značí řeckým písmenem  $\mu$  a směrodatná odchylka řeckým písmenem  $\sigma$ . [6], [23]

Náhodným výběrem nebo podle určitých kritérií se ze základního souboru distancuje výběrový soubor. Jeho rozsah je  $n$  prvků. Dílčí prvky se značí  $x_i$ , aritmetický průměr je označován jako  $\bar{x}$  a směrodatná odchylka  $s$ . Následují vzorce pro výpočet primárních statistických charakteristik naměřených dat se vztahují k výběrovému souboru. [23]

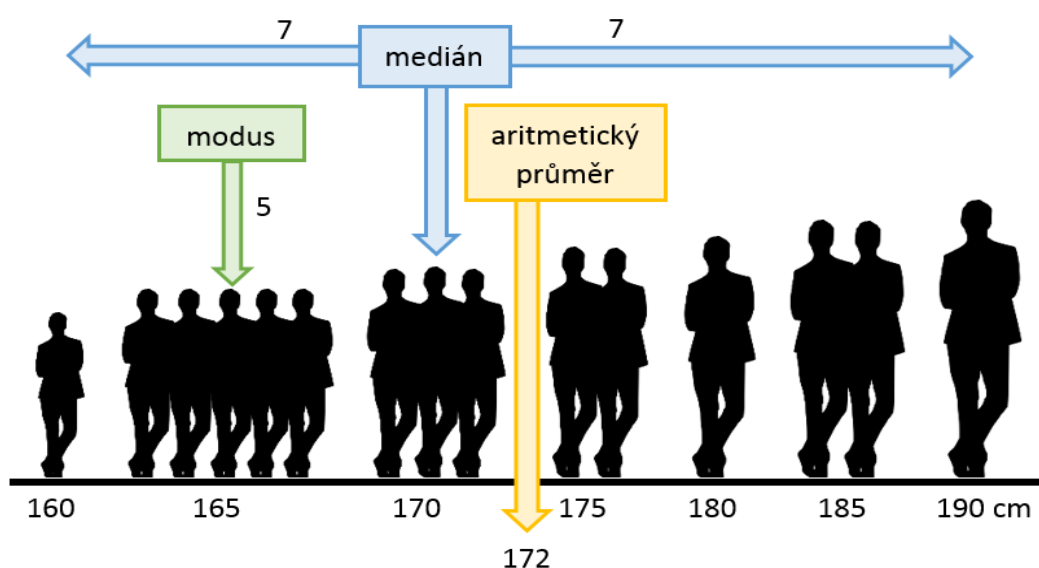
### 3.3.1 Střední hodnota

Jednu z nejstručnějších informací o zkoumaném znaku statistického souboru podává jeho poloha na číselné ose, kterou lze popsat třemi různými odhady středních hodnot. Nejjednodušší a nejčastěji používanou charakteristikou je aritmetický průměr  $\bar{x}$ . Jedná se o součet všech zjištěných hodnot dělený jejich počtem [4], [6]:

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

kde  $n$  ... počet měření  
 $x_i$  ... hodnoty jednotlivých měření.

Značnou nevýhodou aritmetického průměru je ovlivnění sporadickými extrémními hodnotami. U souborů s menším počtem dat se jedná o velký nedostatek. Méně choulostivější charakteristikou na výskyt extrému je medián, který u souboru srovnaného dle velikosti popisuje prostřední hodnotu. Třetí možností odhadu střední hodnoty je modus, který zastupuje hodnotu s největší četností. Vzájemné vztahy mezi jednotlivými odhady jsou patrné z Obr 6). [4], [6], [28]



Obr 6) Vztah mezi odhady střední hodnoty [6]

### 3.3.2 Rozptyl hodnot

Všechny výše uvedené charakteristiky polohy jsou chápány jako číslo, okolo nichž ostatní hodnoty kolísají. Nejjednodušší veličinou popisující interval kolísání je rozpětí, definované jako rozdíl maximální a minimální naměřené hodnoty. Kolísající charakteristikou aritmetického průměru je rozptyl  $s_x^2$ , jehož výpočet je následující [4], [6]:

$$s_x^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2)$$

kde  $\bar{x}$  ... aritmetický průměr  
 $n$  ... počet měření  
 $x_i$  ... hodnoty jednotlivých měření.

### 3.3.3 Směrodatná odchylka

Pro představu rozmístění jednotlivých hodnot v souboru je výhodnější použít směrodatnou odchylku  $s_x$ , která je definována jako druhá odmocnina rozptylu. Na rozdíl od rozptylu, který uvádí hodnoty v druhých mocninách jednotek, má směrodatná odchylka stejný rozměr jako dílčí hodnoty souboru. Její velikost je dána vztahem [4]:

$$s_x = \sqrt{s_x^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

kde  $s_x^2$  ... rozptyl hodnot  
 $\bar{x}$  ... aritmetický průměr  
 $n$  ... počet měření  
 $x_i$  ... hodnoty jednotlivých měření.

### 3.3.4 Variační koeficient

K bezrozměrnému charakterizování proměnlivosti znaku se v praxi používá variační koeficient  $v_x$ , který je podílem směrodatné odchylky a aritmetického průměru. Procentuálně ho lze vyjádřit následovně [4]:

$$v_x = \frac{s_x}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (4)$$

kde  $s_x$  ... směrodatná odchylka  
 $\bar{x}$  ... aritmetický průměr.

### 3.3.5 Normální (Gaussovo) rozdělení

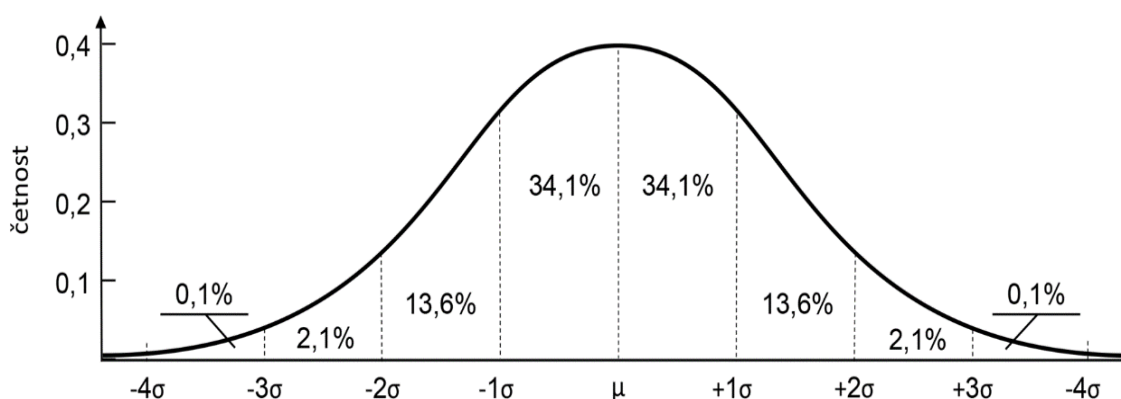
Experimentálně získaná hodnota může nabývat jakékoli hodnoty v určitém intervalu na základě konkrétní zákonitosti. Tento jev je popisován jako náhodná veličina, která může být spojitá nebo diskrétní. Měření je obecně považováno za spojitou náhodnou veličinu, u níž se pole rozptylu rozloží na 10 až 14 tříd, pro které se určují jednotlivé četnosti. Posloupnost těchto četností lze popsat frekvenční funkcí. Převážná většina náhodných veličin se řídí normálním rozdělením. Jedná se o rozdělení s jedním vrcholem symetrické okolo střední hodnoty, kterou u spojitých veličin značíme řeckým písmenem  $\mu$ . Druhým důležitým znakem je rozptyl značený symbolem  $\sigma^2$ . Graficky se vykresluje pomocí tzv. Gaussovy křivky, která je popsána frekvenční funkcí ve tvaru [6], [37]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(x_i - \mu)}{2 \cdot \sigma^2}} \quad (5)$$

kde  $f(x)$  ... frekvenční funkce  
 $\sigma$  ... směrodatná odchylka základního souboru  
 $\mu$  ... střední hodnota základního souboru  
 $\sigma^2$  ... rozptyl základního souboru  
 $x_i$  ... výsledky měření.



Obecný tvar křivky znázorňující hustotu normálního rozdělení (Obr 7) ukazuje, že při normálním rozdělení budou jednotlivá opakování náhodného jevu nejčastěji vycházet v okolí střední hodnoty. Symetrická konstrukce funkce říká, že zhruba stejně tak často jako budou naměřené hodnoty vychýlené pod střední hodnotou, tak budou naměřené i hodnoty vychýlené nad střední hodnotou. Rozptyl určuje, jak těsně se naměřená data blíží střední hodnotě, tedy jak moc strmá bude Gaussova křivka. V praxi platí pravidlo tří sigma, které popisuje rozdělení pravděpodobnosti dílčích výsledků v jednotlivých intervalech. V intervalu  $\langle \mu - \sigma, \mu + \sigma \rangle$  se výsledek měření nachází s pravděpodobností 68,27 %, v širším intervalu  $\langle \mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma \rangle$  s pravděpodobností 95,45 % a v nejobsáhlejším intervalu  $\langle \mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma \rangle$  s pravděpodobností 99,73 %. [9], [37], [47]



Obr 7) Normální rozdělení [47]

### 3.3.6 Odhady parametrů

Existují dva druhy odhadů a to bodový a intervalový. Bodovým odhadem se rozumí odhad parametrů základního souboru jednou hodnotou. Naopak u intervalového odhadu je vytvořen interval, ve kterém se s největší pravděpodobností nachází střední hodnota základního souboru. U základního souboru se stanoví bodový odhad střední hodnoty  $\mu$  stejně jako aritmetický průměr výběrového souboru [23]:

$$\mu = \bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (6)$$

kde  $\bar{x}$  ... aritmetický průměr výběrového souboru  
 $n$  ... počet měření  
 $x_i$  ... hodnoty jednotlivých měření.

Bodový odhad směrodatné odchylky  $\sigma$  je dán vztahem [23]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = s \cdot \sqrt{\frac{1}{n-1}} \quad (7)$$

kde  $\bar{x}$  ... aritmetický průměr  
 $n$  ... počet měření  
 $s$  ... směrodatná odchylka výběrového souboru  
 $x_i$  ... hodnoty jednotlivých měření.

Bodové odhady často bývají zatíženy chybou, protože různými výběry vznikají nepřesnosti. Je tedy nutné stanovit přesnost a těsnost těchto odhadů. K tomu slouží intervalové

odhady. Tyto odhady vytyčí pro konkrétní charakteristiku obor hodnot, ve kterém se odhadovaný parametr nachází se zadanou pravděpodobností. Velikost intervalů je závislá na rozsahu náhodného výběru. Čím je rozsah větší, tím je odhad skutečné hodnoty přesnější a spolehlivější. Středem intervalového odhadu je bodový odhad dané hodnoty, tedy výběrový průměr. Odhad spolehlivosti je symetrický a na obě strany je roven násobku směrodatné chyby odhadu. Interval spolehlivosti pro střední hodnotu  $\mu$  je dán vztahem [23]:

$$\bar{x} - u_p \cdot \frac{s}{\sqrt{n-1}} \leq \mu \leq \bar{x} + u_p \cdot \frac{s}{\sqrt{n-1}} \quad (8)$$

kde  $\bar{x}$  ... aritmetický průměr  
 $n$  ... počet měření  
 $s$  ... směrodatná odchylka výběrového souboru  
 $u_p$  ... násobek směrodatné odchylky, který je dán následující tabulkou:

Tab 1) Nejčastější intervaly spolehlivosti pro normální rozdělení [23]

Násobky směrodatné odchylky	Spolehlivost	Riziko zamítnutí
$\pm 1,960$	95,0 %	5,0 %
$\pm 2,576$	99,0 %	1,0 %
$\pm 3,291$	99,9 %	0,1 %

Intervalový odhad rozptylu  $\sigma$  lze popsat vztahem [22]:

$$\sqrt{\frac{n \cdot s^2}{X_{0,5-p}^2}} \leq \sigma \leq \sqrt{\frac{n \cdot s^2}{X_{1-0,5-p}^2}} \quad (9)$$

kde  $n$  ... počet měření  
 $s^2$  ... rozptyl výběrového souboru  
 $X_p^2$  ... P – kvantil Pearsonova rozdělení se stupněm volnosti  $n - 1$ . Kvantily tohoto rozdělení jsou součástí statistických tabulek.

### 3.3.7 Četnost

Pro statistické posuzování naměřených dat je důležitým znakem četnost jejich výskytu. Jedná se o počet prvků patřících do určitého intervalu. Četnost může být absolutní, relativní a kumulativní. V případě absolutní četnosti je pomocí absolutní hodnoty vyjádřena četnost zastoupení jednotlivých znaků v daném intervalu. Značí se  $n_i$ . Relativní četnost  $f_i$  určuje podíl zastoupení jednotlivých znaků v celém souboru a je dána vztahem [23]:

$$f_i = \frac{n_i}{n} \quad (10)$$

kde  $n$  ... počet měření  
 $n_i$  ... absolutní četnost.

Kumulativní četnost je rovna postupnému přičítání absolutní nebo relativní četnosti vzestupně upořádaného souboru. Pro její vyjádření je nezbytné určit optimální počet intervalů neboli tříd  $k$ . Tento počet je možné stanovit intuitivně nebo z velikosti rozpětí naměřených hodnot a jejich počtu. Obecně se dle počtu naměřených dat  $n$  rozdělují na tři případy [WW]:

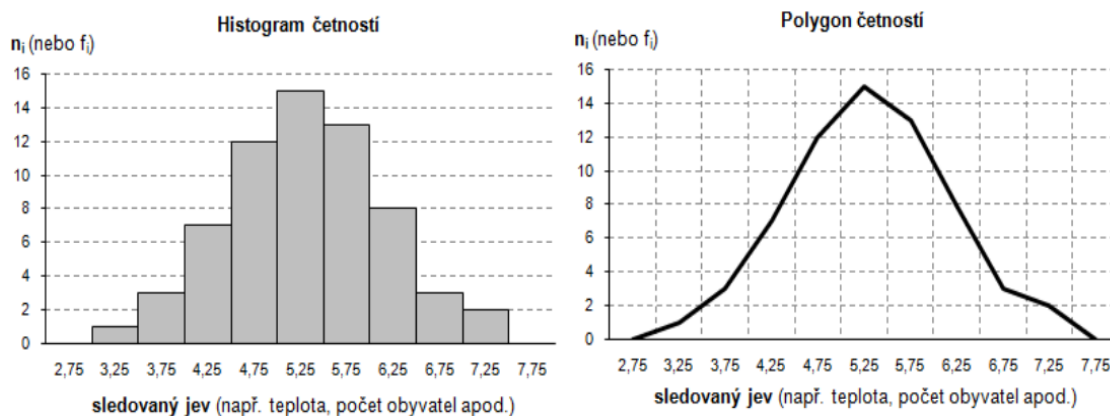
1. pro rozsah  $n > 100$  je  $k = 10 \cdot \log n$
2. pro rozsah  $40 < n \leq 100$  je  $k = 2 \cdot \sqrt{n}$
3. pro rozsah  $n \leq 40$  je  $k = 1 + 1,4426 \cdot \ln n$

Šířku  $h$  jednotlivých intervalů je možné popsat následujícím vzorcem [23]:

$$h = \frac{R}{k} \quad (11)$$

kde  $R$  ... rozpětí naměřených dat  
 $k$  ... počet tříd.

Pro přehlednější zobrazení četnosti je možné použít grafické znázornění v podobě histogramu, polygonu nebo součtové čáry. Histogram (Obr 8a) je součtový graf, kde šířka jednoho sloupce je rovna šířce intervalu. Na vodorovnou osu se vynášejí jednotlivé intervaly a svislá osa zastupuje absolutní popř. relativní četnost. Histogram pro absolutní četnost má stejný tvar jako pro relativní četnost. Je možné z něho vyčíst rozložení hodnot ve statistickém souboru a jejich rozložení okolo střední hodnoty. Obdobou histogramu je polygon, liší se pouze typem grafu. V případě polygonu je graf spojnicový, viz Obr 8b). Pro znázornění kumulativní četnosti se používá součtová čára. Jednotlivé hodnoty kumulativních četností se vynášejí na horní hranici tříd. Nakonec se tyto body propojí lomenou čarou. [WW]



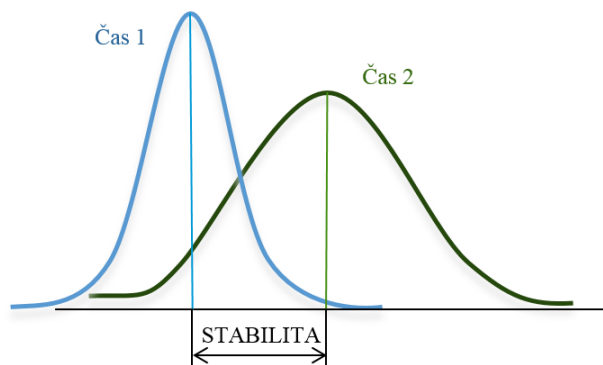
Obr 8) Grafické zobrazení četností a) histogram, b) polygon [23]

### 3.4 Přesnost měření

Variabilita měření je běžně používaný pojem pro klasifikaci rozdělení pravděpodobnosti, která popisuje rozdíly vzdáleností mezi jednotlivými naměřenými hodnotami anebo vzdálenost od střední hodnoty. Proměnlivost libovolného systému se popisuje statistickými charakteristikami dvou veličin, a to polohy a šířky. Z poloh jednotlivých naměřených hodnot se určuje stabilita, strannost a linearita, které se zjišťují porovnáním s etalony či o řád přesnějšími zařízeními. Naopak ze šířek vyplývají vlastnosti jako jsou opakovatelnost a reprodukovatelnost. Celkový důsledek všech možných nejistot měření je označován jako chyba měření. [44]

#### 3.4.1 Stabilita

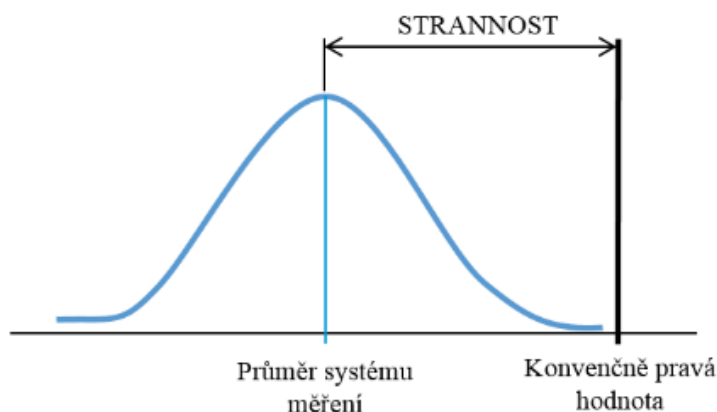
Pod pojmem stabilita se skrývá souhrnná rozdílnost naměřených dat jednoho znaku od stejného operátora na tomtéž vzorovém kusu. Pro přesnější a prokazatelnější určení je vhodné stabilitu sledovat v delším časovém úseku. Vyhodnocení při normálním rozdělení znázorňuje Obr 9). [44]



Obr 9) Stabilita systému měření [44]

### 3.4.2 Strannost

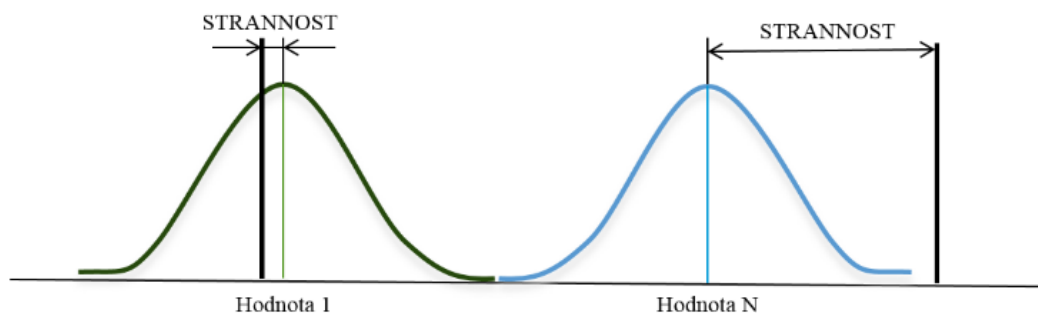
Strannost procesu je rozsah systematické chyby, která je popsána na straně 28. Jedná se o rozdíl mezi konvenčně pravou hodnotou a hodnotou vzniklou zprůměrováním skutečných dat. Podobně jako u stability je kontrolován pouze jeden atribut na tomtéž dílu. Často se objevuje u opotřebovaného či nekalibrovaného měřicího zařízení. Rozpoznatelnou změnu vyvolává i samostatné okolí a s ním spojená změna teploty, vlhkosti či vibrací. Graficky ji lze znázornit dle Obr 10). [Z]



Obr 10) Strannost systému měření [44]

### 3.4.3 Linearita

Další vlastností, úzce spojenou se systematickou chybou, je linearita (Obr 11). V literatuře je popsána jako rozdílnost strannosti v předpokládaném pracovním rozsahu měřicího přístroje. Jádrem analýzy je výběr dat v celém rozsahu měřidla, které se porovnávají



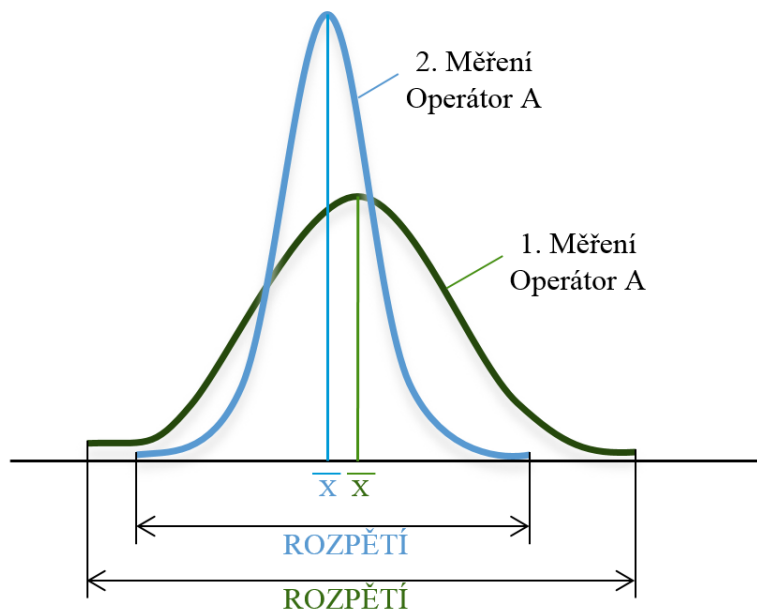
Obr 11) Linearita měřicího systému [44]

s konkrétně pravou hodnotou. Stane-li se, že je měřidlo klasifikováno jako nelineární. Zpravidla to může zavinit hned několik faktorů, jako jsou chybný vzorek, opotřebením měřidla a kalibrace, která není provedena pro celý rozsah přístroje. [44]

### 3.4.4 Opakovatelnost

Rozměrnost shody výsledků mezi jednotlivými po sobě jdoucími měřeními jedné veličiny za stejných podmínek se v literatuře uvádí pod pojmem opakovatelnost měření. Pro korektní určení opakovatelnosti musí být splněno několik následujících podmínek: shodný postup měření, opakování během malé časové periody, totožné místo, totožný pozorovatel a tentýž měřicí přístroj. [6], [7]

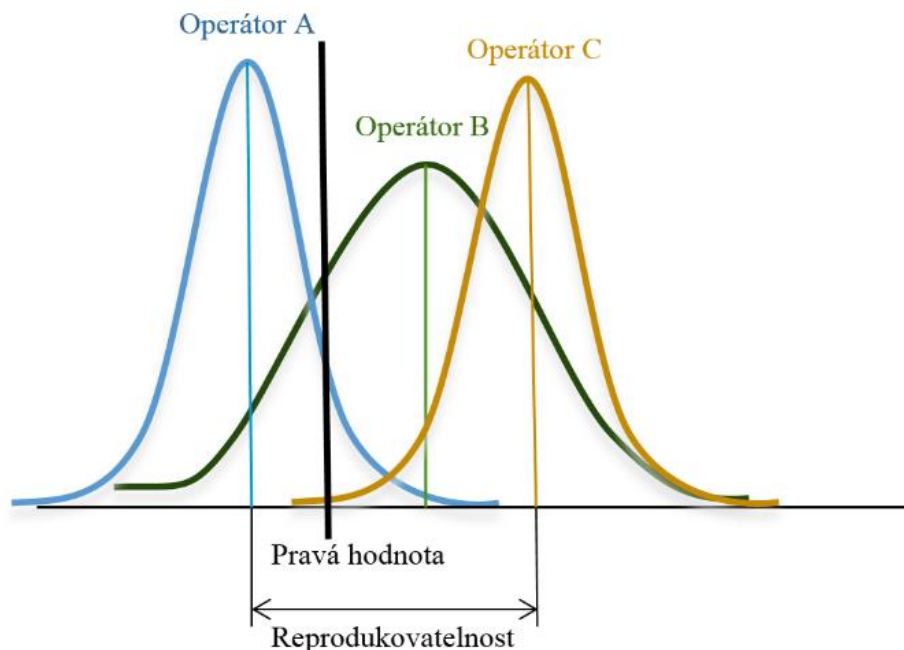
Početně jí lze vyjádřit charakteristikami rozptylu, konkrétně pomocí rozpětí a směrodatné odchylky. Těmito charakteristikami garantují výrobci hodnoty nejistoty u konkrétních měřidel. Velmi důležité je uvést, o kterou z charakteristik se jedná. Geometrické zobrazení je na Obr 12). [6]



Obr 12) Opakovatelnost měření [5]

### 3.4.5 Reprodukovatelnost

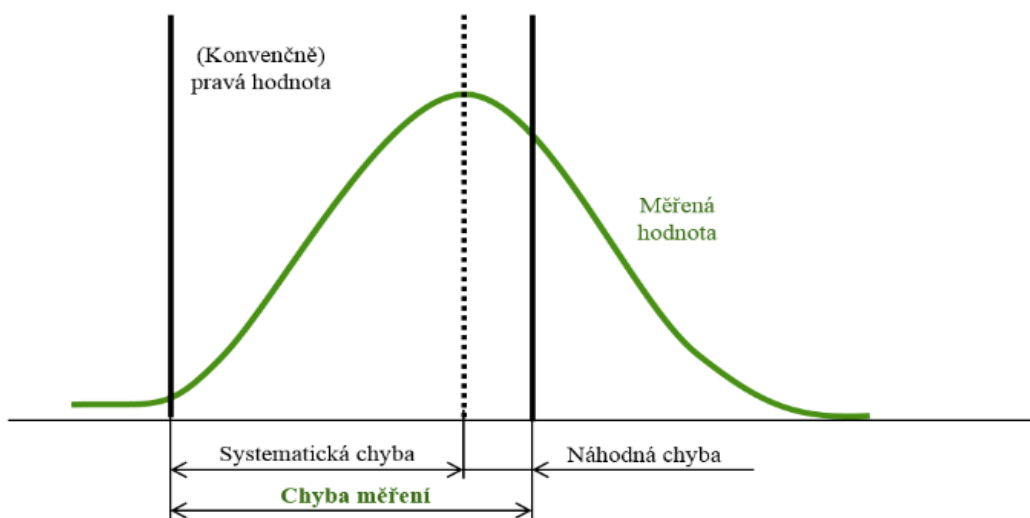
Těsnost shody mezi výsledky měření jedné veličiny při změně podmínek je pojmenována jako reprodukovatelnost. Mezi změny okolností lze zahrnout použití odlišné měřicí metody nebo různého typu přístroje či jiného operátora na odlišném místě v jiný čas a při rozdílných podmínkách. Početní vyjádření reprodukovatelnosti (Obr 13) je shodné se statickým posouzením opakovatelnosti, viz výše. [6], [7]



Obr 13) Reprodukovatelnost měření [5]

### 3.5 Chyby měření

Měřicí a kontrolní prostředky umožňují realizaci příslušného měření s cílem určení hodnoty zkoumané veličiny. Získávání hodnot měření nikdy neprobíhá naprosto ideálně. Vždy je zatíženo chybou, a tak nelze stanovit zcela přesnou hodnotu měřené veličiny. Při opakovaném přeměřování také zjišťujeme vzájemnou odlišnost naměřených rozměrů. Chyby lze klasifikovat podle několika vlastností, například dle časové závislosti je dělíme na statické a dynamické. Statické znamená, že se v průběhu času nemění, jsou tedy konstantní. Naopak u dynamických v průběhu časového intervalu dochází ke změně. Dále je dle možnosti eliminace členíme na odstranitelné a neodstranitelné. A dle možnosti výskytu na náhodné, systematické a chyby hrubé. Celková chyba složená z chyby náhodné a systematické je na Obr 14). [5], [6], [40]



Obr 14) Grafické vyjádření chyby měření [5]

### 3.5.1 Absolutní a relativní chyby

Rozdílem mezi skutečnou hodnotou a operátorem naměřenou je označována absolutní chyba měření  $\Delta$ , kterou definujeme vztahem [6]:

$$\Delta = x_m - x_p \quad (12)$$

kde  $x_m$  ... naměřená hodnota  
 $x_p$  ... (konvenční) pravá hodnota.

Relativní chyba  $\Delta_r$  je vyjádřena jako vzájemný poměr absolutní chyby měření a skutečné hodnoty zkoumané veličiny je vyjádřena vztahem [6]:

$$\Delta_r = \frac{x_m - x_p}{x_p} \quad (13)$$

kde  $x_m$  ... naměřená hodnota  
 $x_p$  ... (konvenční) pravá hodnota.

### 3.5.2 Náhodné chyby

Mezi náhodné chyby zahrnujeme odchylky měření zapříčiněné náhodným faktorem. Objevují se při každém jednotlivém měření. Jedno měření je pro odhalení přítomnosti náhodné chyby neprokazatelné, a proto musíme použít větší soubor zaznamenaných korigovaných hodnot. Poté lze určit velikost náhodné chyby za pomoci intervalu, ve kterém se bude s určitou pravděpodobností nacházet skutečná hodnota studované veličiny. Mezi obecné vlastnosti náhodných chyb platí dvě zákonitosti a to, že malé chyby jsou častější než velké a chyby kladné jsou stejně četné jako záporné. [6], [40]

Ve strojírenství jsou náhodné chyby nejčastěji posuzovány podle Gaussova rozdělení pravděpodobnosti výskytu. V intervalu  $(-\infty, \infty)$  nabývá normální náhodná veličina pravděpodobnosti četnosti výskytu dle vztahu [6], [40]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x_i - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}} \quad (14)$$

kde  $\sigma$  ... směrodatná odchylka  
 $x_i$  ... dílčí veličina  
 $\mu$  ... střední hodnota.

Náhodné chyby lze eliminovat pomocí většího počtu opakování. Největší hodnota náhodné chyby je maximálně rovna  $\pm 3s$  (směrodatné odchylky). Pokud ji chceme snížit, tak opakujeme měření  $n$ -krát za předpokladu opakovatelnosti a výsledkem měření určíme aritmetický průměr. Této hodnotě vypočteme střední hodnotu a směrodatnou odchylku a z té určíme směrodatnou odchylku aritmetického průměru  $s_{\bar{x}}$  dle vztahu [28], [40]:

$$s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} \quad (15)$$

kde  $s_x$  ... směrodatná odchylka jedné naměřené hodnoty  
 $n$  ... počet měření.

### 3.5.3 Systematické chyby

Tato podskupina zahrnuje chyby, které se objevují soustavně během celého procesu měření. Jejich působení lze vydedukovat pomocí změny podmínek měření, např. použití jiného přístroje, jiným operátorem a při různých podmínkách. V podstatě se jedná o střední hodnotu

odvozenou z nekonečného opakování měření téže veličiny poníženu o pravou hodnotu dané veličiny. Poté celkovou chybu  $\Delta_c$  měření lze určit podle vzorce [6], [40]:

$$\Delta_c = \Delta_s + \delta \quad (16)$$

kde  $\Delta_s$  ... systematická chyba  
 $\delta$  ... náhodná chyba.

Podle poznatelnosti je můžeme rozdělit do dvou skupin, na zjistitelné a neznámé. Zjistitelné disponují přesnou hodnotou včetně znaménka a běžně se využívají ke korekci měřené hodnoty. Naopak neznámé nevládní znaménko a nemají konkrétní hodnotu, nelze je tedy použít ke korekcím a přistupuje se k nim jako k chybám náhodným. Dále je dle příčiny výskytu je možné rozčlenit na chyby měřidla, chyby měřící metody, osobní chyby a chyby způsobené vlivem okolí. Defekty samostatného měřidla vznikají už při výrobě, ale také během činnosti a opakovaného používání. Hlavními příčinami jsou nepřesnosti výroby dílčích funkčních částí, nesprávnost montáže a změna podmínek při používání. Odhalují se kalibrací nebo ověřováním. Mezi chyby měřící metody patří především nesprávná volba měřící techniky, např. nesprávné upnutí součásti na směr měření nebo vliv přítlačné síly či deformace. Chyby osobní jsou odvozeny od operátora provádějícího měření, jsou dány nevědomostí, nepozorností, neopatrností a nedokonalostí lidských smyslů. Chyby ovlivněné prostředím zahrnují vlivy jako jsou teplota, prašnost, vlhkost, tlak, osvětlení atd. [40]

Systematické chyby je možné eliminovat pomocí tzv. korekce. Jedná se o algebraickou hodnotu připočtenou k výsledku měření za účelem kompenzace systematické chyby. Velikost korekce je shodná s velikostí systematické chyby, liší se pouze opačným znaménkem. [6]

Většinový podíl laboratorních měření se provádí při pokojové teplotě, proto je nutné zahrnout chybu způsobenou teplotním výkyvem. Teplotní chyba je zapříčiněná rozdílem mezi teplotou při měření a referenční teplotou, která je konvencí stanovená na 20 °C. Teplotní výchyly mají vliv na preciznost a správnost měření přímo i nepřímo pomocí ovlivněného tlaku a vlhkosti vzduchu. Systematickou teplotní chybu  $\varepsilon_{ST}$  lze vyjádřit vztahem [40]:

$$\varepsilon_{ST} = \alpha \cdot L \cdot (T - T_0) \quad (17)$$

kde  $\alpha$  ... koeficient délkové roztažnosti  
 $T$  ... teplota, při které bylo realizováno měření  
 $T_0$  ... referenční teplota  $T_0 = 20$  °C  
 $L$  ... naměřený délkový rozměr.

### 3.5.4 Hrubé chyby

Největších omylů při měření a zpracování dat se dopouští obsluha provádějící měření. Nečastějšími příčinami jsou mylný odečet údaje, nesprávný způsob zpracování, vada přístroje, chybná manipulace s přístrojem atd. Získané hodnoty zatížené hrubou chybou jsou dále nepoužitelné a ze souboru naměřených hodnot se vylučují. Ve vyhodnocování naměřených dat nelze pokračovat, dokud nedojde k odstranění všech hrubých chyb. V laboratoři platí zásada, že dobrý metrolog by neměl způsobit hrubou chybu. [6], [40]



### 3.6 Nejistoty měření

Pojem nejistoty měření je zaváděn z důvodu určení parametru posuzování hodnot v intervalu okolo výsledku měření. Parametr je odůvodněný a může se týkat jak samostatného měření, tak i hodnot odečtených z přístrojů, konstant nebo korekcí, na kterých výsledná hodnota závisí. Výsledek měření musí obsahovat informace o odhalených nejistotách, které by měly být dále specifikovány pomocí charakteristiky výpočtu a použitých parametrů. V protokolu by měly být uvedené odkazy i na normativní dokumenty. Číselné údaje nejistot se zaokrouhlují na dvě desetinná místa. Určování nejistot měření vychází z predikované pravděpodobnosti pokrytí skutečné hodnoty nejistotou měření. Pokud se výše nejistoty určuje pomocí směrodatné odchylky, jedná se o standartní nejistotu. Standartní nejistoty dělíme na nejistoty typu A a typu B. [28], [40], [43]

#### 3.6.1 Standartní nejistota typu A

Nejistoty tohoto typu bývají způsobené náhodnými jevy, které jsou způsobené neznámými příčinami. Získávají se z opakovaných měření za konstantních podmínek. Se zvyšujícím počtem opakování se zmenšují. Současné softwary dokáží zpracovat obrovské množství naměřených dat a tím do značné míry snížit nejistotu měření typu A. U nezávislých naměřených dat se nejistota váže na výběrový průměr a získáme ji shodným výpočtem jako směrodatnou odchylku, ze vztahu [43]:

$$u_A = s_x \quad (18)$$

kde  $u_A$  ... standartní nejistota typu A  
 $s_x$  ... směrodatná odchylka.

Je-li počet měření menší než deset, pak není tato metoda dostatečně spolehlivá. Pro přiblížení se dané hodnotě lze použít korigovanou nejistotu  $u_{AK}$ , kterou dostaneme ze vzorce [43]:

$$u_{AK} = k \cdot s_{\bar{x}} \quad (19)$$

kde  $s_x$  ... směrodatná odchylka  
 $k$  ... koeficient vázaný na počet měření, který se určí z tabulky Tab 2).  
Při větším počtu měření  $n \geq 10$  je koeficient  $k = 1$ .

Tab 2) Hodnoty korekčních koeficientů pro různé počty opakování [43]

n	9	8	7	6	5	4	3	2
k	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,7	2,3	7,0

#### 3.6.2 Standartní nejistota typu B

Nastává v momentě, kdy je odhad vstupní veličiny vymezen jinak než za pomoci statistického zpracování naměřených údajů. Odhalení a eliminace této nejistoty se provádí za předpokladu znalostí všech dosažitelných informací ohledně variability odhadu. Předně se používají informace od výrobce měřícího přístroje, dále pak data z předchozích měření, informace obdržené z kalibrace a certifikace a hodnoty referenčních nejistot uváděné v příručkách. Pro výpočet celkové nejistoty B jsou využívány parciální nejistoty dílčích zdrojů. Pro spolehlivý výpočet je důležité vytyčit všechny možné zdroje chyb s jejich maximálními odchylkami, odhadnout rozdělení pravděpodobnosti a přiřadit jim interval, ve kterém měření ovlivňují. Dílčí nejistoty  $u_z$  lze vypočítat následovně [43]:

$$u_z = \frac{Z_{max}}{m} \quad (20)$$

kde  $Z_{max}$  ... maximální odchylka dílčí nejistoty  
 $m$  ... součinitel odpovídající druhu rozdělení, které bylo příslušnému zdroji nejistoty přiděleno ( $m = 2$  pro normální rozdělení,  $m = 1,73$  pro trojúhelníkové a  $m = 2,45$  pro rovnoměrné).

Celkovou nejistotu typu B ( $u_B$ ) získáme odmocněním sumy součinitelů jednotlivých parciálních nejistot, tedy ze vztahu [43]:

$$u_B = \sqrt{\sum_{j=1}^n u_{zj}^2} \quad (15)$$

kde  $u_z$  ... dílčí nejistota  
 $n$  ... počet zdrojů dílčích nejistot.

### 3.6.3 Kombinovaná standartní nejistota

V reálném světě jen těžko nalezneme případ, ve kterém by bylo měření ovlivněno pouze jedním typem nejistot, proto vznikla tzv. kombinovaná nejistota  $u_C$ , která popisuje výsledný dopad nejistot. Jedná se o míru nejistoty výsledku získaného z celé řady dalších veličin a stanoví se jako druhá odmocnina součtu druhých mocnin standartních nejistot A a B [43]:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (16)$$

kde  $u_A$  ... standartní nejistota typu A  
 $u_B$  ... standartní nejistota typu B.

### 3.6.4 Rozšířená standartní nejistota

Nevystačíme-li si při určování nejistot s nejistotou standartní, je možné ji rozšířit o korekční koeficient  $k_r$ . Rozšířenou standartní nejistotu  $u_r$  pro libovolnou pravděpodobnost dostaneme ze vzorce [43]:

$$u_r = k_r \cdot u_C \quad (17)$$

kde  $k_r$  ... korekční koeficient  
 $u_C$  ... kombinovaná standartní nejistota.

Udává se u řešení, která jsou zatížena velkou spolehlivostí. Naměřená veličina se bude nacházet v intervalu  $\langle x - u_r, x + u_r \rangle$ , který vymezuje nejistotu kolem hodnoty  $x$ . Jde tedy o určení intervalu spolehlivosti pro zvolenou pravděpodobnost. Hodnotu korekčního koeficientu lze uvést dle konvence nebo výpočtem z naměřených dat poskytnutých měřicím technikem. Konvenční hodnoty najdeme v technických normách a předpisech. [40], [43]



## 4 SYSTÉMOVÁ ANALÝZA

Pro kontrolu ve velkosériové a hromadné výrobě je stěžejní zajištění bezpečné identifikace charakteristických znaků výrobků se zřetelem k toleranci jako OK (uvnitř přípustné odchylky) nebo NOK (vně specifikace). Mimo odlišností měřených dat, které jsou způsobeny vlastním výrobním procesem, zahrnuje měření i odchylky zapříčiněné samostatnou technikou měření. Tyto měřené nuance vnáší stín nejistoty nejenom na výsledky měření, ale i na rozhodnutí ve sféře kontroly. Jsou považovány za akceptovatelné jenom v případě adekvátního poměru k přípustné odchylce. [42]

### 4.1 Analýza příčin a následků

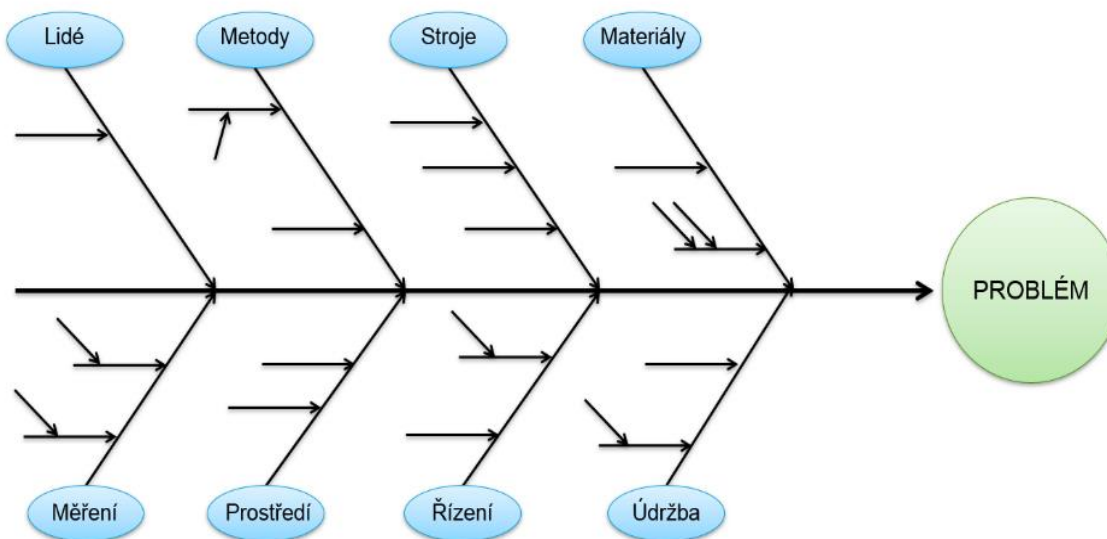
Souvislosti mezi zkoumaným problémem a jeho nejpravděpodobnějšími příčinami graficky znázorňuje Ishikawův diagram známý také jako diagram rybí kost. Název přejal od svého autora Kaora Ishikawa, který se v roce 1915 narodil v Japonsku. Na Tokijské univerzitě získal titul inženýra aplikované chemie a o několik let později titul profesor. Během svého života pracoval u námořnictva a poté ve společnosti Nissan Liquid Fuel Company, kde se zabýval dlouhodobějším zlepšováním kvality vyráběných kusů. Jeho přístup řízení kvality zahrnoval zákaznický servis a neustálé zdokonalování. [10], [16], [25]

Ishikawův diagram je jedním z nástrojů kvality, který vychází z předpokladu, že každý problém má svou příčinu nebo kombinaci příčin. K sestavení je možné použít speciální software (př. Minitab) nebo obyčejný papír a tužku. Stěžejním místem je zkoumaný problém, ke kterému směřují všechny možné zdroje nejistot rozdělených do následujících kategorií známých pod označením 8M. [25]

- Man power (chyby samostatných operátorů)
- Methods (příčiny zaviněné zvolením nevhodné metody, směrnice, norem atd.)
- Machines (nejistoty strojních zařízení, nářadí či počítačů)
- Materials (vady či nepatřičné vlastnosti materiálu)
- Measurements (nejistoty špatně zvoleného postupu měření a měřidla)
- Mother nature (chyby zahrnující vliv okolí)
- Management (nevhodné řízení)
- Maintenance (důsledky nesprávné a nepravidelné údržby)

Ke konstrukci diagramu je používán jednoznačný postup, zobrazený na Obr 15). Jelikož se jedná o skupinovou metodu, tak jsou nejdříve vybráni členové řešícího týmu. V týmu by měli být zástupci různých oddělení ve firmě. Na pravý konec velké šipky, která znázorňuje páteř ryby, nadefinuje řešený problém. Dále jsou identifikovány hlavní kategorie problému, ke kterým se za pomoci brainstormingu přiřadí všechny možné příčiny a subpříčiny jejich vzniku. Každý člen týmu dle svého uvážení oboduje jednotlivé příčiny. Všechny zaznamenané možnosti se vyhodnotí a vyberou se ty nejpravděpodobnější, které mají nejvyšší počet bodů. Dle Paretova principu způsobuje problém jen pár nejpravděpodobnějších příčin a právě ty se skupina lidí snaží najít. Jednotlivé zdroje nejistot zapisujeme stručně a heslovitě. Pokud se některá z příčin váže k více kategoriím je vhodné ji uvést ve všech dotýcných větvích. Na základě této analýzy jsou stanoveny přesné úkony k odstranění chyb. Jestliže se problém

dále nevyskytuje byla objevena pravá příčina. Pokud se řešený problém objeví znovu, je nevyhnutelné hledání nových příčin. [10], [25]



Obr 15) Ishikawův diagram příčin a následků [25]

## 4.2 Analýza systému měření (MSA)

Většina firem v automobilovém průmyslu ke zhodnocení správnosti a vhodnosti zvoleného měřicího postupu používá analytickou metodu MSA, která je přímo vázána na naměřená data. Kompletní popisy a dílčí postupy této analýzy uvádí Česká společnost pro jakost v příručce s názvem Analýza systému měření. Definuje spoustu nových pojmů (viz Tab 3), které vycházejí ze základních statistických definic uvedených ve druhé kapitole. Jedním z těchto pojmů je tzv. variabilita. Nejedná se přímo o statistický pojem popsany v příslušných normách, ale pouze o běžně používaný výraz. V podstatě je tímto pojmem vyjadřována proměnlivost naměřených dat. Pomocí variability se dají srozumitelněji vyjádřit nejistoty, které do systému měření vnášejí jednotlivé faktory, především člověk, zařízení a měřený kus. Celá studie MSA vychází z normálního rozdělení za předpokladu, že většina naměřených dat se nachází z 99 % pod Gaussovou křivkou, z tohoto tvrzení je odvozena číselná konstanta 5,15. [44]

Tab 3) Pojmy studie MSA [44]

Zkratka	Anglický výraz	Překlad
EV	Equipment Variation	Reprodukovatelnost zařízení
AV	Appraiser Variation	Opakovatelnost operátora
TV	Total Variation	Celková variabilita
PV	Part Variation	Variabilita vzorků
R&R	Repeatability & Reproducibility	Opakovatelnost a reprodukovatelnost
GRR	Gauge Repeatability & Reproducibility	Míra opakovatelnosti a reprodukovatelnosti

Za pomoci této studie lze bezchybně odlišit dobrý díl od zmetkovitého. Nejdůležitějším výchozím parametrem posuzování je kvalita naměřených dat, která vyplývá ze statistických charakteristik opakovaných měření při stabilních podmínkách. Pohybují-li se veškerá zaznamenaná měření v těsné blízkosti skutečné hodnoty, je možné jakost měření považovat za vysokou. Naopak, pohybují-li se všechna nebo alespoň některá měření v širším okruhu od reálného rozměru je možné říci, že jakost naměřených dat je nízká. Pokud bude kvalita měřených hodnot nízká, je nezbytné očekávat i malý přínos aplikované analýzy. [25], [31], [44]

Prvním parametrem, který musí být dobře zajištěn je rozhodnutí, zda je měřena správná veličina dle stanoveného návrhu řešení. Jsou-li použity měřicí přípravky a upínací prvky, je nutné je předem ověřit. Následně je nezbytné identifikovat veškeré kritické situace spjaté s prostředím, ve kterém měření probíhá. Samostatná činnost musí odpovídat statistickým vlastnostem jako jsou linearita, strannost, reprodukovatelnost a opakovatelnost. Celkový proces musí splňovat uvedené náležitosti v průběhu času. Následuje fáze plánování experimentu, stanoví se počet operátorů, počet dílů a počet opakování měření. Při určování jednotlivých počtů by měl být brán ohled na kritičnost rozměrů. Čím kritičtější je určovaný rozměr, tím větší by mělo být množství kusů a pokusů. V ideálním případě studii vykonává běžná obsluha stroje a měření se provádí v náhodném pořadí. [31]

Pomocí této studie může být zhodnoceno nejenom samostatné měřidlo, ale i celý měřicí systém. Metoda vychází z analýzy nejistot objevujících se během celého procesu měření, protože kromě samostatného přesného měřidla výsledky ovlivňuje spousta jiných ukazatelů, jako je prostředí, lidský faktor či materiál, a proto je nutné považovat celý postup měření za celek. Cílem je zjistit vliv jednotlivých nežádoucích vlivů na proměnlivost výsledků. Pro správný chod analýzy musí být zajištěna stabilita procesu. Existují tři závažné chyby, které mohou analýzu významně znehodnotit. Nejčastější je chyba sestavení, která zahrnuje nesprávné upnutí, špatné zavedení sondy či chybné nastavení softwaru. Tyto nedostatky se projeví vysokou variabilitou měření nebo nedostatečnou opakovatelností. Následně je nutné provést kontrolu sestavení a softwaru. Druhým frekventovaným nedostatkem je chyba polohy, která vyjde najevo z rozboru linearit a stranností. Jedná se o nepřijatelné pochybení a je nutné provést opakované ověření měřidla či uplatnit korekci měření. Závěrečnou skupinou je chyba šíře, která musí odpovídat určitému procentuálnímu zastoupení variability výrobního procesu. Před aplikací musí být hraniční kritéria schválena zákazníkem. [25], [31], [44]

MSA je možné určit třemi metodami, a to metodou založenou pouze na rozpětí nebo metodikou zahrnující rozpětí i opakovatelnost anebo postupem vycházejícím z rozsahu měření. Pro všechny uvedené postupy vyhodnocení analýzy procesu měření vchází v platnost následující tabulka. [31], [44]

Tab 4) Přijatelnost systému měření [31], [44]

Míra opakovatelnosti a reprodukovatelnosti (GRR)	Přijatelnost
< 10 %	postup měření je přijatelný
10 % < GRR < 30 %	postup může být přijatelný dle významnosti aplikace, nákladů na měřidlo, nákladů na opravy apod.
> 30 %	postup je nepřijatelný a je nutné ho zlepšit

#### 4.2.1 Metoda rozpětí

Prvním nástrojem pro zjištění akceptovatelnosti měřícího zařízení je metoda založená na rozpětí, která umožňuje rychlou aproximaci variability výsledků. Dva operátoři měří dvakrát pět vzorků. Rozpětí jednotlivých kusů je rovno absolutní hodnotě rozdílu průměrného měření operátora A a průměrného měření operátora B. Průměrné rozpětí  $\bar{R}$  se určí následovně [44]:

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{5} \quad (26)$$

kde  $R_i$  ... dílčí rozpětí měření.

Míra opakovatelnosti a reprodukovatelnosti GRR v procentech je pak vyjádřena následující rovnicí [31], [44]:

$$GRR = \frac{5,15 \cdot \bar{R}}{d_2^*} \cdot 100 \quad (27)$$

kde  $\bar{R}$  ... průměrné rozpětí  
 $d_2^*$  ... konstanta pro výpočet směrodatné odchylky, kterou získáme z tabulky v příloze 1 pro počet dvou operátorů  $m = 2$  a pěti kusů  $g = 5$ .

#### 4.2.2 Metoda průměrů a rozpětí

MSA zahrnuje základní statistické techniky a velmi značný důraz klade na ukazatele, opakovatelnost a reprodukovatelnost, které jsou též známé pod zkratkou R&R. Jedná se o matematickou metodu, pomocí které se určí odhad opakovatelnosti a reprodukovatelnosti. Nevýhodou této metodiky je, že nedokáže vyjádřit vzájemnou interakci mezi nimi. [44]

Pro vyhodnocení metody průměru a rozpětí je při optimálních podmínkách zapotřebí tří operátorů a deset vzorků měřeného dílu. Pro konkrétní případ se mohou tyto dva počty lišit. Operátorům jsou přiřazeny písmena A, B a C, vzorky se označí čísla od jedné do deseti. Tato identifikace by měla být viditelná pouze pro pozorovatele, který naměřené výsledky zapisuje nikoli pro operátory, jelikož by mohlo dojít k ovlivnění samostatného měření. Kalibrace měřidla se provádí pouze v případě, jeli součástí měřícího plánu. Pokud není, tak jí operátor neprovádí. Nejdříve operátor A změří všech deset kusů v náhodném pořadí, poté je změří operátor B a C. Naměřená čísla jsou pozorovatelem zapsána do záznamového archu, který je uveden v příloze 2. Tento cyklus se opakuje ještě dvakrát s rozdílným pořadím měřených dílů. Pokud nejsou k dispozici tři operátoři zároveň, je možné použít alternativní postup. Operátor A změří deset kusů v náhodném pořadí a poté měření dvakrát opakuje vždy s jiným pořadím vzorků. Zbývající dva lidé to učiní totéž. [44]

Získaná data mohou být zpracována graficky nebo numericky. K numerickému zhodnocení slouží již odkazovaný formulář v příloze 2. V jednotlivých řádcích se odečte nejmenší hodnota od největší. Výsledky se vepíší do sloupců určených pro rozpětí jednotlivých měření stejného kusu konkrétního operátora. Tyto dílčí rozpětí se sečtou a vydělí počtem kusů. Do tabulky se tato hodnota zaznamená jako průměrné rozpětí jednotlivých operátorů, označené  $\bar{R}_A$ ,  $\bar{R}_B$  a  $\bar{R}_C$ . Průměr všech průměrných rozpětí  $\bar{\bar{R}}$  se stanoví dle následujícího vztahu [44]:

$$\bar{\bar{R}} = \frac{\bar{R}_A + \bar{R}_B + \bar{R}_C}{r} \quad (28)$$

kde  $r$  ... počet operátorů  
 $\bar{R}_A$  ... průměrné rozpětí měření operátora A

$\bar{R}_B$  ... průměrné rozpětí měření operátora B  
 $\bar{R}_C$  ... průměrné rozpětí měření operátora C.

Rozpětí naměřených dat lze regulovat pomocí horní a dolní regulační meze, ty dostaneme vynásobením průměrného rozpětí příslušnými konstantami, které určuje následující tabulka. [44]

Tab 5) Konstanty regulačních mezí pro metodu R&R [44]

Počet opakování	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>
2	0	3,267
3	0	2,575
4	0	2,282
5	0	2,115
6	0	2,004
7	0,076	1,924
8	0,136	1,864
9	0,184	1,816
10	0,223	1,777

Horní regulační mez  $UCL_R$  je určena vzorcem [44]:

$$UCL_R = D_4 \cdot \bar{R} \quad (29)$$

kde  $D_4$  ... koeficient pro určení horní regulační meze  
 $\bar{R}$  ... průměr všech rozpětí.

Vzorec pro dolní regulační  $LCL_R$  mez je [44]:

$$LCL_R = D_3 \cdot \bar{R} \quad (30)$$

kde  $D_3$  ... koeficient pro určení dolní regulační meze  
 $\bar{R}$  ... průměr všech rozpětí.

Jsou-li některá rozpětí větší než vypočtená horní regulační mez, měla by být tato měření opakována příslušným operátorem na patřičném vzorku. Jednodušší alternativa dovoluje tyto rozpětí vyřadit a znovu přepočítat odpovídající proměnné, ale než se tak stane, je nutné odstranit příčiny způsobující neregulovaný stav. [44]

Průměrné hodnoty jednotlivých kusů jsou vyjádřeny jako podíly součtu příslušných měření od všech operátorů a celkového počtu měření toho daného kusu. Při optimálních podmínkách je každý kus měřen devětkrát. Průměry kusů se zaznamenávají do příslušného sloupečku po pravé straně protokolu. Průměry operátora (označené  $\bar{X}_A, \bar{X}_B$  a  $\bar{X}_C$ ) se určují podílem součtu všech naměřených hodnot daného operátora a počtem všech měření téhož operátora. Při stejných podmínkách každý člověk provede třicet měření. [44]

Následně se vyjádří celkový průměr kusů jako podíl součtu průměrů operátorů a počtu lidí, kteří měření realizovali. Další hodnotou potřebnou pro následující výpočty je rozdíl mezi největším a nejmenším průměrem operátorů označovaný  $X_{diff}$  (maximální diference operátorů). Poslední proměnnou, kterou lze získat přímo z naměřených hodnot, je  $R_p$  neboli



rozpětí průměrů kusů. Matematicky ho lze popsat jako rozdíl mezi maximálním a minimálním průměrem kusů. Analýza systému měření vychází z normálního rozdělení a všem složkám variability připisuje 5,15 násobek směrodatné odchylky, což je rovno 99 % plochy pod Gaussovou křivkou. [44]

Variabilita zařízení (EV) je totožná s opakovatelností měření dle rovnice [44]:

$$EV = \bar{R} \cdot K_1 \quad (31)$$

kde  $\bar{R}$  ... průměr všech rozpětí  
 $K_1$  ... konstanta závislá na počtu realizací.

Velikost konstanty  $K_1$  lze popsat následujícím vztahem [44]:

$$K_1 = \frac{5,15}{d_2^*} \quad (32)$$

kde  $d_2^*$  ... konstanta pro výpočet směrodatné odchylky z tabulky v příloze 1  
 5,15 ... je násobek směrodatné odchylky, který je roven 99 % plochy pod křivkou normálního rozdělení.

Variabilita operátora (AV) vychází z reprodukovatelnosti měření. Oproti ní je však zatížena i chybou zařízení, proto je nutný vzorec pro reprodukovatelnost upravit odečtením poměru variability zařízení. Variabilitu operátora lze aproximovat vztahem č.33. Je-li pod odmocninou záporná hodnota, pak je variabilita operátora nulová. [44]

$$AV = \sqrt{(\bar{X}_{diff} \cdot K_2)^2 - \frac{EV^2}{n \cdot r}} \quad (33)$$

kde  $\bar{X}_{diff}$  ... maximální rozpětí operátorů  
 EV ... variabilita zařízení  
 n ... počet kusů  
 r ... počet opakování  
 $K_2$  ... konstanta závislá na počtu realizací.

Velikost konstanty  $K_2$  lze popsat následujícím vztahem [44]:

$$K_2 = \frac{5,15}{d_2^*} \quad (34)$$

kde  $d_2^*$  ... konstanta pro výpočet směrodatné odchylky z tabulky v příloze 1  
 5,15 ... je násobek směrodatné odchylky, který je roven 99 % plochy pod křivkou normálního rozdělení.

Na základě opakovatelnosti a reprodukovatelnosti je variabilita celého systému (R&R) následující [44]:

$$R\&R = \sqrt{EV^2 + AV^2} \quad (35)$$

kde EV ... variabilita zařízení  
 AV ... variabilita operátora.

K posouzení rozdílů mezi naměřenými hodnotami na jednotlivých kusech poslouží rozpětí průměru měření operátorů a konstanta  $K_3$ , která je shodná s  $K_2$ . Variabilitu kusů (PV) pak udává vzorec [44]:

$$PV = R_p \cdot K_3 \quad (36)$$

kde  $R_p$  ... rozpětí průměru mezi operátory  
 $K_3$  ... konstanta závislá na počtu realizací,  $K_2 = K_3$ .

Celková odchylka (TV) měřených dat je rovna odmocnině součtu kvadrátů opakovatelnosti a reprodukovatelnosti a variability mezi kusy [44]:

$$TV = \sqrt{R\&R^2 + PV^2} \quad (37)$$

kde  $R\&R$  ... variabilita systému podle opakovatelnosti a reprodukovatelnosti  
 $PV$  ... variabilita mezi kusy.

Pro porovnání přijatelnosti daného systému měření dle tabulky č.4, je nutné všechny složky vyjádřit procentuálně vzhledem k celkové variabilitě. Jednotlivé složky se vynásobí výrazem  $\frac{100}{TV}$ . Součet jednotlivých dílčích variabilit nebude nikdy roven 100 %. Metoda rozpětí a opakovatelnosti je v práci důkladně popsána, protože bude použita ke kvalifikaci naměřených dat dle formuláře připojeného v příloze 2. [44]

### 4.2.3 Metoda rozptylu ANOVA

Analýza variability popisuje zdroje rozdílnosti jednotlivých měření. Rozděluje chyby do čtyř kategorií, a to kusy, operátoři, vzájemná interakce kusů a operátorů a nepřesnost opakování zapříčiněná měřidlem. Výhody oproti předchozí metodě jsou možnost zpracování jakýchkoli zkušebních nastavení, přesnější odhad variability a získání většího množství informací z experimentu. Nevýhodou je složitost dané metody. Je zapotřebí výpočetní techniky se statistickými programy a interpretace výsledků je velmi náročná. [31], [44]

Významný je náhodný sběr dat. Experiment probíhá pro  $n$  kusů,  $k$  operátorů a  $r$  realizací. Jednou z možností je vytvoření tabulky  $n \cdot k$  měření a to  $r$ -krát zopakovat. Při nezajištění dostatečné náhodnosti dat může dojít ke vzniku strannosti. Graficky lze tuto metodu vyjádřit pomocí histogramu, který znázorňuje jednotlivé četnosti naměřených dat. [44]



## 5 MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ

Termín měřicí zařízení zahrnuje měřidla, etalony, pomocná zařízení, počítače, softwary a instrukce, jejichž primární činností je měření. Dle způsobu vyjádření měřené veličiny jsou děleny na analogové a digitální. Analogové přístroje zaznamenávají plynulý průběh měřeného údaje v závislosti na čase. Naopak u digitálních přístrojů se měřený signál zaznamenává po krocích, které jsou rovny nejmenší změně měřené hodnoty. Výsledný údaj je součet jednotlivých kroků od počáteční nulové hodnoty až po hodnotu v momentě měření. Podstatnou vlastností snímacích zařízení je měřicí rozsah. Jedná se o maximální rozpětí hodnot, jejichž měření bude zatíženo dovolenou chybou. Další neopomenutelnou charakteristikou jsou stanovené pracovní podmínky. Výrobce uvádí škálu různorodých okolností použitelnosti přístroje. Tento interval ohraničují mezní podmínky, při kterých zařízení odolává bez poškození a znehodnocení měřených údajů. V souvislosti se snímací technikou můžeme mluvit o označení citlivost měřicích strojů a zařízení, které vystihuje změnu výstupního signálu v závislosti na vstupním. [6], [40]

### 5.1 Vlastnosti měřicích zařízení

Každé zařízení je popsáno několika charakteristikami, dle kterých odpovídá příslušným normám. Jednotlivé údaje by měl výrobce uvádět v katalogích a na štítcích jednotlivých měřidel. Vlastnosti měřicích přístrojů dělíme na statické, dynamické a informační. [M]

#### 5.1.1 Statické vlastnosti

Do této skupiny jsou zahrnovány vlastnosti přístrojů v tzv. ustáleném stavu. Matematicky je možné je popsat nejjednodušší metodou, a to pomocí algebraických rovnic. Jednou z nejpodstatnějších statických charakteristik je přesnost neboli chyba zařízení. Jedná se o schopnost vyhodnocení pravé hodnoty za předem stanovených podmínek. I zde je zaváděn pojem tzv. konvenčně pravé hodnoty, která se pravé hodnotě přibližuje natolik, že je reciproční rozdíl mezi nimi zanedbatelný. Určujícím znakem přesnosti zařízení v ustáleném stavu je statická absolutní chyba  $\Delta y$ , která je dána vztahem [43]:

$$\Delta y = y_{\infty} - x \quad (18)$$

kde  $y_{\infty}$  ... údaj přístroje v ustáleném stavu  
 $x$  ... měřená veličina.

Následně je možné určit relativní chybu  $\delta(y)$  uváděnou v procentech ze vzorce [43]:

$$\delta(y) = \frac{\Delta y}{x} \cdot 100 \quad (19)$$

kde  $\Delta y$  ... statická absolutní chyba  
 $x$  ... měřená veličina.

Rozhodujícím znakem je třída přesnosti ( $T_p$ ) definována jako absolutní chyba přístroje vztažená na velikost rozpětí přístroje. Vypočtená třída ze vztahu (20) je zaokrouhlována směrem nahoru. [43]

$$T_p = \frac{\Delta y_{max}}{y_{max} - y_{min}} \cdot 100 \quad (20)$$

kde  $\Delta y_{max}$  ... největší přípustná chyba přístroje  
 $y_{max} - y_{min}$  ... měřicí rozpětí přístroje.

Navazující charakteristikou měřidel je citlivost  $c$ . Je to schopnost reakce na změnu odměřované veličiny. Lze jí popsat limitním vztahem pro necitlivost [43]:

$$c = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (21)$$

kde  $\Delta y$  ... statická absolutní chyba  
 $\Delta x$  ... změna měřené veličiny.

Další důležitou statickou vlastností je spolehlivost, která je nejvíce závislá na bezporuchovosti. Pod tímto označením je chápáno plnění požadované funkce v daných podmínkách a v určitém časovém intervalu. Je ovlivněna konstrukčním řešením, způsobem jeho provedení, správným zapojením a používáním. Se spolehlivostí úzce souvisí i samostatná živostnost přístrojů, která vyjadřuje způsobilost přístroje vykonávat měření v daných podmínkách až do doby mezního stavu. Limitní stav nastává v době ukončení funkčního života nebo z důvodu ekonomických či technických nevhodností. [43], [46]

### 5.1.2 Dynamické vlastnosti

Dynamické vlastnosti popisují měřicí zařízení v přechodném stavu, tedy v době, kdy se jejich výstupní signál ještě zcela neustálil, a ještě se mění spolu s časem. Lze je vyjádřit za pomoci diferenciálních rovnic s konstantními koeficienty nebo přenosovými funkcemi. Graficky se vyjadřují pomocí následujících čtyř charakteristik. První je přechodová charakteristika, která reaguje na skokovou změnu vstupu. Rychlostní charakteristika popisuje odezvu vstupní veličiny, která se mění konstantní rychlostí. Další typickou charakteristikou je impulzní funkce, která vyjadřuje odezvu na výchylku vstupních dat ve formě impulsu. Poslední frekvenční charakteristika je odezvou chování přístroje při harmonické transformaci vstupu. [43], [46]

### 5.1.3 Informační vlastnosti

Aby bylo hodnocení přístrojů kompletní je nutné zohlednit i výpočetní techniku. Při volbě měřidla je jedním z hlavních ukazatelů i zpracování velkých souborů v krátkém časovém úseku. Důležitým parametrem je obsah měřicího přístroje, který reprezentuje třídu přesnosti. Do výpočetních bloků měřicích zařízení vstupují spojitě zaznamenávané veličiny  $x(t)$ , které se mohou pohybovat v celém rozpětí měřicího přístroje. Pro vyjádření výsledku je třeba převést analogový signál na diskrétní. Počet diskrétních veličin  $p$  je možné vyjádřit vztahem [43]:

$$p = \frac{y_{max} - y_{min}}{2 \cdot \Delta y} + 1 \quad (22)$$

kde  $\Delta y$  ... statická absolutní chyba  
 $y_{max} - y_{min}$  ... měřicí rozpětí přístroje.

Po zahrnutí statistických vlastností, především třídy přesnosti je možné vztah upravit na tvar [43]:

$$p = \frac{50}{T_p} + 1 \quad (23)$$

kde  $T_p$  ... třída přesnosti.

Jelikož je každá ukládaná informace uváděna v bitech, musí být pro získání informačního obsahu měřícího řetězce vyjádřeno v bitech i desítkové číslo. Poté je informační rozsah  $I_p$  dán výrazem [43]:

$$I_p = \log_2 p \quad (24)$$

kde  $p$  ... počet diskretních veličin.

Druhou nezbytně důležitou informační charakteristikou je informační kapacita přístroje. U časově proměnných veličin je měření vázáno na rychlost odezvy snímače. Kapacita měřidel  $\emptyset_p$  je tedy uváděna s ohledem na jednotku času [43]:

$$\emptyset_p = \frac{I_p}{\Delta t} \quad (25)$$

kde  $I_p$  ... informační obsah  
 $\Delta t$  ... diference času.

## 5.2 Kalibrace

Kalibrace (Obr 16a) je posloupnost činností, při kterých se jednotlivé charakteristiky měřidla srovnávají s metrologicky návazným měřidlem. Nejčastěji se jedná o etalon patřící přímo firmě nebo etalon jiné kalibrační laboratoře nebo etalon Českého metrologického institutu. Postup kalibrace je upravován předpisem, ve kterém jsou zaznamenány jednotlivé kalibrační činnosti. Dále slouží jako návod pro zaměstnance v kalibračních laboratořích. Kalibrační postup musí splňovat následující kritéria [26]:

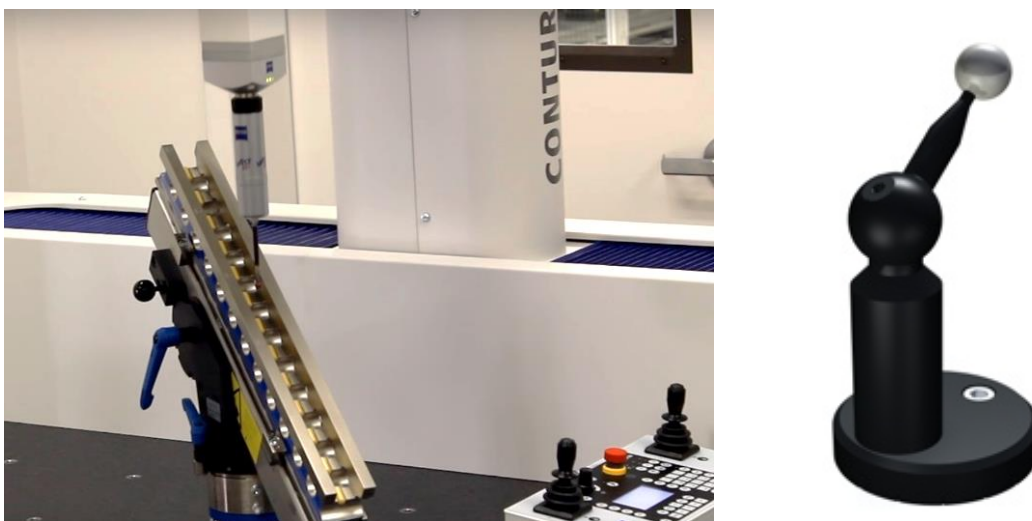
1. Úplnost – obsahuje všechny potřebné informace
2. Správnost – nesmí zahrnovat chyby a nepravdivé údaje
3. Srozumitelnost – celý obsah musí být jednoznačný, především u používání zkratk
4. Účelnost – musí vymezovat nejvhodnější podmínky pro co nejlepší průběh kalibrace při minimálních výdajích
5. Validnost – pokud není normalizovaný, tak musí být doloženo potvrzení a uznání platnosti
6. Stručnost – měl by být stručný a výstižný
7. Přehlednost – musí být čitelný a náležitě formátovaný

Dílčí výsledky jsou zapisovány do kalibračního listu a následně se používají ke korekci naměřených veličin. Můžou být vyjádřeny údajem, funkcí, diagramem, křivkou nebo tabulkou. Pro měřidla běžně používaná ve firmách není definován všeobecně platný předpis určující četnost, přesnost a metodu prováděné kalibrace. Tyto specifikace jsou v kompetenci uživatele měřidla. [29], [40], [41]

Při kalibraci délkových měřitek u CMM se nejdříve vyšetří chyby vedení ve všech osách v závislosti na poloze. Obecně má mechanismus v jednom směru pohybu šest stupňů volnosti, což vede k šesti nelineárním funkcím popisujícím nejistoty jedné osy. Jedná se o tři funkce rotačních chyb, dvě translačních chyb a funkci nelinearity měřítka. Identifikované nejistoty se kompenzují zadáním konstant do prostorové matice. Tato matice je také známa

pod pojmem mapa korekcí s její zápis do hardwaru mohou provádět pouze výrobci CMM anebo jejich autorizovaní servisní zástupci. Zpravidla se provádí jednou či dvakrát do roka. [29], [45]

Pro souřadnicové stroje je také zásadní kalibrace jednotlivých snímačů. V podstatě se jedná o stanovení skutečných rozměrů snímacích sond, které se ukládají do procesoru stroje. Postup je dán programem pro kalibraci sond, který je součástí výpočetního softwaru. Referencí je kalibrační koule neboli přesně vyrobená koule o stanoveném průměru (Obr.16 b). V prvním kroku se určí její poloha pomocí referenčního snímače a souřadnice středu první polohy tohoto snímače jsou uloženy jako referenční souřadnice. Zbylé polohy se generují pomocí rozdílu od první polohy. Každý dotyk bývá kalibrován v 5-6 polohách. Poté se kalibrační koule postupně dotýká ostatní používané snímače. V každé poloze je určen jejich střed, který je dle středu referenčního snímače v téže poloze softwarem kompenzován. Tím je zaručena shodnost výsledku měření při použití různých doteků. Detailní postup výrobci uvádějí v uživatelských příručkách. [36], [41]



Obr 16) Kalibrace CMM a) postup kalibrace, b) kalibrační koule [45]

### 5.3 Ověřování

Po kalibraci následuje ověřování, které bývá často s pojmem kalibrace zaměňováno. Jedná se o souhrn činností prověřujících funkční a metrologické vlastnosti stanoveného měřidla. Do skupiny stanovených měřidel jsou zahrnována měřidla, která Ministerstvo průmyslu a obchodu stanovilo vyhláškou MPO č.345/2002 Sb. Chyby zjištěné ověřování nemusí být uváděny. Podmínkou je pouze skutečnost, že vyšetřená chyba nepřekročila maximální hodnotu. Ověření je zakončeno opatřením příslušného měřidla úřední značkou popř. vystavením ověřovacího listu. [41]

### 5.4 Měření délek

Kromě drsnosti povrchu a geometrických tolerancí jsou pro pravidelnou kontrolu výroby významné délkové rozměry. Lze je měřit rozsáhlou skupinou měřících přístrojů, od jednoduchých posuvných měřidel přes různé výškoměry, mikroskopy a projektory, až po složité souřadnicové stroje. Veškeré uvedené přístroje pro splnění požadované přesnosti používají princip absolutní, nebo komparační či toleranční aplikace. U absolutní metody jsou

měřeny celkové rozměry. Komparační metoda vyhodnocuje odchylky od nominálních rozměrů. A toleranční metoda určí, zda bylo nebo nebylo vyhověno danému předpisu přesnosti. [6], [32]

Velká většina délkových měřících zařízení pracuje dotykovou metodou, u které dochází k přímému kontaktu měřícího zařízení s povrchem měřeného předmětu. Nejprimitivnějšími měřidly jsou koncové měrky, které zastupují určitou referenční délku pomocí vzdálenosti přesně broušených a lapovaných ploch. Používají se ve tvaru hranolků (Johanssonovy měrky) a válečků. Stykové plochy by měli být opracované s velkou rozměrovou přesností, precizní drsností povrchu a dokonalou rovinností. Materiály koncových měrek se vyznačují vysokou odolností proti opotřebení, vysokou tvrdostí a stabilitou rozměru, nízkým koeficientem délkové roztažnosti a značnou odolností vůči korozi. V České republice se na výrobu používá nástrojová ocel třídy 19, karbid wolframu nebo oxydokeramika. Koncové měrky slouží mimo využití délkových etalonů také pro nastavení a ověření měřících zařízení. Jednotlivé měrky musí být trvanlivě označeny jmenovitou délkou v mm a třídou přesnosti. [6], [28], [32]

Další velkou podskupinou vzdálenostních měřidel jsou délkoměry. Jedná se o absolutní jednosouřadnicová měřící zařízení. Nejběžněji používaným je posuvné měřidlo, kterým lze měřit dostupné vnější i vnitřní rozměry. Dále sem patří různé mikrometry, dutinoměry, kalibry a složitější délkoměry. Výškoměry spadají do skupiny modernějších délkoměrů s elektrickým odměřováním. Pracují na principu měření rozdílů dvou výškových hladin. [28]

## 5.5 Souřadnicové měřící stroje

S prudkým nárůstem produktivity práce bylo nezbytné pro měření tvarově složitějších dílů aplikovat nový způsob měření délek, tedy souřadnicové měření. S požadavkem na měření vznikly i nové nároky na příslušná měřící zařízení. Souřadnicové měřící stroje jsou způsobitelné ke snímání a následnému zaznamenávání geometrických rozměrů a měřených elementů v rovině nebo v prostoru. Základním principem je matematické vyhodnocení na základě zapsaných souřadnic jednotlivých snímaných bodů, které jsou odečítány z kartézských souřadnicových os při lineárním odměřování. Senzor k odměřování polohy daného bodu bývá umístěn na jedné z os, většinou ve svislé ose Z. Nasazení souřadnicové měřící techniky, má pro výrobce spoustu kladných stránek, kterými jsou například rychlejší a přesnější měření. Kompletní proměření tankovacího ramene klasickými metodami zabere měřícímu technikovi přibližně tři hodiny čistého času ve srovnání se SMS, který tutéž kontrolu provede výrazně přesněji a rychleji včetně tisku přehledného a graficky zpracovaného protokolu a určení odchylek jednotlivých bodů od CAD modelu. [6], [14], [32]

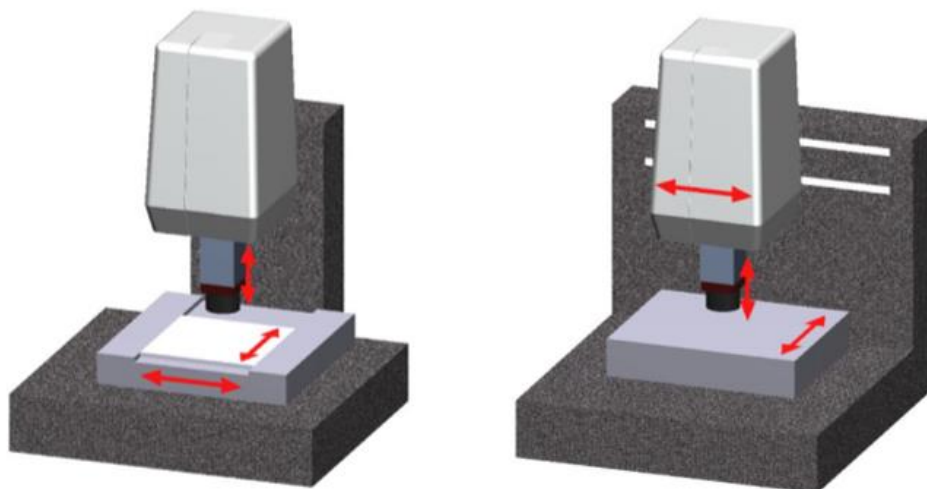
### 5.5.1 Typy souřadnicově měřících strojů

Souřadnicové přístroje lze rozdělit do čtyř základních skupin podle typu jejich konstrukce a rozsahu měření. [14]

Sloupcový typ – zařízení s křížovým stolem, který se pohybuje v osách X a Y je uvedeno na obrázku Obr 17a). Osa Z ve smykadle je rovněž pohyblivě uložena. Používají se pro měření rozměrově menších dílů, rozsah měření je 200-400 mm. Hlavním předmětem snímání je optické měření, ale mohou být vybaveny i mechanickými snímači anebo laserem. [14]



Výložníkový typ – neboli konstrukce ve tvaru L má pevný portál. Pohyby v jednotlivých osách jsou realizovány pomocí smykadla. Z důvodu tuhosti jsou osy kratší a využívají se spíše na měření menších součástí. Ukázka je Obr 17b). [14], [32]



Obr 17) Jednodušší typy SMS a) sloupový a b) výložníkový typ [14]

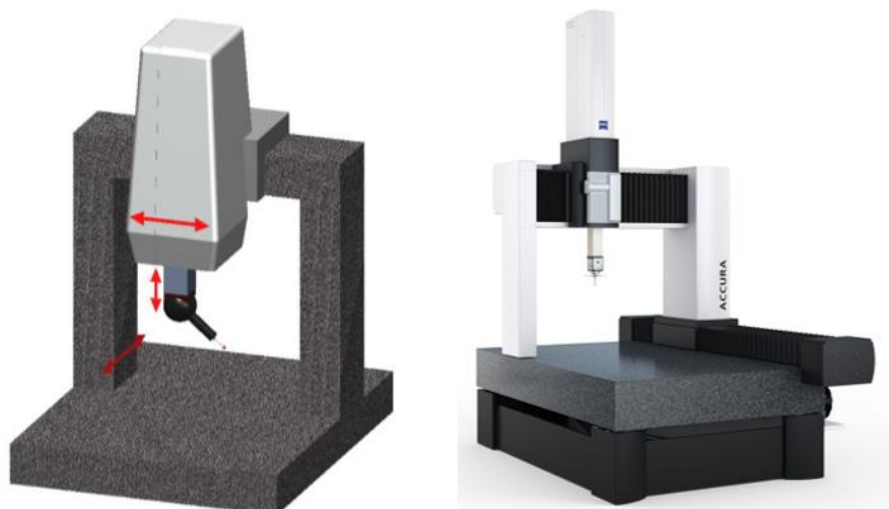
Mostový typ – jedná se o příklad portálu horní gantry, podstavy portálu jsou pevné a zařízení je v ose X vybaveno pohyblivým příčnickem. Zbývající osy jsou konstruovány nahoře na portálu. Stroje jsou určeny k měření rozměrných a tvarově náročných obrobků. Nejběžnější použití našly v automobilovém a leteckém průmyslu. Toto provedení umožňuje použití více snímacích senzorů současně. Schéma mostové konstrukce je na Obr 18a) a SMS firmy ALWAID MCT SL na Obr 18b). [14], [32]



Obr 18) Mostová konstrukce SMS a) schéma a b) ukázka ALWAID MCT SL [14], [32]

Portálový typ – v praxi jde o nejrozšířenější a nejpoužívanější typ SMS. Vysoká přesnost měření je garantována pomocí vysoké tuhosti portálu. Výrobci je na trh uvádějí ve dvou variantách, a to buď s pohyblivým portálem nebo s pevným portálem, který je doplněn pohyblivým stolem. Portál je typu dolní gantry. Mechanické vedení je nahrazeno systémem se vzduchovými ložisky. Pro pohyb odměřovacích supportů stačí malé síly, protože malé pohyblivé součástky kloužou na vzduchovém polštáři po přesných vodičích většinou granitových drahách. Kvůli velikosti samostatného stroje je problematická montáž kvalitního

světla, proto jsou portálové typy CMM vybavovány převážně dotykovými senzory. Model portálové konstrukce je na Obr 19a). Stroj od firmy Zeiss je vyobrazen na Obr 19b). [1], [14]



Obr 19) Portálový typ a stroj ZEISS Accura [14], [45]

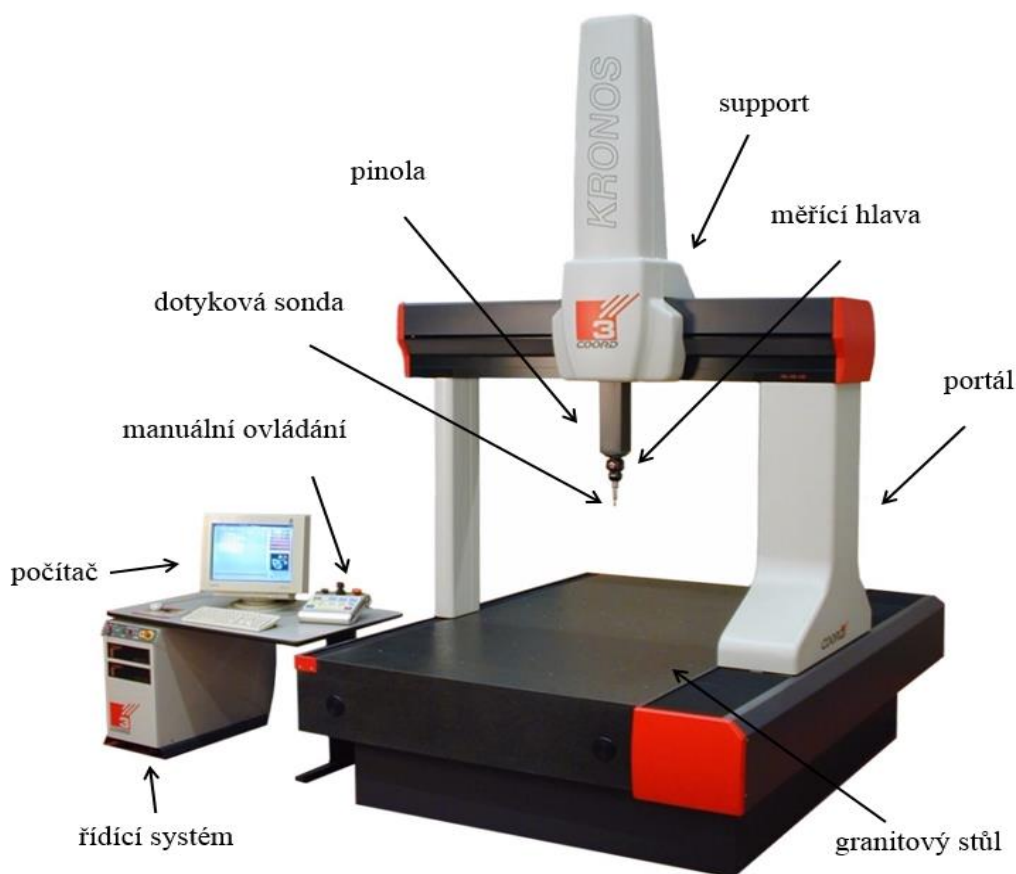
Mezi portálové souřadnicově měřicí stroje patří i CMM stroje v měřicí laboratoři ve Velké Bíteši, na kterých bylo navrženo řešení a zrealizováno měření problematiky zkoumané v této práci.

### 5.5.2 Konstrukční prvky

Měřicí stroje bývají zpravidla podle koncepce sestaveny z těchto hlavních prvků: pracovní desky, vedení, pinoly, portálu, stojanu nebo mostu dle typu provedení, ovládacího panelu, granitového stolu, sensorových zásobníků a počítače s odpovídajícím softwarem. Základní součásti jsou popsány na schématu Obr 20). Tyto prvky se dále spojují do dílčích subsystémů stroje jako jsou mechanická část, odměřovací systém, snímač včetně výměnného systému a řídicí systém se softwarem. Příměrné desky a vodící plochy tvoří základ stroje a jsou na ně kladeny vysoké nároky na přesnost geometrických tolerancí především rovinnosti a kolmosti, proto jsou vyráběny z přesně opracovaného granitového kamene. [32], [33]

Prostor, který při měření dokáže snímač obsáhnout, se nazývá měřicí rozsah. Jde o kvádr, který odpovídá svou velikostí rozsahům jednotlivých snímacích os. Pracovní deska je broušena a ustavena na čtyřech rohových podpěrách, které jsou umístěny pohyblivě a tím dokáží eliminovat vibrace okolí. Kontrolovaný kus lze upnout na pracovní plochu do připravených závitových otvorů pomocí šroubů a upínek přímo nebo v ustavovacím přípravku. Mezi požadavky na stůl s pracovní deskou patří vysoká životnost, objemová stálost, nemagnetičnost, minimální teplotní roztažnost a odolnost vůči korozi. [32], [33]

Sloupy, portály a mosty většinou bývají svařené konstrukce, což zajišťuje dostatečnou tuhost, rozměrovou a tvarovou stálost. Nejčastěji se opět používá žula nebo granit. Při posuvu pinoly musí být nežádoucí pohyb portálu minimální. Pinola se rozumí nejčastěji litinová nebo duralová tyč kruhového či čtvercového průřezu. Deformace způsobená ohybovým namáháním při vysunutí pinoly od její samostatné hmotnosti a hmotnosti snímací hlavy se vyvažuje buď mechanicky pomocí závaží nebo elektricky za pomoci servomotorů. [32], [33]



Obr 20) Schéma měřicího stroje KRONOS od výrobce COORD3 [1]

Nejdůležitější konstrukční částí měřicích strojů jsou pohyblivá uložení. Kompozice těchto částí musí zaručit jejich přemístění s co největší precizností a bez trhavých pohybů, a to i při malých rychlostech, v koncových polohách a při minimální změně pozice. Vzájemná uložení pohyblivých částí a vedení v jednotlivých osách musí být s co největší přesností přímočaré, vzájemně kolmé, stálé, s minimální vůlí a s minimálními pasivními odpory. Jedním z typů uložení je kluzné, které se dnes už moc nepoužívá. Mezi jeho výhody patří rozsáhlá tuhost, zvyšování kvality a přesnost odměřování během používání. Nevýhodami jeho použití jsou velký odpor, problémy s mazáním, jako je svod oleje a tepla s čímž souvisí složitá konstrukce a vyšší cena. O něco lepším a vhodnějším uložení je uložení valivé, které je realizováno pomocí kuliček nebo válečků. Výhodami je malý valivý odpor, odolnost vůči opotřebení, vysoká tuhost a velmi dobrá rovnoměrnost pohybů. Záporem je obtížnost přesného zhotovení. Nejlepším a hojně uplatňovaným řešením v současnosti je aerostatické uložení. Tento typ je založený na vzájemném posuvu součástí CMM po vzduchovém polštáři o šířce 4 až 8  $\mu\text{m}$ . Významným plusem je chybějící přítomnost potíží s odváděním oleje. Další předností jsou malé odpory, a to i při větších rychlostech, vysoká tuhost a dokonalá plynulost pohybu bez trhání. [32], [33]

### 5.5.3 Měřicí systémy

Při používání souřadnicové měřicí techniky je zásadní umět získat souřadnice snímaných bodů v osách kartézské soustavy. K tomu je možné použít následující délkové měřicí systémy: závitový hřídel s úhlovým převodníkem, lineární indukční, inkrementální

délkovou stupnici nebo laserinterferometr. Závitový hřídel opatřený úhlovým převodníkem se vyrábí v různých délkách až do maxima 1,2 m. Závit je lichoběžníkový s poměrně malým stoupáním a standardně bývá uložen v olejové lázni, aby docházelo k co největšímu zajištění tepelné stability. Při zpětném posuvu dochází ke vzniku reverzibilní chyby, která je důsledkem vzájemného vymezení vůle mezi maticí a šroubem, což je považováno za velkou nevýhodu. [32], [40]

Měřítka u lineárního induktosynu je formováno meandrovým vodičem napájeným střídavým proudem. Tištěný spoj tvořící meandr. Je přilepen na izolační vrstvu na kovovém podkladu, který má tepelnou roztažnost shodnou s materiálem stroje. Vlna jednoho meandru má délku 2 mm. Dvě smyčky o vzdálenosti 0,5 mm tvoří jezdec, který se pohybuje po základu. Na těchto smyčkách je indukováno napětí o 90° fázově posunuté, a proto má pohyb jezdcе téměř sinusový průběh s interpolačním odměřovacím krokem 1 μm při rozeznání směru pohybu. Toto zařízení vyžaduje minimální údržbu a je velmi odolné. [32], [40]

Nejrozsáhlejším odměřovacím systémem SMS je inkrementální délková stupnice natisknutá na skleněném či kovovém podkladě. Pracuje na principu odrazu světla a to tak, že se pole odrážející světlo střídají s poli, která světelné paprsky pohlcují. Jezdec je složen ze čtyř propouštěcích polí, z nichž jsou dvě posunutá o ¼ rozteče. Šířka jednoho dílku stupnice je  $0,01 \div 0,04$  mm a lze docílit rozlišitelnosti 1 μm. Pro dosažení větší rozlišitelnosti až o 10 % je možné jezdec vůči stupnici pootočit o nepatrný úhel, tím vzniknou tzv. moiré proužky a pohyb jezdcе se převede na elektrický signál. Pomocí natočení jezdcе je také prováděna kalibrace, která je u tohoto systému relativně jednoduchá. [32], [40]

Posledním vyměřovacím zařízením je laserinterferometr, který se více než jako součást souřadnicových strojů používá ke kontrole jejich přesnosti. Jde o velmi citlivý a značně drahý přístroj. [32], [40]

#### 5.5.4 Snímací systémy

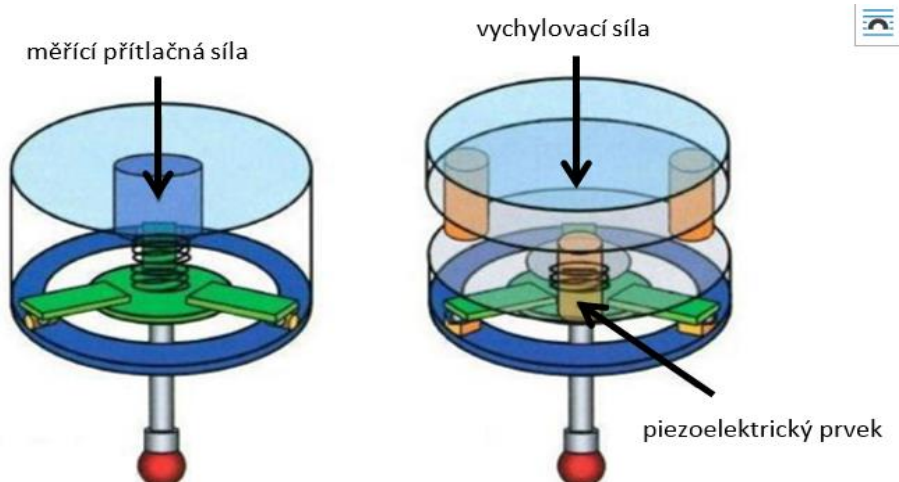
Snímací systémy jsou nedílnou součástí SMS strojů, jejich konstrukce ovlivňuje přesnost měření a možnost automatizace. Jsou spojeny s pinolou a skládají se ze snímací hlavy, prodloužení snímací hlavy, snímacího dotyku a jeho prodloužení. Pevné hlavice se v prostoru nenatáčejí, ale pracují s větší přesností než indexované hlavice. Ty umožňují natáčení sondy v jednotlivých osách a jejich zajištění na požadované pozici. Umí přesně polohovat měřící sondu v pracovním prostoru stroje, dle této vlastnosti je dělíme na manuální a motorické. Manuální jsou ručně nastavitelné, naopak motorické jsou plně automatizované a slouží ke snímání v mnoha úhlech. Dokáží navést sondu k povrchu pod co nejlepší úhlem s cílem dosažení co nejlepších výsledků. Firmy specializující se na měřící techniku vyrábí snímací hlavy různých typů. Některé z nich jsou na Obr 21). [7]



Obr 21) Snímací hlavice firmy Renishaw a) 3osý systém, b) 5osý systém a c) manuální systém [7], [36]

Snímací systémy třídíme do dvou hlavních skupin, a to na dotykové a bezdotykové snímače. Bezdotykové se u SMS používají pouze ve výjimečných případech. Najdeme je spíše u automatických dvouosých přístrojů pracujících v rovině, mezi které patří různé typy mikroskopů. U SMS strojů jsou používány jako doprovodné prvky v podobě laserové hlavy, řádkové kamery a speciálních pneumatických spínačů. Například laserový bodový senzor pracuje na principu promítání světelného paprsku vyvolaného laserem na měřenou součást. Odražená světelná skvrna se následně vykreslí na optoelektronickém senzoru a z tohoto obrazu se určí poloha měřícího bodu. [14], [32]

Daleko větší a rozsáhlejší skupinou jsou dotykové snímače, které se vyznačují pevnými dotyky ve tvaru koule, kužele apod. Fungují na principu mechanického dotyku s měřenou součástí, ze kterého řídicí počítač odečte příslušné souřadnice a vypočítá požadované geometrické veličiny, jako jsou střed a průměr kružnice, osová vzdálenost atd. Přesnou polohu snímaného bodu nelze určit bez korekce snímacího nástroje. Pro správnou korekci je nutné snímač před měřením dobře zkalibrovat. Dotykové snímače dělíme na spínací a měřící. [14]



Obr 22) Principy snímání 3D měřící hlavy a) Elektromechanické kontakty, b) Mechanicko-elektrický měnič [14]



Systémy spínacího typu pracují se sestavou tří bodů. V momentě dotyku snímací koule s měřeným předmětem dojde k zapnutí spouštěcího signálu, který zaznamená souřadnice měřícího stroje vztažené ke středu snímací koule. Kulička je přes tuhý dřík upevněna na trojbodovém uložení a každý z bodů funguje jako spínač. Dojde-li k vychýlení snímače aspoň v jednom směru, tak se daný snímač rozpojí a vyšle spínací signál. Nevýhodou je závislost měřicí síly na směru snímání, to může vést k odlišnému prohnutí tasterů při snímání. Drahé a velmi kvalitní systémy jsou pro převod mechanického systému vybaveny elektrickými převodníky v podobě piezoelektrických částí nebo roztažných pásek, které umožňují snímání nezávisle na směru. Na Obr 22a) je princip systému se spínacím mechanismem vybavený elektromechanickými kontakty. Druhý princip s mechanicko-elektrickým měničem je uveden na Obr 22b). [14]

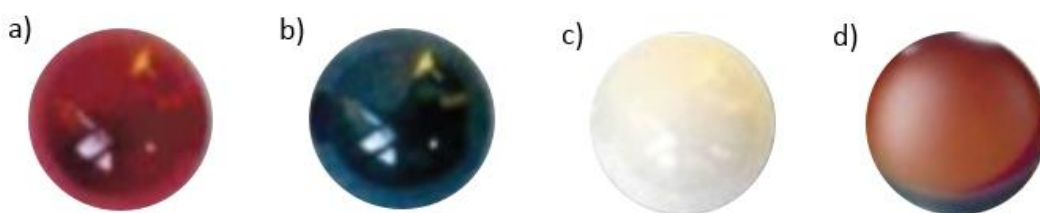
Měřicí dotykové senzory jsou konstrukčně daleko složitější. Obsahují systémy k měření dráhy ve všech třech osách, pomocí kterých lze určit velikost vychýlení dotyku. Odměřovaný bod je determinován překrytím souřadnic senzoru se souřadnicemi stroje. Snímací hlava dokáže pracovat při statickém i dynamickém režimu neboli scanningu. Kulička zůstává nepřetržitě v kontaktu s měřeným objektem pomocí elektronické regulace zpětnovazebních pohonů na pohyb pinoly. [14]

Zprostředkovatelem kontaktu s dílcem je měřicí dotyk, který uvnitř sondy vyvolá spínací signál generující souřadnice bodu. Typ a velikost měřícího dotyku jsou voleny podle snímaného objektu. Důležitými charakteristikami ovlivňující přesnost měření jsou tuhost dotyku a ideální tvar kuličky. K dosažení maximální přesnosti je volen co nejkratší dotyk, aby se zabránilo nežádoucímu průhybu. Dále je volen nejmenší počet prodlužovacích článků, protože každý spoj zvyšuje riziko nepřesného měření. Nejprimitivnějším typem jsou přímé dotyky jednoduše složené ze stopky a precizní kuličky. Složením čtyř nebo pěti samostatných dotyků pevně připevněných ke střednímu dílu do pravouhle kombinace vznikají hvězdicové dotyky. Pracují jako snímače složitých konstrukčních prvků nebo otvorů. Pro kontrolu zápichů a drážek, které se nedají snímat kuličkou ani hvězdičkou se používají diskové dotyky, které pro kontakt využívají nepatrnou část svého povrchu. Na trhu najdeme i speciální tvarové dotyky, například válcové, se špičkou či duté keramické polokoule. Většina firem zabývajících se metrologií nabízí svým zákazníkům také možnost zhotovení kuriózních podob snímačů přímo na míru. Předními výrobci s rozmanitým sortimentem dotyků jsou firmy Renishaw a Prima Bilavčík s.r.o. (Obr. 23). [7], [36]



Obr 23) Měřicí dotyky firmy Prima Bilavčík s.r.o. [34]

Kuličky měřicích dotyků jsou vyráběny z vysoce jakostních materiálů, protože jsou na ně kladeny vysoké nároky jako je nízká opotřebitelnost, vysoká stabilita tvaru a dlouhodobá životnost. Nejčastěji používaným materiálem je rubín. Mimo typické zářivé červené barvy se skleněným leskem se vyznačuje svojí vysokou tvrdostí a trvanlivostí. Rubín není vhodný pro měření hliníkových a litinových povrchů. Při kontaktu s hliníkem dochází k adheznímu opotřebení, kdy se vrstvička hliníku přenesse na tvrdší rubínový materiál. Povlak je viditelný již po 100 m souvislého měření. Pro hliníkové aplikace je lepší používat nitrid křemíku, který se vyznačuje velkou tvrdostí a odolností proti opotřebení jako rubín. Naopak není vhodný pro ocelové povrchy, u kterých dochází k abrazivnímu otěru. Materiály se navzájem obrušují a dochází k jejich poškrábání. V tomto případě se využívá pevný a tvrdý keramický materiál, a to oxid zirkoničitý. Nejpřesnější, ale i nejdražší řešení poskytuje diamant. Jeho extrémní tvrdost a hladký povrch zaručují minimální opotřebení skenovaného povrchu i měřicího doteku. Jednotlivé materiály najdeme na Obr 24). [7]



Obr 24) Materiály kuliček a) rubín, b) nitrid křemíku, c) oxid zirkoničitý a d) diamant [7]

Nejenom kuličky, ale i jejich stopky musí být vyrobeny z kvalitních látek. Nejhojněji se využívá nemagnetické nerezavějící oceli. Pro délky do 30 mm vykazují ideální poměr mezi hmotností a tuhostí stopky. Karbid wolframu slouží pro menší průměry a větší délky, až 50 mm. Pro kuličky s větším průměrem okolo 3 mm a optimální délku 30 mm jsou dřívky vyráběny z keramiky. Poměrně novým východiskem jsou uhlíková vlákna. Vyznačují se zanedbatelnou tepelnou roztažností a schopností tlumit vibrace. [7]

U některých strojů může být součástí snímacích senzorů i senzor zpracování obrazu. Při použití kamery je výhodou vyhnout se nevýhodám, které do měření přináší přenos přes tuhý dřík. Jedná se o prohnutí dříků a nepatrnou deformaci měřeného objektu silovým stykem, což může být při měření malých předmětů nevhodné. Pomocí obrazové sondy je možné snímat pouze dvourozměrným principem. Pracuje se světelným rozhraním. Kalibruje se na speciální kroužek nebo na čistý bílý papír. Je vhodná i pro skenování. [14]

### 5.5.5 Metody měření na SMS

Za pomoci analytické geometrie je možné určit hledané parametry nepřímo z naměřených bodů v rovině či prostoru. K odměřování lze použít pravoúhlý, polární nebo i válcový souřadný systém. Zásadním bodem je sestavení strategie měření včetně příslušné dokumentace, upínacích přípravků, požadavků na přesnost měření atd. Operátor SMS musí dodržovat několik následujících pravidel správné strategie měření. Studovaný díl se ustavuje co možná nejstabilnějším způsobem na největší možnou plochu. Další podmínkou na ustavovací polohu je snaha proměřit součást během jednoho upnutí. Měřicí a konstrukční základny by měly být shodné. Důležitým parametrem je doba trvání měřicího programu, tu je možné zkrátit volbou minimálního počtu snímačů nebo co nejkratší posloupností snímaných bodů. Na geometrickém prvku je volen počet bodů o 2–3 větší, než udává

geometrická definice. Směr pohybu snímacího dotyku před kontaktem je shodný se směrem některé z os. Pro odstranění hrubých chyb je možné geometrické prvky znázorňovat graficky. Kulové a kruhové elementy je nezbytné měřit diagonálně pomocí párových dvojic. [32], [40]

### 5.5.6 Kontrola přesnosti měření

Výsledná přesnost měření je odvozena od všech prvků složitého systému souřadnicových strojů. Lze na ní pohlížet ze dvou základních úhlů, a to ze strany výrobce a ze strany uživatele. Výrobce se zabývá přesností jednotlivých dílčích prvků stroje, kdežto pro spotřebitele je rozhodující celková přesnost a možnost jejího rychlého a snadného ověření. K posouzení preciznosti měřicích strojů se používají analytické a globální metody. [32], [40]

Analytické zkoušení SMS prozkoumává samostatně jednotlivé součásti. Hodnotí chyby v jednotlivých osách, chyby přímostí pohybů při polohování, chyby vzájemné kolmosti os, odchylky rovinnosti pracovních stolů a nedostatky snímacích doteků. Jako kontrolní měřidla se používají laserinterferometr a elektronická libela. [32], [40]

Globální metody udávají pouze komplexní data o přesnosti celého SMS. Zkoušky jsou jednoduché a krátké, takže je uživatel může provádět sám. Principiálně jsou založené na použití různých typů etalonů. Prvním typem jsou lineární etalony, mezi které řadíme i koncové měřky v přesně odstupňovaných vzdálenostech. Plošné etalony nabízí trh ve dvou variantách, buď deska s koulemi (ballplate) anebo s dírami (holeplate). Kalibrace probíhá celkem ve čtyřech rovinách, dvou horizontálních a dvou vertikálních. Prostorové etalony zastupuje úsečkový etalon, který se skládá ze dvou přesných koulí spojených tyčí o konstantní délce  $L$ . Jednu kouli uložíme do pinoly a druhou na kuželové lůžko upevněné na pracovním stole. Vzájemným otáčením koule v pinole se opisuje ideální kružnice o poloměru  $L$  ve všech možných rovinách. Kruhovým testem určí počítač odchylky od ideální kružnice a parametry přesnosti. [32], [40]

### 5.5.7 Software pro SMS

Moderní souřadnicové stroje mohou být vybaveny různým stupněm a obtížností programovacích prostředí. Jejich složitost se ve většině případů odvíjí od kvalifikace pracovníků obsluhy. Některé typy pracují pouze s nasnímanými body. Další dokáží vyčíst dílčí data přímo z modelů. Z praktické stránky je možné měřené elementy na modelu označovat přímo, čímž jsou eliminovány chyby spojené s chybným čtením výkresové dokumentace nebo špatným zadáváním dat. Mnohdy bývají vybavené výkonnými průvodci pro usnadnění náročných úloh. Sada předdefinovaných nástrojů a postupů usnadňuje uživateli správnou volbu metodiky měření a kótování součástí. [2], [11]

Současné softwary umožňují snímání jednotlivých bodů nebo skenování celých ploch, měření v manuálním, poloautomatickém i zcela automatickém režimu a programování v off-line nastavení. K neznámějším vývojářů softwarových programů patří PC-DMIS (Hexagon), Metrosoft CM (Wenzel) a Calypso (Zeiss). [2], [8]





## 6 SOUČASNÝ STAV

Pozorovaný díl má vliv na funkčnost a estetický vzhled celé sestavy v karosérii automobilu velké většiny předních automobilek. Pro zajištění nejvyšší jakosti daného dílu je zapotřebí řádná a přesná metoda kontroly, se kterou je spojené precizní měření. Obr 25) ukazuje výslednou sestavu v činnosti po zamontování do auta.



Obr 25) Tankovací sestavy v automobilech [3], [13]

### 6.1 Kontrolovaný díl

Tankovací rameno je vyráběno vstřikováním materiálu nejčastěji Hostacomu, popřípadě Wipagu do kovové formy. Firma celkem vlastní okolo 150 projektů. Pro vyhodnocení vhodnosti způsobu kontroly byl vybrán jeden z novějších projektů. Jedná se o projekt Audi Q4, který je součástí nového modelu Audi Q4. (Obr 26).



Obr 26) Model Audi 326-1 Q4 [35]

Žádný z odběratelů si nepřeje obdržet vadný kus, a tak je nutné neustále kontrolovat mimo estetického vzhledu i funkčně důležité rozměry, které byly vybrány po domluvě se zákazníkem. Jedná se nejčastěji o celkovou délku dílu, která má vliv na pozici víka vzhledem

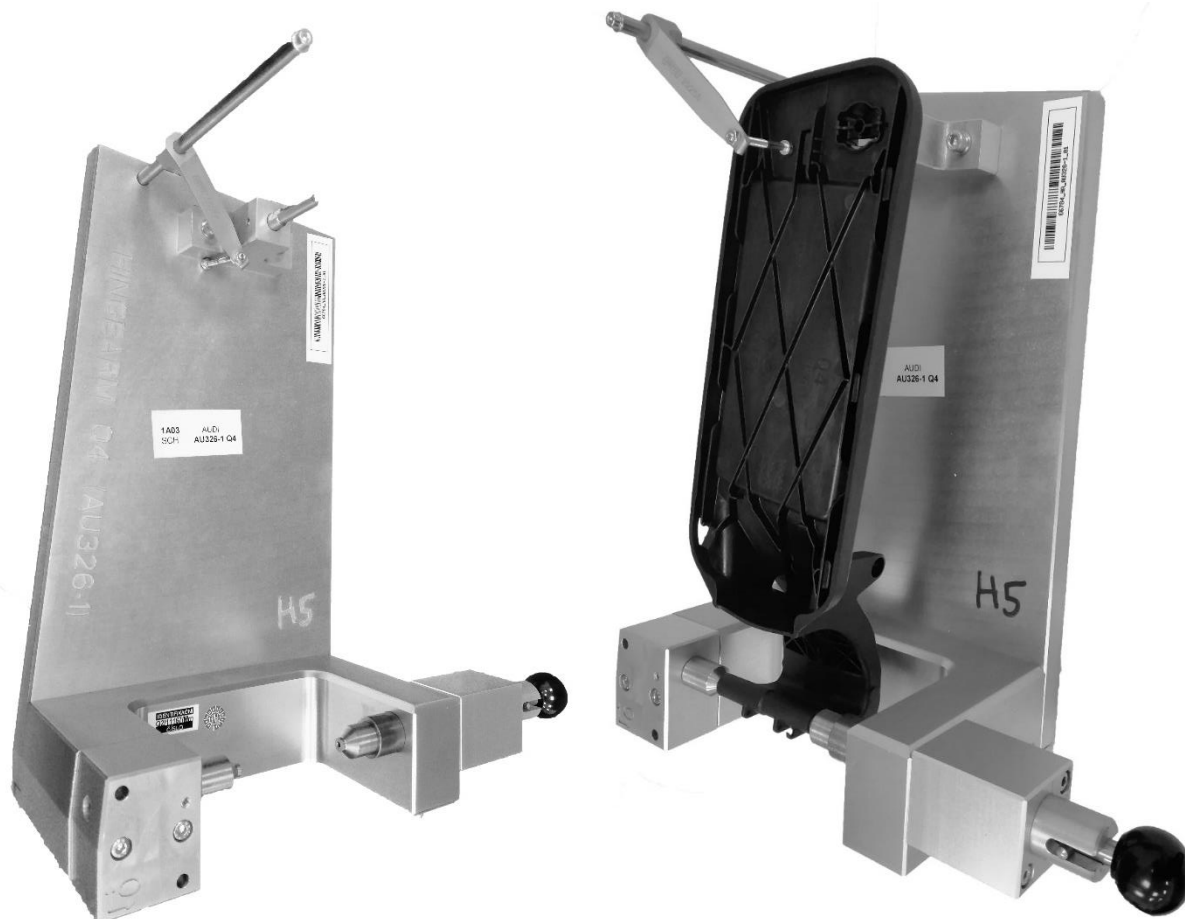
k sestavě. Pokud je díl delší, vzniká velká mezera na jedné straně. Pokud je kratší, vzniká díra na straně druhé. Dalším rozměrem je šířka mezi klipy, která podstatně ovlivňuje bezproblémové nasazení víka. Je-li větší, jde víko nasadit obtížněji nebo vůbec. Naopak je-li menší, tak je víko nasazeno s velkou vůlí a postupně může dojít k jeho samovolnému uvolnění. Posledním rozměrem je šířka tzv. osky, která je důležitá pro správné zabudování do protikusu a zajištění snadného otvírání. Jednotlivé rozměry jsou vyznačeny ve výkresu součásti v elektronické příloze. Samostatný díl vyfocený z obou stran je na Obr 27). Rozměrově jde o spíše menší díl cca 250x100x50 mm o hmotnosti okolo 120g. Rozměry a hmotnost se liší podle projektů. Obecně jsou projekty Volvo a Ford menší než projekty Audi či BMW.



Obr 27) Testované tankovací rameno

## 6.2 Upínací přípravek

Pro zajištění opakovatelného a správného měření na výškoměru se používá speciálně konstruovaný upínací přípravek. Jedná se o hliníkovou desku opatřenou dvěma kostkami s válcovým upínacím zařízením a podpěrným kolíkem. Na jeden průměr se díl nasune a druhou stranou se dotáhne. Proti kolíku se zajistí upínkou, aby nedošlo k nežádoucímu vychýlení během měření. Poloha v přípravku je shodná s polohou v autě. Všechny kóty na výkrese se vztahují právě k této poloze. Pro každý projekt je jedinečný přípravek. Každý musí být před začátkem používání ověřený dle výkresu v elektronické příloze. Pokud je vyroben správně, označí ho metrolog úřední značkou a ověřovacím listem, který je též součástí elektronické přílohy. Přípravky se ověřují jednou za 3 roky. Dále je mu přidělena pozice ve skladu, podle které je pro operátora snadněji dohledatelný. Samostatný přípravek pro zvolený projekt je na Obr 28a) a díl upnutý v přípravku je na Obr 28b).



Obr 28) Upínací přípravek a) samostatný a b) s upnutým dílem

### 6.3 Plán měření

V předsériové výrobě se výlisek proměřuje kompletně dle výkresu. Celkem třikrát nebo čtyřikrát v závislosti na externí nástrojárně, která danou formu upravuje. Poté je projekt předán do sériové výroby, kde jeho kontrola probíhá podle kontrolního plánu. Směnová kontrola při rozjezdu měří celkem pět kusů a jednou za směnu, tedy po 12-ti hodinách přeměřuje dva kusy. Naměřená data zaznamenává do měřicího archu v příloze 4 a následně přepisuje do sledovacího softwaru CAQ.

První dva z uvedených rozměrů jsou měřeny na výškoměru TESA Hite 700 (Obr 29a). Jedná se o motorizovaný přístroj z řady Micro-Hite od švýcarského výrobce. Jeho předností je značná robustnost a spolehlivost. Může být umístěn jak v laboratorních podmínkách, tak i přímo na dílně. Měřicí rozsah je 700 mm s rozlišitelností 0,001 mm. Posuv je realizován pomocí vzduchového polštáře. Kromě měření výšky či průměru dokáže najít nejnižší a nejvyšší bod. [34]

Obsluha si nejdříve zvolí měřicí dotek (Obr 29b), který následně ověří pomocí kalibru. Ukázka ověřování je na Obr 29c). Systém třikrát změří vzdálenost kalibru a vyhodnotí dva parametry, rozměr doteku a chybu s jakou byl dotek ověřen. Výška dotyku je důležitá pro oboustranné měření, kdy se při sejmutí druhé hladiny odečte. Ukáže-li se při prvním pokusu domovská obrazovka, může operátor pokračovat v měření. Pokud se objeví chyba je nutné ověření opakovat.



Obr 29) a) výškoměr TESA Hite 700, b) měřící doteky výškoměru, c) kalibrace měřícího doteku [34]

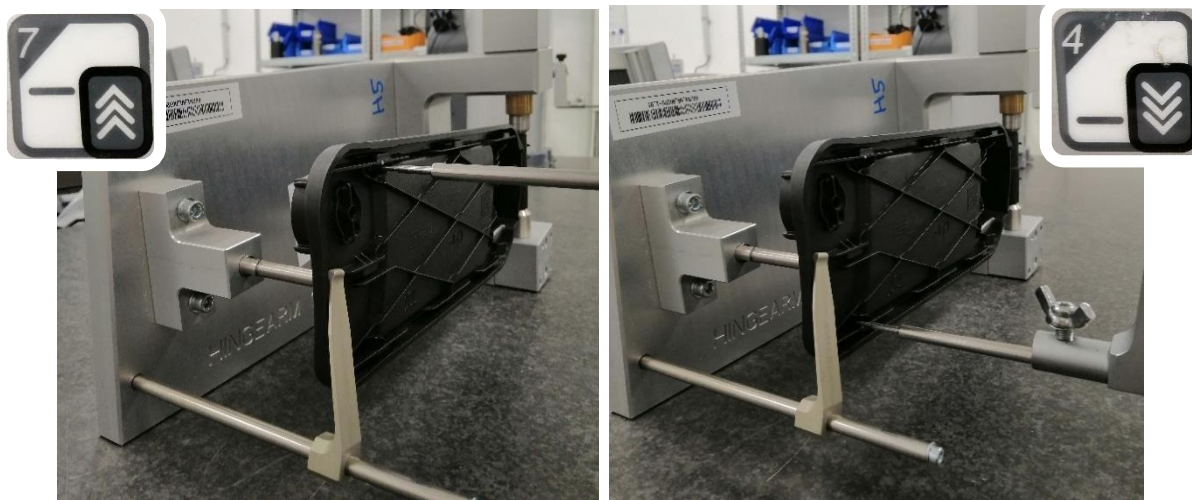
Při měření celkové délky se přípravek s upnutým dílem postaví na výšku. Obsluha vezme nulový bod z pevné části upínacího mechanismu a pomocí funkce nejvyššího bodu najde celkovou délku od středu osky. Postup je na obrázku Obr 30).



Obr 30) Postup měření celkové délky na výškoměru

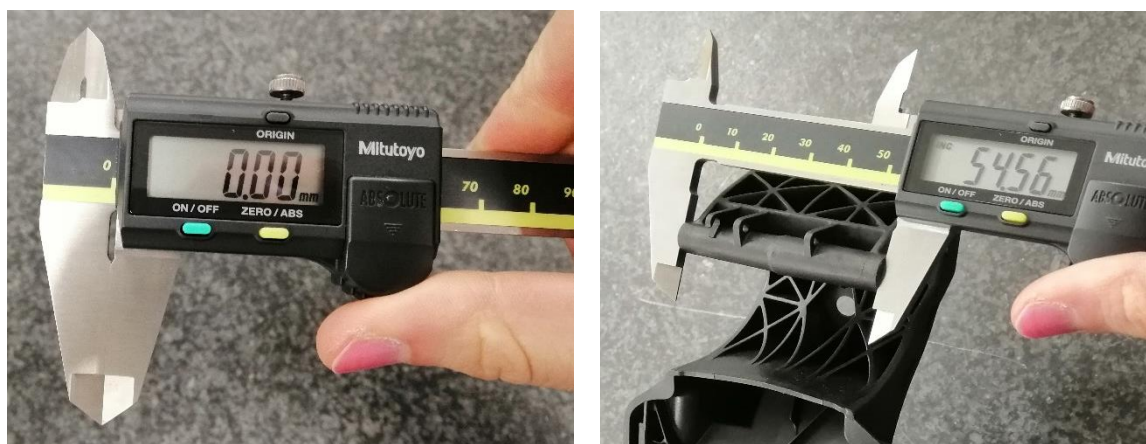


Šířka mezi klipy se proměřuje opět na výškoměru. Aby operátoři měřili vždy ve stejných bodech. Na dílech jsou přidány prvky v podobě plochých nálitků, které striktně určují měřicí body. Obsluha zaměří nulový bod z libovolného nálitku a změří vzdálenost ke druhému. Obrázek Obr 31) názorně popisuje toto měření.



Obr 31) Postup měření šířky mezi klipy na výškoměru

Poslední rozměr je měřen obyčejným posuvným měřítkem. Operátor se musí snažit o co nejkolmější postavení čelistí vůči vylisku. Názorná ukázka je na fotografii Obr 32).

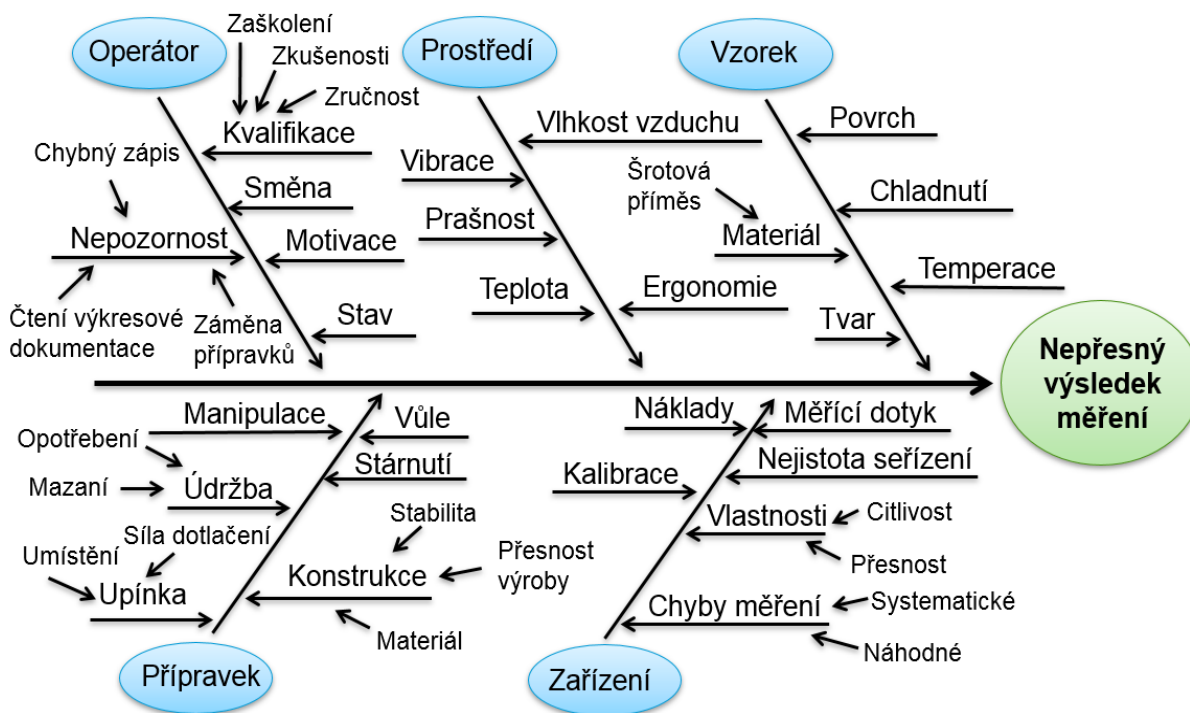


Obr 32) Měření šířky tzv. osky

## 6.4 Systémový rozbor

Ke zdárnému provedení analýzy příčin a následků byla vybrána skupina sedmi osob z různých oddělení firmy: měřící technik, směnová kontrolorka, programátor SMS, procesní inženýr, inženýr kvality, operátor a nezaujatý člen z personálního oddělení. Tito lidé za pomoci brainstormingu sestavili Ishikawův diagram na Obr.33), jehož konstrukce je popsána ve čtvrté kapitole.

Současný způsob kontroly tankovacích ramen provádí především operátor za pomoci výškoměru a posuvného měřidla. Při měření je vždy největší chyba zapříčiněná právě obsluhou. Další nejistoty do revizí přináší prostředí, upínací přípravek, měřidla či samostatný dílec.



Obr 33) Analýza příčin a následků nepřesného výsledku měření současného stavu

Jak už bylo popsáno, největší podíl na výsledné chybě má operátor, který může udělat spoustu nesprávných úkonů v průběhu měření. Vliv na chování obsluhy má hned několik faktorů. Nejpodstatnějším je kvalifikace pověřené osoby, jedná se o jeho zkušenosti, šikovnost či řádné zaškolení. Další významný faktor je jeho stav, ať už psychický nebo fyzický, který může být ovlivněn směnou. Při noční směně je obecně člověk unavený, méně ostražitý a pozorný. Při tomto rozpoložení snadno udělá chybu v podobě záměny měřicích přípravku či chybné orientace ve výkresové dokumentaci. V neposlední řadě má účinek na chování operátorů i motivace od vedení firmy, která může být finančního či kariérního charakteru.

Druhý největší podíl na nepřesnosti má upínací přípravek. Kromě samostatné konstrukce ho ovlivňuje manipulace a údržba. Časem také dochází ke stárnutí, opotřebení a vzniku vůle v pohyblivé upínací části. Variabilním prvkem je zde i upínka, kterou může operátor umístit na libovolné místo a přitlačit libovolnou silou. Výsledky jsou zatíženy také chybou způsobenou měřicími zařízeními. A to jak v případě posuvného měřidla, tak i výškoměru. Jedná se například o nesprávnou kalibraci či ověření. U výškoměru je důležitá volba měřicího dotyku a jeho upevnění. Přesnost měření každého měřicího zařízení ovlivňují také jeho vlastnosti, např. citlivost, přesnost a opakovatelnost.

Také prostředí, ve kterém je experiment realizován má určitý vliv na vyhodnocení. Proto jsou teplota a vlhkost vzduchu v laboratořích kontrolovány a zapisovány. Posledním působícím činitelem je sám studovaný kus. Změnu rozměrů může způsobit kupříkladu nesprávné chladnutí, různé defekty na povrchu a také šrotová příměs v materiálu.

V následujícím kroku každý člen řešícího týmu přidělil jednotlivým příčinám bodové ohodnocení dle svého uvážení. Na základě jejich obodování bylo vybráno pět nejpravděpodobnějších příčin, které jsou uvedeny v nadcházející tabulce Tab 5). Podrobné bodování je uvedeno v příloze 3. V návrhu nového řešení bude kladen největší důraz na redukci právě těchto vybraných příčin.

Tab 6) Nejpravděpodobnější příčiny vzniku nejistot měření současného stavu

Možná příčina	Celkový počet bodů
Zkušenosti operátora	54
Síla dotlačení upínky	52
Umístění upínky	50
Pracovní směna	49
Chybný zápis operátora	45

## 6.5 Vyhodnocení podle R&R studie

K posouzení vhodnosti současného principu měření a pro následné srovnání s navrhovaným řešením, byl proveden experiment. Tři směnové kontrolorky změřily uvedené tři rozměry třikrát na deseti kusech v náhodném pořadí. Naměřená data jsou uvedena v excelovském souboru v elektronické příloze v listu současný stav a jsou zpracována pomocí metody průměru a rozpětí dle formuláře v příloze 2. Výsledná a dílčí variability měřicího systému jsou uvedeny v následující tabulce:

Tab 7) Vyhodnocení současného stavu pomocí R&R

Variabilita	zařízení	operátora	kusu	systému měření	Stav měřicího systému
Rozměr	%EV	%AV	%PV	%GRR	
Celková délka	20,0	58,7	78,5	62,0	nepřijatelný
Šířka mezi klipy	62,8	16,6	76,0	65,0	nepřijatelný
Šířka osky	9,6	4,0	99,6	10,4	podmínečně přijatelný

Metoda MSA vznikla v poslední letech a je považována za velmi přísnou, proto mohl být výškoměr a posuvné měřítko v minulosti používáno ke kontrole. Se zvyšující se produkcí a konkurenceschopností firem vyrábějících shodné produkty je nutné dočasný stav inovovat. Z uvedené tabulky je též zřejmé, že současný způsob měření je značně nevyhovující. Procento variability zařízení (% EV) říká, kolik procent z celkové nejistoty vyčerpalo používané zařízení. Stejně tak procento variability operátora (% AV) ukazuje kolik procent z celkové nejistoty bylo vyčerpáno na lidskou chybu.

Procento variability kusu (% PV) ukazuje na kolik procent dokáže měřicí systém detekovat rozdíly mezi jednotlivými díly produkce. Je možné se domnívat, že při použití posuvného měřítka musí být chyba produkce dostatečně velká, aby jí bylo možné tímto mechanismem rozeznat. Drobná odchylka výroby zůstane nezpůsobována. Malá variabilita operátora při měření šířky osky může být zapříčiněna nízkou rozlišitelností posuvky a vlivem operátora, který si dvě desetinná místa snadno zapamatuje. Pro tuto studii se tedy jedná o nevyhovující výsledek. Je správné se domnívat, že při zopakování experimentu by se posuvné měřítko zařadilo do kategorie nevyhovujících měřidel pro náš účel.

Pro konečné vyhodnocení metody průměru a rozpětí je rozhodující posouzení míry opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měřicího postupu. Tento parametr určíme ze součtu druhých mocnin variability zařízení neboli jeho opakovatelnosti a z variability operátora neboli z jeho reprodukovatelnosti. Nejistoty je možné sčítat pouze pomocí součtu druhých mocnin,



protože nejistota zařízení a nejistota operátora se vzájemně ovlivňují. MSA nedokáže určit do jaké míry se variabilita zařízení a variability operátora ovlivňují, k tomu slouží metoda ANOVA, která je značně složitější.

## 7 NÁVRH ŘEŠENÍ

Experiment bude prováděn na souřadnicovém měřicím stroji Optiv Performance 443 od společnosti Hexagon. Jedná se o multifunkční zařízení, které je vybaveno třemi druhy snímání. Prvním jsou dotykové snímače umístěné v nerotační hlavě. Kamera pracující na základě různě nasvícených zvětšených kontur měřeného dílu. Její rozsah měření je pouze rovinný, a to v ose X a Y. Pro svislé odměřování se primárně užívá laserový paprsek. [11]

### 7.1 Optiv performance 443

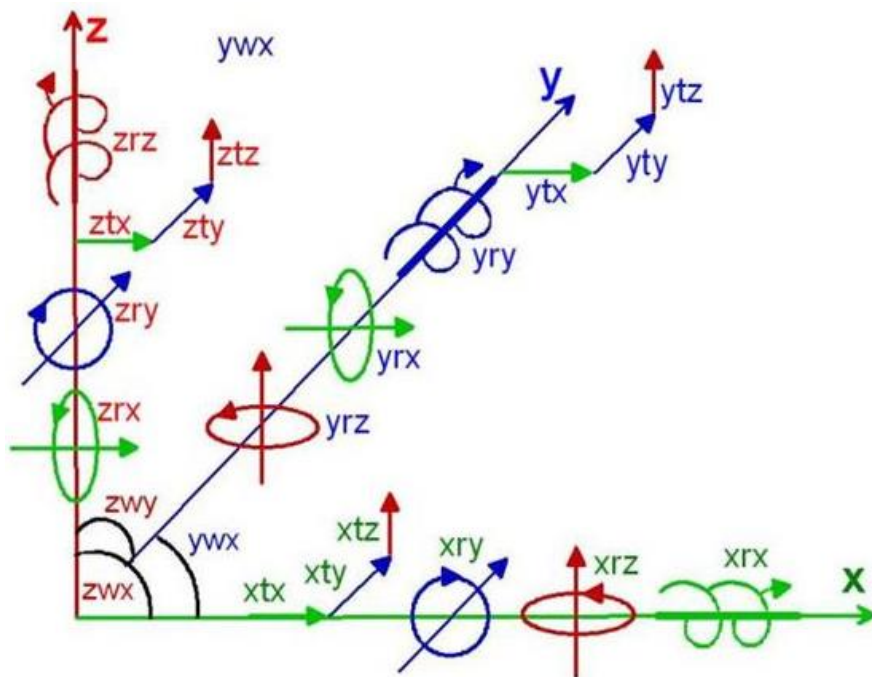
Model performance na obrázku Obr 34a) je univerzální stroj vybavený plnou multisenzorovou technikou. Konstrukce tohoto stroje je výložníkového typu opatřená masivní granitovou základnou. Pevný portál, pohyblivý stůl a přesná vzduchová ložiska na všech osách dokonale tlumí okolní vibrace. Celkový rozměr stroje je 1240 mm na délku, 850 mm na šířku a 2300 mm na výšku. Pracovní prostor má tvar kvádrů o velikosti 400x400x300 mm, je tedy vhodnější pro menší součástky. V jeho zóně se nachází zásobník se šesti snímači, skleněná deska a snímací hlavice rozšířená o optický a laserový senzor. Maximální zatížení skleněné desky je 40 kg. Stroj je napájen napětím 230 V o frekvenci 50 Hz. Zařízení je určeno do klimatizovaných laboratoří se stálou teplotou  $20^{\circ} \pm 3^{\circ}$ . [11]

Součástí stroje je šest snímacích dotyků, tři přímého typu a tři hvězdicovitěho typu s různě rozměrnými kuličkami. Dále je vybaven CCD kamerou, která dokáže až 10x zvětšit měřený objekt při plném zaostření. Optický senzor (Obr 34b) dále zajišťuje spolehlivou detekci hran ve stupních šedi, telecentrické LED podsvícení a LED kruhové osvětlení, které je možné řídit ve čtyřech nezávislých segmentech. Posledním dílčím senzorem je laser, který má vysokou rozlišitelnost pro statické měření výšek. Průměrná doba jeho zaostření je 0,2 s. [11]



Obr 34) Optiv performance 443 a) stroj a b) dotykový snímač a optický senzor [11]

Exkluzivní výhodou je možnost montáže druhé nezávislé vertikální osy, toto spojení se nazývá Dual Z. Umožňuje nezávislý pohyb optického a dotykového senzoru. Rozlišitelnost zařízené je  $0,1 \mu\text{m}$ . Přesnost najetí do jednotlivých os X a Y je  $1,1 + L/500 \mu\text{m}$ , v rovině XY  $1,3 + L/300 \mu\text{m}$  a v ose Z  $2,0 + L/300 \mu\text{m}$ . Proměnná L vyjadřuje vzdálenost najetí v mm. Obecně vzniká v konstrukci souřadnicových a obráběcích strojů 21 geometrických chyb, které popisuje diagram na Obr 35). Návrháři modelu performance se snažili tyto geometrické nedostatky co nevíce kompenzovat a daný SMS splňuje požadavky na přesnost dle normy ISO 10306. [11], [27]



Obr 35) Geometrické chyby v konstrukci strojů [27]

Stroj je vybavený softwarem PC Dmis CAD, který uživateli umožňuje práci s jakýmkoliv modelem, od 2D výkresů až po 3D modely. CAD data je možné importovat a exportovat v téměř libovolném formátu. Software dovoluje graficky testovat a ladit kontrolní postupy před samostatným spuštěním. Za pomoci animace ukazuje trajektorie sondy a umožňuje jejich editaci za běhu. Při práci s pevnými modely automaticky detekuje nebezpečí kolize snímačů s díly a přípravky. Uživatelské prostředí též zahrnuje nástroje pro tvorbu přehledných výstupních protokolů. [11]

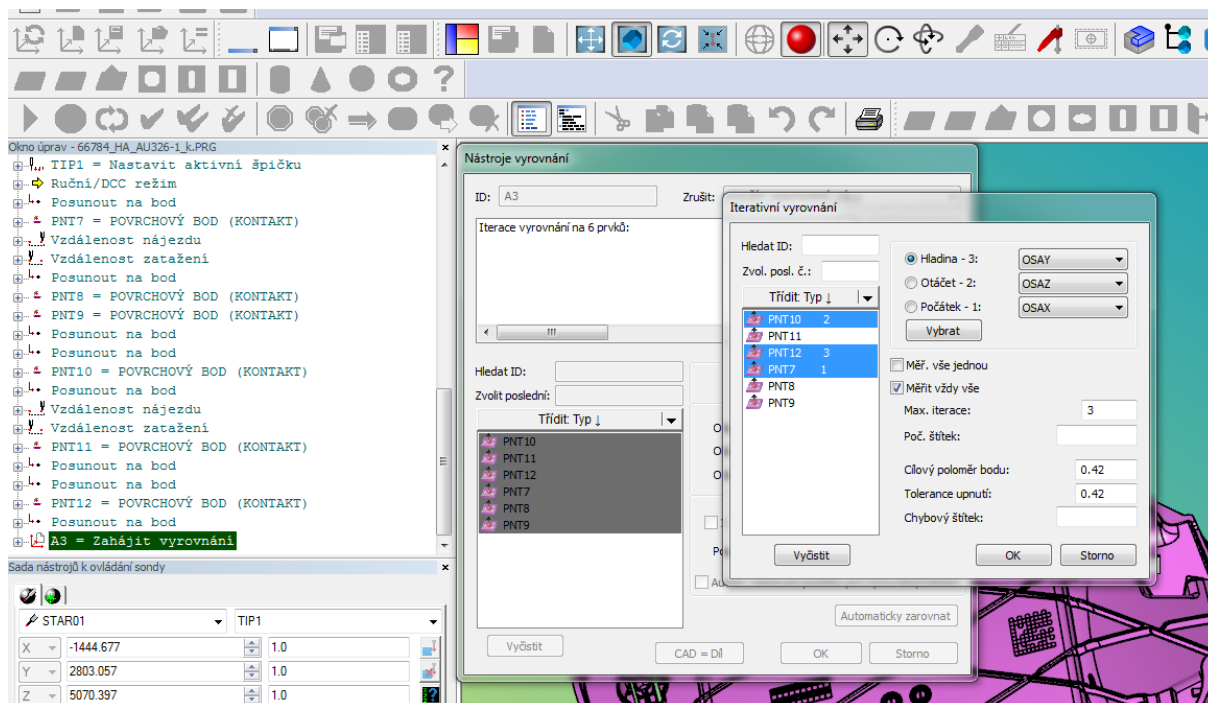
## 7.2 Plánování experimentu

V laboratoři se nacházejí tři souřadnicové měřicí stroje, intuitivně byl vybrán ten s nejmenší kapacitou využití. V práci je uveden pouze stručný a názorný popis vytvořeného programu pro uvedený díl. Kompletní program a jeho textová část jsou přiloženy v elektronické příloze. V hotovém programu je nastaven automatizovaný režim, takže obsluha po spuštění do programu dále nezasahuje. Během následujícího roku budou vytvořeny programy na tankovací ramena všech projektů. Aby nedocházelo k záměně programů, je na přípravku umístěn čárový kód, který po načtení spustí příslušný měřicí program. Součástí čárového kódu jsou informace o projektu, výkresové číslo a verze poslední úpravy programu. Čárový kód pro projekt AU326-1 je na obrázku Obr 36).



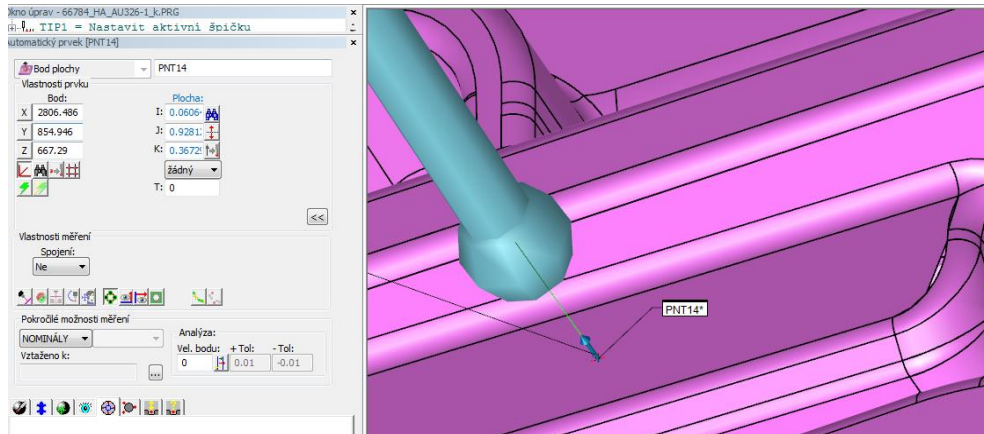
Obr 36) Čárový kód s názvem programu [39]

Na začátku programování je měřicí rychlost nastavena na 50 m/s a dotyková rychlost na 2 m/s. Na SMS strojích je možné pro vyrovnání použít přímo měřený objekt. Což je významná výhoda oproti předchozímu měření na výškovém měřidle, kde bylo použito vyrovnání na přípravek, který už je zatížený výrobní chybou. Pro zkoordinování dílu v prostoru je použito šest bodů v souřadném systému auta. Dle úmluvy v souvislosti s měřeným protikusem se jedná o tři body v ose Y, které určují rovinu. Dva v ose Z, které kus správně dotočí, a nakonec jeden v ose X, jímž se stanoví počátek. Tyto body i se souřadnicemi jsou součástí výrobního výkresu v elektronické příloze. Programátor je zadává ručně a následně pomocí snímače přeneše na měřený díl. Zde je nutné si uvědomit, že díl upnutý v přípravku a umístěný v pracovním prostoru stroje, je vůči souřadnému systému auta pootočený. Poté použije funkci souřadného systému a sváže ho se vzorkem. Dále se nastaví tři vyrovnávací smyčky, aby se každý kus měl možnost v měřicím prostoru vždy stejně natočit a vypolohovat. Pro body měřené v ypsilonové souřadnici auta je nutné nastavit menší vzdálenost nájezdu a odjezdu, protože je zde malý prostor pro manipulaci. Nastavení vyrovnání je na Obr. 37).



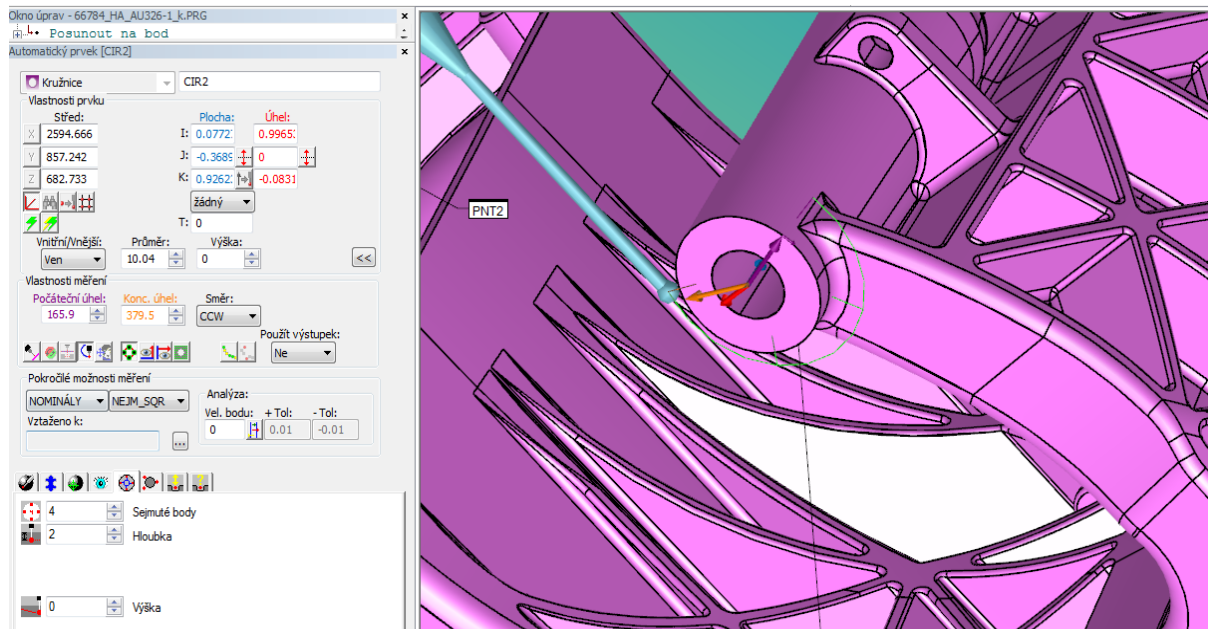
Obr 37) Definování souřadného systému

V další fázi jsou umístěny potřebné měřené body na díl a pomocí polohovaného zastavení a zvolení nejkratší možné dráhy je vytyčena trajektorie snímacího dotyku. Časově výhodné je také pro vyrovnání a celkové měření používat jeden dotyk, protože není do programu přinášena časová ztráta v podobě doby potřebné na výměnu snímačů. Na následující ilustraci Obr 38) je ukázáno vložení měřícího bodu do programu.



Obr 38) Přidání měřícího bodu do programu

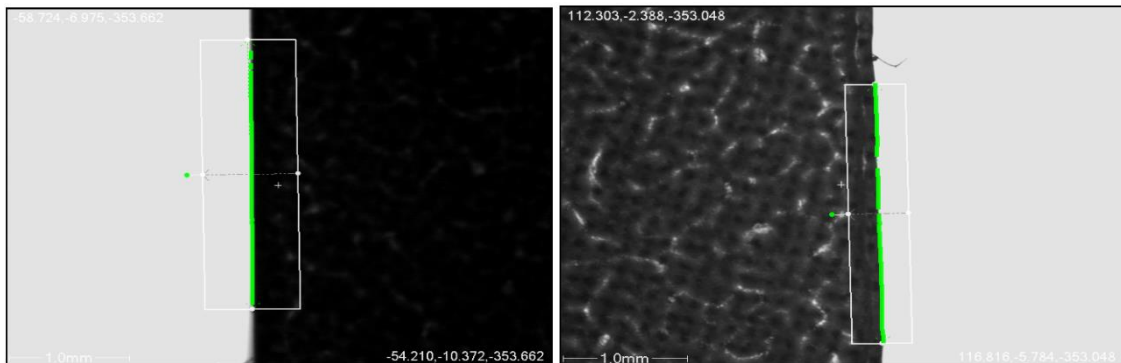
Pro změření délkového rozměru je potřebné určit střed osky, to se dělá pomocí dvou kruhových úsečí na vnější straně. Jednotlivé úseče jsou definovány příkazem kružnice, ve kterém se upraví počáteční a koncový úhel snímání. Dále se určí směr a počet měřených bodů. Ze středu těchto dvou výsečí vznikne přímka, která se používá k vyhodnocení vzdálenosti. Nastavení parametrů kružnice je na Obr.39).



Obr 39) Nastavení parametrů kružnice



Po změření všech bodů je snímač umístěn do zásobníku. Následně se zapne optický senzor, jímž jsou zaostřeny a změřeny hrany osky v podobě přímky. Důležitý je ostrý obraz a nasvícení. Dále se nastaví směr přechodu světla z černé části do bílé. Snímání jedné hrany je na Obr 40).



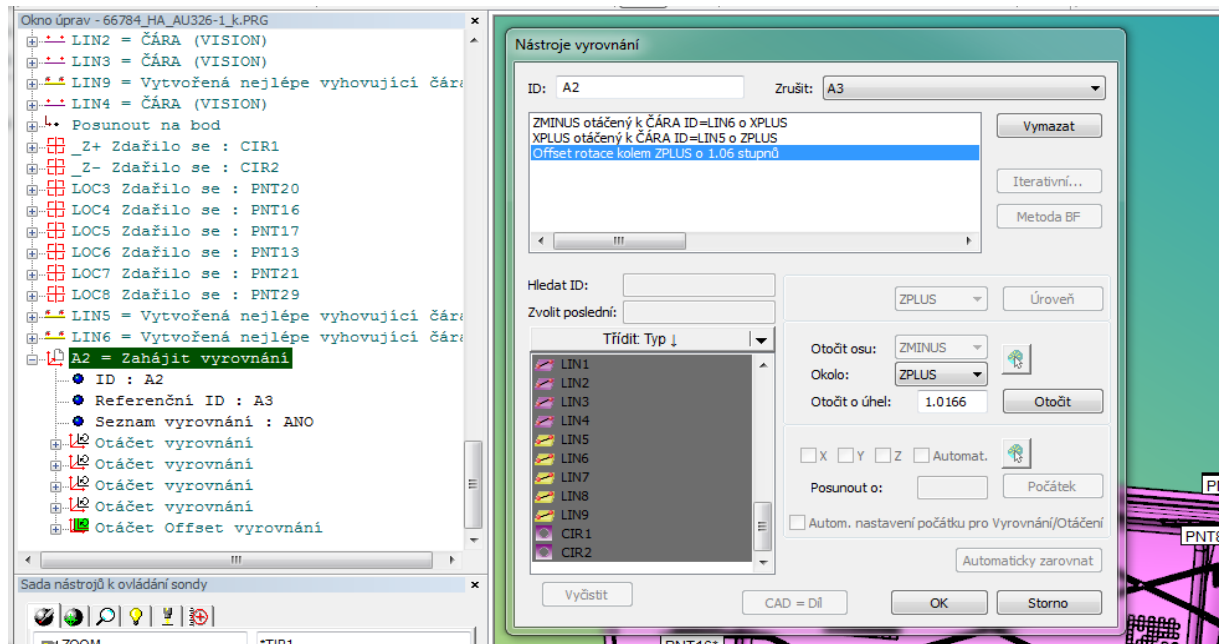
Obr 40) Snímání optickým senzorem

Tímto je ukončena zaznamenávací část programu a následuje vyhodnocení. Pro klasifikaci dle výkresu je nutné vložit nový souřadný systém. Osa Z bude shodná s přímkou osky a osa X otočena o úhel  $\alpha$  vypočítaný z následujícího vzorce:

$$\alpha = \arctg \left( \frac{a}{b} \right)$$

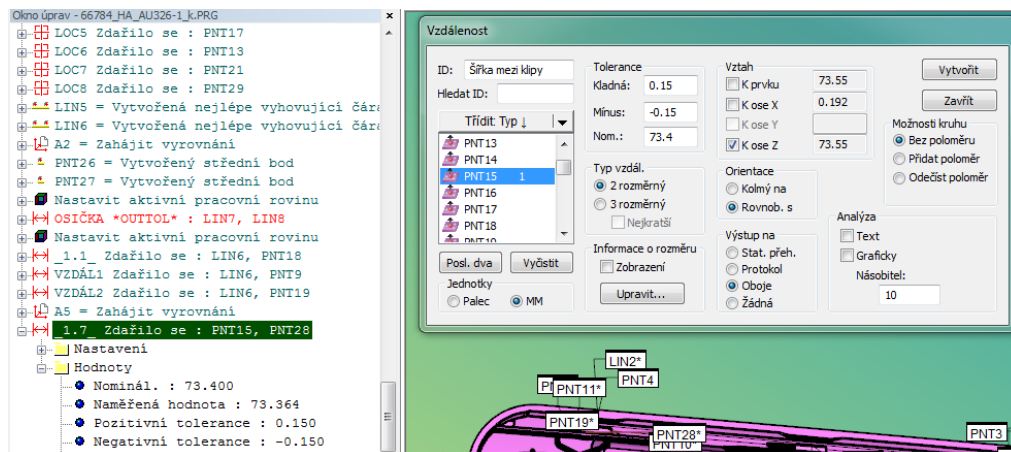
kde  $\alpha$  ... úhel natočení souřadného systému  
 $a$  ... výškový rozměr umístění podpěrného kolíku  
 $b$  ... délkový rozměr umístění podpěrného kolíku.

Oba rozměry jsou na výkresu součásti v elektronické příloze. Vytvoření a natočení nového souřadného systému je na Obr 41).



Obr 41) Vytvoření souřadného systému dle výkresu

Pro vyhodnocení zákaznických rozměrů je použita kóta vzdálenosti. V možnostech jsou uvedeny nominály a tolerance daných rozměrů. Postup klasifikace šířky mezi klipy je na Obr 42). Na požadavek oddělení kvality vyhodnotí program také 3D odchylky bodů na klikech v ose Z. Tím se odhalí nežádoucí zkroucení dílu v průběhu produkce. Pro zajímavost jsou vyhodnoceny ve dvou osách i 3D odchylky středu osky na obou stranách.



Obr 42) Vyhodnocení zákaznického rozměru

Závěrečným krokem programu je tvorba výstupního protokolu. Software PC Dmis obsahuje editační podprogram. Výstupní protokol v příloze 6 obsahuje hlavičku s časovými a evidenčními údaji. Pod záhlavím je umístěn snímek modelu, ke kterému se váží všechny vyhodnocené 3D odchylky. Tabulka níže předkládá naměřené rozměry s nominální hodnotou a tolerancemi. Pokud je naměřený rozměr mimo toleranci, automaticky se zbarví do červena. Mimo protokolu ve formátu PDF je dalším výstup souhrn naměřených dat v excelu, který slouží pro dlouhodobější sledování produkce. Data jsou online přístupná na firemním serveru a je možné je dále zpracovávat a upravovat.

### 7.3 Plán měření

Vytvořením a odzkoušením programu na souřadnicovém stroji končí programátorská práce. V tomto momentě je nezbytně nutné zaškolit všechny pracovníky, kteří budou daný program ke své práci využívat. Ve většině případů proběhne krátké školení, během kterého jsou jasně vytyčeny úkony, které operátor smí či nesmí provádět. Všichni účastníci svoji přítomnost stvrdí podpisem. Jako písemný záznam a také pro pozdější připomenutí slouží pracovní návodka. Jedná se o dokument, který za pomoci krátkého textu a obrázků popisuje pracovní postup obsluhy. V nadcházejícím textu jsou uvedeny dílčí kroky plánu měření. Kompletní pracovní návodka s příslušnými firemními náležitostmi je uvedena v příloze 5.

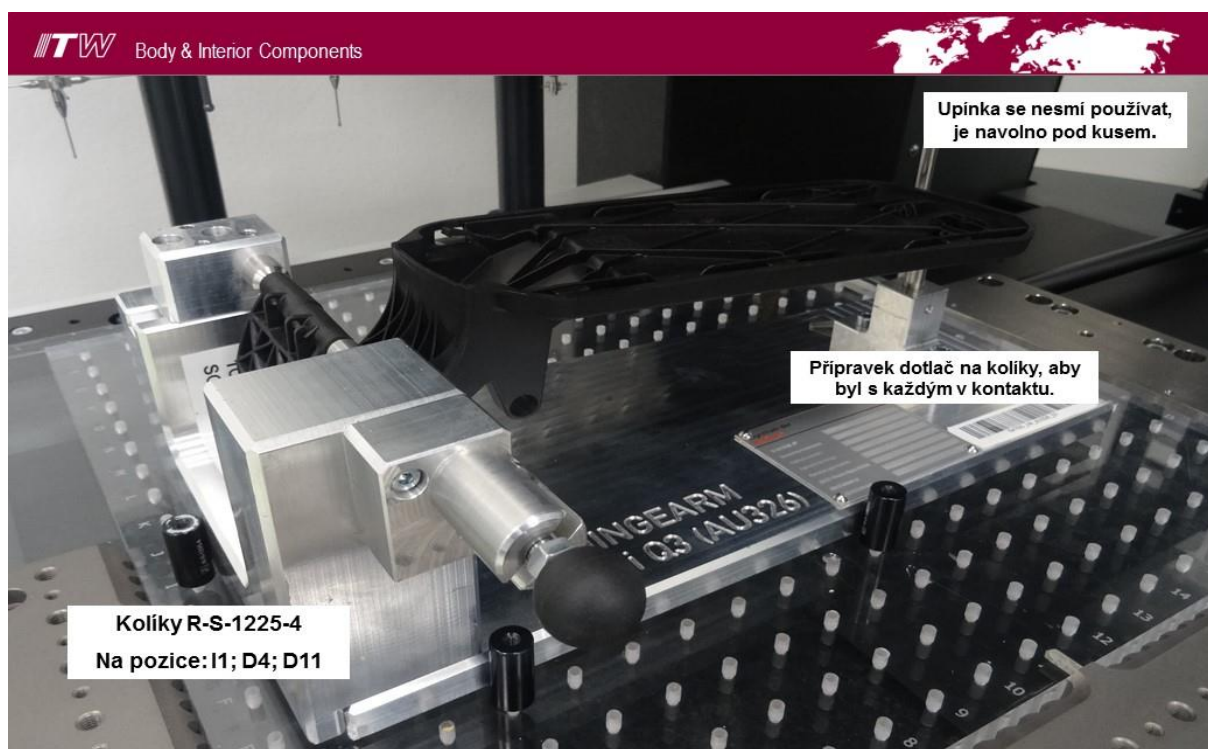
Prvním krokem je upnutí plastového ramene do přípravku. Narozdíl od současného stavu se nesmí upevňovat fixační upínkou, která by do nového systému měření zbytečně vnášela další nejistotu měření. Výhodou je vodorovná poloha dílu v přípravku. Dotyková síla je malá a nedochází jejím působením k vychylování měřicího dílu. Navíc je v této poloze možné změřit všechny požadované rozměry. Následujícím krokem je otevření příslušného programu. V uživatelském prostředí softwaru PC Dmis operátor klikne na záložku SOUBOR a OTEVŘÍT. Pomocí čtecího zařízení načte čárový kód a tím se příslušný program otevře. Jelikož je

pro každý projekt jedinečný program a tím i jedinečný čárový kód, tak by nemělo dojít k jejich záměně. Na obrázku Obr 43) je vyfotografován postup načítání čárového kódu.



Obr 43) Otevření programu načtením čárového kódu

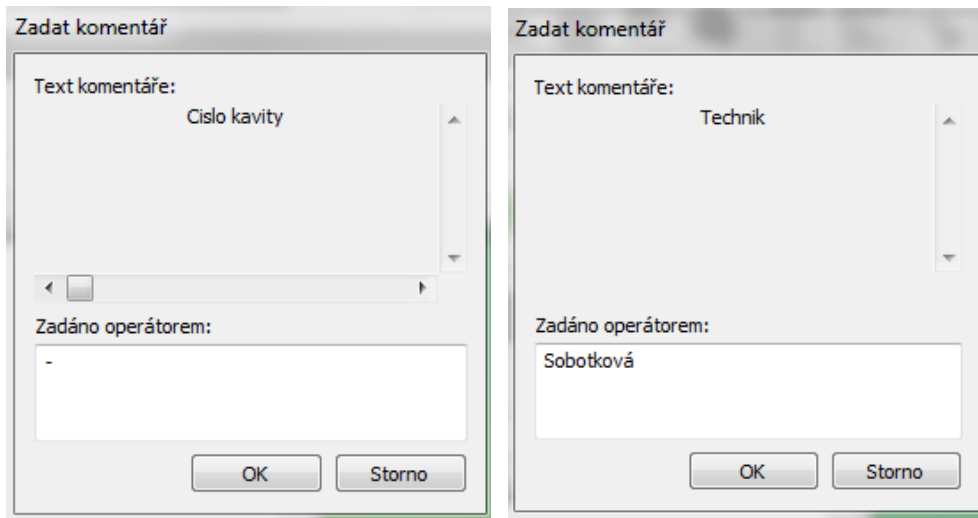
Ikonou PLAY se program spustí. Po spuštění se objeví komentovaný obrázek (Obr 44), který určuje, jak má být přípravek s objektem umístěn do pracovního prostoru souřadnicového stroje. Důležité je umístit měřený objekt do stejné polohy v jaké byl programován. Je tedy důležité použít shodné polohovací kolíky a jejich souřadnicové umístění na skleněné pracovní desce. Pokud ho umístí na jinou pozici hrozí nebezpečí kolize a poškození snímacího doteku.



Obr 44) Komentovaný obrázek umístění objektů do prostoru stroje



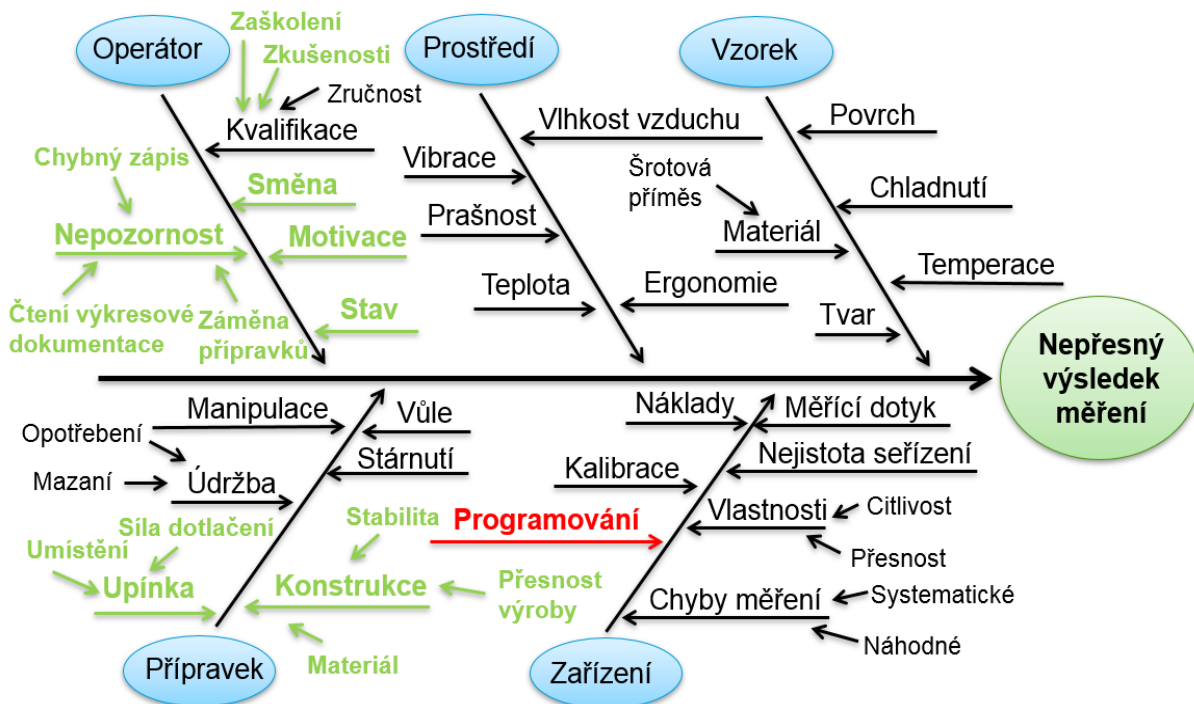
Kliknutím na obrázek je potvrzena správnou poloha. Ještě než začne zařízení měřit, je nutné vyplnit informativní parametry, které následně tvoří hlavičku výstupního protokolu. Jedná se o číslo kavity (v případě jednokavitové formy se nevyplňuje), jméno kontrolora/ky, datum produkce, generační stav, číslo dílu a popřípadě komentář. Viz obrázek Obr 45).



Obr 45) Zadávání vstupních dat

Do průběhu měření nemá možnost operátor zasáhnout. Po skončení programu software ukáže a vytiskne výsledný protokol s vyhodnocením požadovaných rozměrů. V této chvíli může operátor vyměnit kus v přípravku. Po změření požadovaného počtu kusů program křížkem zavře. Proběhlá měření se automaticky ukládají.

## 7.4 Systémový rozbor



Obr 46) Analýza příčin a následků nepřesného výsledku u nového návrhu

Po naprogramování nového řešení došlo ke značné eliminaci některých činitelů ovlivňujících výsledek měření. Směna, motivace či stav operátora už nemají žádný vliv na měření, protože celý proces vykonává systém sám. Částečný vliv operátora zůstává v neopatrnosti upnutí dílu do přípravku. Komponent je plastový a je snadné ho i nepatrnou silou deformovat. Vliv prostředí a samostatného výlisku se nijak výrazně nezměnil. Experiment je prováděn ve stejné laboratoři, tedy za stejných podmínek a na stejné produkci.

Jelikož jsou vyrovnávací body přímo na dílu, tak se značně snížila nejistota konstrukce upínacího přípravku. Fixační upínka se nepoužívá, tím pádem byl vliv jejího umístění a síly dotlačení odstraněn. Tímto opatřením byly eliminovány hned dvě z nejpravděpodobnějších příčin vzniku chyb.

Naopak novou dosti pravděpodobnou chybu sebou přináší samostatné programování. To je dále ovlivněno zkušeností, zručností a vědomostmi programátora. Této chybě se dá předcházet pouze řádným zaškolením a neustálým zvyšováním kvalifikace příslušného pracovníka. Aktualizovaná analýza příčin a rizik je na Obr 46.

## 7.5 Vyhodnocení podle R&R studie

K posouzení vhodnosti nového návrhu postupu kontrol byl proveden stejný experiment. Opět tři směnové kontrolorky změřily uvedené tři rozměry třikrát na deseti kusech v náhodném pořadí. Naměřená data jsou uvedena v excelovském souboru v elektronické příloze v listu Hexagon a jsou zpracována pomocí metody průměru a rozpětí dle formuláře v příloze 2. Výsledná a dílčí variability měřicího systému jsou uvedeny v následující tabulce:

Tab 8) Vyhodnocení nového řešení pomocí R&R

Variabilita	zařízení	operátora	kusu	systému měření	Stav měřicího systému
Rozměr	%EV	%AV	%PV	%RaR	
Celková délka	5,6	0,0	99,8	5,6	přijatelný
Šířka mezi klipy	9,8	2,0	99,4	10,0	přijatelný
Šířka osky	11,2	0,0	99,2	11,2	možná přijatelný

Jak už bylo několikrát řečeno, novým postupem měření se značně omezil vliv operátora. Toto tvrzení potvrzují i nízké procentuální vyjádření variability operátora v uvedené tabulce. Dále na základě předložených výsledků lze usuzovat i značnou sníženou vlivu zařízení, které se dle číselných hodnot u prvního a druhého rozměru snížilo čtyřikrát v porovnání se současným stavem.

Navíc je možné předložené řešení vnímat jako citlivější na změnu produkce oproti předešlému řešení. O tom vypovídá skoro stoprocentní zastoupení variability kusu (% PV) v tabulce. S nepatrně většími rozdíly vychází šířka osky, která je snímána optickou sondou. Při měření plastových dílů a pro účely formy, jsou tyto rozdíly zanedbatelné. Celkově se dá předložený postup kontroly považovat za přijatelnější a efektivnější než postup výchozí.

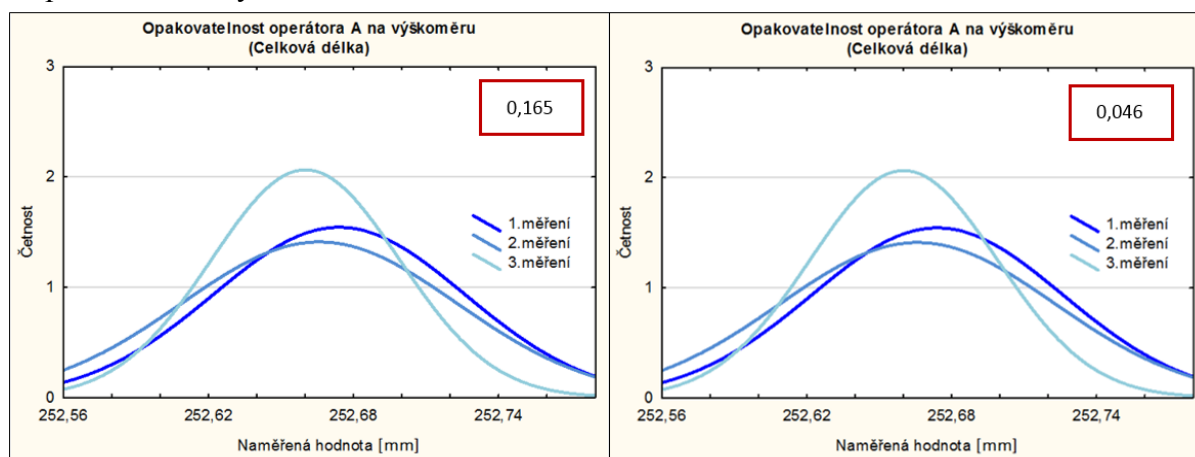


## 8 STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ

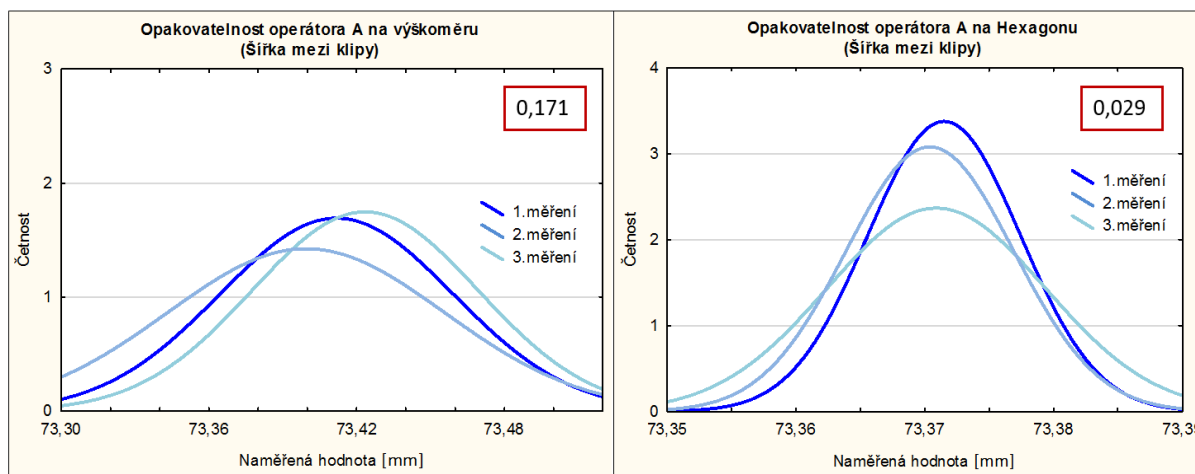
Pro srovnání obou postupů kontroly tankovacího ramene bylo naměřeno celkem devadesát hodnot pro každý zákaznický rozměr za použití obou postupů měření. Tato data jsou uvedené v elektronické příloze a byly dále statisticky zpracovány a vyhodnoceny.

### 8.1 Porovnání opakovatelnosti operátorů

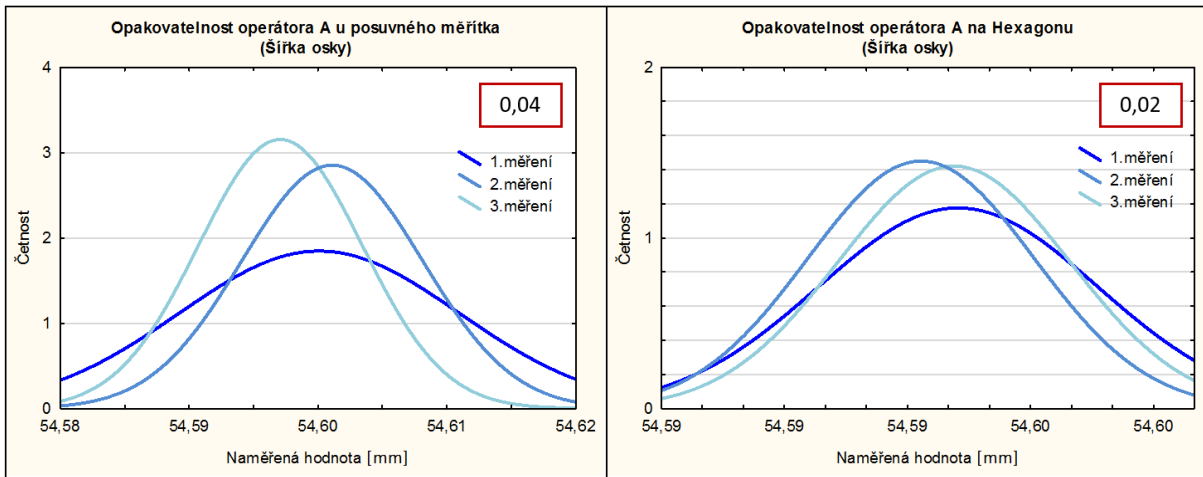
Jedním z ukazatelů zkvalitnění měření je opakovatelnost operátora. Jedná se o část dat, kdy jeden operátor nejdříve naměřil deset kusů v náhodném pořadí a následně tento úkon dvakrát zopakoval. To bylo provedeno všemi operátory pro všechny rozměry a pro oba postupy měření. Níže v textu jsou uvedeny pouze rozdíly opakovatelnosti operátora A pro všechny rozměry (Obr 47, 48 a 49). Opakovatelnost zbylých dvou operátorů je uvedena v příloze 7 a 8. Pro úplnou interpretaci výsledků je nutné si uvědomit, že grafy vytvořené v programu Statistica 12 mají různá měřítka jednotlivých os. Při vyjádření histogramu program vychází z normálního rozdělení a tedy šířka a počet tříd určuje sám. Pro úplnost jsou grafy doplněny rozpětím naměřených hodnot.



Obr 47) Opakovatelnost operátora A při měření celkové délky oběma způsoby



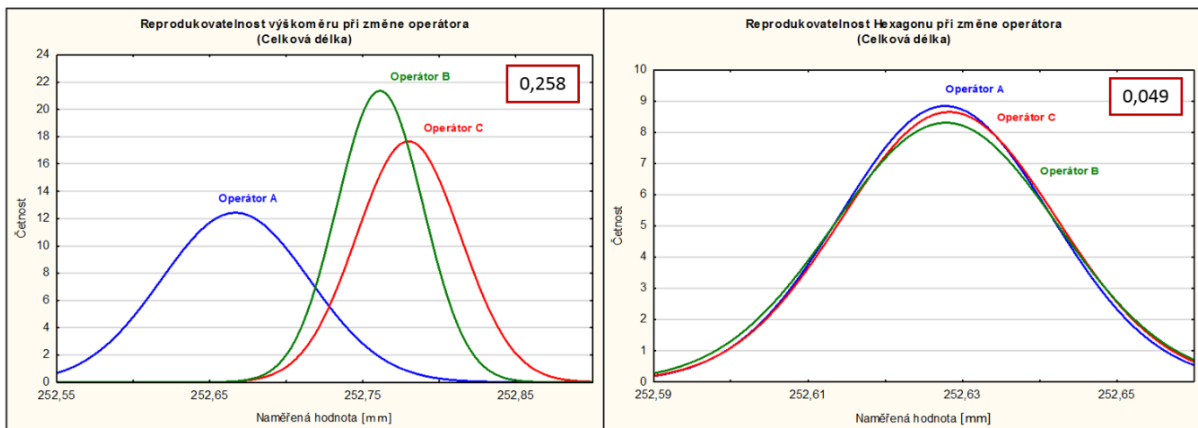
Obr 48) Opakovatelnost operátora A při měření šířky mezi klípy oběma způsoby



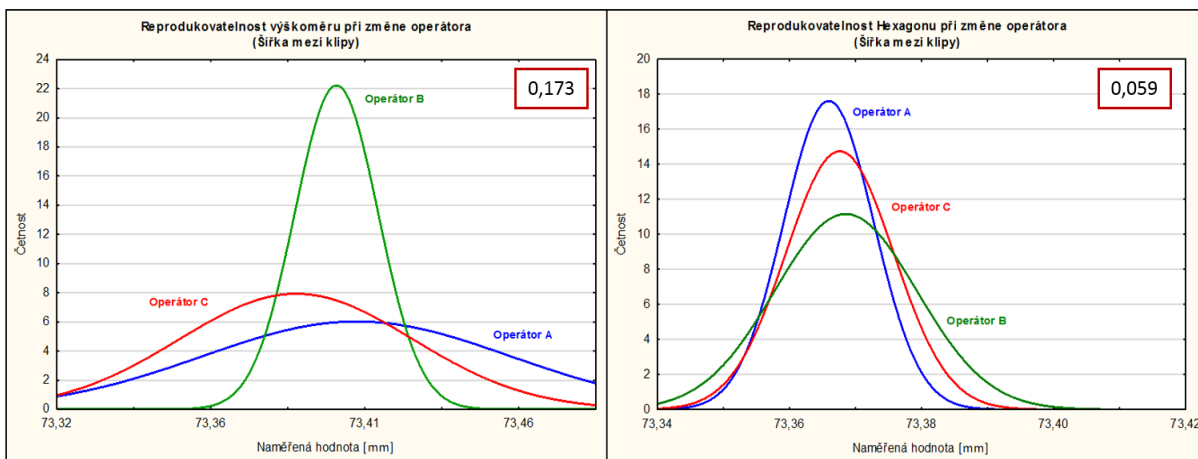
Obr 49) Opakovatelnost operátora A při měření šířky osky oběma způsoby

## 8.2 Porovnání reprodukovatelnosti zařízení

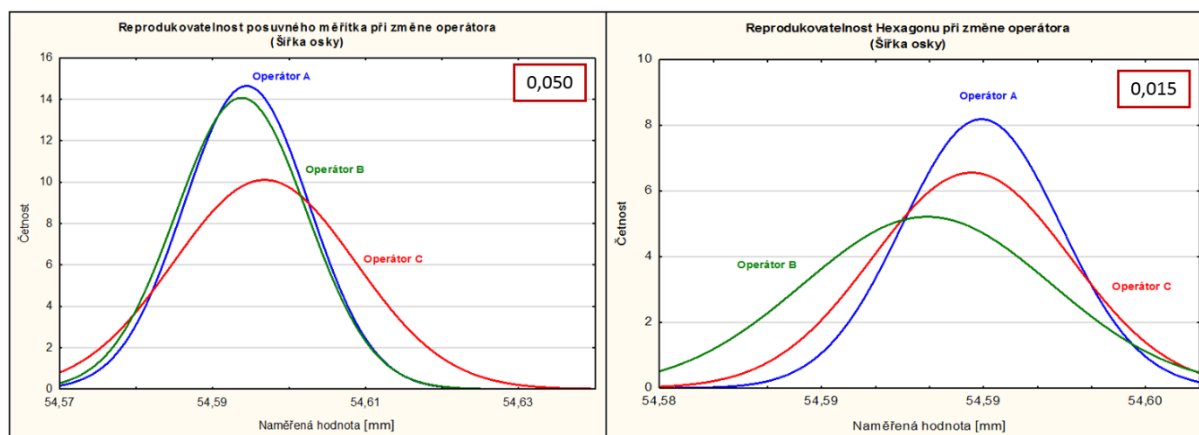
Dalším významným ukazatelem zlepšení metody měření je reprodukovatelnost zařízení, na kterých byl experiment prováděn. Naměřená data od všech operátorů jsou porovnávána v následujících grafech (Obr 50, 51 a 52) pro všechny tři naměřené hodnoty. Opět zde nastává stejný problém s měřítkem jednotlivých os, proto jsou zde uvedena celková rozpětí naměřených hodnot u jednotlivých zařízeních.



Obr 50) Reprodukovatelnost výškoměru a Hexagonu při měření celkové délky



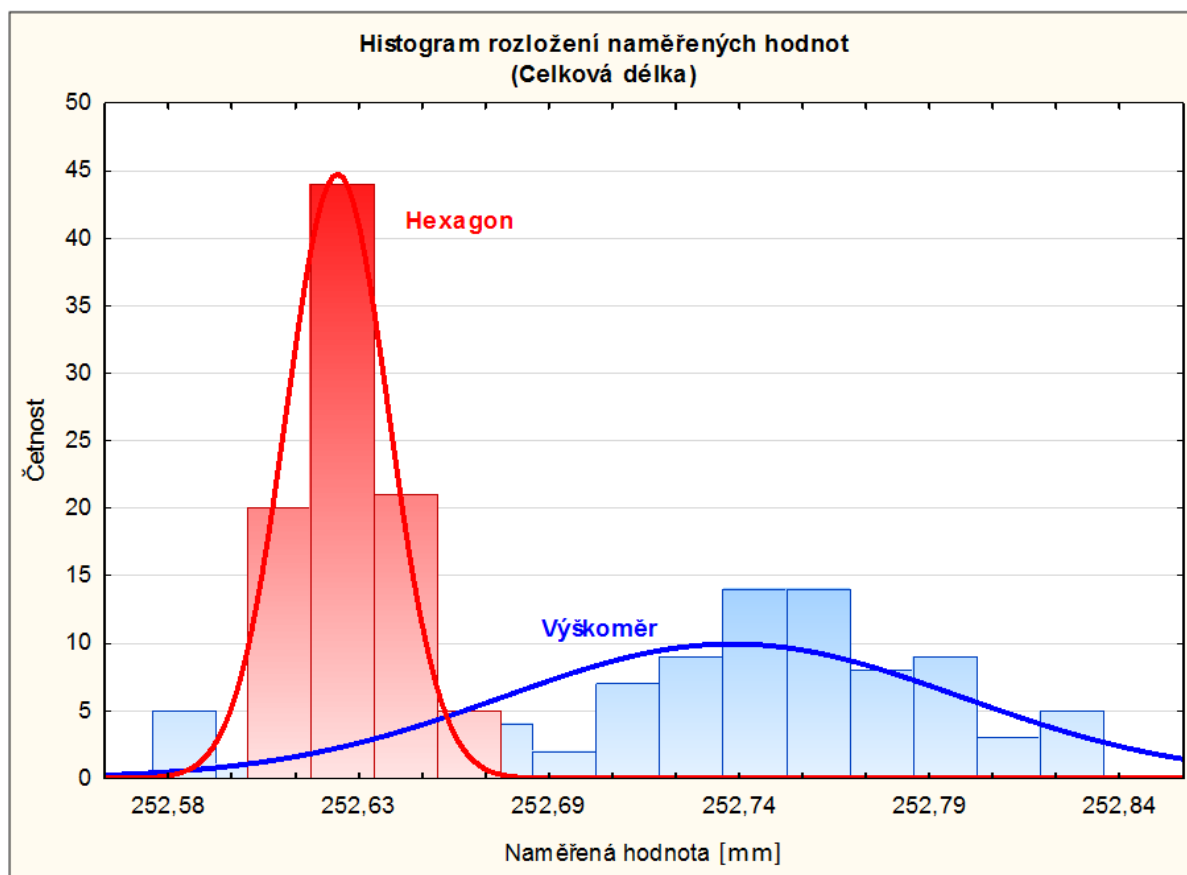
Obr 51) Reprodukovatelnost výškoměru a Hexagonu při měření šířky mezi klipy



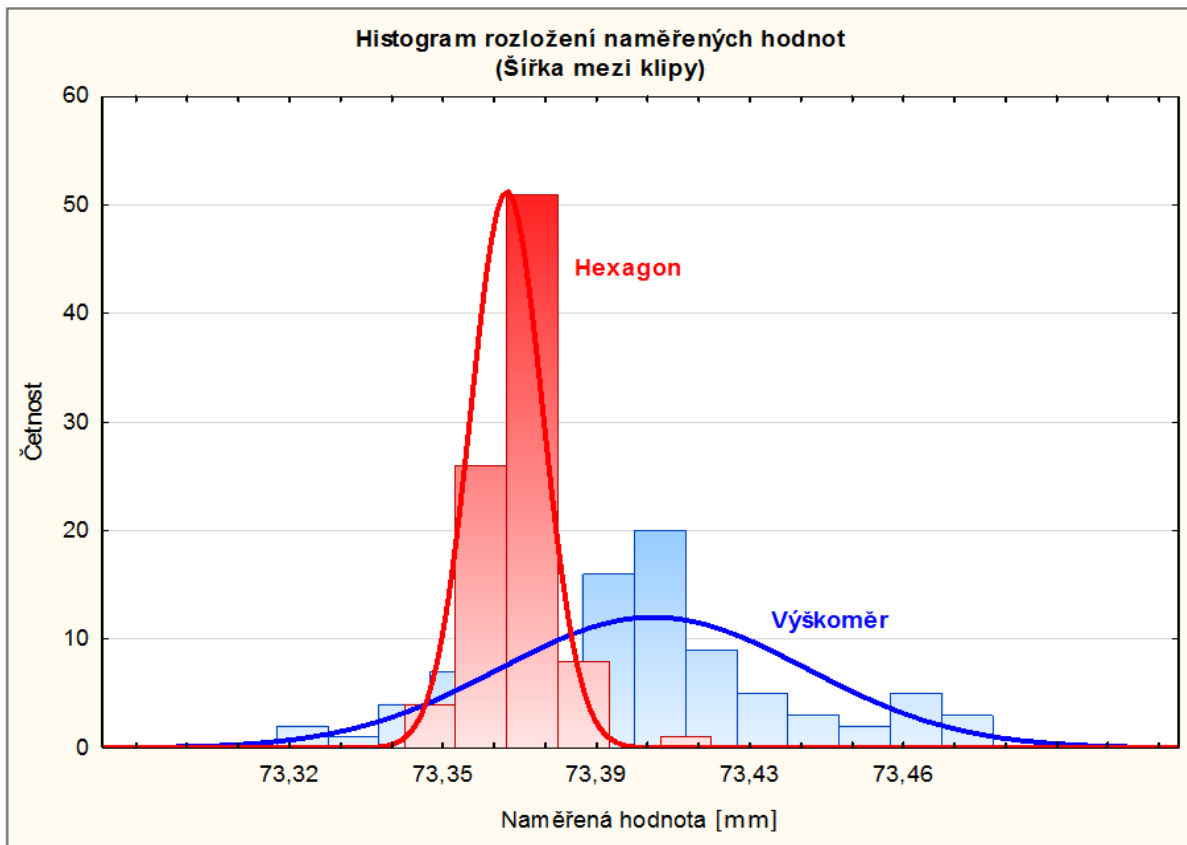
Obr 52) Reprodukovatelnost posuvky a Hexagonu při měření šířky osky

### 8.3 Porovnání rozložení naměřených hodnot

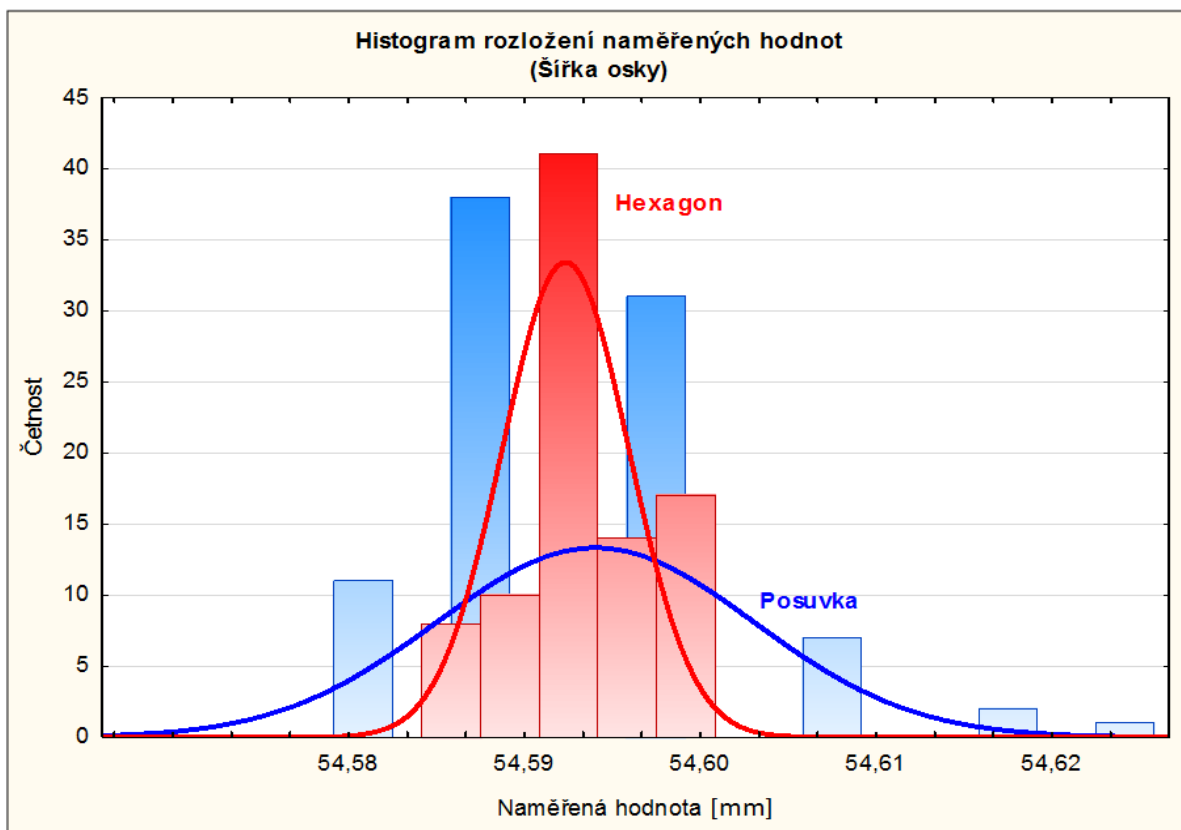
Dalším ukazatelem zefektivnění je zúžení pásma naměřených hodnot. Histogramy rozložení naměřených hodnot jsou na následujících obrázcích Obr. 53, 54 a 55. Jelikož došlo k zúžení pásma naměřených dat u všech tří zákaznických rozměrů a nejen u jednoho či dvou, je možné považovat celý systém za přesnější a odolnější vůči nejistotám.



Obr 53) Porovnání naměřených dat 1. rozměru



Obr 54) Porovnání naměřených dat 2. rozměru



Obr 55) Porovnání naměřených dat 3. rozměru

## 8.4 Snížení nejistoty měření

Číselné vyjádření snížení nejistot, které vznikají vlivem systematických chyb a je v lidských silách je ovlivnit je v tabulce Tab 9). Pro lepší představitelnost snížení nejistoty typu A je v tabulce uvedeno procentuální vyjádření. U všech tří rozměrů byly nejistoty typu A vycházející ze směrodatné odchylky sníženy o 60–78 %. Naopak náhodné vlivy dokáže člověk ovlivnit pouze ve velmi omezené míře a jejich podrobná studie není cílem této práce.

Tab 9) Snížení nejistot způsobených systematickými chybami

<b>Snížení nejistot měření typu A</b>				
	Současný stav	Hexagon	Rozdíl	% snížení
<b>Celková délka ramene</b>				
A	0,048	0,014	0,035	71,9%
B	0,034	0,014	0,020	59,1%
C	0,028	0,014	0,014	48,5%
Celková	0,062	0,014	0,048	77,8%
<b>Šířka mezi klipy</b>				
A	0,049	0,007	0,042	86,2%
B	0,013	0,008	0,005	39,1%
C	0,037	0,011	0,027	71,3%
Celková	0,037	0,009	0,028	76,5%
<b>Šířka osky</b>				
A	0,008	0,003	0,005	64,3%
B	0,012	0,004	0,008	69,2%
C	0,009	0,005	0,004	46,1%
Celková	0,010	0,004	0,006	60,1%

## 8.5 Zvýšení kapacity stroje

Nezamýšleným přínosem renovovaného řešení je efektivnější využití souřadnicového stroje. Pro výpočet současného využití byla po dobu tří měsíců sbírána data časové obsazenosti stroje během směn. Stejný časový úsek byla sbírána data pro výpočet běžného počtu měřených kusů. Průměrně za jednu dvanáctihodinovou směnu je stroj skoro z 50 % využíván na produkci Capless a programování. K tomu bylo připočteno odhadované využití stroje na měření tankovacích ramen. Časový interval pro měření jednoho kusu novým způsobem byl vypočtený jako průměr z časů dosud vytvořených programů pro zákazníka Audi. Po vynásobení tohoto času předpokládaným počtem kontrolovaných kusů za směnu bylo vypočteno odhadované zvýšení využití kapacity SMS přibližně o 17 % za směnu. Celkově by měl být průměrně využíván 75 % pracovní doby. Nasbíraná data a podrobný výpočet jsou uvedeny v elektronické příloze.



## 8.6 Časová úspora

Sice malým ale i tak přínosem je časová úspora. Pro výpočet průměrného času potřebného na změření jednoho kusu dle současného plánu měření byly převzaty data z jiné firemní studie. Podrobný výpočet je uvedený v elektronické příloze. V následující tabulce Tab 10) je uvedena denní úspora v minutách a roční úspora v hodinách. Roční úsporou je myšleno ušetření času za 344 dní, kdy je firma v provozu. Jedná se o vcelku neznatelnou úsporu. Časová úspora nebyla cílem řešené problematiky, daleko důležitější je dosažení přesnějšího a opakovatelnějšího měřicího systému. Společně s nevyužitou kapacitou stroje je možné ji do budoucna využít ke zkrácení intervalů mezi kontrolami.

Tab 10) Časová úspora při zavedení nového návrhu

Období/čas	Současný stav	Nové řešení	Časová úspora
Změření 1 ks (min)	3,48	3,11	0,38
Denní (min)	268,27	239,26	29,00
Roční (hod)	1538,07	1371,78	2,77

## 9 ZÁVĚR

Náplní této závěrečné práce bylo zhodnocení současného postupu kontroly plastového komponentu do tankovací nádrže automobilu. Při podrobnějším zkoumání a pomocí metody R&R byl současný způsob měření vyhodnocený za dále nevyhovující. Proto bylo nezbytně nutné navrhnout zefektivnění tohoto postupu. Za pomoci analýzy příčin a následků byly vytyčeny hlavní faktory zapříčiňující značné nejistoty v původním stavu. Na tyto činitele byl kladen velký důraz při snaze o redukci nejistot.

Pro lepší pochopení problematiky byly v teoretické části popsány hlavní pojmy metrologie a statistiky. Nejdůležitější a nejzajímavější částí bylo vytvoření samostatného programu. K jeho tvorbě byl použit souřadnicový měřicí stroj od formy Hexagon s uživatelsky příjemným softwarem PC Dmis. Problematice souřadnicových strojů je v práci věnována celá kapitola. Pro posouzení přínosu nové metody změřilo více operátorů vícekrát deset kusů v náhodném pořadí oběma měřicími metodami.

Z naměřených dat vyplívá, že došlo k velkému snížení vlivu operátora na výsledky měření a částečnému snížení vlivu měřicího zařízení. Pokud operátor zamění přípravek, nebo do něj díl špatně upne, tak program zahlásí chybu a měření neproběhne. Dále došlo k zúžení rozpětí měřených hodnot mezi jednotlivými operátory, tím pádem ke zvýšení opakovatelnosti a reprodukovatelnosti. K ustavení dílu nebyla použita upínka a tím byl její vliv na měření odstraněn úplně. Velkým přínosem je zvýšení využití kapacity měřicího stroje a časová úspora. To by bylo možné do budoucna využít k častější kontrole. Například zkrácením intervalu mezi přeměřováním z dvanácti hodin na šest. Pokud by se produkce zhoršila během směny mohla by být odhalena dříve než směnou následující.

Po domluvě se společností ITW Pronovia s.r.o. bude tento program dále využíván v praxi. Vzhledem k tomu, že firma vlastní okolo 150 různých projektů, bude třeba vytvořit jednotlivé programy na každý z nich. V souvislosti s tím se objevil nový problém v podobě záměny programu. Tato záležitost se podařila vyřešit pomocí instalace čtecího zařízení čárových kódů, které se liší dle projektů.



## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Alwaid: Your professional partner in metrology* [online]. [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: <https://www.alwaid.cz/>
- [2] *Automobil industry* [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <http://infocube.cz/cs/automobil-industry/>
- [3] *Autoroad* [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://autoroad.cz/>
- [4] CALDA, Emil a Václav DUPAČ. *Matematika pro gymnázia*. 5. vyd. Praha: Prometheus, 2008. Učebnice pro střední školy (Prometheus). ISBN 978-80-7196-365-3.
- [5] CITACE PRO. Generátor citací [online]. 2013 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>
- [6] ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. *Strojírenská metrologie I*. Vyd. 5., V Akademickém nakl. CERM vyd. 3. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4010-4.
- [7] ČEPOVÁ, Lenka a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch: studijní opora*. Ostrava: Vysoká škola báňská, Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2514-4.
- [8] ERDINGER, Filip. *Analýza postupu kontroly obráběného dílu na CMM*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2015, 58 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Mikeš
- [9] GEIZEROVÁ, Helena. *Epidemiologie: vybrané kapitoly pro seminární a praktická cvičení*. 2., dopl. vyd. Praha: Karolinum, 1995. Biomedicínská statistika. ISBN 80-718-4179-X.
- [10] GEORGE, Michael L. *Kapesní příručka Lean Six Sigma: rychlý průvodce téměř 100 nástroji na zlepšování kvality procesů, rychlosti a komplexity*. Brno, 2010. ISBN 978-80-904099-2-7.
- [11] *HEXAGON: Manufacturing Intelligence* [online]. [cit. 2019-03-27]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ>
- [12] HNÁTEK, Jan. *Komentované vydání normy ČSN EN ISO 9001:2016: systémy managementu kvality – Požadavky*. Praha: Česká společnost pro jakost, 2016. ISBN 978-80-02-02642-6.
- [13] *Homer.cz Live* [online]. 2016 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://www.homerlive.cz/>
- [14] CHRISTOPH, Ralf a Hans Joachim NEUMANN. *Multisenzorová souřadnicová měřicí technika*. Čtvrté, přepracované a rozšířené vydání. Uherské Hradiště: L. V. Print, 2008.
- [15] *IATF Příručka auditora ISO/TS 16949*. Praha: Česká společnost pro jakost, 2014. ISBN 978-80-02-02577-1.
- [16] ISHIKAWA, Kaoru. *What is total quality control? The Japanese way*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, c1985. ISBN 01-395-2433-9.
- [17] *ITW & CSR: Working together* [online]. 2015 [cit. 2018-12-11]. Dostupné z: <http://itw2015.dixeatondevsites.com/>
- [18] *ITW* [online]. 2019 [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: <http://www.itw.com/>
- [19] *ITW AUTOMOTIVE OEM: Fuel, Release & Trim* [online]. [cit. 2018-11-29]. Dostupné z: <https://www.itw-deltar.de/itw/home.html>

- [20] *ITW Dynatec* [online]. COPYRIGHT, 2019 [cit. 2019-01-26]. Dostupné z: <https://www.itwdynatec.com/>
- [21] *ITW Pronovia* [online]. [cit. 2018-11-24]. Dostupné z: <https://www.itwpronovia.cz/cs/>
- [22] KARPÍŠEK, Zdeněk. *Matematika IV. 4., přeprac. vyd.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2014. ISBN 978-80-2144-858-2.
- [23] KLADIVO, Petr. *Základy statistiky*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2013. ISBN 978-80-244-3841-2.
- [24] LENFELD, Petr. *Technologie vstřikování* [online]. Svitavy: publi.cz, 2016 [cit. 2017-05-24]. ISBN 78-80-88058-74-8. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/Cover.html>
- [25] *Management mania* [online]. Copyright, 2011 [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://managementmania.com/cs/measurement-system-analysis>
- [26] *Metrie s.r.o.* [online]. 2016 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.metrie.cz/index.php?lang=cz>
- [27] MIKEŠ, Petr, Libor BERÁNEK. *Úvod do metrologie a souřadnicového měření na CMM*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2015.
- [28] MILITKÝ, Jiří a Dana KŘEMENÁKOVÁ. *Metrologie a řízení jakosti*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-242-6.
- [29] *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/>
- [30] *Netstal* [online]. Netstal Maschinen, 2019 [cit. 2019-01-26]. Dostupné z: <https://www.netstal.com/en/home.html>
- [31] NEZDAŘILÍKOVÁ, Martina. *Analýza systému měření*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013, 64 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Alois Fiala CSc.
- [32] PERNIKÁŘ, Jiří a Miroslav TYKAL. *Strojírenská metrologie II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-3338-8.
- [33] POKORNÝ, Přemysl. *Souřadnicové měřicí stroje*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 1998. ISBN 80-708-3326-2.
- [34] *Prima Bilavčík s.r.o.: Přístroje pro měření a metrologii* [online]. 2014 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.merici-pristroje.cz/>
- [35] *QuattroDaily* [online]. 2018 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.quattrodaily.com/>
- [36] *RENISHAW: Ap* [online]. [cit. 2019-03-04]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/renishaw-zvysovani-efektivit-ve-vyrobe-a-zdravotni-peci--1030>
- [37] ŘEZANKOVÁ, Hana, Luboš MAREK, Michal VRABEC, Lukáš KALENSKÝ a Pavel ŘEZANKA. *IASTAT-Interaktivní učebnice statistiky* [online]. 2001 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://iastat.vse.cz/>
- [38] *Simply Safe Dividends: Illinois tool works* [online]. COPYRIGHT, 2017 [cit. 2019-02-26]. Dostupné z: <https://1.simplysafedividends.com/illinois-tool-works-itw/>
- [39] *TEC-IT Datenverarbeitung GmbH: Barcode Software* [online]. [cit. 2019-03-27]. Dostupné z: <https://www.tec-it.com/en/start/Default.aspx>

- [40] TICHÁ, Šárka, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. *Strojírenská metrologie*. Vyd. 5., V Akademickém nakl. CERM vyd. 3. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0671-1.
- [41] *Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví* [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://www.unmz.cz/test/casto-kladene-otazky-metrologie>
- [42] *Vhodnost kontrolních procesů: vhodnost měřicích systémů, vhodnost procesů měření a kontroly, rozšířená nejistota, posuzování shody*. Praha: Česká společnost pro jakost, 2011. Management jakosti v automobilovém průmyslu. ISBN 978-80-02-02307-4.
- [43] VOLF, Jaromír, Josef JENČÍK a Kamil PODANÝ. *Technická měření*. Vyd. 5., V Akademickém nakl. CERM vyd. 3. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-010-2138-6. [N] ISBN 978-80-7414-730-2
- [44] ZAJÍC, Jiří. *Analýza systémů měření (MSA): příručka*. 3. vyd. Praha: Česká společnost pro jakost, 2003. Česká společnost pro jakost. ISBN 80-020-1562-2.
- [45] ZEISS [online]. [cit. 2019-02-06]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/corporate/home.html>
- [46] ZELENÝ, František. *Základní vlastnosti měřicích přístrojů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1976. Řada strojírenské literatury.
- [47] ZVÁROVÁ, Jana. *Základy statistiky pro biomedicínské obory: nationalism, war and the great powers*. 2., dopl. vyd. Praha: Karolinum, 2011. Biomedicínská statistika. ISBN 978-80-246-1931-6.



# 10 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

## 10.1 Seznam tabulek

Tab 1)	Nejčastější intervaly spolehlivosti pro normální rozdělení [23].....	27
Tab 2)	Hodnoty korekčních koeficientů pro různé počty opakování [43] .....	34
Tab 3)	Pojmy studie msa [44] .....	38
Tab 4)	Přijatelnost systému měření [31], [44] .....	39
Tab 5)	Konstanty regulačních mezí pro metodu r&r [44].....	41
Tab 6)	Nejpravděpodobnější příčiny vzniku nejistot měření současného stavu .....	65
Tab 7)	Vyhodnocení současného stavu pomocí r&r .....	65
Tab 8)	Vyhodnocení nového řešení pomocí r&r.....	75
Tab 9)	Snížení nejistot způsobených systematickými chybami.....	81
Tab 10)	Časová úspora při zavedení nového návrhu .....	82

## 10.2 Seznam obrázků

Obr 1)	Ukázky kontrolovaných dílů .....	15
Obr 2)	Prodejní a výrobní místa společnosti ITW [20] .....	17
Obr 3)	Vstříkolis Synergy 2400 [30] .....	18
Obr 4)	Palivový systém s bezvíčkovým uzavíráním nádrže [17] .....	19
Obr 5)	Zamykací komponenty [19] .....	19
Obr 6)	Vztah mezi odhady střední hodnoty [6] .....	24
Obr 7)	Normální rozdělení [47] .....	26
Obr 8)	Grafické zobrazení četností a) histogram, b) polygon [23].....	28
Obr 9)	Stabilita systému měření [44].....	29
Obr 10)	Strannost systému měření [44] .....	29
Obr 11)	Linearita měřicího systému [44].....	29
Obr 12)	Opakovatelnost měření [5] .....	30
Obr 13)	Reprodukovatelnost měření [5] .....	31
Obr 14)	Grafické vyjádření chyby měření [5] .....	31
Obr 15)	Ishikawův diagram příčin a následků [25] .....	38
Obr 16)	Kalibrace CMM a) postup kalibrace, b) kalibrační koule [45] .....	48
Obr 17)	Jednodušší typy SMS a) sloupový a b) výložníkový typ [14].....	50
Obr 18)	Mostová konstrukce SMS a) schéma a b) ukázka ALWAID MCT SL [14], [32] ..	50
Obr 19)	Portálový typ a stroj ZEISS Accura [14], [45].....	51
Obr 20)	Schéma měřicího stroje KRONOS od výrobce COORD3 [1] .....	52
Obr 21)	Snímací hlavice firmy Renishaw a) 3osý systém, b) 5osý systém a c) manuální systém [7], [36].....	54
Obr 22)	Principy snímání 3D měřicí hlavy a) Elektromechanické kontakty, b) Mechanicko-elektrický měnič [14] .....	54



Obr 23) Měřicí doteky firmy Prima Bilavčik s.r.o. [34].....	55
Obr 24) Materiály a) rubín, b) nitrid křemíku, c) oxid zirkoničitý a d) diamant [7].....	56
Obr 25) Tankovací sestavy v automobilech [3], [13].....	59
Obr 26) Model Audi 326-1 Q4 [35] .....	59
Obr 27) Testované tankovací rameno.....	60
Obr 28) Upínací přípravek a) samostatný a b) s upnutým dílem.....	61
Obr 29) a) výškoměr TESA Hite 700, b) měřicí doteky výškoměru, c) kalibrace měřícího doteku [34] .....	62
Obr 30) Postup měření celkové délky na výškoměru .....	62
Obr 31) Postup měření šířky mezi klipy na výškoměru .....	63
Obr 32) Měření šířky tzv. osky.....	63
Obr 33) Analýza příčin a následků nepřesného výsledku měření současného stavu .....	64
Obr 34) Optiv performance 443 a) stroj a b) dotykový snímač a optický senzor [11].....	67
Obr 35) Geometrické chyby v konstrukci strojů [27].....	68
Obr 36) Čárový kód s názvem programu [39].....	69
Obr 37) Definování souřadného systému .....	69
Obr 38) Přidání měřícího bodu do programu .....	70
Obr 39) Nastavení parametrů kružnice.....	70
Obr 40) Snímání optickým senzorem.....	71
Obr 41) Vytvoření souřadného systému dle výkresu .....	71
Obr 42) Vyhodnocení zákaznického rozměru .....	72
Obr 43) Otevření programu načtením čárového kódu.....	73
Obr 44) Komentovaný obrázek umístění objektů do prostoru stroje .....	73
Obr 45) Zadávání vstupních dat .....	74
Obr 46) Analýza příčin a následků nepřesného výsledku u nového návrhu .....	74
Obr 47) Opakovatelnost operátora A při měření celkové délky oběma způsoby.....	77
Obr 48) Opakovatelnost operátora A při měření šířky mezi klipy oběma způsoby .....	77
Obr 49) Opakovatelnost operátora A při měření šířky osky oběma způsoby .....	78
Obr 50) Reprodukovatelnost výškoměru a Hexagonu při měření celkové délky.....	78
Obr 51) Reprodukovatelnost výškoměru a Hexagonu při měření šířky mezi klipy .....	78
Obr 52) Reprodukovatelnost posuvky a Hexagonu při měření šířky osky.....	79
Obr 53) Porovnání naměřených dat 1. rozměru .....	79
Obr 54) Porovnání naměřených dat 2. rozměru .....	80
Obr 55) Porovnání naměřených dat 3. rozměru .....	80

# 11 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

## 11.1 Seznam tabulek

Tab 1)	Nejčastější intervaly spolehlivosti pro normální rozdělení [23].....	27
Tab 2)	Hodnoty korekčních koeficientů pro různé počty opakování [43] .....	34
Tab 3)	Pojmy studie msa [44] .....	38
Tab 4)	Přijatelnost systému měření [31], [44] .....	39
Tab 5)	Konstanty regulačních mezí pro metodu r&r [44].....	41
Tab 6)	Nejpravděpodobnější příčiny vzniku nejistot měření současného stavu .....	65
Tab 7)	Vyhodnocení současného stavu pomocí r&r .....	65
Tab 8)	Vyhodnocení nového řešení pomocí r&r.....	75
Tab 9)	Snížení nejistot způsobených systematickými chybami.....	81
Tab 10)	Časová úspora při zavedení nového návrhu .....	82

## 11.2 Seznam obrázků

Obr 1)	Ukázky kontrolovaných dílů .....	15
Obr 2)	Prodejní a výrobní místa společnosti ITW [20] .....	17
Obr 3)	Vstříkolis Synergy 2400 [30] .....	18
Obr 4)	Palivový systém s bezvíčkovým uzavíráním nádrže [17] .....	19
Obr 5)	Zamykací komponenty [19] .....	19
Obr 6)	Vztah mezi odhady střední hodnoty [6] .....	24
Obr 7)	Normální rozdělení [47] .....	26
Obr 8)	Grafické zobrazení četností a) histogram, b) polygon [23].....	28
Obr 9)	Stabilita systému měření [44].....	29
Obr 10)	Strannost systému měření [44].....	29
Obr 11)	Linearita měřícího systému [44].....	29
Obr 12)	Opakovatelnost měření [5] .....	30
Obr 13)	Reprodukovatelnost měření [5] .....	31
Obr 14)	Grafické vyjádření chyby měření [5] .....	31
Obr 15)	Ishikawův diagram příčin a následků [25] .....	38
Obr 16)	Kalibrace CMM a) postup kalibrace, b) kalibrační koule [45] .....	48
Obr 17)	Jednodušší typy SMS a) sloupový a b) výložníkový typ [14].....	50
Obr 18)	Mostová konstrukce SMS a) schéma a b) ukázka ALWAID MCT SL [14], [32] ..	50
Obr 19)	Portálový typ a stroj ZEISS Accura [14], [45].....	51
Obr 20)	Schéma měřícího stroje KRONOS od výrobce COORD3 [1] .....	52
Obr 21)	Snímací hlavice firmy Renishaw a) 3osý systém, b) 5osý systém a c) manuální systém [7], [36].....	54

Obr 22) Principy snímání 3D měřící hlavy a) Elektromechanické kontakty, b) Mechanicko-elektrický měnič [14].....	54
Obr 23) Měřicí doteky firmy Prima Bilavčík s.r.o. [34].....	55
Obr 24) Materiály a) rubín, b) nitrid křemíku, c) oxid zirkoničitý a d) diamant [7].....	56
Obr 25) Tankovací sestavy v automobilech [3], [13].....	59
Obr 26) Model Audi 326-1 Q4 [35] .....	59
Obr 27) Testované tankovací rameno.....	60
Obr 28) Upínací přípravek a) samostatný a b) s upnutým dílem.....	61
Obr 29) a) výškoměr TESA Hite 700, b) měřicí doteky výškoměru, c) kalibrace měřícího doteku [34] .....	62
Obr 30) Postup měření celkové délky na výškoměru.....	62
Obr 31) Postup měření šířky mezi klipy na výškoměru .....	63
Obr 32) Měření šířky tzv. osky.....	63
Obr 33) Analýza příčin a následků nepřesného výsledku měření současného stavu .....	64
Obr 34) Optiv performance 443 a) stroj a b) dotykový snímač a optický senzor [11].....	67
Obr 35) Geometrické chyby v konstrukci strojů [27].....	68
Obr 36) Čárový kód s názvem programu [39].....	69
Obr 37) Definování souřadného systému .....	69
Obr 38) Přidání měřícího bodu do programu .....	70
Obr 39) Nastavení parametrů kružnice.....	70
Obr 40) Snímání optickým senzorem.....	71
Obr 41) Vytvoření souřadného systému dle výkresu .....	71
Obr 42) Vyhodnocení zákaznického rozměru .....	72
Obr 43) Otevření programu načtením čárového kódu.....	73
Obr 44) Komentovaný obrázek umístění objektů do prostoru stroje .....	73
Obr 45) Zadávání vstupních dat .....	74
Obr 46) Analýza příčin a následků nepřesného výsledku u nového návrhu .....	74
Obr 47) Opakovatelnost operátora A při měření celkové délky oběma způsoby.....	77
Obr 48) Opakovatelnost operátora A při měření šířky mezi klipy oběma způsoby .....	77
Obr 49) Opakovatelnost operátora A při měření šířky osky oběma způsoby .....	78
Obr 50) Reprodukovatelnost výškoměru a Hexagonu při měření celkové délky.....	78
Obr 51) Reprodukovatelnost výškoměru a Hexagonu při měření šířky mezi klipy .....	78
Obr 52) Reprodukovatelnost posuvky a Hexagonu při měření šířky osky.....	79
Obr 53) Porovnání naměřených dat 1. rozměru .....	79
Obr 54) Porovnání naměřených dat 2. rozměru .....	80
Obr 55) Porovnání naměřených dat 3. rozměru .....	80

### 11.3 Seznam použitých zkratk a symbolů

Značka	Veličina	Jednotka
$s_x$	směrodatná odchylka	-
$s_x^2$	rozptyl hodnot	-
$v_x$	variační koeficient	[%]
$\bar{x}$	aritmetický průměr	-
$x_i$	jednotlivá měření	-
$\sigma^2$	rozptyl normálního rozdělení	-
$f(x)$	frekvenční funkce	-
$n$	počet měření	-
$x_m$	naměřená hodnota	-
$x_p$	konvenčně pravá hodnota	-
$\Delta_r$	relativní chyba měření	-
$\Delta$	absolutní chyba měření	-
$\mu$	střední hodnota normálního rozdělení	-
$\sigma$	směrodatná odchylka normálního rozdělení	-
$\Delta_c$	celková chyba zatěžující měření	-
$\Delta_s$	systematická chyba	-
$\delta$	náhodná chyba	-
$\varepsilon_{ST}$	systematická teplotní chyba	-
$\alpha$	koeficient délkové roztažnosti	[K <sup>-1</sup> ]
$T$	teplota, při které bylo realizováno měření	[°C]
$T_0$	referenční teplota	[°C]
$L$	naměřený délkový rozměr	[mm]
$u_A$	standartní nejistota typu A	-
$u_{AK}$	korigovaná standartní nejistota typu A	-
$k$	koeficient vázaný na počet měření	-
$u_z$	dílčí nejistota	-
$Z_{max}$	maximální odchylka dílčí nejistoty	-
$m$	součinitel odpovídající druhu rozdělení	-
$u_B$	celková nejistota typu B	-
$n$	počet zdrojů dílčích nejistot	-
$u_r$	rozšířená standartní nejistota	-
$k_r$	korekční koeficient	-
$u_C$	kombinovaná standartní nejistota	-
$\Delta y$	statická absolutní chyba	-
$y_\infty$	údaj přístroje v ustáleném stavu	-
$x$	měřená veličina	-
$\delta(y)$	relativní chyba	-
$T_p$	třída přesnosti	-
$\Delta y_{max}$	největší přípustná chyba přístroje	-
$y_{max} - y_{min}$	měřící rozpětí přístroje	-
$c$	citlivost měřicích přístrojů	-

$\Delta x$	změna měřené veličiny	-
p	počet diskrétních veličin	-
$I_p$	informační obsah	-
$\phi_p$	informační kapacita	-
$\Delta t$	diference času	[s]
$\bar{R}$	průměrné rozpětí	-
$R_i$	dílčí rozpětí měření	-
GRR	výsledná variabilita (metoda rozpětí)	[%]
g	počet měřených kusů	-
$d_2^*$	konstanta pro výpočet směrodatné odchyšky	-
$\bar{\bar{R}}$	průměr všech rozpětí	-
r	počet operátorů	-
$\bar{R}_A$	průměrné rozpětí měření operátora A	-
$\bar{R}_B$	průměrné rozpětí měření operátora B	-
$\bar{R}_C$	průměrné rozpětí měření operátora C	-
UCL <sub>R</sub>	horní regulační mez	-
D <sub>4</sub>	koeficient pro určení horní regulační meze	-
LCL <sub>R</sub>	dolní regulační mez	-
D <sub>3</sub>	koeficient pro určení dolní regulační meze	-
EV	variabilita zařízení	-
$\sigma_c$	opakovatelnost měření	-
K <sub>1</sub>	konstanta pro výpočet variability zařízení	-
AV	variabilita operátora	-
X <sub>diff</sub>	maximální diference operátorů	-
K <sub>2</sub>	konstanta pro výpočet variability operátora	-
R&R	výsledná variabilita (metoda průměru a rozpětí)	-
PV	variabilita mezi kusy	-
R <sub>p</sub>	rozpětí průměru mezi operátory	-
TV	celková variabilita	-
T	tolerance	-
$\alpha$	úhel natočení souřadného systému	[°]
a	výškový rozměr umístění podpěrného kolíku	[mm]
b	délkový rozměr umístění podpěrného kolíku	[mm]

## 12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 - HODNOTY $d_2^*$ PRO ROZDĚLENÍ PRŮMĚRNÉHO ROZPĚTÍ (MSA) [44] I	
Příloha 2 - PROTOKOL NA SBĚR ÚDAJŮ A VYHODNOCENÍ MSA.....	II
Příloha 3 - Analýza příčin a následků současného stavu .....	III
Příloha 4 - Záznamový arch současného postupu měření .....	IV
Příloha 5 - Kompletní návodka nového postupu měření.....	V
Příloha 6 - Protokol ze SMS stroje.....	VI
Příloha 7 - Opakovatelnost operátora B při měření zákaznických rozměrů .....	VII
Příloha 8 - Opakovatelnost operátora C při měření zákaznických rozměrů .....	VIII

### Elektronické přílohy (CD)

Výkres součásti

Výkres přípravků

Ověřovací protokol přípravku

Naměřená data a jejich statistické zpracování




# PŘÍLOHY

## Příloha 1 – Hodnoty $d_2^*$ pro rozdělení průměrného rozpětí (MSA) [44]

		m (počet realizací)														
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
g (počet operátorů x počet kusů)	1	1,41	1,91	2,24	2,48	2,67	2,83	2,96	3,08	3,18	3,27	3,35	3,42	3,49	3,55	
	2	1,28	1,81	2,15	2,40	2,60	2,77	2,91	3,02	3,13	3,22	3,3	3,38	3,45	3,51	
	3	1,23	1,77	2,12	2,38	2,58	2,75	2,89	3,01	3,11	3,21	3,29	3,37	3,43	3,49	
	4	1,21	1,75	2,11	2,37	2,57	2,74	2,88	3,00	3,10	3,20	3,28	3,36	3,43	3,49	
	5	1,19	1,74	2,10	2,36	2,56	2,73	2,87	2,99	3,10	3,19	3,28	3,35	3,42	3,49	
	6	1,18	1,73	2,09	2,35	2,56	2,73	2,87	2,99	3,10	3,19	3,27	3,35	3,42	3,48	
	7	1,17	1,73	2,09	2,35	2,55	2,72	2,87	2,99	3,10	3,19	3,27	3,35	3,42	3,48	
	8	1,17	1,72	2,08	2,35	2,55	2,72	2,87	2,98	3,09	3,19	3,27	3,35	3,42	3,48	
	9	1,16	1,72	2,08	2,34	2,55	2,72	2,86	2,98	3,09	3,18	3,27	3,35	3,42	3,48	
	10	1,16	1,72	2,08	2,34	2,55	2,72	2,86	2,98	3,09	3,18	3,27	3,34	3,42	3,48	
	11	1,16	1,71	2,08	2,34	2,55	2,72	2,86	2,98	3,09	3,18	3,27	3,34	3,41	3,48	
	12	1,15	1,71	2,07	2,34	2,55	2,72	2,85	2,98	3,09	3,18	3,27	3,34	3,41	3,48	
	13	1,15	1,71	2,07	2,34	2,55	2,71	2,85	2,98	3,09	3,18	3,27	3,34	3,41	3,48	
	14	1,15	1,71	2,07	2,34	2,54	2,71	2,85	2,98	3,08	3,18	3,27	3,34	3,41	3,48	
	15	1,15	1,71	2,07	2,34	2,54	2,71	2,85	2,98	3,08	3,18	3,26	3,34	3,41	3,48	
	>15	1,128	1,693	2,059	2,326	2,534	2,704	2,847	2,970	3,078	3,173	3,258	3,336	3,407	3,472	



## Příloha 2 – Protokol na sběr údajů a vyhodnocení MSA

				<h1 style="margin: 0;">Analýza systému měření</h1> <h2 style="margin: 0;">MSA</h2>					Datum				
Měřicí zařízení													
Projekt								Nominál					
Číslo výkresu								Horní tolerance					
Revize								Dolní tolerance					
Jméno	Operátor A				Operátor B				Operátor C				$\bar{x}_i$
	1	2	3	Průměr	1	2	3	Průměr	1	2	3	Průměr	
Díl	1	2	3	Průměr	1	2	3	Průměr	1	2	3	Průměr	
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
$\bar{x}$													
$\bar{R}$													
<b>Analýza měřicí jednotky</b>													
$\bar{\bar{x}} = \frac{\bar{x}_A + \bar{x}_B + \bar{x}_C}{r} =$					$\%EV = \frac{EV}{TV} \cdot 100 =$								
$\bar{\bar{R}} = \frac{\bar{R}_A + \bar{R}_B + \bar{R}_C}{r} =$					$\%AV = \frac{V}{TV} \cdot 100 =$								
$\bar{x}_{diff} = \bar{x}_{max} - \bar{x}_{min} =$					$\%GRR = \frac{R\&R}{TV} \cdot 100 =$								
$\bar{R}_p = \bar{x}_{imax} - \bar{x}_{imin} =$													
$UCL_R = D_4 \cdot \bar{\bar{R}} =$					$\%PV = \frac{PV}{TV} \cdot 100 =$								
$LCL_R = D_3 \cdot \bar{\bar{R}} =$													
$EV = \bar{\bar{R}} \cdot K_1 =$													
$AV = \sqrt{(\bar{X}_{diff} \cdot K_2)^2 - \frac{EV^2}{n \cdot r}} =$													
$R\&R = \sqrt{EV^2 + AV^2} =$													
$PV = R_p \cdot K_3 =$													
$TV = \sqrt{R\&R^2 + PV^2} =$													

### Příloha 3 – Analýza příčin a následků současného stavu

Možná příčina/ člen týmu		Měřící technik	Programátor SMS	Inženýr kvality	Procesní inženýr	Směnová kontrola	Operátor	Personalista	Celkem bodů
1	Chybný zápis operátora	6	7	5	6	7	7	7	45
2	Operátor zamění přípravek	4	5	5	4	5	4	4	31
3	Chybná orientace ve výkresu	7	7	8	6	7	4	5	44
4	Zaškolení operátora	6	5	5	6	5	4	5	36
5	Zkušenosti operátora	8	8	10	6	9	5	8	54
6	Zručnost operátora	5	5	4	6	6	3	5	34
7	Motivace operátora	3	5	4	5	5	4	10	36
8	Stav operátora	5	7	5	4	8	6	8	43
9	Pracovní směna	8	7	7	4	8	8	7	49
10	Prostředí při práci	6	6	5	6	5	5	3	36
11	Vibrace na pracovišti	5	5	4	6	5	5	1	31
12	Teplota na pracovišti	4	5	7	3	3	4	2	28
13	Prašnost na pracovišti	4	4	4	5	5	5	3	30
14	Vlhkost vzduchu na pracovišti	4	3	3	5	2	2	5	24
15	Ergonomie pracoviště	6	7	5	6	4	4	4	36
16	Materiál vylisku	5	5	6	7	5	5	3	36
17	Šrotová příměs vylisku	8	4	7	5	3	5	2	34
18	Povrch vylisku	9	9	4	4	3	3	5	37
19	Temperace vylisku	6	7	6	4	4	5	3	35
20	Chladnutí vylisku	5	5	5	6	4	4	4	33
21	Manipulace s přípravkem	4	4	4	4	5	5	4	30
22	Mazání přípravku	5	6	6	3	2	3	3	28
23	Opatření přípravku	6	7	5	8	5	4	4	39
24	Umístění upínky	9	8	7	8	7	7	4	50
25	Síla dotlačení upínky	10	8	6	8	7	8	5	52
26	Vůle přípravku	7	6	7	6	6	6	6	44
27	Stárnutí přípravku	6	6	6	5	6	5	5	39
28	Stabilita konstrukce přípravku	6	7	7	4	3	3	6	36
29	Materiál přípravku	2	2	5	5	8	3	2	27
30	Přesnost výroby přípravku	4	4	7	7	3	4	3	32
31	Náklady na měřecí zařízení	2	2	4	1	2	2	7	20
32	Chyby měření náhodné	4	4	7	3	4	4	2	28
33	Chyby měření systematické	6	7	6	3	4	4	3	33
34	Kalibrace	7	8	4	3	5	3	3	33
35	Nejistota seřízení	6	6	5	6	7	5	5	40
36	Citlivost zařízení	6	6	6	6	7	7	5	43
37	Přesnost měření	8	7	7	5	5	3	4	39
38	Měřící dotyk	3	2	7	7	6	6	5	36

## Příloha 4 – Záznamový arch současného postupu měření

# ITW Pronovia

Vlkovská 595  
595 01 Velká Bíteš

Tel.: +420566788951  
Fax.: +420566788991

Součást plánu  
kontrol

č.54203

				Rameno		AU326-1 Q4							
<b>Název dílu</b>				<b>Tankovací rameno</b>					<b>Průběh práce</b>	<b>Uvolnění produkce a přeměření po 12 hod</b>			
<b>Číslo dílce</b>				66784-1-00-001					<b>Zákazník č.</b>		Audi AU326-1		
<b>Frekvence kontrol</b>				12 hodin ( 1x za směnu)					<b>Stav schválení</b>		02S		
č.	<b>Kontrolovaný prvek</b>	Počet kusů	Měřidlo	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>					
<b>Rozměry:</b>													
1.	252,70 +/- 0,3	5 (2)	výškoměr										
2.	73,54 +/- 0,15	5 (2)	výškoměr										
3.	55 +0,1/-0,05	5 (2)	posuvka										
4.	Měření mezery	1x kombinace	3D měřicí stroj	viz. výtisk z 3D									
5.	Měření přesazení	1x kombinace	3D měřicí stroj										
6.	Šarže materiálu	1x	-										
<b>Vizuální kontrola</b>													
1.	plně vystříklé	50-0	vizuální kontrola										
2.	bez spálenin a vnitřních bublin	50-0	vizuální kontrola										
3.	bez zlomu mezi jádrem a formou	50-0	vizuální kontrola										
4.	bez otřepů a ostrých hran	50-0	vizuální kontrola										
5.	bez průhybů	50-0	vizuální kontrola										
6.	vtok čistý	50-0	vizuální kontrola										
7.	viditelná plocha bez vad	50-0	vizuální kontrola										
8.	datumovka	1 kavita	vizuální kontrola										
<b>Datum / čas</b>													
<b>Kontrola kvality</b>													
č.	<b>Kontrolovaný prvek</b>	Počet kusů	Měřidlo	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>					
<b>Rozměry:</b>													
1.	252,70 +/- 0,3	5 (2)	výškoměr										
2.	73,54 +/- 0,15	5 (2)	výškoměr										
3.	55 +0,1/-0,05	5 (2)	posuvka										
4.	Měření mezery	1x kombinace	3D měřicí stroj	viz. výtisk z 3D									
5.	Měření přesazení	1x kombinace	3D měřicí stroj										
6.	Šarže materiálu	1x	-										
<b>Vizuální kontrola:</b>													
1.	plně vystříklé	50-0	0										
2.	bez spálenin a vnitřních bublin	50-0	0										
3.	bez zlomu mezi jádrem a formou	50-0	vizuální kontrola										
4.	bez otřepů a ostrých hran	50-0	vizuální kontrola										
5.	bez průhybů	50-0	vizuální kontrola										
6.	vtok čistý	50-0	vizuální kontrola										
7.	viditelná plocha bez vad	50-0	vizuální kontrola										
8.	datumovka	1 kavita	vizuální kontrola										
<b>Datum / čas</b>													
<b>Kontrola kvality</b>													

## Příloha 5 – Kompletní návodka nového postupu měření

### ITW Pronovia Velká Bíteš

Vlkovská 595 Tel.: +420566788811  
 595 01 Velká Bíteš Fax.: +420566789991

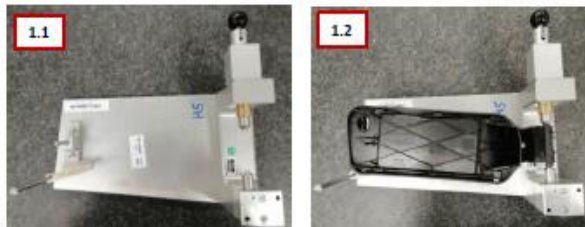
Změnový stav	00	Č. Dokumentu	6808111.05.2019
Datum	17.1.2019		

## Postup měření SCH Audi AU326-1 List 1

Název dílce	Tankovací rameno	Průběh práce	Uvolnění produkce a přeměření po 12 hod	
Číslo dílce	66784-1-00-001	Zákazník č.	32227338	Datum vytvoření: 17.4.2019 Vytvořil: Sobotková

č.	Kontrolovaný prvek	Název	Zk. prostředek	Měř.přípravek
1.	252,70 +/-0,3	Délka	Hexagon	1A04
2.	73,54 +/-0,15	Šířka	Hexagon	1A04
3.	55,00 +/-0,1/-0,05	Šířka	Hexagon	1A04

**1. Usazení dílu** - díl usadit do měřičích přípravku 1A04 viz foto NEUPEVŇOVAT upínkou



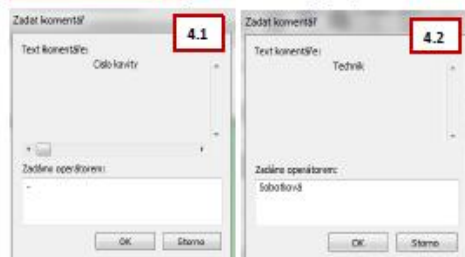
**2. Otevření programu** - v uživatelském prostředí klikni na možnost SOUBOR a OTEVŘÍT, pomocí čtečky zařízení načti čárový kód



**3. Spuštění programu** - klikni na tlačítko PLAY a dle zobrazeného obrázku umísti přípravek s dílem do pracovního prostoru stroje  
 - použij 3x kolík s označením R-S-1225-4 na pozici I1, D4, D11  
 - kliknutím na obrázek program spust



**4. Zadávání informací** - v tabulkách vyplň požadované informace (kavita, číslo dílu, jméno, produkci...)

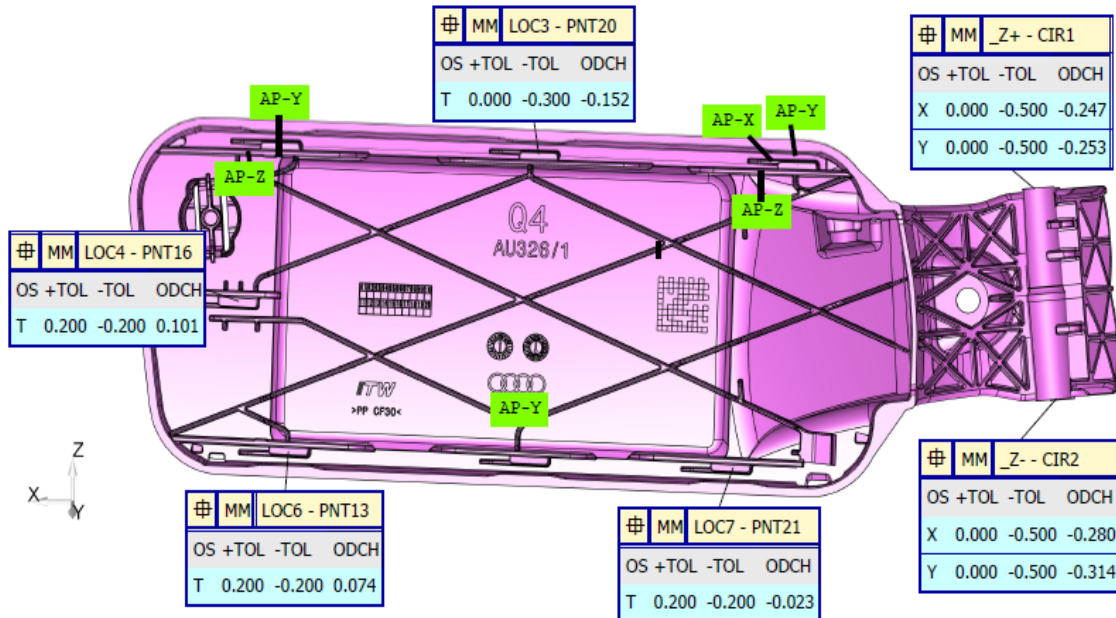


**5. Výměna kusů** - po skončení měření vyměň kus v přípravku a vytiskni protokol  
 - opakuj postup od kroku jedna dokud nezměříš požadovaný počet kusů

**6. Vyvození programu** - po ukončení měření program křížkem zavři

## Příloha 6 – Protokol ze SMS stroje

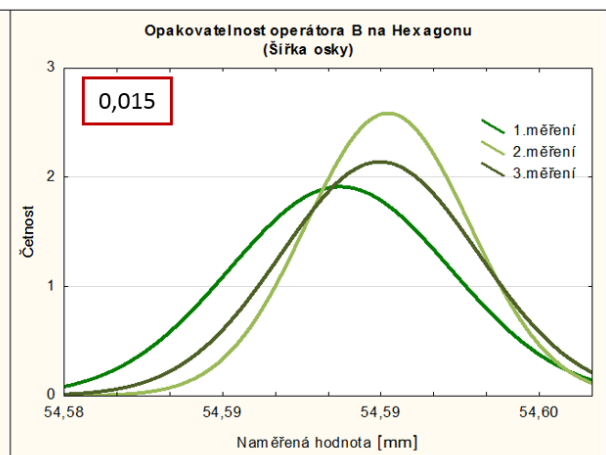
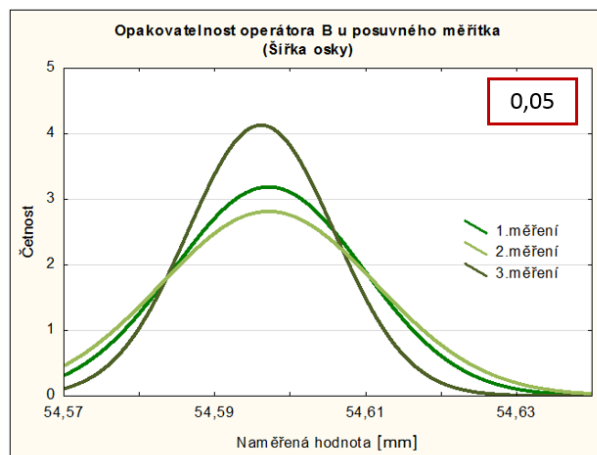
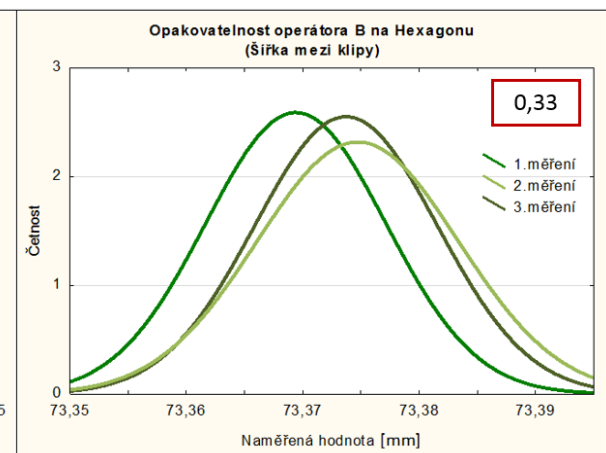
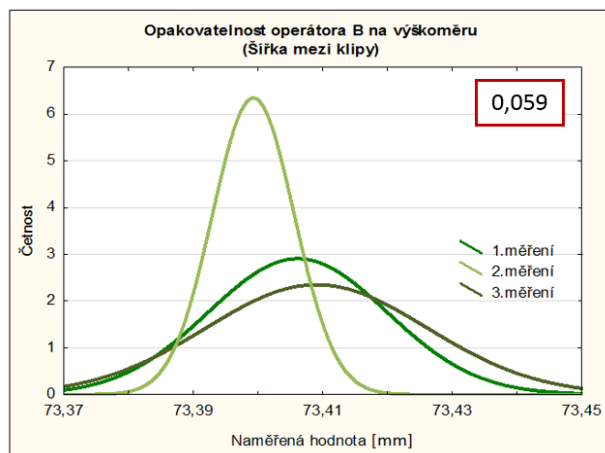
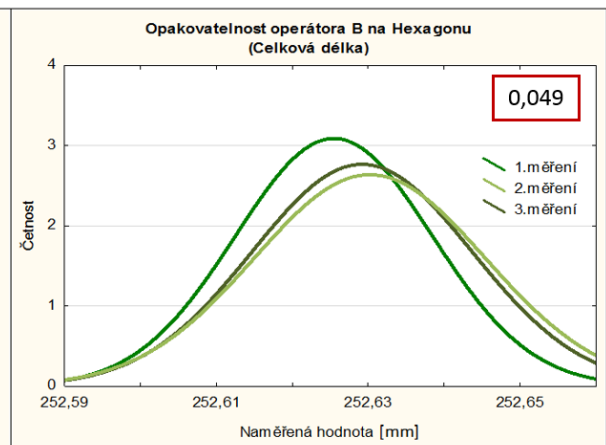
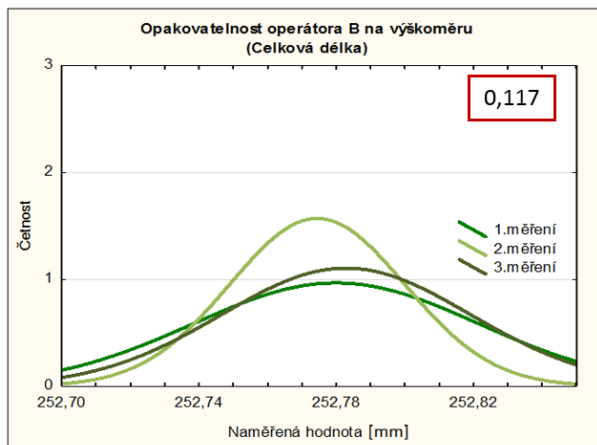
 <i>Powertrain / Chassis, Body &amp; Fast</i>	<b>Report</b>				Page
	Audi AU326-1 Q4				Q2/2945/Mm
<b>Drawing No.:</b>	66784	<b>Production:</b>	04/2019	<b>Technician:</b>	Sobotková
<b>Index:</b>	B 15.7.2018	<b>Cavity:</b>	-	<b>Datum:</b>	14/05/19
<b>Generation status:</b>	05S	<b>Part No.:</b>	1	<b>Time:</b>	23:08:34
<b>Note:</b>	Programování				



### Zákaznické rozměry

↔	MM	ROZM OSIČKA= 2D VZDÁLENOST OD ČÁRA LIN7 K ČÁRA LIN8 (STŘED NA STŘED)			
OS	NOMINÁLNÍ	+TOL	-TOL	MĚŘ	ODCH
M	54.650	0.100	-0.050	54.546	-0.104
↔	MM	ROZM_1.1_ = 2D VZDÁLENOST OD ČÁRA LIN6 K BOD PNT18 PAR K OSAX			
OS	NOMINÁLNÍ	+TOL	-TOL	MĚŘ	ODCH
M	252.700	0.300	-0.300	252.627	-0.073
↔	MM	ROZM_1.7_ = 2D VZDÁLENOST OD BOD PNT15 K BOD PNT28 PAR K OSAX			
OS	NOMINÁLNÍ	+TOL	-TOL	MĚŘ	ODCH
M	73.400	0.150	-0.150	73.364	-0.036

## Příloha 7 – Opakovatelnost operátora B při měření zákaznických rozměrů





## Příloha 8 – Opakovatelnost operátora C při měření zákaznických rozměrů

