



**ČVUT**

ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE

**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

## **Tvorba metodiky pro stanovování nejistot a způsobilosti měření dle VDA 5**

### **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Autor:** Markéta Malčeková

**Vedoucí práce:** Ing. Jan Urban, Ph.D.

**Studijní program:** B 2342 Teoretický základ strojního inženýrství

**Studijní obor:** 2301R000 Studijní program je bezoborový

**Praha, 2024**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Malčeková** Jméno: **Markéta** Osobní číslo: **483242**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Tvorba metodiky pro stanovování nejistot a způsobilosti měření dle VDA 5.**

Název bakalářské práce anglicky:

**Creation of methodology for determining the uncertainty and capability of measurement acc. to VDA 5.**

Pokyny pro vypracování:

1. Nastudování příručky VDA5 - seznámení s metodikou a pravidly pro prokazování způsobilosti a nejistot měření
2. Analýza současného stavu plnění metodiky dle VDA 5 ve vybraném provozu
3. Návrh metodiky pro implementaci ve vybraném provozu.

Seznam doporučené literatury:

**Příručka VDA 5 - Česká společnost pro jakost 2021**

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **03.04.2024** Termín odevzdání bakalářské práce: **05.08.2024**

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

Ing. Jan Urban, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

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

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

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

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracovala samostatně a použila jsem pouze podklady (literaturu, projekty, software atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne: .....

.....

Podpis autora

## Poděkování

Ráda bych tímto poděkovala vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Janu Urbanovi, Ph.D. a Ing. Jiřímu Reslovi za jejich pomoc a vedení při tvorbě této vysokoškolské kvalifikační práce a hlavně za jejich trpělivost. Dále bych ráda poděkovala firmě Škoda Auto a.s. za poskytnuté vybavení a zázemí, zvláště pak děkuji oddělení GQH-1/1.

## Anotace

Tato bakalářská práce se zaměřuje na tvorbu návrhu metodiky pro stanovování nejistot a vhodnosti měření dle VDA 5. V první části tato práce shrnuje teoretické poznatky, zejména v oblasti vyhodnocování vhodnosti měřicích systémů a procesů, a to jak způsobilosti dle AIAG MSA 4, tak vhodnosti dle VDA 5. V druhé části práce je proveden experiment a na naměřených datech provedena analýza způsobilosti a vhodnosti použitého měřicího systému a procesu, a to jak z hlediska způsobilosti dle zavedené metodiky na základě AIAG MSA 4, tak z hlediska vhodnosti dle VDA 5. V poslední řadě byl na základě poznatků z provedeného experimentu vytvořen obecný návrh metodiky pro stanovování nejistot a vhodnosti měření na základě VDA 5.

## Klíčová slova

způsobilost měření, vhodnost měření, VDA 5, MSA, nejistoty měření

## Annotation

This bachelor thesis focuses on the creation of a proposal of a methodology for determining the uncertainty and suitability of measurement according to VDA 5. In the first part, this thesis summarises theoretical knowledge, especially in the area of determining the suitability of measuring systems and processes, both capability according to AIAG MSA 4 and suitability acc. to VDA 5. In the second part, an experiment is performed and the measured data is used to analyse the capability and suitability of the measuring system and process, both according to the currently used capability-determining methodology based on AIAG MSA 4 and suitability acc. to VDA 5. Lastly, a general proposal of a methodology for determining the uncertainty and suitability of measurement based on VDA 5 was created based on knowledge acquired during the performed experiment.

## Keywords

measurement capability, measurement suitability, VDA 5, MSA, measurement uncertainty

# Obsah

1	Úvod.....	9
2	Měřicí technika.....	10
2.1	Souřadné systémy.....	10
2.1.1	Kartézská soustava souřadnic.....	10
2.1.2	Cylindrická soustava souřadnic.....	11
2.1.3	Sférická soustava souřadnic .....	12
2.1.4	Souřadný systém měřicího stroje .....	12
2.1.5	Souřadný systém součásti.....	13
2.2	Vyrovnaní součásti.....	13
2.2.1	Standardní metoda vyrovnaní součásti.....	13
2.2.2	Metoda RPS.....	14
2.2.3	Metoda 3D připasování .....	15
2.2.4	Metoda P6 .....	16
2.3	Podmínky potřebné pro měření .....	16
2.4	Dotykové souřadnicové měřicí stroje.....	17
2.4.1	Konstrukce dotykových měřicích strojů.....	17
2.4.2	Konstrukce a materiály dotykových sond .....	20
2.4.3	Korekce poloměru kuličky .....	22
2.4.4	Dělení dotykových snímacích hlav .....	22
2.5	Bezdotykové souřadnicové měřicí stroje .....	23
2.5.1	Optické 3D skenery .....	24
2.5.2	Laserové 3D skenery .....	25
3	Přípravné procesy .....	26
3.1	Očištění .....	26
3.2	Temperace .....	26
3.3	Úprava povrchu pro bezkontaktní měření .....	26
3.4	Vlhkost .....	27
3.5	Vhodná kombinace materiálů dotykového senzoru a součásti.....	27
3.6	Správné upnutí měřené součásti.....	27
4	Analýzy systémů měření .....	28
4.1	AIAG MSA 4 .....	28
4.1.1	Postup 1 .....	28
4.1.2	Postup 2 - Average-Range-Method (ARM) .....	30
4.1.3	Postup 2 - Analysis of Variance (ANOVA).....	31
4.1.4	Postup 3 .....	33
4.2	VDA 5 .....	34
4.2.1	Rozdělení měřených dílů dle rizika.....	34
4.2.2	Indexy vhodnosti dle VDA 5.....	35

4.2.3	Schéma postupu vyhodnocování vhodnosti dle VDA 5 .....	40
5	Analýza současného stavu.....	42
5.1	Použité stroje a podmínky .....	43
5.1.1	Měření referenčních hodnot ojníc .....	43
5.1.2	Měření ojníc .....	45
5.2	Zpracování referenčních hodnot.....	46
5.3	Zpracování dat dle MSA .....	47
5.3.1	Vyhodnocení způsobilosti systému měření dle stávající metodiky.....	47
5.3.2	Vyhodnocení způsobilosti procesu měření dle stávající metodiky .....	49
5.4	Zpracování dat dle VDA 5 .....	51
5.4.1	Vyhodnocení rozlišení indikace .....	51
5.4.2	Vyhodnocení vhodnosti systému měření dle metodiky VDA 5 .....	51
5.4.3	Vyhodnocení vhodnosti procesu měření dle metodiky VDA 5.....	52
5.5	Porovnání výsledků dle MSA a VDA 5 .....	54
5.5.1	Porovnání způsobilosti a vhodnosti měřicího systému .....	54
5.5.2	Porovnání způsobilosti a vhodnosti měřicího procesu .....	55
5.5.3	Nejčastější vlivy na způsobilost a vhodnost měřicího systému/procesu .....	56
6	Návrh metodiky.....	59
6.1	Identifikace rizikových charakteristik.....	59
6.2	Určení hranic vhodnosti .....	59
6.3	Návrh experimentu.....	60
7	Závěr .....	61

## Seznam použitých symbolů

$\%GR\&R$ [%]	procentuální hodnota opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření vztažena k tolerančnímu poli
$\alpha$ [-]	koeficient pro odstranění vlivu interakce
$AV$ [mm]	Appraiser Variation – reprodukovatelnost měření
$c_g$ [-]	koeficient způsobilosti měřidla dle MSA
$c_{gk}$ [-]	kritický koeficient způsobilosti měřidla dle MSA
$DF$ [-]	Degree of Freedom – stupeň volnosti
$EV$ [mm]	Equipment Variation – opakovatelnost měření
$GR\&R$ [mm]	Gauge Repeatability & Reproducibility – opakovatelnost a reprodukovatelnost
$INT$ [mm]	Interaction Appraiser-Part – rozptyl interakcí
$k$ [-]	počet operátorů
$k, K$ [-]	koeficient rozšíření
$MS$ [mm <sup>2</sup> ]	Mean of Squares – průměr kvadrátu rozptylů
$n$ [-]	počet měřených součástí
$ndc$ [-]	Number of Distinct Categories – počet odlišných kategorií
$PV$ [mm]	Part Variation – rozptyl součástí
$Q_{MP}$ [%]	koeficient vhodnosti měřicího procesu dle VDA 5
$Q_{MS}$ [%]	koeficient vhodnosti měřicího systému dle VDA 5
$r$ [-]	počet opakovaných měření
$R_{\bar{x}}$ [mm]	Rozpětí všech průměrných hodnot naměřených všemi operátory
$\bar{R}_j$ [mm]	průměrné rozpětí náměrů operátora pro součást
$\bar{\bar{R}}$ [mm]	průměr rozpětí náměrů všech operátorů
$s$ [mm]	směrodatná odchylka měření
$SS$ [mm <sup>2</sup> ]	Sum of Squares – součet čtverců
$TOL$ [mm]	šířka tolerančního pole
$TSS$ [mm <sup>2</sup> ]	Total Sum of Squares – součet čtverců všech odchylek
$u$ [mm]	kombinovaná standardní nejistota
$U$ [mm]	rozšířená nejistota
$x$ [mm]	měřená hodnota
$\bar{x}$ [mm]	aritmetický průměr naměřených hodnot
$\bar{x}_j$ [mm]	průměrná hodnota naměřená operátorem

## Seznam použitých zkratk

3D	Three-Dimensional Space – trojrozměrný prostor
AIAG	Automotive Industry Action Group
ANOVA	Analysis of Variance – analýza rozptylu
ARM	Average-Range-Method – metoda střední hodnoty rozsahu
BMF	zvláštní charakteristika funkce
BMS	zvláštní charakteristika bezpečnosti
BMZ	zvláštní zákonná charakteristika
CMM	Coordinate Measuring Machine – souřadnicový měřicí stroj
DIN	Deutsches Institut für Normung – Německý ústav pro průmyslovou normalizaci
DMR	dolní mezní rozměr
HMR	horní mezní rozměr
ISO	International Organisation for Standardization – Mezinárodní organizace pro normalizaci
MP	měřicí proces
MPE	Maximum Permissible Error – největší dovolená chyba měření
MS	měřicí systém
MSA	Measurement System Analysis – Analýza systému měření [9]
REF	referenční hodnota měřeného prvku
RPS	Referenz Punkte System – systém referenčních bodů
SW	software
VDA 5	Verband der Automobilindustrie – Band 5 – Svaz německého automobilového průmyslu – svazek 5 [24]



# 1 Úvod

V rámci výroby automobilů a jejich komponentů ve firmě Škoda Auto a.s. je třeba zajistit kontrolu vyráběných součástí, aby byla dodržena požadovaná kvalita výrobků. Aby výsledky takovýchto kontrol kvality mohly být považovány za spolehlivé, je třeba provést analýzu při kontrole použitého měřicího systému a procesu z hlediska jejich způsobilosti a vhodnosti.

V současné době je ve firmě Škoda Auto a.s. používána metodika vyhodnocování způsobilosti založená na AIAG MSA. Jako společnost spadající pod skupinu Volkswagen AG, tedy členskou skupinu německé organizace VDA (Verband der Automobilindustrie), plánuje Škoda Auto a.s. přechod na metodiku vyhodnocování vhodnosti měřicích systémů a procesů založenou na příručce VDA 5 Management kvality v automobilovém průmyslu – Procesy měření a zkoušení.

Tato práce porovnává na základě provedeného experimentu výsledky vyhodnocení způsobilosti a vhodnosti použitého měřicího systému a procesu dle obou výše zmíněných metodik. Na základě tohoto porovnání pak byl vytvořen návrh metodiky pro stanovování nejistot a vhodnosti měření dle VDA 5.

## 2 Měřicí technika

V rámci této bakalářské práce jsou zkoumána a vyhodnocována data naměřená na různých typech měřicích strojů za účelem zjištění způsobilosti/vhodnosti měřicích systémů a procesů. V této kapitole jsou tedy shrnuty základy rozdělení typů souřadných systémů, podmínky ovlivňující měřicí proces a základní typy měřicích strojů z hlediska konstrukce a typu snímacích systémů.

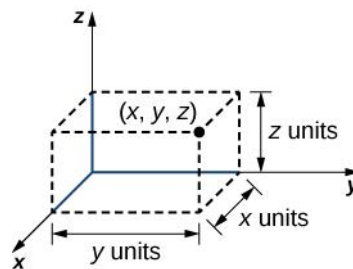
### 2.1 Souřadné systémy

Souřadný systém obecně popisuje přesnou polohu bodů v prostoru vůči zvolenému počátku souřadného systému, který je třeba pevně určit. Z takto jednoznačně definovaných bodů pak lze složené prvky rovněž jednoznačně umístit ve zkoumaném prostoru. Souřadnicové měřicí stroje tuto skutečnost využívají pro měření rozměrových a tvarových charakteristik objektů.

3D souřadné systémy jsou obecně definovány za pomoci tří základních údajů zvaných souřadnice, jejichž význam se liší dle zvolené soustavy souřadnic. Základními typy takovýchto soustav jsou kartézská, cylindrická a sférická soustava souřadnic.

Pro účely měření na souřadnicovém měřicím stroji se rozlišují dva základní typy souřadných systémů, a to souřadný systém měřicího stroje a souřadný systém součásti. Tyto souřadné systémy jsou zapisovány v jedné z výše zmíněných soustav souřadnic, které jsou voleny v závislosti na konstrukčním uspořádání měřicího stroje.

#### 2.1.1 Kartézská soustava souřadnic



Obr. 1: Kartézská soustava souřadnic [1]

Ze všech souřadných soustav je kartézská soustava souřadnic tou nejčastěji používanou a nejvíce rozšířenou. Zároveň se vůči ní nejsnáze vyjadřují jiné soustavy souřadnic.

Kartézská soustava souřadnic je definována třemi osami  $X$ ,  $Y$  a  $Z$ , pro které platí, že jsou navzájem kolmé. Zpravidla také platí, že je tato soustava pravotočivá. Ve většině případů je vertikální hodnota definována za pomoci osy  $Z$  a horizontální plocha bývá definována rovinou  $XY$ , tedy rovinou ve které leží jak osa  $X$ , tak osa  $Y$ . Analogicky jsou pak definovány také roviny  $XZ$  a  $YZ$ .

Souřadnice bodu  $P$  měřeného v kartézské soustavě souřadnic jsou pak zapsány následovně

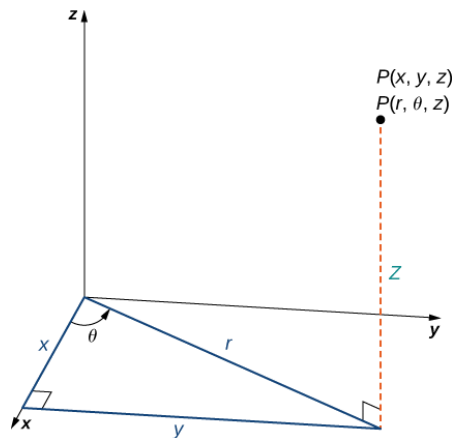
$$P = [X; Y; Z], \quad 2.1-1$$

kde hodnoty  $X$ ,  $Y$  a  $Z$  označují vzdálenost měřeného bodu od počátku souřadného systému  $O$  (viz Obr. 1).

Tento typ souřadného systému zpravidla nalezneme u větších stacionárních strojů pro dílenské a laboratorní účely.

[1]

## 2.1.2 Cylindrická soustava souřadnic



Obr. 2: Cylindrická soustava souřadnic [2]

Cylindrická, neboli válcová soustava souřadnic je definována třemi souřadnicemi  $r$ ,  $\theta$  a  $z$ . Souřadnice  $r$  odpovídá vzdálenosti měřeného bodu od osy  $Z$ ,  $\theta$  je úhlem průmětu průvodiče do roviny  $XY$  od osy  $X$  a  $z$  je vzdálenost měřeného bodu od počátku souřadného systému  $O$ , viz Obr. 2.

Souřadnice stejného bodu  $P$ , jako v sekci 2.1.1, jsou pak zapsány do cylindrické soustavy souřadnic následovně

$$P = [r; \theta; z] = \left[ \sqrt{X^2 + Y^2}; \tan^{-1} \frac{Y}{X}; Z \right], \quad 2.1-2$$

kde hodnoty  $X$ ,  $Y$  a  $Z$  označují souřadnice měřeného bodu v kartézské soustavě souřadnic (vzorec 2.1-1).

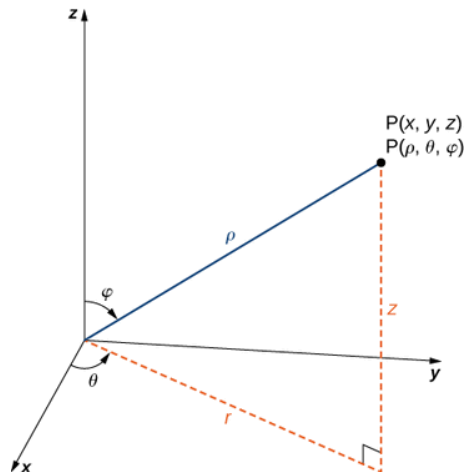
Hodnota úhlu  $\varphi$  se volí v následujícím rozsahu

$$0 \leq \theta \leq 2\pi. \quad 2.1-3$$

Cylindrická soustava souřadnic je vhodná pro měření objektů s válcovou symetrií, neboť takovéto objekty mají ve válcových souřadnicích jednodušší tvar zápisu. Používá se nejčastěji u stacionárních souřadných strojů menších rozměrů, většinou manuálních dílenských.

[2]

### 2.1.3 Sférická soustava souřadnic



Obr. 3: Sférická soustava souřadnic [2]

Sférická neboli kulová soustava souřadnic je definována třemi souřadnicemi  $\rho$ ,  $\theta$  a  $\varphi$ . Souřadnice  $\rho$  odpovídá vzdálenosti měřeného bodu od počátku, souřadnice  $\theta$  je úhlem odklonu průmětu průvodiče od osy  $X$  a souřadnice  $\varphi$  je úhel mezi průvodičem a osou  $Z$ , viz Obr. 3.

Souřadnice stejného bodu  $P$ , jako v sekci 2.1.1, jsou pak zapsány do sférické soustavy souřadnic následovně

$$P = [\rho; \theta; \varphi] = \left[ \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}; \tan^{-1} \frac{Y}{X}; \cos^{-1} \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}} \right], \quad 2.1-4$$

kde hodnoty  $X$ ,  $Y$  a  $Z$  označují souřadnice měřeného bodu v kartézské soustavě souřadnic (vzorec 2.1-1).

Hodnoty úhlů  $\varphi$  a  $\theta$  se volí v následujícím rozsahu

$$0 \leq \theta \leq 2\pi \quad a \quad 0 \leq \varphi \leq \pi. \quad 2.1-5$$

Sférická soustava souřadnic je vhodná pro měření objektů s kulovou symetrií. Je často používána pro mobilní stroje s ručním vedením měřicího ramene pro měření menších součástí nebo pro mobilní stroje typu trackeru pro měření velkých objemných dílů.

[2]

### 2.1.4 Souřadný systém měřicího stroje

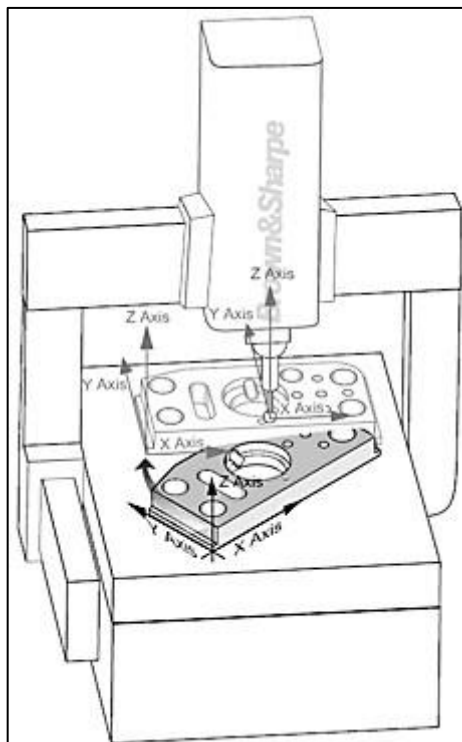
Tento souřadný systém je pevně spojený s prostorem měřicího stroje a je vztažen ke zvolenému základnímu bodu v rámci měřicího prostoru. Zpravidla se pro měření souřadnic bodů v souřadném systému stroje využívá kartézského systému souřadnic. U velkých CMM strojů bývá osa  $X$  většinou orientována (při pohledu na měřicí prostor zepředu) zleva doprava, osa  $Y$  zepředu dozadu a osa  $Z$  zdola nahoru.

V tomto souřadném systému neprobíhá měření samotné, ale probíhá zde manipulace na stroji. Jsou v něm udávány kupříkladu polohy uložení snímačů pro výměnu, bezpečnostní prvky (například vhodná místa pro přepřelohování nastavitelných hlav) nebo rychloposuvy.

[3]

## 2.1.5 Souřadný systém součásti

Tento souřadný systém je vztažen a vyrovnán k pevně danému bodu na měřené součásti. Slouží k samotnému měření rozměrů součásti. Vyrovnání takového počátku souřadné soustavy může probíhat několika způsoby. Pro obecné tvary je pravděpodobně nejčastěji využívána takzvaná standardní metoda (dále popsána v sekci 2.2.1). Všechny následné body jsou pak vztaženy k tomuto základnímu bodu a jsou jim připisovány souřadnice na základě nadefinovaných směrů os souřadného systému. [3]



Obr. 4: Vyrovnávání souřadného systému součásti na souřadný systém stroje [3]

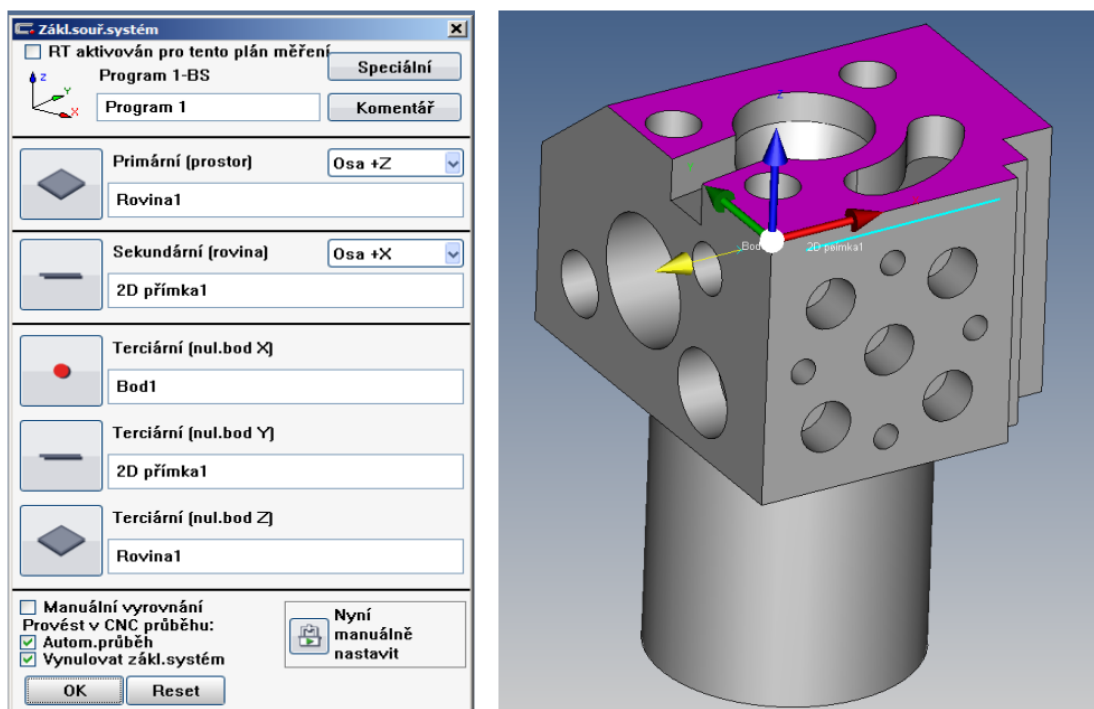
## 2.2 Vyrovnání součásti

Slouží k jednoznačnému určení polohy a orientace souřadného systému měřené součásti v souřadném systému měřicího stroje.

### 2.2.1 Standardní metoda vyrovnání součásti

Tato metoda vychází z principu zarovnání počátku souřadného systému součásti na geometrické prvky. Bývá také nazývána metodou R-P-B (rovina-přímka-bod) nebo metodou 3-2-1. Oba tyto názvy odkazují na skutečnost, že pozice základního/počátečního bodu souřadného systému součástky je jednoznačně určena tím, že se nejdříve odeberou tři stupně prostorové volnosti určením roviny (k určení je třeba naměřit tři body v souřadném systému stroje), poté další dva stupně volnosti určené pomocí přímky (k určení jsou třeba dva naměřené body) a následně je odebrán poslední stupeň volnosti pomocí bodu (k určení stačí jediný naměřený bod). Viz Obr. 5.

[4]

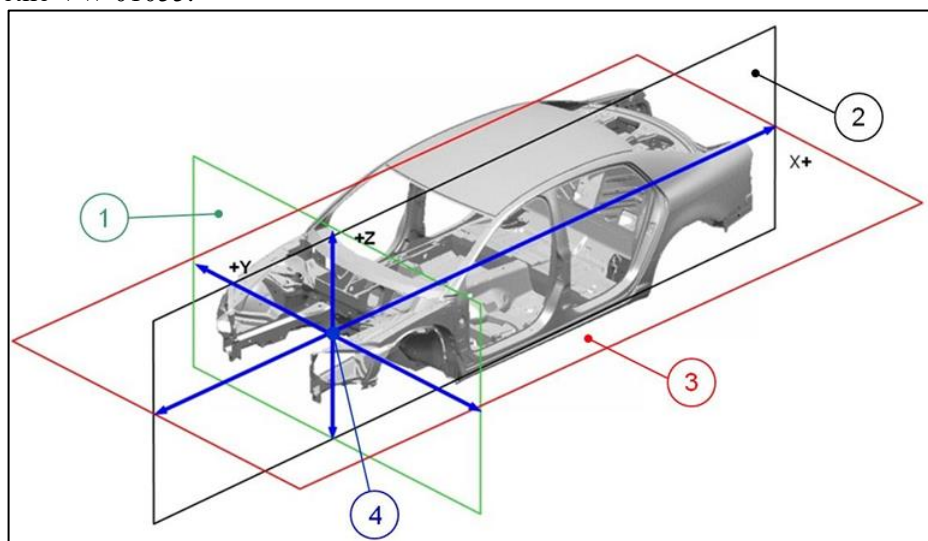


Obr. 5: Standardní vyrovnání součásti v programu Calypso [4]

## 2.2.2 Metoda RPS

Metoda RPS, neboli „Referenz Punkte System“, popřípadě „Reference Point System“, funguje, jak již název napovídá, na principu vyrovnání součásti na takzvané referenční body. Poloha těchto bodů je v jedné či více souřadnicích fixně dána. Zpravidla se pro takovéto vyrovnávání při měření jednotlivých dílů využívá přípravek, kupříkladu se středícími kužely, na který se díl uloží. Hodnoty RPS bodů, na které je díl vyrovnán, jsou přitom považovány za dokonale přesné v souřadnicích, které fixují.

Tato vyrovnávací metoda je používána primárně v automobilovém průmyslu a jednoznačně určuje polohu a orientaci součásti v souřadném systému celého automobilu, která má nulový bod ve středu přední nápravy (viz Obr. 6). Vychází z normy společnosti Volkswagen AG, konkrétně VW 01055.



Obr. 6: Souřadný systém automobilu: (1) vertikální rovina YZ, (2) podélná rovina XZ, (3) horizontální rovina XY a (4) nulový bod souřadného systému automobilu [6]

Tato metoda obecně rozlišuje několik typů referenčních bodů:

**Plošné body F** se nacházejí na rovinách/plochách a zpravidla fixují jednu osu (jednu ze souřadnic).

**Středové body H** se nacházejí ve středu děr (kružnice či drážky) a fixují většinou více os / více stupňů volnosti. Nelze je měřit přímo, vychází z vyhodnocení dat kontury dané díry.

**Teoretické body T** jsou sestaveny ze dvou vedle sebe ležících sekundárních RPS bodů.

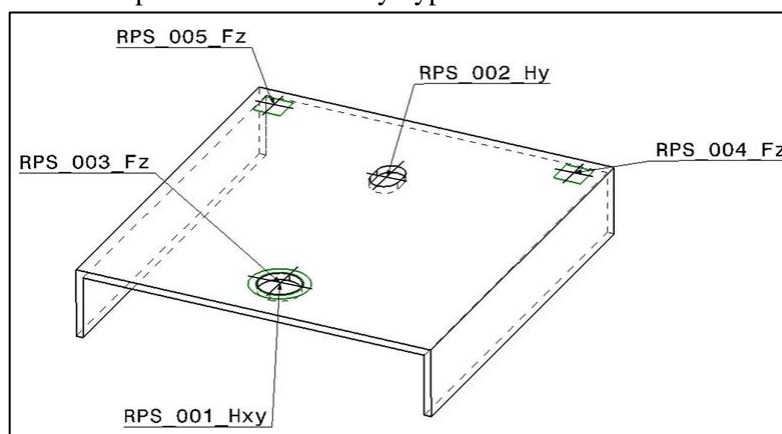
Hlavní (primární) RPS body přitom fixují orientaci, zatímco sekundární RPS body fixují natočení součásti.

Zápis RPS bodu pak může vypadat kupříkladu následovně

$$RPS\_001\_Hxy, \quad 2.2-1$$

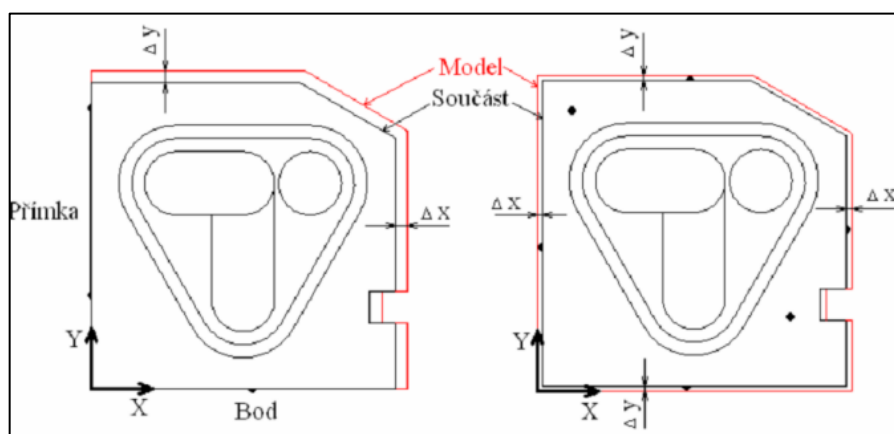
kde  $RPS\_001$  předává informaci, že se jedná o hlavní RPS bod číslo 1 (hlavní RPS body mají čísla od 001 do 006; sekundární RPS body pro určování teoretických bodů mají hodnoty 021 až 050),  $H$  definuje o jaký typ RPS bodu se jedná (sekundární RPS bod by byl značen malým písmenem) a  $xy$  specifikuje, které osy jsou tímto bodem zafixovány. [5] [6]

V technické dokumentaci pak mohou RPS body vypadat následovně:



Obr. 7: Příklad layoutu RPS bodů na U profilu [6]

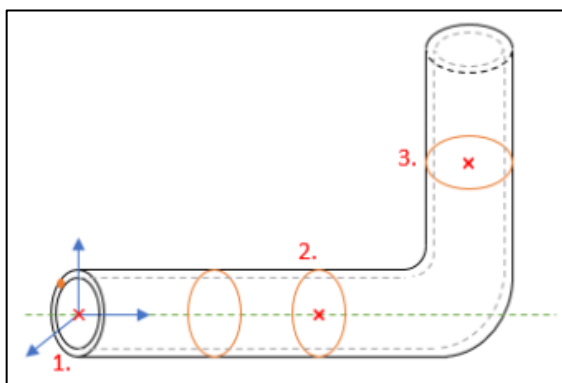
### 2.2.3 Metoda 3D připasování



Obr. 8: Srovnání vyrovnání součásti standardní metodou (vlevo) a metodou 3D připasování (vpravo) [4]

Tato metoda je vhodná pro obecné tvarové plochy, kde by se standardní metodou špatně vyrovnávalo na geometrické prvky. Jedná se o takzvané vyrovnání na tvar neboli Best Fit, kdy jsou díly vyrovnány za jednotlivé body blokující díl ve všech směrech pohybu, a to tak, aby ve všech těchto bodech byla shodně malá odchylka od modelu. Je tedy třeba body rovnoměrně rozložit, neboť se efektivně jedná o metodu nejmenších čtverců. [4]

## 2.2.4 Metoda P6



Obr. 9: Znárodnění vyrovnání součásti metodou P6 [7]

Tato metoda je nejhodněji využívána pro měření trubek. Vychází ze tří naměřených bodů. První bod určuje počátek souřadného systému součásti, první a druhý bod společně definují hlavní osu a třetí bod definuje otáčení kolem hlavní osy. [5]

## 2.3 Podmínky potřebné pro měření

Pro účely co nejlépe opakovatelného měření je třeba co nejvíce snížit variabilitu ovlivnitelných vlivů procesu. Obecně se do variability měřicího procesu promítají vlivy použitého měřidla, vlivy zvolené metody měření a vyhodnocování, vlivy měřeného objektu, vlivy okolního prostředí a vliv obsluhy stroje.

**Vliv měřidla / měřicího stroje** je závislý například na jeho parametrech přesnosti, měřicím rozsahu, senzorech, konstrukčním provedení, kalibraci, údržbě, použitím softwaru a korekci reziduálních chyb měření.

Pro zajištění vhodných podmínek měření je tedy třeba vhodně zvolit měřidlo / měřicí stroj a zajistit jeho kalibraci.

**Vliv metody měření a vyhodnocování** závisí například na volbě snímačů, poloze a orientaci součásti v měřicím prostoru, zvolené metodě upnutí, počtu měřených bodů na součásti, zvoleném matematickém modelu, použitím počítačovým softwaru, zvolených filtrech a statistických metodách. Je tedy třeba zvolit metodu měření a vyhodnocování vyhovující požadované aplikaci.

**Vliv měřeného objektu** zpravidla závisí na materiálových vlastnostech objektu (elasticita, plasticita, křehkost, ...), jeho tvaru a tvarových odchylkách a na vlastnostech jeho povrchu (lesk, barevné přechody, ...). Také se zde projevuje teplota měřeného objektu formou tepelné roztažnosti materiálu a případně znečištění součásti.

Pro zajištění podmínek pro spolehlivé měření je tedy třeba vzít v potaz fyzikální vlastnosti měřeného objektu při volbě měřicí strategie a v případě potřeby měřený objekt před samotným měřením temperovat a očistit. K tomuto slouží vhodně zvolené přípravné procesy (viz kapitola 3).

**Vliv okolního prostředí** vychází z teploty okolí a její časové stability a prostorového gradientu, tlaku okolního média (nejčastěji vzduchu), vibrační podlahy, znečišťujícími částicemi ve vzduchu (vodní pára, prach, olej, chladicí emulze, ...), případně ze světelných podmínek v místě měření (intenzita a stabilita).

Je tedy třeba zajistit odizolování měřicího stroje vůči vibracím, regulaci teploty okolí pro snížení jejího gradientu a zvýšení časové stability. Dále je třeba zajištění filtrace vzduchu od nečistot, zajištění konstantní (nízké) vlhkosti a vhodných světelných podmínek pro zvolený měřicí systém.

**Vliv obsluhy** se projevuje primárně opakovatelností operátora, jeho kvalifikací a proškolením, a dále vyrovnáním a upnutím součásti (pokud vyrovnává / upíná obsluha) nebo kalibrací snímačů (pokud vykonává obsluha).



Pro vhodné měření je tedy třeba zajistit pracovníkovi možnost získání kvalifikace potřebné pro výkon činnosti a motivovat jej k řádnému plnění postupů po něm požadovaném (snižuje variabilitu kvality provedení požadovaných aktivit a celková kvalita se tím zvyšuje).

[8] [9]

## 2.4 Dotykové souřadnicové měřicí stroje

Dotykové/kontaktní měření je jednou z nejrozšířenějších v současné době používaných metod nedestruktivní kontroly rozměrů a tolerancí součástí.

Dotykové měření na souřadnicovém stroji obecně probíhá dle následujícího postupu:

Snímací systém sbírá z povrchu měřené součásti body dotykem snímače, které promítá do nastaveného souřadného systému. Těmito body následně v počítačovém programu prokládá ideální tvar prvků (na základě programátorem vytvořeného kódu). Toto dále umožňuje provádět vyhodnocování vzájemné polohy prvků, přiřazování a vyhodnocování tolerancí jejich tvaru a polohy a také následný export naměřených dat do měřicího protokolu či statistického softwaru.

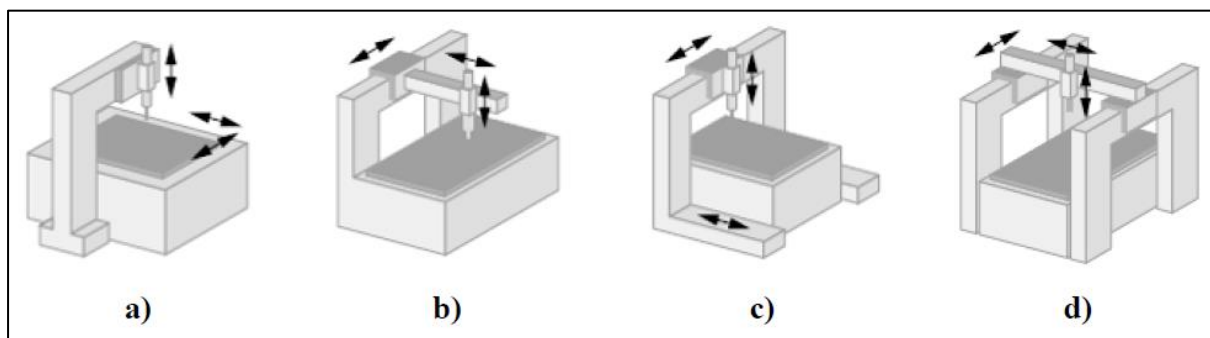
Mezi výhody dotykového měření obecně patří, že se jedná o velmi flexibilní senzor, tedy že při vhodném nastavení a za použití vhodné zvolené přípravku jej lze použít pro velké spektrum geometrií a materiálů. Další výhodou je také jeho nezávislost na případné průhlednosti, barvách či odrazivosti povrchu. Právě odrazivost, průhlednost, barevné přechody a občasná nekompatibilita se složitější geometrií mohou působit problémy při volbě bezdotykových měřicích metod.

Dotykové měření je ovšem limitováno nutností fyzického dotyku snímače, dokáže tedy měřit pouze rozměry, kterých se stylus, respektive jeho zakončení, dokáže dotknout. Nelze tedy měřit geometrické prvky, do kterých / ke kterým se stylus nedokáže dostat, a rovněž nelze měřit rozměry menší, než je průměr konce sondy na snímači. Zároveň platí, že i když je průměr zkoumaného otvoru větší než průměr kuličky, pokud je řádově shodný s rozměrem konce sondy snímače, není snímač vhodný pro danou měřicí aplikaci. Také platí, že není vhodné dotykově měřit materiály/součástky citlivé na dotyk, neboť by mohlo dojít k jejich poškození v průběhu měření či deformaci s negativním vlivem na výsledek měření. Oproti bezdotykovému měření je také potřeba výrazně delší časový úsek k nasnímání ekvivalentního počtu bodů, jedná se tedy o méně produktivní řešení.[10]

### 2.4.1 Konstrukce dotykových měřicích strojů

Obecně se souřadnicové měřicí stroje dělí na tři základní kategorie na základě počtu souřadnic, které jsou schopny odměřovat, tedy na jednosouřadnicové, dvousouřadnicové a třísouřadnicové.

Pro měření v prostoru, tedy ve třech souřadnicích, jsou CMM děleny do čtyř základních uspořádání na základě geometrie a kinematiky jejich konstrukce. Těmito typy jsou typ konzolový (sloupový), typ s horizontálním ramenem, typ portálový a typ mostový (viz Obr. 10). [5] [11]



Obr. 10: Typy CMM: a) konzolový typ, b) typ s horizontálním ramenem, c) portálový typ a d) mostový typ [11]

### Konzolový typ

Tento typ měřicího CMM (*Obr. 10 a*) je řazen mezi nejpřesnější typy CMM strojů a bývá vhodný pro malé rozsahy měření. Měřená součást je upnuta na stůl, který se pohybuje ve směrech horizontálních os  $X$  a  $Y$ , zatímco měřicí hlava je upnuta na konzolovém rameni a vykonává pohyb ve směru vertikální osy  $Z$ . Pro konzolový typ měřicího stroje je charakteristická tuhá úhlová konstrukce a dobrý přístup k měřenému objektu. [11]

### Sloupový typ s horizontálním ramenem

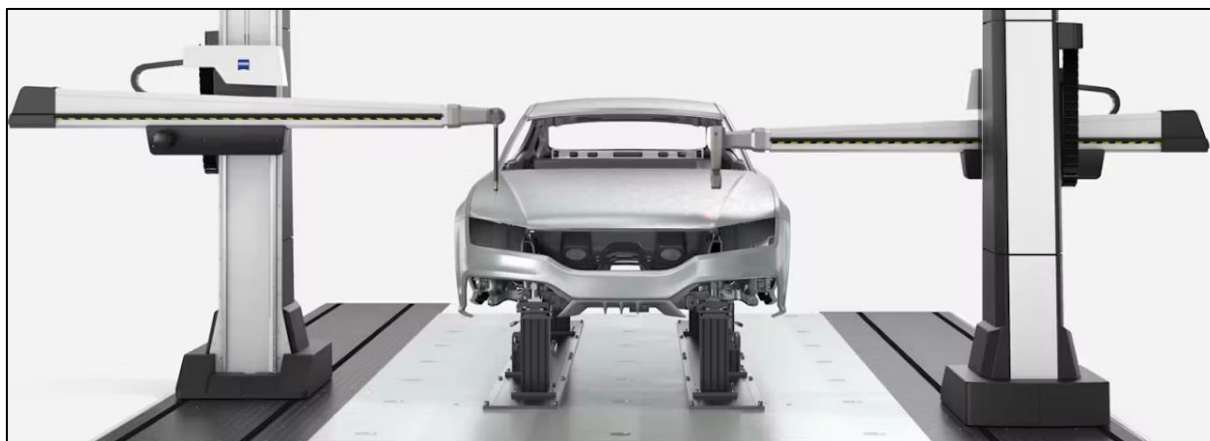


*Obr. 11: Souřadnicový měřicí stroj s horizontálním ramenem ZEISS Caleno [13]*

Tento typ měřicího stroje (*Obr. 10 b*) a *Obr. 11*) má z důvodu potřeby udržení dostatečné tuhosti ramene poměrně krátkou osu  $Y$  v porovnání s osami  $X$  a  $Z$  a hodí se proto pro měření dlouhých úzkých součástí. Měřený objekt je přitom upnut na pevný stůl a pohyb vykonává měřicí hlava upnutá na pohyblivém rameni.

Mezi výhody této konstrukce patří zanedbatelný vliv hmotnosti součásti na přesnost měření, neboť stůl je nepohyblivý. Další výhodou je poměrně vysoká rychlost měření, neboť je pohybováno pouze relativně malou hmotností (pouze ramenem s měřicí hlavou). Mezi nevýhody naopak patří výše zmíněný vliv ohýbání horizontálního ramene, po němž se pohybuje měřicí hlava, což do měření vnáší Abbého chybu. Kompenzace této chyby bývá většinou řešena softwarovou korekcí od výrobce.

Pro účely automobilového průmyslu bývá používána takzvaná dvouramenná konstrukce (*Obr. 12*), jež spočívá v sestavě dvou zrcadlově orientovaných měřicího strojů s horizontálními rameny. Tato ramena měří objekt (například karoserii) z obou stran současně, což zvyšuje produktivitu měření.



*Obr. 12: Dvouramenná konstrukce stroje s horizontálními rameny ZEISS Caleno [13]*

[11] [12]

### Portálový typ

Tento konstrukční typ (*Obr. 10 c*) je nejrozšířenějším typem CMM pro účely měření se středními až velkými rozsahy. Tento konstrukční typ se vyznačuje vysokou tuhostí portálu. Existují dvě základní provedení: konstrukce s pohyblivým portálem a konstrukce s pevným portálem. V obou případech se pinola pohybuje po suportu v osách  $X$  a  $Z$ . V případě pohyblivého portálu vykonává pohyb ve směru osy  $Y$  samotný portál, zatímco stůl s obrobkem zůstává nehybný. U stroje s pevným portálem naopak pohyb ve směru osy  $Y$  vykonává stůl, na který je obrobek upnutý.



*Obr. 13: CMM s pohyblivým portálem ZEISS SPECTRUM [14]*

**Konstrukce s pohyblivým portálem** (*Obr. 13*) je nejpoužívanější variantou portálového CMM stroje. Pohyblivý portál umožňuje dobrý přístup k měřenému dílu z mnoha stran a pevný stůl umožňuje měření velmi hmotných dílů bez vnášení velké chyby způsobené vysokou hmotností. Potenciálním problémem takovéto konstrukce je takzvané krokování, tedy že se obě strany portálu nepohybují stejnou rychlostí, a dochází tedy k natočení portálu. Výhodou naopak je, že oproti sloupové konstrukci s horizontálním ramenem dochází k výrazně menšímu ohýbání ramene, neboť je portál podepřen na obou stranách měřicího stolu. Tato konstrukce je vhodná pro měření středně velkých dílů s nižší nejistotou měření.



*Obr. 14: CMM s pevným portálem ZEISS O-INSPECT [15]*

**Konstrukce s pevným portálem** (*Obr. 14*) má pohyblivou pracovní desku a portál pevně spojen s ložem stroje. Pracovní deska umožňuje pohyb v jedné ose, čímž předchází efektu krokování, který nastává u konstrukcí s pohyblivým portálem. Zároveň je zde zásadní výhodou velmi tuhá konstrukce a s ní spojené výrazné snížení Abbého chyby. Z těchto důvodů patří tento typ měřicího stroje mezi nejpreciznější na trhu. Oproti konstrukci s pohyblivým portálem je měření s pevným portálem časově

náročnější, jelikož je nutno rozpohybovat těžkou granitovou pracovní deskou. Dalšími potenciálními nevýhodami jsou omezená nosnost desky, její prohýbání (které je nutno softwarově korigovat) a značná prostorová náročnost přístroje (uložení pro pracovní desku zabírá hodně místa).

[11] [12]

### Mostový typ

Tento konstrukční typ (*Obr. 10 d*) a *Obr. 15*) je určený pro největší rozsahy měření vyžadující vysokou přesnost. Používá se při měření velkých součástí (až přes 20 m), zvláště v automobilovém a leteckém průmyslu. Zpravidla se jedná o masivní konstrukce, což pomáhá zamezit průhybům mostu a vnášení velkých chyb do měření. Aby se předešlo krokování zmíněnému u portálových CMM s pohyblivým portálem, bývají obě strany mostu poháněny, a to duálními motory.



*Obr. 15: CMM mostové konstrukce ZEISS MMZ M [16]*

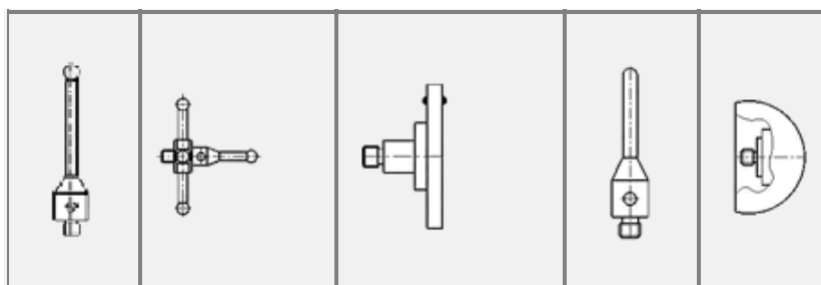
Hmotnost pohybující se části je relativně malá, neboť se pohybuje výhradně nosník, dochází tedy k relativně rychlému pohybu. Další z výhod je dobrá přístupnost obsluhy k dílu samotnému a zpravidla velice příznivý poměr ceny a výkonu stroje.

[5] [11] [12]

## 2.4.2 Konstrukce a materiály dotykových sond

### Konstrukční typy sond

Měřicí sonda je ta část snímače, která při dotykovém měření přichází do kontaktu s měřenou součástí. Obecně se od takovéto sondy vyžaduje vysoká tuhost, tvrdost a tvarová přesnost. Je několik z kladných konstrukčních typů měřicích sond.



*Obr. 16: Typy dotykových sond: (zleva) přímá sonda, hvězdicová sonda, disková sonda, válcová sonda a kulová sonda [17]*

**Přímá sonda** je nejjednodušším a nejběžněji používaným typem sondy v metrologii. Je velmi versatilní, co se oblasti použití týče. Jedná se o rovný dřík zakončený kuličkou. Tato sonda by ideálně měla najíždět kolmo na měřený povrch. Pro zamezení ohýbání je doporučeno použít co nejkratší dřík, který daná aplikace umožní.

**Hvězdicová sonda** je konfigurací seskládaných přímých sond do hvězdicovitého tvaru. Konkrétní typ seskládání závisí na aplikaci, na kterou bude senzor použit. Vyšší množství měřicích zakončení urychluje měřicí proces a zvyšuje produktivitu měření vlivem eliminace potřeby časté výměny konfigurací měřicích hlav.

**Naklápěcí sonda** je konstrukčně velmi podobná sondě přímé, ale disponuje kloubem umožňujícím naklápění dříku. Toto dovoluje měření šikmých ploch a otvorů bez nutnosti měnit sondu.

**Disková sonda** na rozdíl od předchozích na konci dříku nedisponuje kuličkou, ale kulovou úsečí, která umožňuje měření zápchů, drážek a závitů. Efektivně se jedná o měření „poledníkem“ větší kuličky, poněvadž kontakt probíhá pouze po obvodu disku.

**Válcová sonda** opět nedisponuje zakončením s kuličkou, nýbrž je zakončena válcem, disponuje tedy větším měřicím povrchem. Bývá využívána kupříkladu k měření tenkostěnných součástí, kde sondy s kuličkovým zakončením nedokáží zaručit dostatečný kontakt.

**Kulová sonda** má tvar relativně velké (v porovnání s běžnými rozměry výše zmíněných sond) duté polokoule. Tento dutý tvar je volen z důvodu snížení hmotnosti a tím i hybnosti sondy. Bývá používána pro měření hlubokých děr a tvarů a je vhodná i pro měření hrubých povrchů, neboť velký průměr polokoule tuto drsnost odfiltruje. Zpravidla bývá vyráběna z keramiky.

[18]

### **Materiály sond**

**Dříky sondy** jsou vyráběny z řady různých materiálů zvolených pro vysokou tuhost a tvrdost, nízkou hmotnost, a hlavně minimální teplotní roztažnost. Mezi nejčastěji používané patří například titan, karbid wolframu, nerezové oceli, keramika či uhlíkové kompozity. Pro odlehčení lze dříky také konstruovat stupňovité, což omezí měřicí délku, ale zvýší stabilitu dříku oproti variantě rovného dříku (o průměru nejužší části toho stupňovitého).

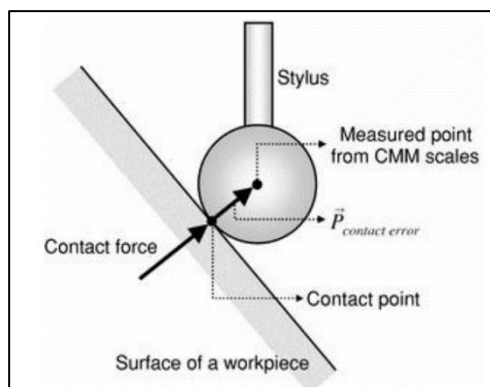
**Kuličky (či jiná zakončení) sondy** bývají zpravidla vyráběny z rubínu, nitridu křemíku, oxidu zirkoničitého, diamantu, keramiky či karbidu wolframu. Faktory vedoucí k výběru těchto materiálů jsou nízká abrazivnost, vysoká tvrdost a pevnost, nízká hmotnost a (v případě keramiky) možnost vyrábět kuličky na míru požadavkům.

Je třeba dbát na vhodnou kombinaci materiálu kuličky a materiálu měřeného objektu. Kupříkladu rubín je jednoznačně nejlepší volbou materiálu pro kuličky velmi malých rozměrů (až 120  $\mu\text{m}$ ), ale pro měření dílu z hliníku nebo jeho slitin je nezávisle na geometrii rubínová kulička zcela nevhodná. Rubín je totiž silně reaktivní s hliníkem a při kontaktu dochází k ulpívání hliníkových částic na rubínové sondě, což navyšuje chybu měření.

[18]

### 2.4.3 Korekce poloměru kuličky

Podstatným faktorem, který je nutno brát v potaz, je nutnost korekce poloměru kuličky (či jiného zakončení). Počítačový program, který měření řídí, totiž jako bod dotyku počítá geometrický střed kuličky na ose dráčky, ale dotyk samotný ve skutečnosti probíhá na vnějším plášti měřicí kuličky.

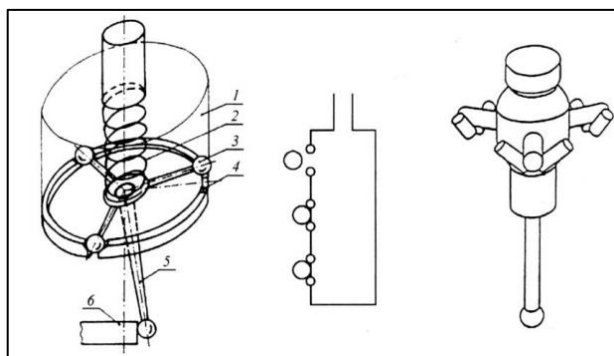


Obr. 17: Schéma korekce poloměru kuličky [10]

Počítačový program, který má informaci o průměru kuličky a chybě tvaru, pak musí tuto odchylku reálného bodu od toho imaginárního softwarově korigovat. Tato korekce probíhá za pomoci znalosti normálového vektoru, kterým bylo sondou na měřený povrch najížděno. Ze znalosti poloměru a výše zmíněného normálového vektoru pak lze jednoznačně určit polohu bodu dotyku (viz Obr. 17). Toto ale lze provést pouze za předpokladu správného najíždění na měřenou plochu. Při najíždění sondy na plochu jinak než přes normálu je do měření vnášena chyba. Vyhodnocený bod dotyku totiž nebude totožný se skutečným bodem dotyku. Korekci kuličky lze tedy počítat pouze při doteku po normále, jakkoli jinak znamená vnesení chyby. [10]

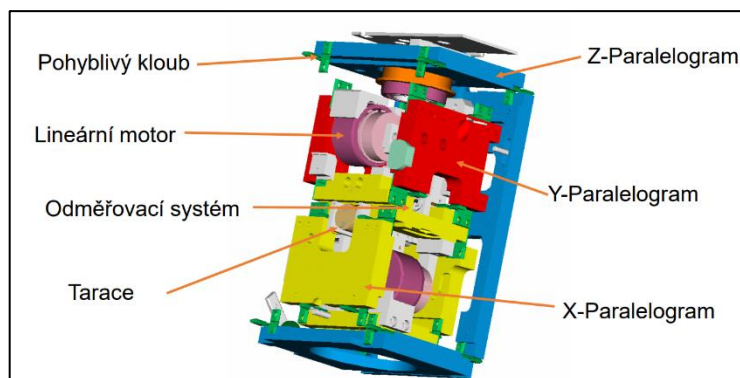
### 2.4.4 Dělení dotykových snímacích hlav

Obecně vzato jsou dotykové (kontaktní) souřadnicové měřicí hlavy děleny na pasivní (spínací) a aktivní.



Obr. 18: Pasivní spínací hlava [10]

**Pasivní dotykové snímací hlavy** (od kterých se v současné době upouští ve prospěch snímacích hlav aktivních), vychází z principu soustavy tří rovnoměrně (po 120°) rozmístěných spínačů v těle snímací hlavy. Tyto spínače dále předávají výstupní signály ve formě logické 0 nebo 1 (pokud došlo ke kontaktu, dojde k odečtení souřadnic). Mezi nevýhody této metody patří nutnost najíždět na měřený díl specifikovanou měřicí rychlostí (běžně okolo 5 mm/s), což se může projevit na rychlosti průběhu celkového měření. Dalším potenciálním problémem při použití tohoto typu snímací hlavy je možné nepřesné měření při prohnutí snímačů při měření v různých směrech a z toho vyplývající nepřesné spínání vnitřní soustavy, což vede ke zkreslení zanesených hodnot.



Obr. 19: Aktivní snímací hlava [10]

**Aktivní dotykové snímací hlavy** nevyžadují specifickou rychlost při najíždění na díl a měřicí sílu místo toho regulují za pomoci mechanismů umístěných uvnitř - v aktivní snímací hlavě. Ta funguje na principu sady tří paralelogramů (v každém měřeném směru) s určitou dovolenou výchylkou, která závisí na proudu procházejícím cívkou v měřicí hlavě. Po dotyku s měřenou konturou se sonda přesouvá do výchozí nastavené polohy nulové výchylky, kde se ji aktivní snímací hlava snaží udržet. Přítlačná síla je tedy měněna dle potřeby, aby zůstal zachován dotyk na kontuře. Zároveň měnící se přítlačnou sílu softwarově kompenzuje v rámci naměřených dat, takže tím není do měření vnášena chyba.

[10]

## 2.5 Bezdotykové souřadnicové měřicí stroje

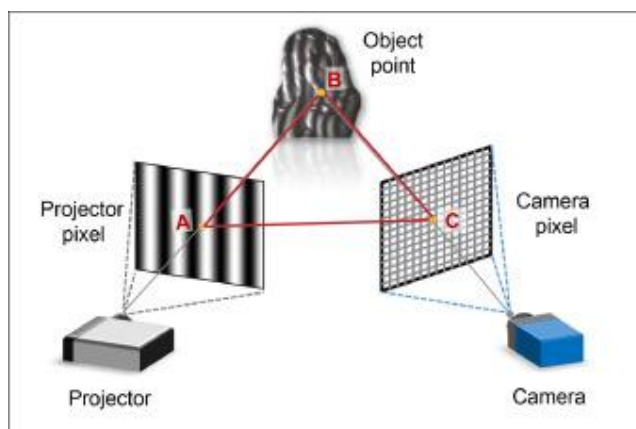
Tyto přístroje, na rozdíl od výše zmíněných dotykových systémů, nevyžadují pro účely měření dotyk sondy s povrchem měřeného dílu. Ke snímání bodů dochází jedním z níže zmíněných bezkontaktních principů. Mezi obecné výhody těchto bezdotykových měřicích metod patří velké množství naměřených bodů za relativně krátký časový úsek měření v porovnání s dotykovými metodami, které bodů nasnímají méně a za delší časový úsek. Tato efektivita sběru bodů je ovšem kompenzována nižší přesností měření za stejných laboratorních podmínek a citlivostí měřicí optiky na barvy, průhlednost, lesk a vhodné nasvětlení měřeného dílu. Zároveň také může dojít k potížím při měření děr, ohybů či vnitřních dutin, neboť takovéto slepé/nenasnímatelné místo nelze vyhodnotit.

Nejčastěji v průmyslu zastupované bývají triangulační senzory, a to optické 3D skenery (pruhová projekce, fotogrammetrie) či laserové 3D skenery (laser skenery, laser trackery). Tyto senzory využívají metodu triangulace, tedy sesazení dvojdimenzionálních snímků nasnímaných pod odlišnými úhly do třídimenzionálního obrazu za předpokladu znalosti rozdílu těchto snímacích úhlů.



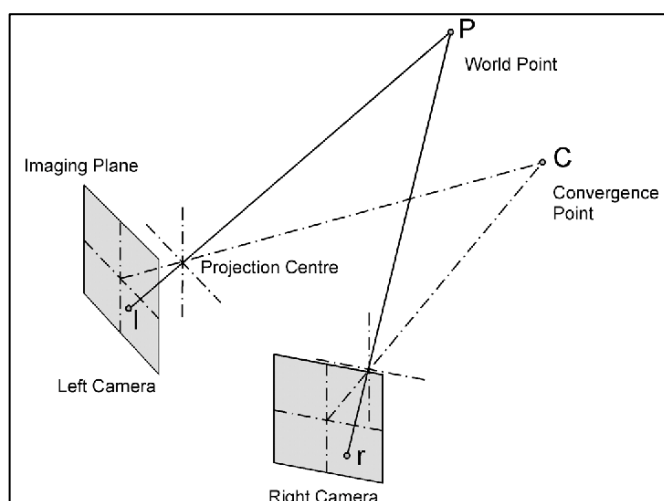
## 2.5.1 Optické 3D skenery

Tyto přístroje fungují na principu pořizování vícero snímků měřeného objektu z více úhlů a následnému sesazení těchto dvojdimenzionálních snímků metodou triangulace do prostorového modelu.



Obr. 20: Metoda pruhové projekce [20]

**Metoda pruhové projekce** spočívá v promítání kontrastních pruhů na měřený díl, který je zároveň snímán pomocí kamery. Tato kamera je vůči modelu umístěna pod známým úhlem, případně se může měnit (například u měření na rotujícím stole, stále ale musí být momentální úhel známý). Tato metoda bývá většinou nevhodná pro lesklé či průhledné povrchy bez úpravy (zmatnění či pokrytí neprůhlednou vrstvou), neboť jsou kontury na seskládaných snímcích hůře rozlišitelné.



Obr. 21: Metoda fotogrammetrie [21]

**Metoda fotogrammetrie** funguje na principu sesazení digitálních obrazů povrchu součásti z různých úhlů speciálním digitálním fotoaparátem. Na povrchu měřené součásti bývají umístěny bodové měřicí značky a každá ze zmíněných značek bývá opakovaně fotografována z vícero různých úhlů. Po sesazení obrazů pak tyto značky slouží k jednoznačnému určení polohy bodu, který značí. Dále se používá kalibrační tyč umístěná ve snímcích vedle součásti, která poskytuje měřítko pro vyhodnocování výsledného modelu. Podobně jako metoda pruhové projekce, bývá i tato měřicí metoda citlivá na lesk a průhlednost měřeného povrchu. [19]

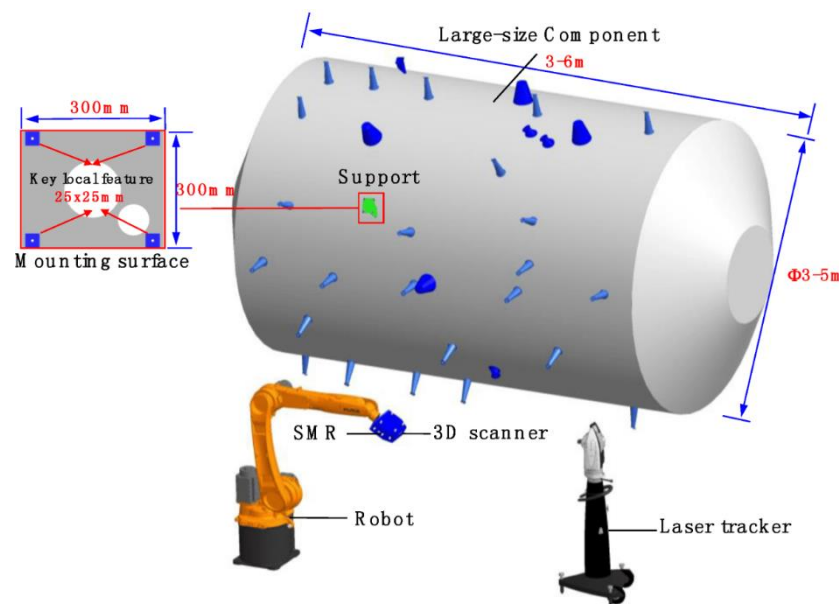


## 2.5.2 Laserové 3D skenery

Tyto přístroje snímají informace o povrchu měřeného dílu primárně za pomoci laserových paprsků a nikoli optických snímků.

**Laser skenery** využívají pro měření jak laserové, tak optické techniky. Bývají upínány na stroje či nekartézská robotická ramena a fungují na triangulačním principu. Promítají na měřený povrch sítě bodů nebo čar, která je nasnímána kamerou pod známým úhlem. Vzdálenost měřeného objektu od skenovací hlavy se pak vyhodnocuje pomocí stereometrie.

**Laser trackery** vychází z principu laserového interferometru, tedy měří relativní vzdálenost měřeného bodu vůči vzdálenosti známého odrazového bodu. Ze změny vlnové délky mezi oběma vyslanými paprsky je vyhodnocena relativní vzdálenost měřeného objektu vůči vzdálenosti známého odrazového bodu. Z těchto dat software vyhodnotí absolutní vzdálenost měřeného místa od místa vyslání laserových paprsků (hlavy laser trackeru).



Obr. 22: Systém měření kombinací laser skeneru a laser trackeru [22]

Laser skenery jsou obvykle používány v kombinaci s laser trackery, kdy skenery na nekartézských robotických ramenech snímají měřený objekt vůči vlastnímu souřadnému systému a laser trackery sledují polohu a orientaci skenovací hlavy v prostoru. Tímto převádí naměřené relativní souřadnice na absolutní souřadnice měřicí buňky.

[19]

## 3 Přípravné procesy

V této kapitole se nachází základní popis přípravných procesů potřebných pro spolehlivé měření a faktorů, které je nutno zvážit a brát v potaz při volbě metody měření a přípravných procesů.

### 3.1 Očištění

Aby bylo možno součástku správně přeměřit, ať už kontaktní či bezkontaktní metodou, je ji třeba odjehlít a očistit od cizích či vlastních nečistot.

Pro účely přesného měření je tedy třeba měřený díl očistit. V závislosti na typu dílu a očekávaném typu znečištění může toto očištění proběhnout formou ofouknutí dílu proudem vzduchu, nebo kupříkladu pomocí mechanického očištění kartáči, vyprání dílu v průmyslové pračce / ultrazvukové čističce nebo otření / vysušení od chladicí emulze či oleje..

V případě drobných prachových částic dojde u kontaktního měření často k odhrnutí prachové částice z měřeného dílu měřicí sondou. Ne vždy se ale dá spoléhat, že k tomu dojde, a u velmi přesných aplikací i mikroskopické smítka výrazně ovlivní výsledek měření. V případě bezkontaktního měření by nečistota ulpívající na povrchu součástky mohla být SW vyhodnocena jako bod povrchu a vnášela by do měření chybná data.

### 3.2 Temperace

Z důvodu teplotní roztažnosti měřených součástí je třeba součásti před měřením vytemperovat na teplotu, pro kterou jsou vedeny požadované rozměry. Toto pravidlo platí v případě, že předpokládaná hodnota tepelné roztažnosti je významná vůči požadované přesnosti měření. Na stejnou teplotu by měla být vytemperována i místnost, ve které měření probíhá. Temperaci je myšleno uvedení celého dílu na požadovanou teplotu, tedy dlouhodobé skladování v prostředí dané teploty, dokud nezmizí teplotní gradient v měřené součásti (alespoň nakolik to jde) a nebude mít celý díl homogenní požadovanou teplotu.

Pro měřicí místnosti je princip analogický. Udržení požadované teploty bývá realizováno za pomoci ventilačních a klimatizačních systémů. Pro velmi přesné aplikace je třeba i kompenzovat efekt světla a pracovníků, což do prostředí rovněž vnáší teplo. Této kompenzace se dá kupříkladu dosáhnout celostěnovou klimatizací (která vytváří horizontální proud homogenně teplého vzduchu, čímž předchází tvorbě teplotního gradientu) nebo třeba rozsvícením a zhasínáním světla v závislosti na množství pracovníků v místnosti a jejich momentální pozici.

### 3.3 Úprava povrchu pro bezkontaktní měření

Jak jsem již zmínila výše, v podkapitole 2.5 *Bezdotykové souřadnicové měřicí stroje*, jsou bezkontaktní typy měření citlivé na vlastnosti povrchu, a to primárně na jejich průhlednost, odrazivost, barevné přechody (tvorí falešné hrany), a členitost povrchu, která může vést k nekorektně nasnímaným bodům.

Členitosti povrchu bohužel přípravnými procesy nelze předejít, ale lze optimalizovat měřicí program pro danou geometrii, či lze zvolit jinou metodu vyhodnocení v případě, že bude původní metoda shledána nevyhovující.

Odráživost, průhlednost a barevnou nestálost povrchů, které všechny vnášejí do měření chybně nasnímané body, lze přípravnými procesy částečně kompenzovat, kupříkladu nanesením tenké povrchové vrstvy požadovaných optických vlastností, či vhodnou volbou osvětlení dílu.

### 3.4 Vlhkost

Vzdušná vlhkost může mít v závislosti na materiálu měřeného dílu (kupříkladu u plastů či kompozitních materiálů) nemalý vliv na přesnost měření. Je tedy třeba pro každý materiál vyhodnotit vyhovující rozsah vzdušné vlhkosti. Zatímco kovy nebývají nijak výrazněji ovlivněny, plasty ve vlhkém prostředí nabývají na objemu a je tedy třeba je skladovat, temperovat a měřit v prostředí s nízkou vlhkostí.

Vlhkost prostředí lze regulovat kombinací vysoušečů a zvlhčovačů vzduchu.

### 3.5 Vhodná kombinace materiálů dotykového senzoru a součásti

Jak již bylo zmíněno výše, v sekci 2.4.2 *Konstrukce a materiály dotykových sond*, je při dotykovém měření třeba v rámci přípravy zkontrolovat kompatibilitu materiálu měřicí kuličky a materiálu měřeného objektu, respektive ověřit, že se nebudou navzájem ovlivňovat způsobem, který by vnašel nepřesnosti do měřicího procesu, jako například již výše zmíněná kombinace rubínu a hliníku / hliníkové slitiny.

### 3.6 Správné upnutí měřené součásti

Pro účely zaručení co nejvyšší přesnosti měření je třeba díl pevně upnout do stroje. Toto upnutí probíhá většinou za pomoci tuhého přípravku, a to tak, aby byly všechny měřené prvky dobře dostupné pro snímací systém a aby se měřená součást v průběhu měření nehýbala. Pohybem součásti by došlo ke znehodnocení výsledků měření. Tyto přípravky mohou být specializované jednoúčelové, pro vysokou sériovost měření, či víceúčelné, zpravidla modulární, které lze adaptovat pro potřeby kusového měření.

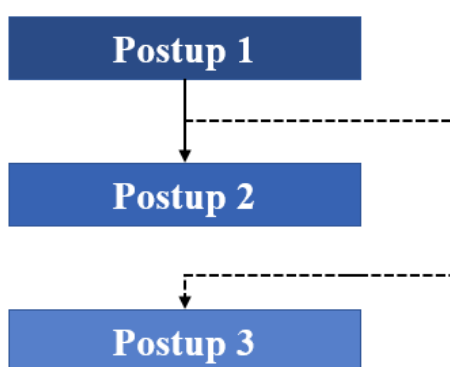
Z hlediska opakovatelnosti upnutí zkoumané součásti je jednoznačně nejlepší volbou výše zmíněný jednoúčelový přípravek vytvořený právě pro specifickou měřicí aplikaci. Jednoúčelové přípravky minimalizuje variabilitu operátora tím, že bývá jen jediný způsob upnutí a vyrovnání (kupříkladu přípravek se středícími kužely). Méně přesné bývají modulární sestavy/stavebnice (např. Alufix od firmy WITTE), které sice lze částečně přizpůsobit pro konkrétní aplikaci, ale ne dokonale, poněvadž se jedná o díly univerzální stavebnice, která není upravena pro danou aplikaci. Jednotlivé části mají vůči sobě vůli a sestava není perfektně tuhá ani perfektně nehybná. Nejhorší opakovatelnost upnutí pak mají univerzální upínače, jako jsou třeba svěráky či sklíčidla, neboť se zde nejvíce projeví variabilita operátora.

## 4 Analýzy systémů měření

Systémy měření lze vyhodnocovat na základě různých analytických metod, které vesměs vyústí v index či koeficient určující míru způsobilosti měření a hranice těchto indexů určující, zda zkoumané měření vyhovuje či nikoliv.

### 4.1 AIAG MSA 4

Metodika AIAG MSA 4 (Automotive Industry Action Group - Measurement System Analysis), nadále krátce nazývaná MSA, je příručkou k analýze měření vytvořenou americkými automobilovými společnostmi Chrysler Group LLC, Ford Motor Company a General Motors Corporation. Byla vytvořena k unifikaci požadavků na dodavatele komponent výše zmíněných společností. Jedná se o nezávaznou příručku navrhuující metodiku určování způsobilosti měřicích systémů a procesů na základě popsaných analytických metod.



Obr. 23: Schématická návaznost postupů v rámci MSA

V rámci vyhodnocování způsobilosti měřidla dle metodiky MSA lze proces posuzování rozdělit do tří částí/postupů (viz Obr. 23):

- Postup 1 (určení koeficientů způsobilosti měřidla)
- Postup 2 (určení hodnoty opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měřidla a to buď metodou ARM nebo metodou ANOVA)
- Postup 3 (alternativní určení opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měřidla, když operátor nevstupuje do procesu měření – například plná automatizace)

Postup 2 a Postup 3 jsou vyhodnocovány pouze v případě, že měřidlo bylo prokázáno jako způsobilé dle Postupu 1.

Je možné také říct, že Postup 1 udává způsobilost měřicího systému, zatímco Postup 2 popřípadě Postup 3 určují způsobilost měřicího procesu.

[9]

#### 4.1.1 Postup 1

Dle Postupu 1, tedy prvního kroku analýzy způsobilosti dle MSA, je rozlišováno několik koeficientů pro vyhodnocení způsobilosti měřidla pro daný úkol z hlediska rozlišení měřicího zařízení. Jsou jimi koeficient způsobilosti měřidla  $c_g$  a kritický koeficient způsobilosti měřidla  $c_{gk}$ . Oba koeficienty se určují na základě opakovaného měření konkrétních rozměrů. Doporučeno bývá přinejmenším 10 opakovaných měření.

**Koeficient způsobilosti měřidla  $c_g$** 

Tento koeficient je vypočítán za pomoci následujícího vzorce

$$c_g = \frac{0,2 \cdot TOL}{6 \cdot s}, \quad 4.1-1$$

kde  $TOL$  je šířka tolerančního pole měřeného prvku (vzorec 4.1-2) a  $s$  je směrodatná odchylka naměřených hodnot (vzorec 4.1-3).

Pro výpočet šířky tolerančního pole  $TOL$  platí

$$TOL = HMR - DMR, \quad 4.1-2$$

kde  $HMR$  je horní mezní rozměr měřeného prvku a  $DMR$  je dolní mezní rozměr měřeného prvku.

Pro výpočet směrodatné odchylky naměřených hodnot  $s$  platí

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad 4.1-3$$

kde  $n$  je počet naměřených hodnot,  $x_i$  je  $i$ -tá naměřená hodnota v sérii a  $\bar{x}$  je aritmetickým průměrem všech naměřených hodnot daného opakovaného měření.

Aby bylo měřidlo vyhodnoceno pro danou aplikaci jako způsobilé, musí pro hodnotu koeficientu způsobilosti měřidla platit následující vztah

$$c_g \geq 1,33. \quad 4.1-4$$

**Kritický koeficient způsobilosti měřidla  $c_{gk}$** 

Tento koeficient, někdy také nazývaný minimální index způsobilosti měřidla, posuzuje nejen samotnou způsobilost procesu měření, ale také strannost daného měření. Vypočítá se dle následujícího vzorce

$$c_{gk} = \min \left( \frac{\bar{x} - (REF - 0,1 \cdot TOL)}{3 \cdot s}, \frac{(REF + 0,1 \cdot TOL) - \bar{x}}{3 \cdot s} \right), \quad 4.1-5$$

kde  $\bar{x}$  je aritmetickým průměrem všech naměřených hodnot,  $REF$  je referenční hodnotou měřeného prvku (nutno měřit alespoň o řád přesnějším strojem, než je stroj zkoumaný na způsobilost, pokud je to možné),  $TOL$  je šířka tolerančního pole měřeného prvku (viz vzorec 4.1-2) a  $s$  je směrodatná odchylka opakovaně naměřených hodnot (viz vzorec 4.1-3).

Aby bylo měřidlo vyhodnoceno pro danou aplikaci jako způsobilé, musí pro hodnotu kritického koeficientu způsobilosti měřidla platit následující vztah

$$c_{gk} \geq 1,33. \quad 4.1-6$$

Mezi koeficientem způsobilosti měřidla  $c_g$  a kritickým koeficientem způsobilosti měřidla  $c_{gk}$  vždy platí následující vztah

$$c_g \geq c_{gk}. \quad 4.1-7$$

Toto platí proto, že v případě dokonale nestranného měření (ideální situace) hodnota kritického koeficientu způsobilosti  $c_{gk}$  odpovídá hodnotě koeficientu způsobilosti  $c_g$ , kde strannost měření není brána v potaz.

V případě, že je měřidlo prohlášeno za způsobilé, pokračuje analýza na Postup 2. [23]

### 4.1.2 Postup 2 - Average-Range-Method (ARM)

Tato metoda, česky nazývána metoda střední hodnoty rozsahu, spočívá v počátečním stanovení počtu operátorů  $k$ , počtu měřených součástí  $n$  a počtu opakovaných měření jednoho kusu na operátora  $r$ , při dodržení následujících parametrů

$$k \geq 2; n \geq 5; r \geq 2 \text{ a zároveň } k \cdot n \cdot r \geq 30. \quad 4.1-8$$

Následně je pro každou měřenou součást určena průměrná hodnota  $\bar{x}_j$  naměřená operátorem  $j$  a průměrné rozpětí  $\bar{R}_j$  operátora  $j$  pro každou měřenou součást dle následujících vzorců

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n \cdot r} \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^r x_{ijm}, \quad 4.1-9$$

$$\bar{R}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{ij}. \quad 4.1-10$$

**Hodnota opakovatelnosti systému měření  $EV$**  (Equipment variation) je pak určena z následujícího vzorce

$$EV = K_1 \cdot \bar{\bar{R}}, \quad 4.1-11$$

kde  $K_1$  je empiricky určená tabulková konstanta a  $\bar{\bar{R}}$  je průměr rozpětí všech operátorů (vzorec 4.1-12).

$$\bar{\bar{R}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \bar{R}_j. \quad 4.1-12$$

**Hodnota reprodukovatelnosti měřicího systému  $AV$**  (Appraiser variation) je určena z následujícího vzorce

$$AV = \sqrt{(K_2 \cdot R_{\bar{x}})^2 - \frac{EV^2}{n \cdot r}}, \quad 4.1-13$$

kde  $K_2$  je empiricky určená tabulková konstanta a  $R_{\bar{x}}$  je rozpětí všech průměrných hodnot naměřených jednotlivými operátory (vzorec 4.1-14).

$$R_{\bar{x}} = \max(\bar{x}_j) - \min(\bar{x}_j). \quad 4.1-14$$

Obě hodnoty ve vzorcích 4.1-11 a 4.1-13 lze také uvádět v procentuální podobě.

**Hodnota opakovatelnosti a reprodukovatelnosti  $GR\&R$**  respektive % $GR\&R$  (Gage Repeatability & Reproducibility) je vypočtena z následujících vztahů

$$GR\&R = \sqrt{EV^2 + AV^2}, \quad 4.1-15$$

$$\%GR\&R = \frac{GR\&R}{TOL} \cdot 100 [\%], \quad 4.1-16$$

kde  $TOL$  je šířkou tolerančního pole měřeného rozměru.

Aby byl systém vyhodnocen jako zůsobilý z hlediska opakovatelnosti a reprodukovatelnosti, nesmí být překročeny níže uvedené hraniční hodnoty.

Systém je určitě způsobilý, platí-li vztah

$$\%GR\&R \leq 10\% . \quad 4.1-17$$

Systém může být podmíněně způsobilý, platí-li vztah

$$10\% < \%GR\&R \leq 30\% . \quad 4.1-18$$

V případě uvedeném ve vzorci 4.1-18 je třeba vyhodnotit způsobilost pro konkrétní aplikace na základě její důležitosti, nákladů na měření a přepracování/opravu. Zároveň by mělo být použito takového měřicího procesu schváleno zákazníkem.

Zároveň je  $\%GR\&R$  možno využít pro vyhodnocení způsobilosti pouze v případě, že vypočtené statistiky jsou deterministické odhady variability systému, což ovšem nemusí být skutečností, neboť lze výsledky měnit vhodnou volbou filtrů (např. eliminace vlivu interakce), nebo přímo manipulací celé studie (např. produkování dílů mimo očekávané variability procesu).

Dalším z faktorů, který je třeba brát v potaz, je hodnota **počtu odlišných kategorií** (Number of Distinct Categories), které lze spolehlivě (97%) rozlišit v rámci měření. Tato hodnota je vypočtena následujícím vztahem:

$$ndc = 1,41 \cdot \frac{PV}{GR\&R} . \quad 4.1-19$$

Vypočítaná hodnota je následně zaokrouhlena a je dána doporučená hladina

$$ndc \geq 5. \quad 4.1-20$$

Menší počet  $ndc$  (2 až 4) umožňuje pouze hrubé odhady a není způsobilý pro odhad parametrů a ukazatelů procesu. Hodnota  $ndc = 1$  indikuje pouze zda proces produkuje shodné či neshodné díly.

[9] [23]

### 4.1.3 Postup 2 - Analysis of Variance (ANOVA)

Tato metoda, česky nazývána analýza rozptylu, je ve srovnání s výše zmíněnou metodou ARM považována za přesnější, vyžaduje ale použití statistických softwarů z důvodů vyšší komplikovanosti výpočtu.

Obecně spočívá v počátečním stanovení počtu operátorů  $k$ , počtu měřených součástí  $n$  a počtu opakovaných měření jednoho kusu na operátora  $r$ .

Pro výpočet stupňů volnosti (Degree of Freedom) pak platí následující vztahy:

*Tabulka 1: Tabulka vztahů pro určení stupňů volnosti vlivů měření pro metodu ANOVA [23]*

Vliv	Stupeň volnosti
Součást	$DF_P = n - 1$
Operátor	$DF_A = k - 1$
Interakce mezi operátory a součástmi	$DF_{AP} = (n - 1) \cdot (k - 1)$
Měřidlo	$DF_E = n \cdot k \cdot (r - 1)$

Pro výpočet součtu čtverců (Sum of Squares) odchylek jednotlivých vlivů pak platí níže uvedené vztahy.

Součet čtverců odchylek mezi  $n$  měřenými součástmi je vypočítán ze vztahu

$$SS_P = \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_{i\bullet\bullet}^2}{k \cdot r} - \frac{x_{\bullet\bullet\bullet}^2}{n \cdot k \cdot r} \right) = k \cdot r \cdot \sum_{i=1}^n (\bar{x}_i - \bar{\bar{x}}) , \quad 4.1-21$$

kde  $\bar{x}_i$  je průměr měření součásti  $i$  a  $\bar{\bar{x}}$  je celkový průměr měření.

Součet čtverců odchylek mezi  $k$  operátory je vypočítán ze vztahu

$$SS_A = \sum_{j=1}^k \left( \frac{x_{\blacksquare j \blacksquare}^2}{n \cdot r} - \frac{x_{\blacksquare \blacksquare \blacksquare}^2}{n \cdot k \cdot r} \right) = n \cdot r \cdot \sum_{j=1}^k (\bar{x}_j - \bar{\bar{x}}), \quad 4.1-22$$

kde  $\bar{x}_j$  je průměr měření operátorem  $j$  a  $\bar{\bar{x}}$  je celkový průměr měření.

Součet čtverců odchylek přes interakce mezi  $k$  operátory a  $n$  měřeními součástmi je vypočítán ze vztahu

$$SS_{AP} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \left( \frac{x_{ij \blacksquare}^2}{r} - \frac{x_{\blacksquare \blacksquare \blacksquare}^2}{n \cdot k \cdot r} \right) - SS_P - SS_A. \quad 4.1-23$$

Součet čtverců odchylek měřidla je vypočítán ze vztahu

$$SS_E = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^r \left( x_{ijm}^2 - \frac{x_{\blacksquare \blacksquare \blacksquare}^2}{n \cdot k \cdot r} \right) - SS_P - SS_A - SS_{AP}. \quad 4.1-24$$

Suma všech čtyř výše vypočítaných odchylek pak činí součet čtverců odchylek přes všechny naměřené hodnoty (Total Sum of Squares)

$$TSS = SS_P + SS_A + SS_{AP} + SS_E. \quad 4.1-25$$

Dále jsou počítány kvadráty vlivu jednotlivých rozptylů (Mean of Squares).

Průměr kvadrátu rozptylu součásti je vypočítán z následujícího vztahu

$$MS_P = \frac{SS_P}{DF_P}. \quad 4.1-26$$

Průměr kvadrátu rozptylu operátorů je vypočítán ze vztahu

$$MS_A = \frac{SS_A}{DF_A}. \quad 4.1-27$$

Průměr kvadrátu rozptylu interakcí je vypočítán z následujícího vztahu

$$MS_{AP} = \frac{SS_{AP}}{DF_{AP}}. \quad 4.1-28$$

Průměr kvadrátu rozptylu měřidla je vypočítán ze vztahu

$$MS_E = \frac{SS_E}{DF_E}. \quad 4.1-29$$

**Rozptyl součásti PV** (Part Variation) je pak vypočítán vztahem

$$PV = \sqrt{\frac{MS_P - MS_{AP}}{k \cdot r}}. \quad 4.1-30$$



**Rozptyl operátora  $AV$**  (Appraiser Variation) neboli reprodukovatelnost je vypočítán vztahem

$$AV = \sqrt{\frac{MS_A - MS_{AP}}{n \cdot r}} . \quad 4.1-31$$

**Rozptyl interakcí  $INT$**  (Interaction Appraiser-Part) je vypočítán vztahem

$$INT = \sqrt{\frac{MS_{AP} - MS_E}{r}} . \quad 4.1-32$$

**Rozptyl měřidla  $EV$**  (Equipment Variation) je pak vypočítán vztahem

$$EV = \sqrt{MS_E} . \quad 4.1-33$$

Všechny hodnoty ve vzorcích 4.1-30, 4.1-31, 4.1-32 a 4.1-33 lze také uvádět v procentuální podobě.

Pro vyhodnocení způsobilosti měřidla jsou následně vypočítány hodnoty **opakovatelnosti a reprodukovatelnosti  $GR\&R$**  respektive **% $GR\&R$**  (Gauge Repeatability & Reproducibility) za použití následujících vztahů:

$$GR\&R = \sqrt{EV^2 + AV^2 + INT^2} , \quad 4.1-34$$

$$\%GR\&R = \frac{GR\&R}{TOL} \cdot 100 [\%] , \quad 4.1-35$$

kde  $TOL$  je šířkou tolerančního pole měřeného rozměru.

Aby byl proces vyhodnocen jako zůsobilý z hlediska opakovatelnosti a reprodukovatelnosti, nesmí být překročeny hraniční hodnoty uvedené ve vzorcích 4.1-17 a 4.1-18.

Zároveň platí omezení uvedená na konci sekce 4.1.2 *Postup 2 Average-Range-Method (ARM)*. [23]

### 4.1.4 Postup 3

Tento postup je speciální variantou Postupu 2, u kterého ale není přítomen vliv operátora. Používá se tedy kupříkladu pro plně automatizované měřicí linky.

Výpočtově je analogický k Postupu 2, ať už metodou ARM nebo ANOVA.

Je nutné stanovení počtu měřených součástí  $n$  a počtu opakovaných měření jednoho kusu  $r$ , při dodržení následujících parametrů:

$$n \geq 5; r \geq 2 \text{ a zároveň } n \cdot r \geq 20 . \quad 4.1-36$$

Z důvodu neexistujícího vlivu operátora pak pro hodnoty **opakovatelnosti a reprodukovatelnosti  $GR\&R$**  respektive **% $GR\&R$**  (Gauge Repeatability & Reproducibility) platí:

$$GR\&R = EV , \quad 4.1-37$$

$$\%GR\&R = \frac{EV}{TOL} \cdot 100 [\%] , \quad 4.1-38$$

kde  $EV$  je vypočítáno ze vzorce 4.1-11, potažmo 4.1-33 a  $TOL$  je šířkou tolerančního pole měřeného rozměru.

Aby byl proces vyhodnocen jako zůsobilý z hlediska opakovatelnosti a reprodukovatelnosti, nesmí být překročeny hraniční hodnoty uvedené ve vzorcích 4.1-17 a 4.1-18.

Zároveň platí omezení uvedená na konci sekce 4.1.2 *Postup 2 Average-Range-Method (ARM)*. [23]

## 4.2 VDA 5

Příručka VDA 5 – Mess- und Prüfprozesse, Eignung, Planung und Management, 3. přepracované vydání, červenec 2021, nadále označovaná pouze jako VDA 5, je nezávazný dokument vydaný německým Verband der Automobilindustrie e. V. (Svaz automobilového průmyslu) jako pátý svazek v řadě publikací Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie (Management kvality v automobilovém průmyslu).

Příručka VDA 5 slouží k zřehlednění shrnutí požadavků na metodiku určení vhodnosti procesu zkoušení, tedy schválení zkušebního zařízení, řešení nejistot měření v návrhu produktu a ve výrobě. Vzhledem ke komplexnosti tohoto úkolu a diverzitě mezi řešeními dle jednotlivých norem a směrnic byly po konzultacích s firmami pod záštitou Německého svazu automobilového průmyslu vytvořeny doporučené rámcové postupy pro tvoření metodik procesů měření a zkoušení vycházející z norem ISO/IEC Guide 98-3 (2008-09), DIN EN ISO 14253-1 a vybraných metod, které se v praxi osvědčily, jako jsou například určité části AIAG MSA či vybrané podnikové normy.

[24]

### 4.2.1 Rozdělení měřených dílů dle rizika

Jednou z hlavních změn, kterou třetí vydání příručky VDA 5 přináší oproti v současné době ve Škoda Auto a.s. používané metodice založené na MSA, je, že se v ní jedná o metody volby procesů a systémů měření založené na rizicích.

Metodika VDA 5 rozděluje vyráběné díly a jejich charakteristiky do pěti takzvaných Risikoklassen, tedy tříd rizika, na základě kterých se pak dále určují minimální požadavky na proces zkoušení.

Třídy tedy odpovídají „žádnému riziku“ (třída 1), „nízkému riziku“ (třída 2), „střednímu riziku“ (třída 3), „vysokému riziku“ (třída 4) a „nejvyššímu riziku“ (třída 5). Tyto třídy jsou definovány na základě případných následků a pravděpodobnosti výskytu nesprávného rozhodnutí podle výsledku zkoušky.

Speciálními případy jsou takzvané zvláštní charakteristiky funkce (BMF) spadající automaticky do třídy 4 a zvláštní charakteristiky bezpečnosti produktu (BMS) a zvláštní zákonné charakteristiky (BMZ) patřící automaticky do třídy 5. Tyto zvláštní charakteristiky musí být nadefinovány za spolupráce vývoje a plánování a jsou pevně dány již ve výkresu.

V následující tabulce (*Tabulka 2*) je schématicky popsán základní předvýběr procesů v závislosti na třídách rizika a úkony a podmínky s nimi spojené, jak jsou uvedeny v rámci příručky VDA 5. [24]

*Tabulka 2: Tabulka předvýběru procesů pro řízení založeném na rizicích [24]*

Třídy rizika:	Žádné (1)	Malé (2)	Střední (3)	Velké (4)	Nejvyšší (5)
Stupeň zabezpečení:	Nejmenší zabezpečení vhodnosti procesu	Řízení založené na rizicích vhodnosti procesu (na základě matice k prohlášení úrovně zabezpečení)			Vyšší zabezpečení vhodnosti procesu zkoušení
Testování ve fázi vývoje a posuzování:	Např. nastavovací montážní pomůcky,	Zvážení rámcových podmínek pro stanovení dat	Stanovení dat (ne uvolnění dílu!)	Data jako základ pro uvolnění s výjimkou právního zázemí	Uvolnění / typ zkoušky / zákonné požadavky
Vývoj/výroba po zahájení produkce:	pokud je charakteristika později sledována zkušebním zařízením	Zkouška, která byla následně opět potvrzena špičkovým zkušebním zařízením	Zkušební charakteristiky, které nejsou zvláštními charakteristikami	Zvláštní charakteristiky funkce (BMF)	Zvláštní charakteristiky bezpečnosti produktu (BMS) a zvláštní zákonné charakteristiky (BMZ)

## 4.2.2 Indexy vhodnosti dle VDA 5

Nejvýraznějším rozdílem mezi vyhodnocováním za pomoci metodiky VDA 5 a vyhodnocováním za pomoci metodiky MSA jsou i koeficienty, na jejichž základě je vyhodnocována vhodnost daného systému či procesu měření. V rámci vyhodnocování vhodnosti dle metodiky VDA 5 se používá index vhodnosti měřicího systému  $Q_{MS}$  a index vhodnosti měřicího procesu  $Q_{MP}$ .

### Dostačující rozlišení indikace

Před počátkem vyhodnocování vhodnosti měřicího systému/procesu dle výše zmíněných indexů je třeba vyhodnotit, zda má systém dostatečné rozlišení.

Požadavek na rozlišení měřicího systému je dle příručky VDA 5 následující:

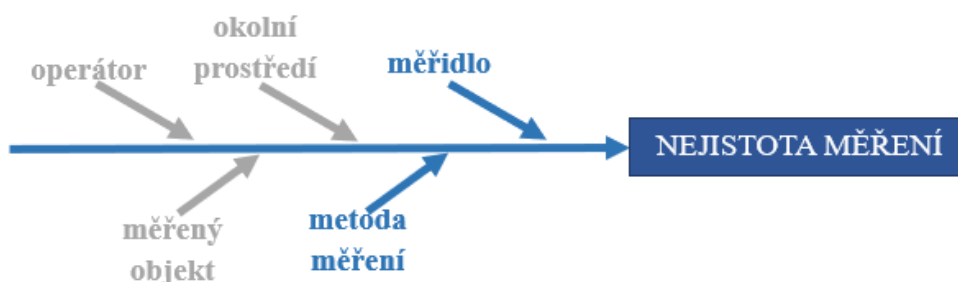
$$RE \leq 5\% TOL, \quad 4.2-1$$

kde  $RE$  je rozlišení indikace a  $TOL$  je šířka tolerančního pole měřeného prvku (viz vzorec 4.1-2).

V případě, že je tato podmínka splněna, má smysl pokračovat ve vyhodnocování měřicího systému/procesu.

### Index vhodnosti měřicího systému $Q_{MS}$

Tento index zahrnuje informace o vhodnosti samostatného měřicího systému bez dalších nejistot vstupujících do procesu měření, zahrnuje tedy pouze měřidlo a zvolenou metodu měření, jak je znázorněno na Obr. 24.



Obr. 24: Diagram znázorňující uvažované veličiny vstupující do vyhodnocování vhodnosti měřicího systému [24]

Hodnota tohoto indexu je udávána v procentech a je vypočítána dle následujícího vztahu

$$Q_{MS} = \frac{2 \cdot U_{MS}}{TOL} \cdot 100, \quad 4.2-2$$

kde  $U_{MS}$  je rozšířená nejistota měřicího systému a  $TOL$  je šířka tolerančního pole měřeného prvku (viz vzorec 4.1-2).

Rozšířená nejistota měřicího systému  $U_{MS}$  je vypočítána za pomoci následujícího vzorce

$$U_{MS} = k \cdot u_{MS}, \quad 4.2-3$$

kde  $u_{MS}$  je kombinovaná standardní nejistota měřicího systému (vzorec 4.2-5 nebo vzorec 4.2-6) a  $k$  je tabulková hodnota koeficientu rozšíření pro pravděpodobnost pokrytí 95,45 % v závislosti na stupních volnosti dle následující tabulky.

Tabulka 3: Tabulka koeficientů rozšíření  $k$  pro pravděpodobnost pokrytí 95,45 % v závislosti na stupních volnosti  $f$  [24]

Počet stupňů volnosti $f$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$k$	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,32	2,28
Počet stupňů volnosti $f$	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$k$	2,25	2,23	2,21	2,20	2,18	2,17	2,16	2,15	2,14	2,13
Počet stupňů volnosti $f$	21	22	23	24	25	26	27	28	29	$\rightarrow \infty$
$k$	2,13	2,12	2,12	2,11	2,11	2,10	2,10	2,09	2,09	2,0

Stupně volnosti  $f$ , na základě kterých je z výše znázorněné tabulky volen koeficient rozšíření  $k$ , jsou vypočteny následujícím vztahem

$$f = (r \cdot m) - 1, \quad 4.2-4$$

kde  $r$  je počet referenčních součástí a  $m$  je počet opakovaných měření.

Kombinovanou standardní nejistotu měřicího systému  $u_{MS}$  lze určit dvěma způsoby.

První způsob určení hodnoty kombinované standardní nejistoty lze použít v případě známých hodnot všech vystupujících největších dovolených chyb  $MPE$  (Maximum Permissible Error) přístroje/přístrojů.

V takovém případě je koeficient  $u_{MS}$  určen z následujícího vzorce:

$$u_{MS} = u_{MPE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{MPE_i^2}{3} \right)}, \quad 4.2-5$$

kde  $n$  je počet naměřených hodnot a  $MPE_i$  je největší dovolená chyba  $i$ -tého přístroje.

V případě, že hodnoty  $MPE$  měřicího systému nejsou známy, nebo existuje důvod tyto údaje považovat za nespolehlivé, je koeficient  $u_{MS}$  vypočítán z následujícího vzorce

$$u_{MS} = \sqrt{u_{CAL}^2 + \max(u_{EVR}^2, u_{RE}^2) + u_{BI}^2 + u_{LIN}^2 + u_{MS.REST}^2}, \quad 4.2-6$$

kde  $u_{CAL}$  je nejistota kalibrace etalonu (vzorec 4.2-7),  $u_{EVR}$  je nejistota opakovatelnosti na etalonu (vzorec 4.2-8),  $u_{RE}$  je nejistota rozlišení indikace (vzorec 4.2-9),  $u_{BI}$  je nejistota systematické odchylky (vzorec 4.2-9),  $u_{LIN}$  je nejistota vlivu odchylek linearity v rozsahu použití (vzorec 4.2-11) a  $u_{MS.REST}$  jsou nejistoty dalších faktorů ovlivňující systém měření.

Nejistota kalibrace etalonu  $u_{CAL}$  je vypočítána za pomoci jednoho z následujících vzorců, a to v závislosti na parametrech uvedených v kalibračním protokolu (buď je zadána rozšířená nejistota  $U_{CAL}$ , nebo je zadána referenční hodnota s intervalem s mezní hodnotou  $\pm a$ )

$$u_{CAL} = \frac{U_{CAL}}{k} \quad \text{nebo} \quad u_{CAL} = \frac{a}{\sqrt{3}}, \quad 4.2-7$$

kde  $k$  je koeficientem rozšíření převzatým z kalibračních podkladů.

Nejistota opakovatelnosti na etalonu  $u_{EVR}$  je vypočítána za pomoci vzorce pro směrodatnou odchylku opakovaných měření

$$u_{EVR} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad 4.2-8$$

kde  $n$  je počet naměřených hodnot,  $x_i$  je  $i$ -tá naměřená hodnota v sérii a  $\bar{x}$  je aritmetickým průměrem všech naměřených hodnot daného opakovaného měření.

Nejistota rozlišení indikace  $u_{RE}$  je přímo závislé na  $RE$  (rozlišení indikace), a je vypočítáno z následujícího vztahu:

$$u_{RE} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{RE}{2}. \quad 4.2-9$$

Nejistota systematické odchylky měření  $u_{BI}$  je vypočítána z následujícího vztahu

$$u_{BI} = \frac{BI}{\sqrt{3}} = \frac{|\bar{x} - REF|}{\sqrt{3}}, \quad 4.2-10$$

kde  $BI$  je systematická odchylka měření (také známá jako bias),  $\bar{x}$  je aritmetickým průměrem všech naměřených hodnot daného opakovaného měření a  $REF$  je referenční hodnotou měřeného prvku (nutno měřit alespoň o řád přesnějším strojem, než je stroj zkoumaný na vhodnost, je-li možno).

Nejistota vlivu odchylek linearity v rozsahu použití  $u_{LIN}$  je vypočítána jedním z následujících tří vzorců, a to v závislosti na poskytnutých parametrech (buď je k dispozici informace o  $U_{LIN}$ , nebo je k dispozici informace o standardní směrodatné odchylce  $s_{LIN}$  (vzorec 4.1-3), nebo je odchylka linearity definována jako maximální hodnota, a tedy  $\pm a$ )

$$u_{LIN} = \frac{U_{LIN}}{k} \quad \text{nebo} \quad u_{LIN} = s_{LIN} \quad \text{nebo} \quad u_{LIN} = \frac{a}{\sqrt{3}}, \quad 4.2-11$$

kde  $k$  je tabulkovým koeficientem rozšíření dle *Tabulka 3*.

Aby byl měřicí systém vyhodnocen pro danou aplikaci jako vhodný, musí pro hodnotu indexu vhodnosti měřicího systému platit následující vztah

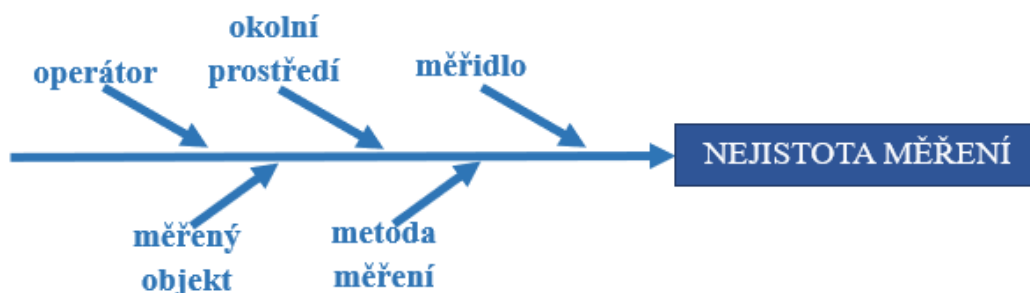
$$Q_{MS} \leq Q_{MS,max}, \quad 4.2-12$$

kde  $Q_{MS,max}$  odpovídá navržené limitní hodnotě indexu vhodnosti měřicího systému.

Metodika VDA 5 pak doporučuje limitní hodnotu  $Q_{MS,max} = 15\%$ . [24]

### Index vhodnosti měřicího procesu $Q_{MP}$

Tento index zahrnuje informace o vhodnosti celého měřicího procesu, tedy kombinace měřicího systému, operátora, okolního prostředí a měřeného objektu.



Obr. 25: Diagram znázorňující uvažované veličiny vstupující do vyhodnocování vhodnosti měřicího procesu [24]

Hodnota tohoto indexu je udávána v procentech a je vypočítána dle následujícího vztahu

$$Q_{MP} = \frac{2 \cdot U_{MP}}{TOL} \cdot 100, \quad 4.2-13$$

kde  $U_{MP}$  je rozšířená nejistota měřicího procesu (vzorec 4.2-13) a  $TOL$  je šířka tolerančního pole měřeného prvku (vzorec 4.1-2).

Rozšířená nejistota měřicího procesu  $U_{MP}$  je vypočítána za pomoci následujícího vzorce

$$U_{MP} = k \cdot u_{MP}, \quad 4.2-14$$

kde  $u_{MP}$  je kombinovaná standardní nejistota měřicího systému (vzorec 4.2-15 nebo vzorec 4.2-16) a  $k$  je tabulková hodnota koeficientu rozšíření pro pravděpodobnost pokrytí 95,45 % v závislosti na stupních volnosti (vzorec 4.2-4) dle *Tabulka 3*.

Kombinovanou standardní nejistotu měřicího procesu  $u_{MP}$  lze určit následujícími dvěma způsoby.

První způsob určení hodnoty kombinované standardní nejistoty měřicího procesu lze použít, pokud bylo k určení kombinované standardní nejistoty měřicího systému  $u_{MS}$  použito výhradně jedno či více MPE (vzorec 4.2-4). V takovém případě je pro výpočet použit následující vzorec

$$u_{MP} = \sqrt{u_{MS}^2 + u_{AV}^2 + u_{GV}^2 + u_{STAB}^2 + u_{OBJ}^2 + u_T^2 + u_{MP.REST}^2 + \sum_i u_{IA,i}^2}, \quad 4.2-15$$

kde  $u_{AV}$  je nejistota srovnatelnosti operátorů,  $u_{GV}$  je nejistota srovnatelnosti systémů měření,  $u_{STAB}$  je nejistota krátkodobé stability procesu měření,  $u_{OBJ}$  je nejistota způsobená nehomogenitou měřeného objektu,  $u_T$  je nejistota vlivu teploty,  $u_{MS.REST}$  jsou nejistoty dalších faktorů ovlivňujících proces měření a  $u_{IA,i}$  jsou nejistoty interakcí mezi ovlivňujícími faktory.

Nejistota srovnatelnosti operátorů  $u_{AV}$ , nejistota srovnatelnosti systémů měření  $u_{GV}$ , nejistoty interakcí mezi ovlivňujícími faktory  $u_{IA,i}$  se vypočítají za použití analýzy rozptylu daných veličin metodou ANOVA v rámci pokusu na procesu zkoušení (experiment MP).

Nejistota krátkodobé stability procesu měření  $u_{AV}$  se určuje na základě jednoho ze tří testů, výběr testu odpovídá očekávané časové změně naměřených hodnot. Varianty možných testů jsou test součástí v několika časových bodech se stanovením nejistot měření, upravená zkouška experimentu MP (modifikace pokusu pro získání  $u_{AV}$ , ale operátor je jen jeden a měří v různých časových bodech) a test „D-optimální testovací plán“.

Nejistota způsobená nehomogenitou měřeného objektu  $u_{OBJ}$  je určena buď jako nejistota typu B (určena na základě zkušenosti autora), nebo jako nejistota typu A (určena statisticky na základě provedených měření).

Nejistota vlivu teploty  $u_T$  se určuje dle normy či předpisu zvolené autorem experientu, který na základě konkrétní aplikace musí vybrat metodu nejvíce vyhovující měřicí metodice. Mezi běžně volené normy a předpisy patří kupříkladu DIN EN ISO 14253-2 či ISO/IEC Guide 98-3 (příloha H).

V případě, že byla kombinovaná standardní nejistota měřicího systému  $u_{MS}$  vypočítána bez použití znalosti  $MPE$  (vzorec 4.2-5), je pak kombinovaná standardní nejistota měřicího systému  $u_{MP}$  počítána z následujícího vzorce

$$u_{MP} = \sqrt{u_{CAL}^2 + \max(u_{EVR}^2, u_{RE}^2, u_{EVO}^2) + u_{BI}^2 + u_{LIN}^2 + u_{MS.REST}^2 + u_{AV}^2 + u_{GV}^2 + u_{STAB}^2 + u_{OBJ}^2 + u_T^2 + u_{MP.REST}^2 + \sum_i u_{IA,i}^2}, \quad 4.2-16$$

kde  $u_{CAL}$  je nejistota kalibrace etalonu (vzorec 4.2-6),  $u_{EVR}$  je nejistota opakovatelnosti na etalonu (vzorec 4.2-7),  $u_{RE}$  je nejistota rozlišení indikace (vzorec 4.2-8),  $u_{EVO}$  je nejistota opakovatelnosti na měřeném objektu,  $u_{BI}$  je nejistota vlivu systematické odchylky (vzorec 4.2-9),  $u_{LIN}$  je nejistota vlivu odchylek linearity v rozsahu použití (vzorec 4.2-11),  $u_{MS.REST}$  jsou nejistoty dalších faktorů ovlivňujících systém měření,  $u_{AV}$  je nejistota srovnatelnosti operátorů,  $u_{GV}$  je nejistota srovnatelnosti systémů měření,  $u_{STAB}$  je nejistota krátkodobé stability procesu měření,  $u_{OBJ}$  je nejistota způsobená nehomogenitou měřeného objektu,  $u_T$  je nejistota vlivu teploty,  $u_{MP.REST}$  jsou nejistoty dalších faktorů ovlivňujících proces měření a  $u_{IA,i}$  jsou nejistoty interakcí mezi ovlivňujícími faktory.

Nejistota opakovatelnosti na měřeném objektu  $u_{EVO}$  se vypočítá za použití analýzy rozptylu daných veličin metodou ANOVA v rámci pokusu na procesu zkoušení (experiment MP).

Aby byl měřicí proces vyhodnocen pro danou aplikaci jako vhodný, musí pro hodnotu indexu vhodnosti měřicího procesu platit následující vztah

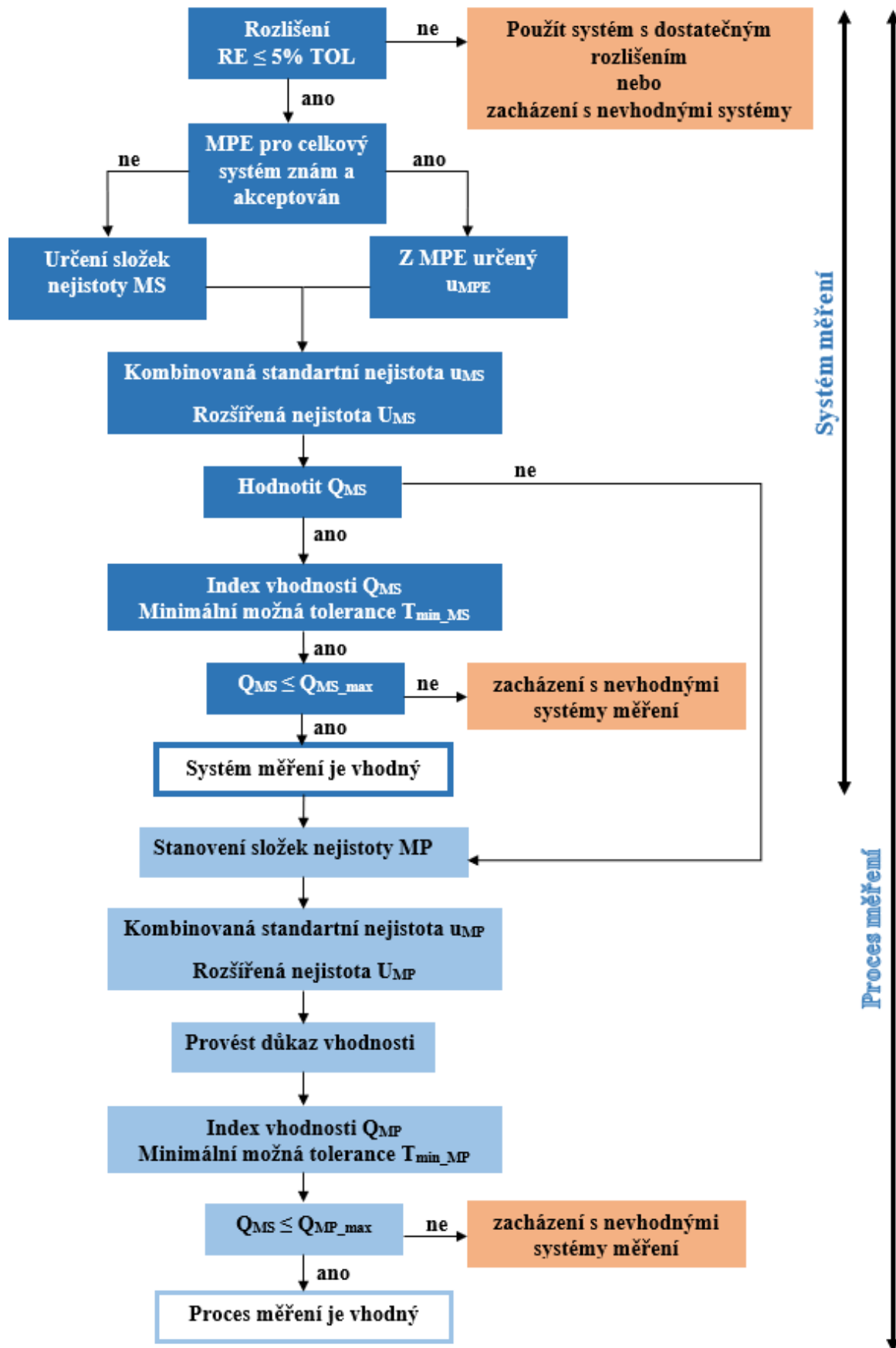
$$Q_{MP} \leq Q_{MP,max}, \quad 4.2-17$$

kde  $Q_{MP,max}$  odpovídá navržené limitní hodnotě indexu vhodnosti měřicího systému.

Metodika VDA 5 pak doporučuje limitní hodnotu  $Q_{MP,max} = 30\%$ .

[24]

### 4.2.3 Schéma postupu vyhodnocování vhodnosti dle VDA 5



Obr. 26: Schématický postup vyhodnocování vhodnosti systémů a procesů měření [24]



Ve výše uvedeném obrázku (*Obr. 26*) je graficky znázorněn schématický postup posuzování a vyhodnocování vhodnosti systémů a procesů měření a zkoušení dle VDA 5. Tento postup spočívá v postupném vyhodnocování indexů vhodnosti měřicího systému a měřicího procesu dle vztahů vypsanych v sekci 4.2.2 *Indexy vhodnosti dle VDA 5*. Výstup této analýzy je pak v rámci managementu procesu zkoušení a hodnocení průběhu vhodnosti dále zpracováván do formy protokolu o zkoušce/shodě, popřípadě protokolu o rozšíření pásma shody zohledněné dle ISO 14253.

[24]

## 5 Analýza současného stavu

V rámci analýzy současného stavu byla zkoumána vhodnost a způsobilost v současné době ve Škoda Auto používaného měřicího systému a procesu pro měření ocelových ojnic (Obr. 27) v rámci výroby komponentů.

Tato vhodnost byla přezkoumána nejdříve dle stávající metodiky vyhodnocování vhodnosti na základě metodiky AIAG MSA a dále dle metodiky vyhodnocování vhodnosti uvedené v příručce VDA 5.



Obr. 27: Fotografie zkoumané ojnice A

Pro zajištění dostatečné reprezentativnosti vzorku zkoumaných ojnic byly pro účely experimentu vybrány přímo z výroby ojnice stejného typu vyrobené na různých strojích a v různých upínačích.

Z důvodu dodržení smlouvy o mlčenlivosti, kterou jsem s firmou Škoda Auto a.s. uzavřela, byla pro účely této bakalářské práce naměřená data anonymizována do podoby charX (kdy X je číslo zkoumané charakteristiky).

## 5.1 Použité stroje a podmínky

### 5.1.1 Měření referenčních hodnot ojníc



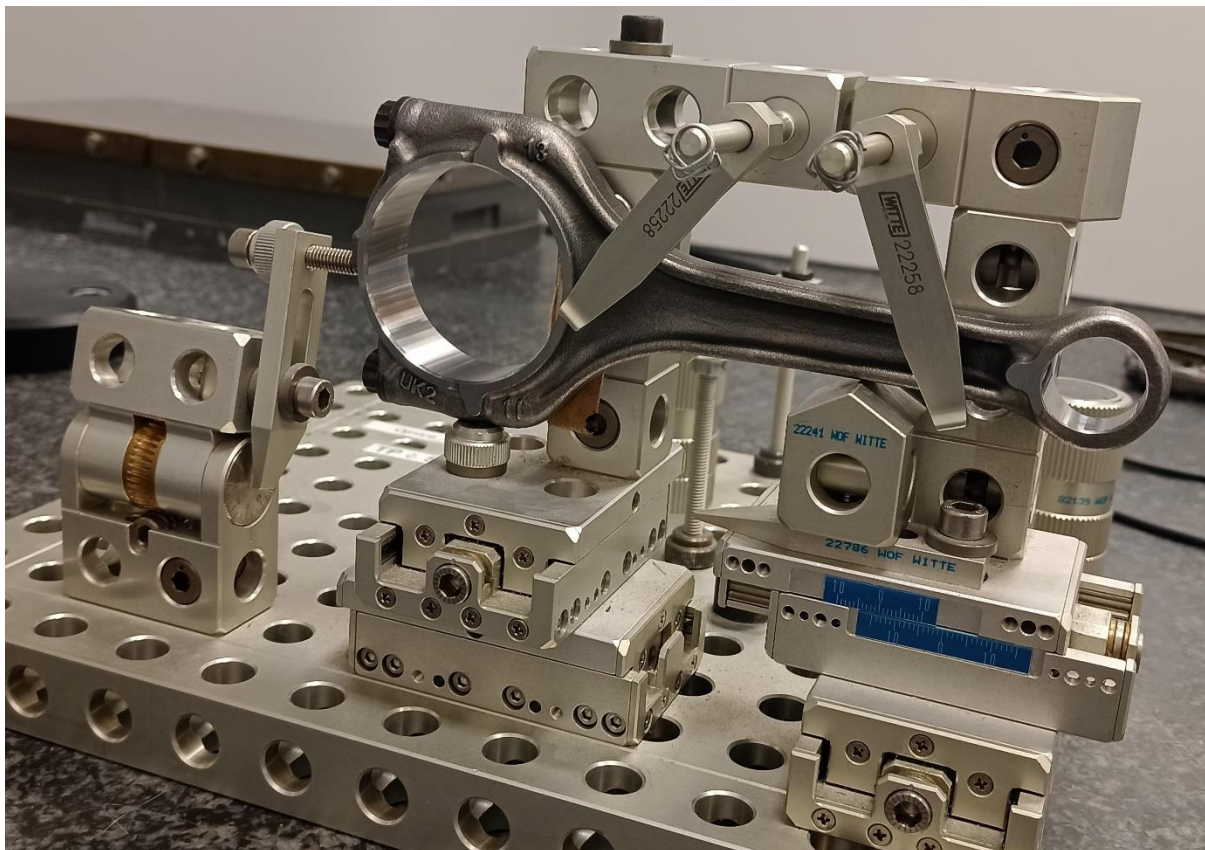
Obr. 28: Portálový měřicí stroj ZEISS PRISMO ultra [25]

Toto měření probíhalo na ZEISS PRISMO ultra (Obr. 28), portálovém dotykovém souřadnicovém měřicím stroji s pohyblivým portálem, pracovním prostorem 900/1300/700 mm, rozlišením indikace  $RE = 0,0001$  mm a s maximální povolenou chybou délky  $E_{0,MPE} = (0,5+L/500)$   $\mu\text{m}$ , tedy základní chyba stroje činí  $0,5$   $\mu\text{m}$  a na každý půl metr délky narůstá chyba o  $1$   $\mu\text{m}$ .



Obr. 29: Fotografie použité sondy: dřík 22 mm s kuličkou  $\varnothing 3$  mm (nalevo) a dřík 55 mm s kuličkou  $\varnothing 4$  mm (napravo)

V rámci měření referencí byla použita kombinace aktivní snímací hlavy a hvězdicovité sondy se dvěma protilehlými horizontálními rameny a rovnými dříky (délky 22 mm a 55 mm) zakončené rubínovými kuličkami o průměrech 3 mm a 4 mm (Obr. 29). Ojnice byly v měřicím prostoru upevněny na přípravku modulárního typu WITTE Alufix (Obr. 30).



Obr. 30: Fotografie upevnění ojnice v modulárním přípravku WITTE Alufix

Celkem bylo naměřeno pět kusů ojnic, jedním operátorem, každý kus přeměřen pětkrát v automatické smyčce spuštěného auditového programu (měření hotových ojnic v maximálním možném rozsahu dle finální dokumentace) v SW Calypso 7.6.0805. Měřeno bylo bez vyjímání dílu mezi jednotlivými náměry, aby byl minimalizován vliv nejistoty operátora. Na každé ojnici bylo měřeno 22 charakteristik.

V průběhu měření byly senzorem upevněným na CMM stroji ZEISS PRISMO ultra zaznamenávány teploty měřicího prostředí, které se během měření pohybovaly v rozmezí  $21,25 \pm 0,05^\circ\text{C}$ . Na stroji byla během měření použita teplotní kompenzace. Bylo předpokládáno, že nejistoty měření způsobené vzdušnou vlhkostí a atmosférickým tlakem budou ve srovnání s nejistotou měření způsobenou teplotou zanedbatelné, a jejich změny v průběhu měření tudíž nebyly sledovány. Na počátku měření činila hodnota relativní vzdušné vlhkosti 55,6%.

## 5.1.2 Měření ojníc



Obr. 31: Portálový měřicí stroj ZEISS PRISMO navigator [26]

Toto měření probíhalo na ZEISS PRISMO navigator, dotykovém souřadnicovém měřicím stroji s pohyblivým portálem, který má maximální povolenou chybu délky  $E_{0,MPE} = (0,9+L/350) \mu\text{m}$ , rozlišení indikace  $RE = 0,0001 \text{ mm}$  a pracovní prostor 900/1800/700 mm. Pro měření všech dílů byla použita aktivní skenovací hlava a hvězdicová sonda totožná s tou, která byla použita při měření referenčních hodnot (Obr. 29). Ojnice byly v měřicím prostoru opět upevněny na přípravku modulárního typu WITTE Alufix, a to stejným, jako při měření referenčních hodnot (Obr. 30).

V průběhu měření byly senzorem upevněným na CMM PRISMO navigator zaznamenávány teploty měřicího prostředí, které se pohybovaly v rozmezí  $21,6^{\circ}\text{C} \pm 0,1^{\circ}\text{C}$  (tato teplota bude používána pro výpočet nejistoty způsobené teplotou). Opět bylo předpokládáno, že nejistoty měření způsobené vzdušnou vlhkostí a atmosférickým tlakem budou ve srovnání s nejistotou měření způsobenou teplotou zanedbatelné. Jejich změny v průběhu měření tudíž nebyly sledovány. Na počátku měření činila hodnota relativní vzdušné vlhkosti 59,9%.

Pro měření dat k vyhodnocení způsobilosti a vhodnosti měřicího systému byla ojnice A měřena desetkrát v automatické smyčce auditového programu spuštěného v SW Calypso 7.6.0805 bez vyjímání a následného upínání dílu mezi jednotlivými náměry, aby byl eliminován vliv operátora. Tento počet opakovaných měření byl zvolen na základě doporučeného minimálního počtu měření zmíněného v sekci 4.1.1 Postup 1.

Pro měření dat k vyhodnocení způsobilosti a vhodnosti měřicího procesu bylo změřeno všech pět ojníc (A až E), dvěma operátory, po pěti náměrech na kus a operátora. Mezi jednotlivými náměry byla ojnice vyjmuta z přípravku a pak upevněna zpět, aby se projevil vliv operátorů. Tyto počty opakovaných měření, operátorů a kusů byly zvoleny na základě vzorce 4.1-8.

## 5.2 Zpracování referenčních hodnot

Referenční hodnoty jednotlivých charakteristik byly spočítány jako aritmetické průměry naměřených hodnot daného rozměru u každé ojnice.

Referenční hodnoty jednotlivých charakteristik (v mm) vypočítané na základě měření jsou pak uvedeny v následující tabulce (*Tabulka 4*):

*Tabulka 4: Tabulka referenčních hodnot charakteristik z měření na ZEISS PRISMO ultra*

char.	Ojnice A	Ojnice B	Ojnice C	Ojnice D	Ojnice E
char 1	50,6052	50,6075	50,6078	50,6072	50,6085
char 2	50,6077	50,6095	50,6083	50,6109	50,6090
char 3	0,0021	0,0022	0,0020	0,0021	0,0018
char 4	50,6050	50,6046	50,6047	50,6043	50,6053
char 5	50,6073	50,6076	50,6066	50,6067	50,6055
char 6	0,0038	0,0055	0,0047	0,0040	0,0042
char 7	0,0080	0,0107	0,0086	0,0081	0,0098
char 8	0,0011	0,0016	0,0015	0,0013	0,0013
char 9	0,0047	0,0040	0,0041	0,0056	0,0042
char 10	0,0091	0,0060	0,0103	0,0081	0,0099
char 11	19,9670	19,9707	19,9661	19,9645	19,9654
char 12	0,0139	0,0282	0,0347	0,0230	0,0500
char 13	0,0019	0,0149	0,0015	0,0203	0,0106
char 14	0,0195	0,0198	0,0208	0,0209	0,0090
char 15	-140,0098	-140,0099	-140,0104	-140,0104	-140,0045
char 16	19,0104	19,0104	19,0098	19,0106	19,0115
char 17	0,0116	0,0117	0,0117	0,0116	0,0116
char 18	19,0098	19,0099	19,0095	19,0094	19,0110
char 19	0,0114	0,0118	0,0117	0,0119	0,0121
char 20	0,0027	0,0027	0,0021	0,0027	0,0032
char 21	0,0027	0,0027	0,0021	0,0027	0,0032
char 22	0,0027	0,0027	0,0021	0,0027	0,0032

Tyto hodnoty jsou dále použity pro výpočty způsobilosti a vhodnosti v podkapitolách 5.3 *Zpracování dat dle MSA* a 5.4 *Zpracování dat dle VDA 5*.



## 5.3 Zpracování dat dle MSA

### 5.3.1 Vyhodnocení způsobilosti systému měření dle stávající metodiky

Pro účely zkoumání způsobilosti systému měření byla desetkrát opakovaně měřena ojnice A bez vlivu operátora na měřicím stroji ZEISS PRISMO navigator (detailněji popsáno v sekci 5.1.2 *Měření ojnic*).

Pro vyhodnocení dle současné metodiky založené na MSA byly použity referenční hodnoty ojnice A z *Tabulka 4* a z naměřených dat byly na základě vztahů ze sekce 4.1.1 *Postup 1* vypočítány následující hodnoty  $TOL$  (vzorec 4.1-2),  $\bar{x}$ ,  $s$  (vzorec 4.1-3),  $c_g$  (vzorec 4.1-1) a  $c_{gk}$  (vzorec 4.1-5):

*Tabulka 5: Tabulka vyhodnocení způsobilosti měřicího systému dle současné metodiky*

char.	REF [mm]	TOL [mm]	$\bar{x}$ [mm]	s [mm]	$c_g$ [-]	$c_{gk}$ [-]
char1	50,6052	0,012	50,6060	0,00004	9,604	2,935
char2	50,6077	0,012	50,6077	0,00005	8,441	8,120
char3	0,0021	0,005	0,0019	0,00001	20,084	14,426
char4	50,6050	0,012	50,6056	0,00006	6,393	3,228
char5	50,6073	0,012	50,6071	0,00005	7,979	7,121
char6	0,0038	0,005	0,0036	0,00001	13,214	8,636
char7	0,0080	0,025	0,0079	0,00003	25,027	24,778
char8	0,0011	0,005	0,0012	0,00002	7,545	5,284
char9	0,0047	0,008	0,0047	0,00007	4,017	3,915
char10	0,0091	0,040	0,0086	0,00005	24,947	21,972
char11	19,9670	0,050	19,9663	0,00015	11,440	9,816
char12	0,0139	0,075	0,0149	0,00066	3,774	3,268
char13	0,0019	0,200	0,0027	0,00086	7,778	7,487
char14	0,0195	0,040	0,0204	0,00025	5,317	4,268
char15	-140,0098	0,040	-140,0102	0,00013	10,634	9,585
char16	19,0104	0,020	19,0103	0,00003	23,306	21,997
char17	0,0116	0,010	0,0127	0,00004	8,964	-0,792
char18	19,0098	0,020	19,0104	0,00001	46,173	34,044
char19	0,0114	0,010	0,0113	0,00004	8,477	7,785
char20	0,0027	0,004	0,0030	0,00002	8,101	2,705
char21	0,0027	0,004	0,0030	0,00002	8,101	2,705
char22	0,0027	0,004	0,0030	0,00002	8,101	2,705

Ve výše znázorněné tabulce (*Tabulka 5*) jsou zelenou barvou znázorněny pole s vyhovujícími (kritickými) koeficienty způsobilosti měřidla ZEISS PRISMO navigator a červeně nevyhovující koeficienty pro měření jednotlivých charakteristik zkoumané ojnice.

Z této tabulky je patrné, že pro všechny zkoumané charakteristiky je koeficient způsobilosti měřidla  $c_g$  vyhovující (dle vzorce 4.1-4). Kdyby byla tedy způsobilost vyhodnocována pouze na základě tohoto koeficientu, byl by měřicí systém způsobilý.

Kritický koeficient způsobilosti měřidla  $c_{gk}$  je také vyhovující (dle vzorce 4.1-6), až na výjimku charakteristiky č. 17, ta v momentě, kdy je přihlédnuto ke strannosti měření, není vyhovující. Systém tedy pro všechny charakteristiky, které je třeba vyhodnotit, není způsobilý.

V případě nevyhovujícího systému měření je možné přezkoumat kritičnost nevyhovující charakteristiky. V případě nízké kritičnosti je pak dále možné snížit hranici pro vyhodnocení tak, aby systém vyhovoval. Další z možností řešení této situace je zvolení jiného měřicího systému (z metrologického hlediska lepší řešení), popřípadě diskuze s konstruktéry o tom, zda nelze toleranční pole rozvolnit, aniž by došlo k narušení funkce (z ekonomického hlediska lepší řešení).

Zároveň je třeba dodat, že na oddělení výroby komponentů je pro určité díly výpočet  $c_g$  upraven za účelem rozšíření pole způsobilosti, a to tak, že ve vzorci 4.1-1 není děleno šesti směrodatnými odchylkami, nýbrž pouze čtyřmi. Analogická změna je také provedena pro výpočet  $c_{gk}$ , kdy je po této úpravě každá z částí dělena pouze dvěma směrodatnými odchylkami a ne třemi. Upravené vztahy pak vypadají následovně

$$c_g = \frac{0,2 \cdot TOL}{4 \cdot s}, \quad 5.3-1$$

$$c_{gk} = \min \left( \frac{\bar{x} - (REF - 0,1 \cdot TOL)}{2 \cdot s}, \frac{(REF + 0,1 \cdot TOL) - \bar{x}}{2 \cdot s} \right). \quad 5.3-2$$

Výše uvedená vyhodnocení vhodnosti měřicího systému by dle těchto upravených vzorců vypadala následovně

Tabulka 6: Tabulka vyhodnocení způsobilosti měřicího systému dle současné metodiky s rozšířeným polem způsobilosti

char.	REF [mm]	TOL [mm]	$\bar{x}$ [mm]	s [mm]	$c_g$ [-]	$c_{gk}$ [-]
char1	50,6052	0,012	50,6060	0,00004	14,405	4,403
char2	50,6077	0,012	50,6077	0,00005	12,662	12,180
char3	0,0021	0,005	0,0019	0,00001	30,125	21,638
char4	50,6050	0,012	50,6056	0,00006	9,589	4,842
char5	50,6073	0,012	50,6071	0,00005	11,968	10,681
char6	0,0038	0,005	0,0036	0,00001	19,821	12,954
char7	0,0080	0,025	0,0079	0,00003	37,541	37,168
char8	0,0011	0,005	0,0012	0,00002	11,318	7,925
char9	0,0047	0,008	0,0047	0,00007	6,026	5,873
char10	0,0091	0,040	0,0086	0,00005	37,423	32,958
char11	19,9670	0,050	19,9663	0,00015	17,160	14,724
char12	0,0139	0,075	0,0149	0,00066	5,660	4,902
char13	0,0019	0,200	0,0027	0,00086	11,666	11,230
char14	0,0195	0,040	0,0204	0,00025	7,975	6,402
char15	-140,0098	0,040	-140,0102	0,00013	15,951	14,377
char16	19,0104	0,020	19,0103	0,00003	34,960	32,996
char17	0,0116	0,010	0,0127	0,00004	13,446	-1,187
char18	19,0098	0,020	19,0104	0,00001	69,260	51,066
char19	0,0114	0,010	0,0113	0,00004	12,715	11,677
char20	0,0027	0,004	0,0030	0,00002	12,151	4,058
char21	0,0027	0,004	0,0030	0,00002	12,151	4,058
char22	0,0027	0,004	0,0030	0,00002	12,151	4,058

Z výše uvedené tabulky je patrné, že problém nevyhovujícího kritického koeficientu způsobilosti charakteristiky 17 se ale použitím této upravené varianty výpočetního vztahu neodstraní, neboť problémem je vysoká strannost (bias), takže rozšíření pole způsobilosti, popřípadě snížení průchozí hranice kritického  $c_g/c_{gk}$ , nepomůže k získání vyhovujícího výsledku.

Je tedy třeba zvolit jiný systém měření, nebo prodiskutovat situaci s konstruktérem.



### 5.3.2 Vyhodnocení způsobilosti procesu měření dle stávající metodiky

Pro účely zkoumání způsobilosti procesu měření byly zkoumané ojnice opakovaně měřeny dvěma operátory (Postup 2), přičemž byla měřená ojnice opakovaně vyjímána a opět upevňována do přípravku (detaily v sekci 5.1.2 *Měření ojnice*).

Vzhledem k tomu, že nevyhovuje již systém měření, nemá dle pravidel metodiky MSA smysl vyhodnocovat proces měření, neboť bude zaručeně také nevyhovující. V rámci této práce je ale zkoumán existující proces celkově, takže předstírejme, že problém způsobilosti systému pro měření charakteristiky 17 byl vyřešen jedním z výše navržených způsobů, a způsobilost měřicího procesu je tedy zkoumána pro všechny pozorované charakteristiky.

Za pomoci softwaru Minitab 16 byly statistickou metodou Gage R&R Study (Crossed) - ANOVA Method (zvolena z důvodu vyšší přesnosti než metoda ARM) vyhodnoceny následující parametry dle metodiky na základě AIAG MSA:

Tabulka 7: Tabulka vyhodnocení způsobilosti měřicího procesu dle současné metodiky

charakteristika	TOL [mm]	EV [%]	AV [%]	INT [%]	PV [%]	ndc	%GR&R
char1	0,012	23,47	4,03	0	97,12	5	13,18
char2	0,012	4,61	5,62	9,64	99,29	11	7,07
char3	0,005	100	0	0	0	1	210,02
char4	0,012	31,97	3,53	32,7	88,86	2	7,4
char5	0,012	31,51	5,3	0	94,76	4	13,99
char6	0,005	65,75	0	0	75,35	1	60,85
char7	0,025	5,83	0	6,73	99,6	15	2,36
char8	0,005	54,33	0	0	83,96	2	12,45
char9	0,008	29,52	0	25,81	91,99	3	18,96
char10	0,040	10,47	5,17	0	99,32	11	3,25
char11	0,050	9,06	11,57	7,71	98,61	8	4,85
char12	0,075	11,3	36,03	13,87	91,55	3	58,54
char13	0,200	49,05	13,55	86,09	0	1	27,74
char14	0,040	5,33	0	12,56	99,06	10	11,06
char15	0,040	5,33	0	12,56	99,06	10	5,53
char16	0,020	56,91	9,94	0	81,62	1	16
char17	0,010	87,59	28,49	0	38,95	1	50,24
char18	0,020	43,99	0	0	89,8	2	8,57
char19	0,010	79,81	0	0	60,25	1	20,37
char20	0,004	52,29	0	0	85,24	2	28,46
char21	0,004	52,29	0	0	85,24	2	28,46
char22	0,004	52,29	0	0	85,24	2	28,46

kde  $TOL$  je šířkou tolerančního pole (vzorec 4.1-2);  $EV$ ,  $AV$ ,  $INT$  a  $PV$  jsou procentuální hodnoty jednotlivých variabilit (vzorce 4.1-30 až 4.1-33),  $\%GR\&R$  je procentuální hodnota reprodukovatelnosti a opakovatelnosti vztažená k tolerančnímu poli (vzorec 4.1-35) a  $ndc$  je počet odlišných kategorií (4.1-19).

Jako hodnota koeficientu pro odstranění vlivu interakce bylo zvoleno  $\alpha = 0,05$ , poněvadž se jedná o standardně používanou hodnotu v oblasti statistického vyhodnocování způsobilosti.

Protokol výpočtů a vygenerované grafy pro jednotlivé charakteristiky v programu Minitab 16 je k dispozici v *Příloha 1 - Grafické a číselné výstupy ze SW Minitab 16*.

Ve výše znázorněné tabulce (*Tabulka 7*) jsou zelenou barvou znázorněna pole s vyhovujícími hodnotami  $\%GR\&R$  a  $ndc$  pro proces měření jednotlivých charakteristik zkoumané ojnice. Oranžovou barvou jsou znázorněny podmíněně vyhovující výsledky dle podmínek uvedených v podkapitole 4.1 AIAG MSA 4. V poslední řadě jsou červenou barvou vyznačeny jednoznačně nevyhovující hodnoty.

Jako celkové vyhodnocení způsobilosti je pak bráno horší z hodnocení  $\%GR\&R$  a  $ndc$ , a to z důvodu, že v případě dostatečné  $ndc$  je výpovědní hodnota  $\%GR\&R$  dostačující a lze ji považovat za správnou, zatímco v opačném případě je experiment použit k vyhodnocení nedostačující (popř. podmíněně dostačující) a hodnota  $\%GR\&R$  tedy může být zavádějící a nelze se na jejím základě informovaně rozhodnout.

Po přehodnocení této tabulky dle výše zmíněných podmínek pak vyplývá, že pro 7 ze zkoumaných charakteristik je současný proces měření zaručeně nevyhovující, a to i dle současné metodiky. Pro dalších 10 charakteristik může být proces vyhovující, ale podléhá individuálnímu schválení.

## 5.4 Zpracování dat dle VDA 5

### 5.4.1 Vyhodnocení rozlišení indikace

Charakteristikami s nejužším tolerančním polem jsou char20, char21 a char22, které mají šířku tolerančního pole  $TOL = 0,004$  mm. Pokud bude rozlišení indikace dostatečné pro tuto širší tolerančního pole, bude vyhovovat i pro zbylé hodnoty.

Jak je již uvedeno v sekci 5.1.2 *Měření ojníc*, hodnota rozlišení indikace na použitém stroji je  $RE = 0,0001$  mm.

Dostatečná hodnota  $RE$ , je vyjádřena ve vzorci 4.2-1, do kterého bylo číselně dosazeno v následující rovnici

$$RE = 0,0001 \text{ mm} \leq 5\% TOL = 0,05 \cdot 0,004 \text{ mm} = 0,0002 \text{ mm} . \quad 5.4-1$$

Rozlišení indikace je tedy dle pravidel uvedených v příručce VDA 5 vhodné pro danou aplikaci.

### 5.4.2 Vyhodnocení vhodnosti systému měření dle metodiky VDA 5

Pro účely zkoumání vhodnosti systému měření byla použita totožná data jako v případě vyhodnocování dle MSA (viz 5.3.1 *Vyhodnocení způsobilosti systému měření dle stávající metodiky*).

Pro vyhodnocení byla použita metoda experimentu (vzorce 4.2-2; 4.2-3 a 4.2-6) a vyhodnocení proběhlo ve statistickém softwaru Yarovyn od společnosti DIRIBET s r.o. Výstup tohoto vyhodnocení je zanesen v následující tabulce:

Tabulka 8: Tabulka vyhodnocení vhodnosti měřicího systému dle VDA 5

char.	$u_{FVR}$ [mm]	$u_{BI}$ [mm]	$u_{MS,REST}$ [mm]	$Q_{MS}$ [%]
char1	~ 0,0001	0,0005	0,0001	16,548
char2	~ 0,0001	~ 0,0001	0,0001	4,285
char3	~ 0,0001	0,0001	0,0001	11,319
char4	0,0001	0,0003	0,0001	12,261
char5	0,0001	0,0001	0,0001	4,909
char6	~ 0,0001	0,0001	0,0001	12,280
char7	~ 0,0001	~ 0,0001	0,0001	1,945
char8	~ 0,0001	0,0001	0,0001	11,693
char9	0,0001	~ 0,0001	0,0001	6,777
char10	0,0001	0,0003	0,0001	3,042
char11	0,0002	0,0004	0,0001	3,622
char12	0,0007	0,0006	0,0001	4,881
char13	0,0010	0,0004	0,0001	2,016
char14	0,0003	0,0005	0,0001	5,393
char15	0,0001	0,0002	0,0001	2,873
char16	~ 0,0001	0,0001	0,0001	5,437
char17	~ 0,0001	0,0006	0,0001	25,603
char18	~ 0,0001	0,0003	0,0001	12,995
char19	~ 0,0001	~ 0,0001	0,0001	5,258
char20	~ 0,0001	0,0002	0,0001	19,290
char21	~ 0,0001	0,0002	0,0001	19,290
char22	~ 0,0001	0,0002	0,0001	19,290

Z výše uvedené tabulky je patrné, že jako vyhovující dle doporučené hranice vhodnosti  $Q_{MS\_max} = 15\%$  (viz sekce 4.2.2 *Indexy vhodnosti dle VDA 5*) lze vyhodnotit 17 z 22 zkoumaných charakteristik. Závěrem tedy je, že dle doporučených hranic indexu vhodnosti měřicího systému je tento systém pro zkoumání tohoto typu ojníc nevhodný.

Příručka VDA 5 ovšem umožňuje rozšířit pole vhodnosti dle uvážení uživatele. V případě, že by na základě rizikovosti charakteristik bylo rozhodnuto o rozvolnění požadavku na  $Q_{MS\_max} = 20\%$  (běžné rozšíření), nebo až  $Q_{MS\_max} = 25\%$ , stal by se měřicí systém vhodným pro zkoumání všech charakteristik, kromě charakteristiky 17, analogicky jako je tomu při vyhodnocení dle současné metodiky založené na MSA.

Protokol výpočtů provedených v programu Yarovyn je k dispozici v příloze *Příloha 2 - ANALÝZA NEJISTOT*.

Vzhledem k tomu, že by došlo k poměrně zásadnímu rozšíření pole vhodnosti od doporučené hranice, a přesto by nebyl systém vyhovující pro všechny zkoumané charakteristiky, vyplývá opět, že je třeba zvolit jiný systém měření, nebo prodiskutovat situaci s konstruktérem.

### 5.4.3 Vyhodnocení vhodnosti procesu měření dle metodiky VDA 5

Pro účely zkoumání vhodnosti systému měření byla použita totožná data jako v případě vyhodnocování dle stávající metodiky (viz 5.3.2 Vyhodnocení způsobilosti procesu měření dle stávající metodiky).

Vzhledem k tomu, že nevyhovuje již systém měření, nemá dle pravidel metodiky VDA 5 smysl vyhodnocovat proces měření, neboť bude zaručeně také nevyhovující. V rámci této práce je ale zkoumán existující proces celkově, takže - analogicky jako u vyhodnocení dle MSA - bude proces měření zkoumán nezávisle na výsledcích analýzy vhodnosti měřicího systému.

Pro vyhodnocení vhodnosti měřicího procesu byla použita metoda experimentu (vzorce 4.2-13; 4.2-14 a 4.2-16) a vyhodnocení proběhlo ve statistickém softwaru Yarovyn. Výstup tohoto vyhodnocení je zanesen v následující tabulce:

Tabulka 9: Tabulka vyhodnocení vhodnosti měřicího procesu dle VDA 5

char.	$u_{BI}$ [mm]	$u_{MS.REST}$ [mm]	$u_{EVO}$ [mm]	$u_{AV}$ [mm]	$u_T$ [mm]	$u_{IA}$ [mm]	$Q_{MP}$ [%]
char1	0,0005	0,0001	0,0003	0,0001	~ 0,0001	0	18,671
char2	~ 0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	~ 0,0001	0,0001	7,209
char3	0,0001	0,0001	0,0018	0	~ 0,0001	0	140,468
char4	0,0003	0,0001	0,0001	0,0001	~ 0,0001	0,0001	13,484
char5	0,0001	0,0001	0,0003	~ 0,0001	~ 0,0001	0	10,404
char6	0,0001	0,0001	0,0005	0	~ 0,0001	0	42,366
char7	~ 0,0001	0,0001	0,0001	~ 0,0001	~ 0,0001	0,0001	2,713
char8	0,0001	0,0001	0,0001	0	~ 0,0001	0	14,218
char9	~ 0,0001	0,0001	0,0002	0,0002	~ 0,0001	0,0002	16,207
char10	0,0003	0,0001	0,0002	0,0001	~ 0,0001	0	3,693
char11	0,0004	0,0001	0,0002	0,0003	~ 0,0001	0,0002	4,928
char12	0,0006	0,0001	0,0021	0,0070	~ 0,0001	0,0025	41,404
char13	0,0004	0,0001	0,0045	0,0081	~ 0,0001	0,0080	24,414
char14	0,0005	0,0001	0,0003	0,0007	~ 0,0001	0,0007	11,065
char15	0,0002	0,0001	0,0003	0,0004	~ 0,0001	0,0004	6,458
char16	0,0001	0,0001	0,0005	0,0001	~ 0,0001	0	21,993
char17	0,0006	0,0001	0,0008	0,0003	~ 0,0001	0	42,128
char18	0,0003	0,0001	0,0003	0	~ 0,0001	0	17,295
char19	~ 0,0001	0,0001	0,0003	0	~ 0,0001	0	14,467
char20	0,0002	0,0001	0,0002	0	~ 0,0001	0	27,000
char21	0,0002	0,0001	0,0002	0	~ 0,0001	0	27,000
char22	0,0002	0,0001	0,0002	0	~ 0,0001	0	27,000

Z tabulky je patrné, že jako vyhovující dle doporučené hranice vhodnosti  $Q_{MP\_max} = 30\%$  (viz sekce 4.2.2 *Indexy vhodnosti dle VDA 5*) lze vyhodnotit 10 z 22 zkoumaných charakteristik. Závěrem tedy je, že dle doporučených hranic indexu vhodnosti měřicího procesu je tento systém pro zkoumání tohoto typu ojníc nevhodný.

Nejistota způsobená vlivem teploty byla určena na základě DIN EN ISO 14253-2 a to pro teplotu 21,6°C.

Příručka VDA 5 umožňuje rozšířit pole vhodnosti dle uvážení uživatele. V případě, že by na základě rizikovosti charakteristik bylo rozhodnuto o rozvolnění požadavku kupříkladu na  $Q_{MP\_max} = 50\%$  stal by se měřicí proces vhodným pro zkoumání všech charakteristik, kromě charakteristiky 3, je tedy stále nevyhovující pro měření ojnice jako celku.

Protokol výpočtů pro jednotlivé charakteristiky v programu Yarovyn je k dispozici v příloze *Příloha 2 - ANALÝZA NEJISTOT*.

## 5.5 Porovnání výsledků dle MSA a VDA 5

### 5.5.1 Porovnání způsobilosti a vhodnosti měřicího systému

V následující tabulce je znázorněno porovnání způsobilosti a vhodnosti měřicího systému pro jednotlivé charakteristiky na základě doporučených hranic jednotlivých metodik. Jako koeficient způsobilosti metodiky založené na AIAG MSA je zvolen kritický koeficient způsobilosti měřidla.

*Tabulka 10: Tabulka porovnání vyhodnocení způsobilosti a vhodnosti měřicího systému dle současné metodiky a dle metodiky založené na VDA 5 dle metodikami doporučených hranic*

char.	$c_{gk}$ [-]	$Q_{MS}$ [%]
char1	2,935	16,548
char2	8,120	4,285
char3	14,426	11,319
char4	3,228	12,261
char5	7,121	4,909
char6	8,636	12,280
char7	24,778	1,945
char8	5,284	11,693
char9	3,915	6,777
char10	21,972	3,042
char11	9,816	3,622
char12	3,268	4,881
char13	7,487	2,016
char14	4,268	5,393
char15	9,585	2,873
char16	21,997	5,437
char17	-0,792	25,603
char18	34,044	12,995
char19	7,785	5,258
char20	2,705	19,290
char21	2,705	19,290
char22	2,705	19,290

Z tabulky je patrné, že vyhodnocování systému dle VDA 5 dle doporučených hranic je náročnější z hlediska požadavků na měřicí systém, neboť hodnoty vyhovující dle metodiky založené na MSA nemusí dostačovat požadavkům metodiky založené na VDA 5.

Je ke zvážení, zda je pro danou aplikaci vhodné metodiku na základě VDA 5 nasadit, či zda je stávající metodika na základě MSA dostačující.

Zároveň je třeba vzít v potaz možnost, že data vykazují bias z důvodu ne zcela vhodného prvotního upnutí operátorem před spuštěním měřicí smyčky. Toto mohlo do měření vnést chybu (více v sekci 5.5.3 *Nejčastější vlivy na způsobilost a vhodnost měřicího systému/procesu*).

Dle obou metodik je v současnosti používaný systém pro měření ojníc nevyhovující.

## 5.5.2 Porovnání způsobilosti a vhodnosti měřicího procesu

V následující tabulce je barevně znázorněno porovnání způsobilosti a vhodnosti měřicího procesu pro jednotlivé charakteristiky na základě doporučených hranic jednotlivých metodik. Zelenou barvou je vyhovující, žlutě podmíněně vyhovující a červeně nevyhovující proces pro danou charakteristiku. Jako koeficient způsobilosti metodiky založené na AIAG MSA je uvedena hodnota %GR&R a barevná škála zahrnuje jak způsobilost dle této hodnoty, tak způsobilost hodnoty  $ndc$  vycházející z vyhodnocených dat, a to tak, že je pole barevně vyznačeno dle horší způsobilosti z výše zmíněných. Obecně je předpokládáno schválení podmíněně vyhovujících hodnot %GR&R.

Tabulka 11: Tabulka porovnání vyhodnocení způsobilosti a vhodnosti měřicího procesu dle současné metodiky a dle metodiky založené na VDA 5 dle metodikami doporučených hranic

char.	%GR&R [%] ( $ndc$ ) [-]	$Q_{MP}$ [%]
char1	13,18 (5)	18,671
char2	7,07 (11)	7,209
char3	210,02 (1)	140,468
char4	7,40 (2)	13,484
char5	13,99 (4)	10,404
char6	60,85 (1)	42,366
char7	2,36 (15)	2,713
char8	12,45 (2)	14,218
char9	18,96 (3)	16,207
char10	3,25 (11)	3,693
char11	4,85 (8)	4,928
char12	58,54 (3)	41,404
char13	27,74 (1)	24,414
char14	11,06 (10)	11,065
char15	5,53 (10)	6,458
char16	16,00 (1)	21,993
char17	50,24 (1)	42,128
char18	8,57 (2)	17,295
char19	20,37 (1)	14,467
char20	28,46 (2)	27,000
char21	28,46 (2)	27,000
char22	28,46 (2)	27,000

Z tabulky je patrné, že vyhodnocování procesu dle VDA 5 (dle doporučených hranic) určuje jako vyhovující více charakteristik, než metoda vyhodnocení založená na MSA. Důvodem může být provedení experimentu, neboť v rámci této kvalifikační práce navržený a provedený experiment nejspíše nedisponoval dostatečným počtem a variabilitou náměrů, ač splnil požadavky metodikami na něj kladené, což vedlo k nízkým hodnotám  $ndc$  u některých charakteristik.

Nutno také dodat, že v rámci této práce provedený experiment měl relativně vysoký podíl vlivu interakce operátorů a dílů, protože měření pro účely experimentu nebyla randomizována z důvodu časových omezení obou operátorů a měřicí techniky. Je pravděpodobné, že výsledky randomizovaného experimentu by mohly být z hlediska způsobilosti a vhodnosti pro jednotlivé charakteristiky méně příznivé.

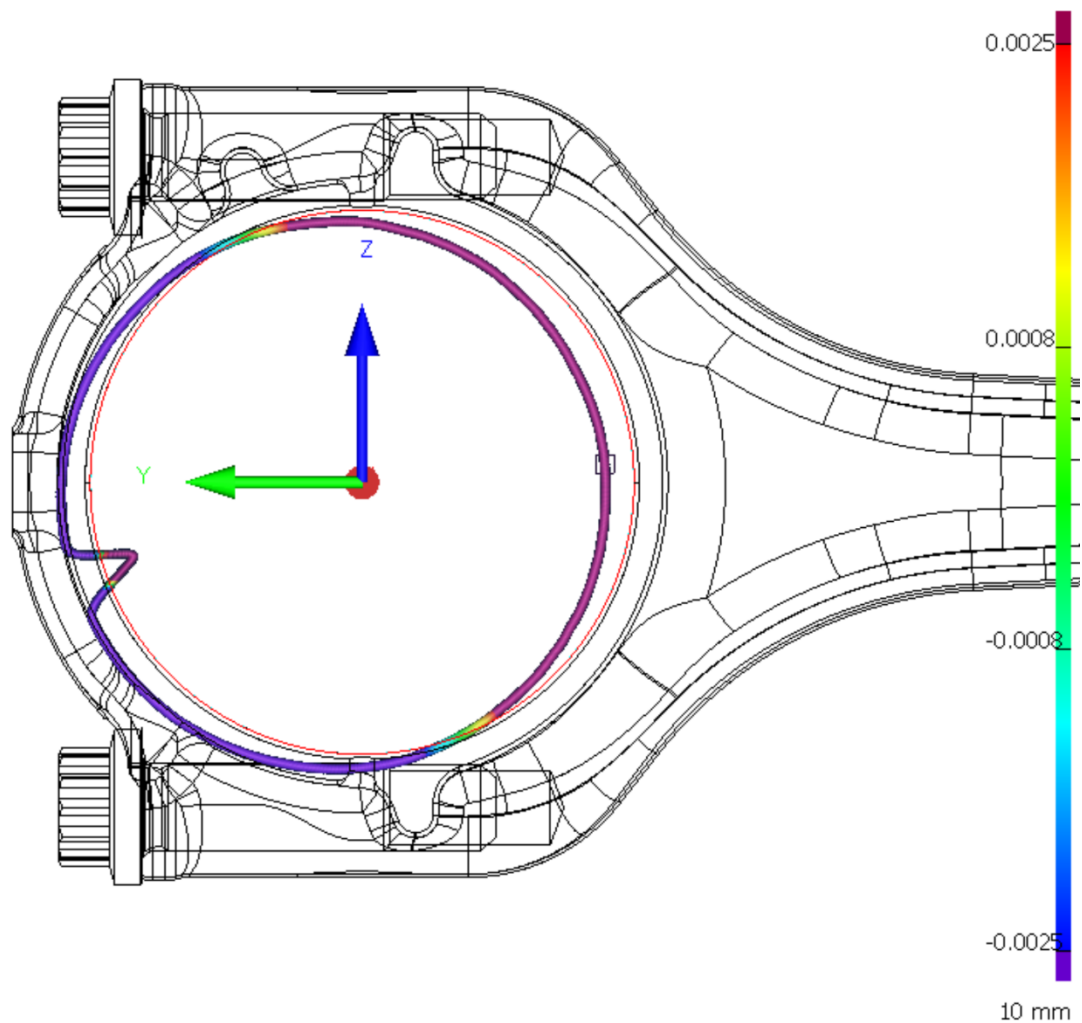
Dle obou výše uvedených metodik je v současnosti používaný proces pro měření ojníc nevyhovující, a to i v případě rozšíření pásma vhodnosti dle VDA 5 na  $Q_{MP\_max} = 50\%$  a schválení všech podmíněně vyhovujících hodnot %GR&R.

### 5.5.3 Nejčastější vlivy na způsobilost a vhodnost měřicího systému/procesu

V rámci experimentu na určení způsobilosti a vhodnosti systému a procesu měření byly identifikovány následující nejčastější zdroje chyb / nevyhovujících výsledků analýzy:

#### Nečistoty

Analýza měřicího programu v SW Calypso ukázala, že častým zdrojem odlehklých hodnot v rámci měření byly občasné nečistoty ulpívající na měřené součásti. Toto se výrazně projevilo kupříkladu na charakteristikách char3 a char6, které jsou obě charakteristikami kruhovitosti.



Obr. 32: Grafické znázornění vlivu nečistoty (vlevo dole) a kombinace vlivu nedostatečně tuhého upnutí a deformace způsobené přítlačnou silou na char3 v SW Calypso

Tento zdroj chybně naměřených bodů se projevuje ve variabilitě operátora, tedy až při vyhodnocování způsobilosti a vhodnosti měřicího systému. Pro částečnou eliminaci tohoto zdroje by mělo dojít k očištění dílu operátorem mezi jednotlivými náměry. Očištění operátory v rámci tohoto experimentu se ukázalo jako nedostatečné.



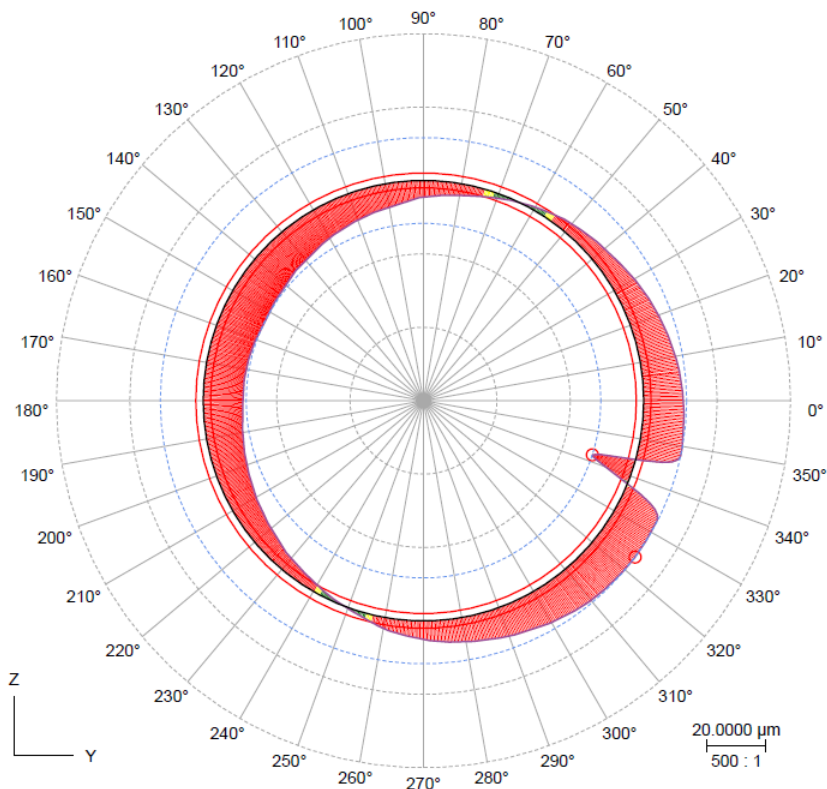
### Nevhodný přípravek

Upínací přípravek (*Obr. 30*) použitý pro měření zkoumaných ojníc auditovým programem funguje na principu opření ojnice o fixní body a jejím následným zaaretování za pomoci dvou přitlačných pružin.

Prvním, méně závažným, problémem je, že síla, kterou v rámci aretace operátor vyvine, se pak může projevit mírnou deformací ojnice. Vzhledem k vysokým pevnostním vlastnostem materiálu ojnice AISI 4340 je vliv proměnné síly přitlačení pružin operátorem minimální, ale při porovnání jednotlivých náměrů jej bylo možno pozorovat kupříkladu na charakteristice rovnoběžnosti (*char12*).

Dalším zdrojem nepřesného měření, který se v rámci provedeného měření projevoval velmi výrazně, je nedostatečná tuhost použitého přípravku kombinovaná s jeho konstrukcí. Experimentálně bylo ověřeno, že přípravek nedostatečně zabraňoval pohybu ojnice, nezávisle na použité síle při upnutí.

Oba tyto faktory vedou ke zkreslení výsledků měření, především při vyhodnocování tvarových tolerancí jako je kupříkladu pozice konkrétního bodu (nevyhovující *char17*) nebo opět kruhovitost (*char3* a *char6*). Kombinovaný vliv přitlačení a nedostatečně tuhého upnutí na kruhovitost je vidět v *Obr. 33*, který je grafem kruhovitosti znázorněné v *Obr. 32* přímo na pozorované ojnici.



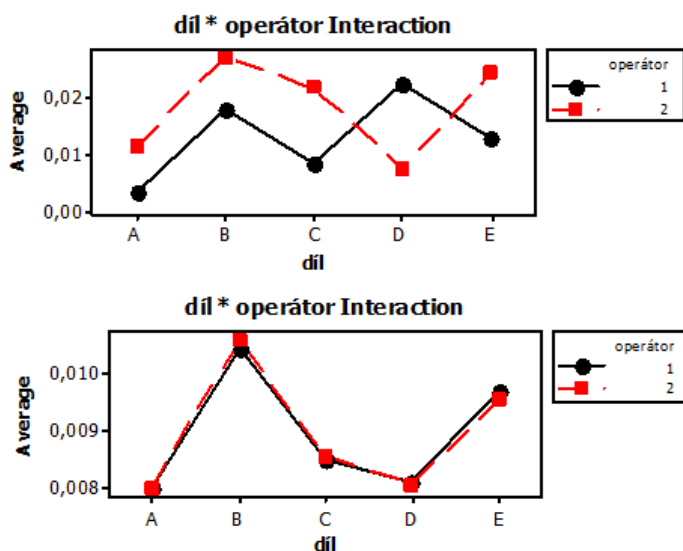
*Obr. 33: Graf kruhovitosti char3 ovlivněné nedostatečně tuhým upnutím, deformací způsobenou přitlačnou silou a nečistotou na měřené ojnici vytvořený v SW Calypso*

Vliv těchto zdrojů chyb se opět projevuje ve variabilitě operátora, tedy až při analýze způsobilosti a vhodnosti měřicího procesu. Je však možné nesprávným / nedostatečně tuhým upnutím negativně ovlivnit i vyhodnocování způsobilosti/vhodnosti měřicího systému, poněvadž je sice pro měření použita automatická smyčka, ale prvotní upnutí může způsobit konzistentní deformaci/posun, který se projeví formou biasu (strannosti) měření. Je možné, že právě k tomuto došlo při experimentu pro určení způsobilosti a vhodnosti měřicího systému v rámci této bakalářské práce.

Tyto problémy se dají z většiny eliminovat volbou dostatečně tuhého a vhodně navrženého přípravku, který není náchylný na drobné výkyvy použité síly operátora. V současné době používaný přípravek na měření ojníc tedy pro tuto aplikaci nevyhovuje.

### Nedostatečná randomizace experimentu

Jak jsem již letmo zmínila v sekci 5.5.2, provedený experiment byl realizován postupně, tedy nejdříve jeden operátor přeměřil vše a pak teprve přišel na řadu operátor druhý. Toto mělo za následek relativně vysoký vliv interakce mezi dílem a operátorem při vyhodnocování naměřených výsledků.



Obr. 34: Grafické znázornění vysokého vlivu interakce na char13 (nahore) a nízkého vlivu interakce na char7 (dole) v programu Minitab 16

Randomizace experimentu spočívá v tom, že je měřeno střídavě, tedy ne v uspořádaných skupinách, jako tomu bylo v rámci tohoto experimentu. Takováto randomizace by v rámci experimentu vyžadovala střídání operátorů a anonymizaci (ale identifikovatelnost) zkoumaných dílů.

V případě randomizovaného experimentu by klesl vliv interakce mezi dílem a operátorem a naopak narostl vliv samotného operátora.

Tato varianta experimentu by technicky vzato šla provést, ale vyžadovala by více přípravy ze strany autorů experimentu a také anonymizování ojnic pro operátory a randomizaci pořadí. V případě, že je autor experimentu zároveň operátorem, vyžadoval by experiment buď jiného operátora, nebo další osobu, která by měření zanonymizovala.

Randomizovaný experiment by měl také pravděpodobně vliv na hodnotu koeficientů způsobilosti a vhodnosti, a to tak, že by vyhodnocení randomizovaných dat vycházelo méně způsobile/vhodně, než vyhodnocení dat seskupených, jak tomu bylo v rámci této vysokoškolské kvalifikační práce.

### Nedostatečná variabilita použitých dílů

Při vyhodnocování metodiky založené na MSA vyšlo najevo, že většina náměrů charakteristik nedisponuje dostatečnou hodnotou  $ndc$  dle vzorce 4.1-19. Důvodem je s nejvyšší pravděpodobností nedostatečná variabilita zkoumaných ojnic, a to i přesto, že byla při jejich výběru brána v potaz, a byly aktivně vybírány tak, aby jí bylo dosaženo.

Tento zdroj nevhovujících vyhodnocení lze odstranit dvěma způsoby.

Prvním a jednodušším způsobem je navýšení počtu zkoumaných ojnic za zachování předpokladu, že budou vybírány opět z různých strojů a přípravků.

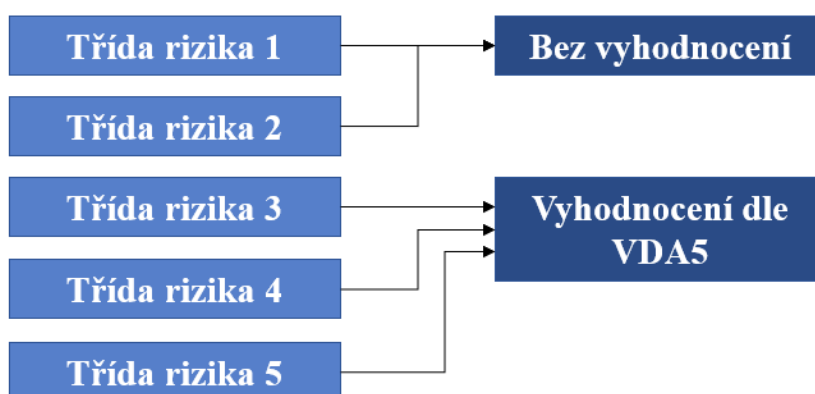
Druhým, časově náročnějším způsobem, je naměření vysokého počtu ojnic (např. >50 ks) a na základě naměřených hodnot vybrat skupinu ojnic (např. ~10 ks) tak, aby výsledný výběr měl co nejvyšší možnou variabilitu. Tato varianta zaručí velmi vysokou variabilitu dat vstupujících do vyhodnocování, ale je časově a tedy i finančně náročnější. Považuji tedy první zmíněnou metodu za vhodnější.

## 6 Návrh metodiky

Na základě provedeného experimentu a z něj získaných poznatků jsem vytvořila následující návrh obecné metodiky pro implementaci v rámci výroby a kontroly komponentů ve Škoda Auto a.s..

### 6.1 Identifikace rizikových charakteristik

Vzhledem k srovnatelné náročnosti vyhodnocování vhodnosti měřicích systémů/procesů dle metodiky VDA 5 ve srovnání se současnou metodikou založenou na MSA (v případě správně navrženého experimentu), považuji nasazení vyhodnocování dle této nové metodiky za snadno uskutečnitelný krok. Navrhuji použít toto vyhodnocení vhodnosti pouze pro účely zkoumání měřicího procesu pro charakteristiky dle tříd rizika 3-5 (4.2.1 Rozdělení měřených dílů dle rizika). Pro charakteristiky třídy 1 až 2 se nedomnívám, že by bylo třeba vyhodnocovat vhodnost, a to z toho důvodu, že charakteristiky třídy rizikovosti 3-5 mají ze své podstaty většinou užší toleranční meze, a dá se tedy předpokládat, že pokud bude systém/proces vyhovovat pro tyto náročnější charakteristiky, bude rovněž vyhovovat pro charakteristiky nižších tříd rizikovosti.



Obr. 35: Schéma volby vyhodnocení v závislosti na třídě rizika charakteristiky

Pro tyto účely je tedy třeba, aby byly všechny charakteristiky zkoumané součástí vyhodnoceny z hlediska jejich rizikovosti skupinou složenou ze zástupců oddělení metrologie, oddělení kvality, konstrukčního oddělení a oddělení technologie (dle doporučení VDA 5). Jednotlivým charakteristikám by tímto byly jednoznačně přiřazeny třídy rizikovosti, na základě kterých by pak byla určena potřeba jejich vyhodnocení dle VDA 5.

### 6.2 Určení hranic vhodnosti

V rámci stanovení návrhu jednotné metodiky vyhodnocování vhodnosti dle VDA 5 je třeba určit, zda se výroba komponentů firmy Škoda Auto bude držet v rámci vyhodnocování hranic doporučených touto metodikou, či zda tyto hranice budou určeny jinak (vyšší) na základě znalostí a odbornosti určujících.

O konečné hodnotě těchto hranic, které pak budou ve Škoda Auto používány, by měla dle doporučení příručky VDA 5 rozhodovat skupina složená ze zástupců oddělení metrologie, oddělení kvality, konstrukčního oddělení a oddělení technologie, aby bylo možno dosáhnout optimálního řešení z hlediska potřeb všech výše zmíněných oddělení.

## 6.3 Návrh experimentu

Vzhledem k srovnatelnosti experimentálně získaných výsledků vyhodnocení vhodnosti dle VDA 5 a vyhodnocení způsobilosti dle MSA navrhuji použít pro vyhodnocování vhodnosti dle nové metodiky založené na VDA 5 analogický experiment tomu, který byl proveden v rámci této bakalářské práce, pouze rozšířen o požadavky, které použitý experiment vyhodnotil jako nedostačující.

Experiment použitý v rámci této bakalářské práce ke zkoumání vhodnosti měřicího procesu dle VDA 5 byl počtem měřených dílů, operátorů a opakování bezpečně nad minimální hranicí požadovanou metodikou. Z vyhodnocení dat se však jeví, že počet 5 opakování, 5 dílů a 2 operátorů neposkytuje dostatečné množství parametrů, neboť do měření zanáší každé jednotlivé měření příliš velkou chybu a má příliš malou variabilitu dílů. Navrhuji tedy pro účely obecné metodiky stanovit následující minimální počty:

Tabulka 12: Návrh minimálního počtu operátorů, měřených dílů a počtu opakování

Počet operátorů	> 3
Počet dílů	> 10
Počet opakování	> 5

Horní hranice nepovažuji za nutné unifikovaně stanovovat, mělo by však být přihlíženo k délce trvání zkušebních měření a k vytížení účastníků se operátorů, neboť i v rámci této bakalářské práce provedený experiment, který probíhal na menší škále a na relativně jednoduchém dílu (pouze 22 charakteristik), trval jeden náměr více než 5,5 minuty a celkový čas měření více než 9 hodin. V případě členitějšího dílu s více charakteristikami by se tento čas násobně zvýšil. Je tedy třeba při tvorbě návrhu počtu operátorů, dílů a opakování vzít v potaz časovou a finanční náročnost experimentu pro určení vhodnosti. Případná randomizace experimentu by pak potřebnou časovou dotaci ještě navýšila.

Použití dílů z různých strojů a upínačů pro zajištění variability experimentu se ukázalo jako vhodné, do návrhu metodiky bych tedy tento požadavek taktéž zařadila, pouze rozšířený o vyšší počet dílů (viz Tabulka 12).

Vzhledem k potřebě zkoumání vhodnosti měřicích procesů pro kontrolu a uvolňování dílů považuji za nutné, aby v rámci experimentu zkoušení byla použita totožná sensorika, program a metoda upnutí, jaká je pak používána v kontrolním procesu samotném.

Vzhledem k potřebě znalosti teploty pro určení nejistoty jí způsobené zároveň považuji za nutné monitorovat teplotu měřicího místa, a před měřením vytemperovat zkoumaný díl na teplotu měřicího prostředí.

Pro minimalizaci odlehlých a chybných hodnot v rámci měření je třeba důkladné očištění dílu před jednotlivými náměry a volba vhodně konstruovaného, dostatečně tuhého přípravku minimalizujícího vliv operátora.

## 7 Závěr

Pro měřicí systémy a procesy určené ke kontrole kvality vyráběných součástek ve Škoda Auto je třeba zaručit způsobilost a vhodnost těchto systémů a procesů, aby je bylo možné použít k uvolňování dílů. V této práci bylo provedené experimentální měření součástky (ojnice) z oddělení výroby komponentů, které proběhlo na vybavení určeném k měření těchto ojníc (souřadnicovém měřicím stroji, přípravku, sensorice i programu) v rámci kontroly kvality ve Škoda Auto a.s..

Během analýzy naměřených dat byla vyhodnocena způsobilost procesu a systému měření dle metodiky AIAG MSA 4, na které je v současné době postaveno vyhodnocování způsobilosti měřicích systémů a procesů ve Škoda Auto a.s.. K vyhodnocení způsobilosti měřicího systému byla použita veličina  $c_{gk}[-]$  (aby byla do vyhodnocení zahrnuta jeho strannost) a k vyhodnocení způsobilosti měřicího procesu byla použita veličina  $\%GR\&R[\%]$  v kombinaci s veličinou  $ndc[-]$  (obě vypočítány metodou Gage R&R Study (Crossed) - ANOVA).

Dále byla tato data vyhodnocena z hlediska vhodnosti na základě metodiky VDA 5 za pomoci veličin  $Q_{MS}[\%]$  pro měřicí systém a  $Q_{MP}[\%]$  pro měřicí proces.

Porovnání výsledků obou analýz způsobilosti a vhodnosti měřicího systému vedlo ke zjištění, že při dodržování hraničních hodnot předepsaných metodikami byl systém pro většinu zkoumaných charakteristik vyhodnocen jako způsobilý/vhodný, v případě metodiky na základě AIAG MSA 4 systém nevyhovoval pouze pro jednu charakteristiku, zatímco při vyhodnocování dle VDA 5 nevyhovoval pro pět charakteristik. V případě rozšíření pole vhodnosti dle metodiky VDA 5 pak měřicí systém nevyhovoval pouze pro jednu charakteristiku a to pro totožnou, pro kterou nevyhovoval i dle vyhodnocení AIAG MSA4. Na základě provedeného experimentu byl měřicí systém shledán nevyhovujícím dle obou metodik.

Porovnání výsledků analýz způsobilosti a vhodnosti měřicího procesu vedlo k zjištění, že zatímco dle metodiky VDA 5 vyhovoval proces pro měření všech charakteristik kromě čtyř, zatímco při vyhodnocení na základě AIAG MSA bylo více nevyhovujících charakteristik a mnoho podmíněně vyhovujících. Předpokládaným důvodem byl nevhodně navržený experiment, který nebyl dostatečně variabilní, a tudíž zkresloval výsledky nevyhovujícími hodnotami  $ndc$ . Na základě provedeného experimentu byl měřicí systém shledán nevyhovujícím dle obou metodik.

Na základě naměřených dat bylo také provedeno přezkoumání vlivů, které při měření nejčastěji vedly k chybně naměřeným hodnotám a byly vytvořeny návrhy pro jejich minimalizaci.

Dále byl vytvořen návrh metodiky pro určování vhodnosti měřicích systémů a procesů na základě VDA 5 pro použití na oddělení výroby komponentů ve firmě Škoda Auto a.s..

Na základě poznatků z experimentu bylo vyhodnoceno, že za předpokladu vhodně vytvořeného experimentu a jednoznačně nadefinovaných mezí vhodnosti a tříd rizika jednotlivých charakteristik, lze navrhnout obecnou metodiku založenou na VDA 5. V rámci této práce byl navržen způsob identifikace a klasifikace charakteristik dle tříd rizika a s nimi související požadavky na vyhodnocování těchto charakteristik. Dále byl vytvořen návrh metody určení hranic vhodnosti pro měřicí systém a proces. V poslední řadě je součástí tohoto návrhu obecný návrh experimentu ke zkoumání vhodnosti dílů, který byl vytvořen na základě experimentu provedeného pro účely této bakalářské práce a následné identifikace jeho problematických částí. Navrženou metodiku a experiment je třeba prakticky otestovat v rámci dalšího zkoumání problematiky.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] Calculus Volume 3: 2.2 Vectors in Three Dimensions. OpenStax [online]. Houston, 2016 [cit. 2024-05-04]. Dostupné z: <https://openstax.org/books/calculus-volume-3/pages/2-2-vectors-in-three-dimensions>
- [2] Calculus Volume 3: 2.7 Cylindrical and Spherical Coordinates. OpenStax [online]. Houston, 2016 [cit. 2024-05-04]. Dostupné z: <https://openstax.org/books/calculus-volume-3/pages/2-7-cylindrical-and-spherical-coordinates>
- [3] Intro to Coordinate Metrology. Hexagon Manufacturing intelligence [online]. Seongnam: Hexagon AB, 2024 [cit. 2024-06-04]. Dostupné z: <https://hexagon.com/resources/resource-library/intro-coordinate-metrology>
- [4] BERÁNEK, Libor. MTR 7. přednáška Měření s využitím CMM - CMS - Úvod.mkv [online]. Praha, 2020 [cit. 2024-06-13]. Dostupné z: <https://moodle-vyuka.cvut.cz/mod/resource/view.php?id=272619>
- [5] BERÁNEK, Libor. MTR 8. přednáška Měření s využitím CMM - CMS – Vyrovnání-Konstrukce.mkv [online]. Praha, 2020 [cit. 2024-06-13]. Dostupné z: <https://moodle-vyuka.cvut.cz/mod/resource/view.php?id=272621>
- [6] VOLKSWAGEN AG. *VW 01055 - Referenz Punkte System (RPS), 2021-05*. Wolfsburg, 2021.
- [7] JIRÁSKOVÁ, Jana. Způsoby vyrovnání součástí při měření na souřadnicových měřicích strojích [online]. Praha, 2020 [cit. 2024-06-11]. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/90122/F2-BP-2020-Jiraskova-Jana-BP\\_Jiraskova.pdf?sequence=-1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/90122/F2-BP-2020-Jiraskova-Jana-BP_Jiraskova.pdf?sequence=-1&isAllowed=y)
- [8] BERÁNEK, Libor. MTR 2. přednáška Nejistoty měření, komunální měřidla.mkv [online]. Praha, 2020 [cit. 2024-06-13]. Dostupné z: <https://moodle-vyuka.cvut.cz/mod/resource/view.php?id=272609>
- [9] *Analýza systémů měření (MSA), 4. vydání*. Praha: Česká společnost pro jakost, 2011
- [10] BERÁNEK, Libor. MTR 2020 9. přednáška Měření s využitím CMM - CMS - Dotykové snímací systémy.mkv [online]. Praha, 2020 [cit. 2024-06-13]. Dostupné z: <https://moodle-vyuka.cvut.cz/mod/resource/view.php?id=272623>
- [11] PETŘKOVSKÁ, Lenka; ČEPOVÁ, Lenka. *Metrologie a řízení kvality*. [online] Ostrava, 2012 [cit. 2024-06-11]. Dostupné na: [http://projekty.fs.vsb.cz/459/ucebniopory/Metrologie\\_a\\_rizeni\\_kvality.pdf](http://projekty.fs.vsb.cz/459/ucebniopory/Metrologie_a_rizeni_kvality.pdf)
- [12] NEKOLNÝ, Miroslav. *Optimalizace plánu měření z hlediska kompatibility se systémy konceptu průmyslu 4.0* [online]. Praha, 2022 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/103577/F2-DP-2022-Nekolny-Miroslav-DP\\_Miroslav\\_Nekolny.pdf?sequence=-1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/103577/F2-DP-2022-Nekolny-Miroslav-DP_Miroslav_Nekolny.pdf?sequence=-1&isAllowed=y)
- [13] ZEISS CALENO - měřicí stroj s horizontálním ramenem s optickými a dotykovými senzory [online]. Praha, 2024 [cit. 2024-06-17]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/souradnicove-merici-stroje/stojanove-merici-stroje-s-horizontalnim-ramenem/caleno.html>
- [14] Portálový měřicí stroj ZEISS SPECTRUM [online]. Praha, 2024 [cit. 2024-06-17]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/souradnicove-merici-stroje/portalove-souradnicove-merici-stroje/spectrum.html>
- [15] ZEISS O-INSPECT – multisenzorový souřadnicový měřicí přístroj [online]. Praha, 2024 [cit. 2024-06-17]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/opticka/o-inspect.html>



- [16] ZEISS MMZ M měřicí stroj mostového typu pro složité obrobky [online]. Praha, 2024 [cit 2024-06-20]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/souradnicove-merici-stroje/velke-souradnicove-merici-stroje/zeiss-mmz-m.html>
- [17] ITP STYLI: Types of Styli: Usages and Benefits [online]. Praha, 2024 [cit 2024-06-20]. Dostupné z: <https://www.itpstyli.com/Resources/Types-Of-Styli>
- [18] RENISHAW: User guide: Precision styli [online]. Wotton-under-Edge, 2023 [cit 2024-06-20]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/resourcecentre/en/details/--36164?lang=en>
- [19] BERÁNEK, Libor. MTR 2020 10. přednáška Měření s využitím CMM - CMS - Bezdotykové snímací systémy.mkv [online]. Praha, 2020 [cit 2024-06-13]. Dostupné z: <https://moodle-vyuka.cvut.cz/mod/resource/view.php?id=272625>
- [20] FENG, Shije; ZUO,Chao; ZHANG,Liang; TAO,Tianyang; HU, Yan; YIN, Wei; QIAN, Jiaming; CHEN, Qain: Calibration of fringe projection profilometry: A comparative review [online]. 2021 [cit 2024-06-21]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816621000920>
- [21] SIEBERT, J.; MARSHALL S.J.: Human body 3D imaging by speckle texture projection photogrammetry 2020 [cit 2024-06-21]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Human-body-3D-imaging-by-speckle-texture-projection-Siebert-Marshall/d672c8264e6bc860fb1934f44d57df618276bb29>
- [22] ZHOU, Zhilong; LIU, Wei; WU, Qiong; WANG, Yuxin; YU, Binchao; YUE, Yi; ZHANG, Jiabo: A Combined Measurement Method for Large-Size Aerospace Components [online]. Sensors, 2020 [cit 2024-06-21]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/17/4843>
- [23] BOSCH. *Quality Management in the Bosch Group, Technical Statistics, Booklet 10: Capability of Measurement and Test Processes, Edition November 2019*. Stuttgart: Robert Bosch GmbH, 2019
- [24] VDA. *Qualitätsmanagement in der Autoobilindustrie: Band 5, Mess- und Prüfprozesse; eignung, Planung und Management; 3., überarbeitete Auflage*. Berlin: Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA), 2021. ISSN 0943-9412
- [25] ZEISS PRISMO - Pro všechny měřicí úlohy [online]. Praha, 2024 [cit 2024-07-02]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/souradnicove-merici-stroje/portalove-souradnicove-merici-stroje/prismo.html#prismofamily>
- [26] Zeiss Prismo Navigator | visionaltechnology [online]. San Juan, 2024 [cit 2024-07-03]. Dostupné z: <https://www.visionaltechnology.com/copy-of-zeiss-micura>

## Seznam tabulek

<i>Tabulka 1: Tabulka vztahů pro určení stupňů volnosti vlivů měření pro metodu ANOVA [23] .....</i>	<i>31</i>
<i>Tabulka 2: Tabulka předvýběru procesů pro řízení založeném na rizicích [24] .....</i>	<i>34</i>
<i>Tabulka 3: Tabulka koeficientů rozšíření k pro pravděpodobnost pokrytí 95,45 % v závislosti na stupních volnosti f [24] .....</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka 4: Tabulka referenčních hodnot charakteristik z měření na ZEISS PRISMO ultra .....</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 5: Tabulka vyhodnocení způsobilosti měřicího systému dle současné metodiky .....</i>	<i>47</i>
<i>Tabulka 6: Tabulka vyhodnocení způsobilosti měřicího systému dle současné metodiky s rozšířeným polem způsobilosti .....</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 7: Tabulka vyhodnocení způsobilosti měřicího procesu dle současné metodiky .....</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka 8: Tabulka vyhodnocení vhodnosti měřicího systému dle VDA 5 .....</i>	<i>51</i>
<i>Tabulka 9: Tabulka vyhodnocení vhodnosti měřicího procesu dle VDA 5 .....</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 10: Tabulka porovnání vyhodnocení způsobilosti a vhodnosti měřicího systému dle současné metodiky a dle metodiky založené na VDA 5 dle metodikami doporučených hranic .....</i>	<i>54</i>
<i>Tabulka 11: Tabulka porovnání vyhodnocení způsobilosti a vhodnosti měřicího procesu dle současné metodiky a dle metodiky založené na VDA 5 dle metodikami doporučených hranic .....</i>	<i>55</i>
<i>Tabulka 12: Návrh minimálního počtu operátorů, měřených dílů a počtu opakování .....</i>	<i>60</i>



## Seznam obrázků

<i>Obr. 1: Kartézská soustava souřadnic [1]</i> .....	10
<i>Obr. 2: Cylindrická soustava souřadnic [2]</i> .....	11
<i>Obr. 3: Sférická soustava souřadnic [2]</i> .....	12
<i>Obr. 4: Vyrovnávání souřadného systému součásti na souřadný systém stroje [3]</i> .....	13
<i>Obr. 5: Standardní vyrovnání součásti v programu Calypso [4]</i> .....	14
<i>Obr. 6: Souřadný systém automobilu: (1) vertikální rovina YZ, (2) podélná rovina XZ, (3) horizontální rovina XY a (4) nulový bod souřadného systému automobilu [6]</i> .....	14
<i>Obr. 7: Příklad layoutu RPS bodů na U profilu [6]</i> .....	15
<i>Obr. 8: Srovnání vyrovnání součásti standardní metodou (vlevo) a metodou 3D připasování (vpravo) [4]</i> .....	15
<i>Obr. 9: Znázornění vyrovnání součásti metodou P6 [7]</i> .....	16
<i>Obr. 10: Typy CMM: a) konzolový typ, b) typ s horizontálním ramenem, c) portálový typ a d) mostový typ [11]</i> .....	17
<i>Obr. 11: Souřadnicový měřicí stroj s horizontálním ramenem ZEISS Caleno [13]</i> .....	18
<i>Obr. 12: Dvouramenná konstrukce stroje s horizontálními rameny ZEISS Caleno [13]</i> .....	18
<i>Obr. 13: CMM s pohyblivým portálem ZEISS SPECTRUM [14]</i> .....	19
<i>Obr. 14: CMM s pevným portálem ZEISS O-INSPECT [15]</i> .....	19
<i>Obr. 15: CMM mostové konstrukce ZEISS MMZ M [16]</i> .....	20
<i>Obr. 16: Typy dotykových sond: (zleva) přímá sonda, hvězdicová sonda, disková sonda, válcová sonda a kulová sonda [17]</i> .....	20
<i>Obr. 17: Schéma korekce poloměru kuličky [10]</i> .....	22
<i>Obr. 18: Pasivní spínací hlava [10]</i> .....	22
<i>Obr. 19: Aktivní snímací hlava [10]</i> .....	23
<i>Obr. 20: Metoda pruhové projekce [20]</i> .....	24
<i>Obr. 21: Metoda fotogrammetrie [21]</i> .....	24
<i>Obr. 22: Systém měření kombinací laser skeneru a laser trackeru [22]</i> .....	25
<i>Obr. 23: Schématická návaznost postupů v rámci MSA</i> .....	28
<i>Obr. 24: Diagram znázorňující uvažované veličiny vstupující do vyhodnocování vhodnosti měřicího systému [24]</i> .....	35
<i>Obr. 25: Diagram znázorňující uvažované veličiny vstupující do vyhodnocování vhodnosti měřicího procesu [24]</i> .....	38
<i>Obr. 26: Schématický postup vyhodnocování vhodnosti systémů a procesů měření [24]</i> .....	40
<i>Obr. 27: Fotografie zkoumané ojnice A</i> .....	42
<i>Obr. 28: Portálový měřicí stroj ZEISS PRISMO ultra [25]</i> .....	43
<i>Obr. 29: Fotografie použité sondy: dřík 22 mm s kuličkou Ø3 mm (nalevo) a dřík 55 mm s kuličkou Ø4 mm (napravo)</i> .....	43

<i>Obr. 30: Fotografie upevnění ojnice v modulárním přípravku WITTE Alufix</i> .....	44
<i>Obr. 31: Portálový měřicí stroj ZEISS PRISMO navigator [26]</i> .....	45
<i>Obr. 32: Grafické znázornění vlivu nečistoty (vlevo dole) a kombinace vlivu nedostatečně tuhého upnutí a deformace způsobené přítlačnou silou na char3 v SW Calypso</i> .....	56
<i>Obr. 33: Graf kruhovitosti char3 ovlivněné nedostatečně tuhým upnutím, deformací způsobenou přítlačnou silou a nečistotou na měřené ojnici vytvořený v SW Calypso</i> .....	57
<i>Obr. 34: Grafické znázornění vysokého vlivu interakce na char13 (nahore) a nízkého vlivu interakce na char7 (dole) v programu Minitab 16</i> .....	58
<i>Obr. 35: Schéma volby vyhodnocení v závislosti na třídě rizika charakteristiky</i> .....	59

## Seznam použitých vzorců a vztahů

- 2.1-1 Zápis souřadnic bodu měřeného v kartézské soustavě souřadnic
- 2.1-2 Zápis souřadnic bodu měřeného v cylindrické soustavě souřadnic
- 2.1-3 Rozsah hodnoty úhlu  $\varphi$
- 2.1-4 Zápis souřadnic bodu měřeného ve sférické soustavě souřadnic
- 2.1-5 Rozsah hodnot úhlů  $\varphi$  a  $\theta$
- 4.1-1 Výpočet koeficientu způsobilosti měřidla  $c_g$
- 4.1-2 Výpočet šířky tolerančního pole
- 4.1-3 Výpočet směrodatné odchylky naměřených hodnot  $s$
- 4.1-4 Hranice vyhovujícího koeficientu způsobilosti měřidla  $c_g$
- 4.1-5 Výpočet kritického koeficientu způsobilosti měřidla  $c_{gk}$
- 4.1-6 Hranice vyhovujícího kritického koeficientu způsobilosti měřidla  $c_{gk}$
- 4.1-7 Vztah mezi  $c_g$  a  $c_{gk}$
- 4.1-8 Požadovaný počet parametrů pro MSA – Postup 2
- 4.1-9 Výpočet průměrné hodnoty  $\bar{x}_j$  na součásti měřené operátorem  $j$
- 4.1-10 Výpočet průměrného rozpětí  $\bar{R}_j$  operátora  $j$
- 4.1-11 Výpočet hodnoty opakovatelnosti systému měření  $EV$
- 4.1-12 Výpočet průměru rozpětí všech operátorů  $\bar{R}$
- 4.1-13 Výpočet hodnoty reprodukovatelnosti systému měření  $AV$
- 4.1-14 Výpočet rozpětí všech průměrných hodnot naměřených jednotlivými operátory  $R_{\bar{x}}$
- 4.1-15 Výpočet hodnoty opakovatelnosti a reprodukovatelnosti  $GR\&R$  (ARM)
- 4.1-16 Výpočet procentuální hodnoty opakovatelnosti a reprodukovatelnosti  $\%GR\&R$  vztahené k šířce tolerančního pole (ARM)
- 4.1-17 Hranice určité vyhovující hodnoty  $\%GR\&R$
- 4.1-18 Hranice podmíněně vyhovující hodnoty  $\%GR\&R$
- 4.1-19 Výpočet počtu odlišných kategorií  $ndc$
- 4.1-20 Doporučená hranice vyhovujícího počtu odlišných kategorií  $ndc$
- 4.1-21 Výpočet součtu čtverců odchylek mezi  $n$  měřenými součástmi  $SS_p$
- 4.1-22 Výpočet součtu čtverců odchylek mezi  $k$  operátory  $SS_A$
- 4.1-23 Výpočet součtu čtverců odchylek přes interakce mezi  $k$  operátory a  $n$  měřenými součástmi  $SS_{AP}$
- 4.1-24 Výpočet součtu čtverců odchylek měřidla  $SS_E$
- 4.1-25 Výpočet sumy všech součtů čtverců odchylek  $TSS$
- 4.1-26 Výpočet průměru kvadrátu rozptylu součásti  $MS_p$
- 4.1-27 Výpočet průměru kvadrátu rozptylu operátorů  $MS_A$
- 4.1-28 Výpočet průměru kvadrátu rozptylu interakcí  $MS_{AP}$
- 4.1-29 Výpočet průměru kvadrátu rozptylu měřidla  $MS_E$
- 4.1-30 Výpočet rozptylu součásti  $PV$
- 4.1-31 Výpočet rozptylu operátora  $AV$
- 4.1-32 Výpočet rozptylu interakcí  $INT$
- 4.1-33 Výpočet rozptylu měřidla  $EV$
- 4.1-34 Výpočet hodnoty opakovatelnosti a reprodukovatelnosti  $GR\&R$  (ANOVA)
- 4.1-35 Výpočet procentuální hodnoty opakovatelnosti a reprodukovatelnosti  $\%GR\&R$  vztahené k šířce tolerančního pole (ANOVA)
- 4.1-36 Požadovaný počet parametrů pro MSA – Postup 3
- 4.1-37 Výpočet hodnoty opakovatelnosti a reprodukovatelnosti  $GR\&R$  (Postup 3)

- 4.1-38 Výpočet procentuální hodnoty opakovatelnosti a reprodukovatelnosti  $\%GR\&R$  vztažené k šířce tolerančního pole (Postup 3)
- 4.2-1 Požadavek na rozlišení měřicího systému  $RE$  vůči šířce tolerančního pole  $TOL$
- 4.2-2 Výpočet indexu vhodnosti měřicího systému  $Q_{MS}$
- 4.2-3 Výpočet rozšířené nejistoty měřicího systému  $U_{MS}$
- 4.2-4 Výpočet stupňů volnosti  $f$
- 4.2-5 Výpočet kombinované standardní nejistoty měřicího systému  $u_{MS}$  z MPE
- 4.2-6 Výpočet kombinované standardní nejistoty měřicího systému  $u_{MS}$  ze statistické analýzy
- 4.2-7 Výpočet nejistoty kalibrace etalonu  $u_{CAL}$
- 4.2-8 Výpočet nejistoty opakovatelnosti na etalonu  $u_{EVR}$
- 4.2-9 Výpočet nejistoty rozlišení indikace  $u_{RE}$
- 4.2-10 Výpočet nejistoty systematické odchylky měření  $u_{BI}$
- 4.2-11 Výpočet nejistoty vlivu odchylek linearit v rozsahu použití  $u_{LIN}$
- 4.2-12 Hranice vyhovující hodnoty indexu vhodnosti měřicího systému  $Q_{MS}$
- 4.2-13 Výpočet indexu vhodnosti měřicího procesu  $Q_{MP}$
- 4.2-14 Výpočet rozšířené nejistoty měřicího procesu  $U_{MP}$
- 4.2-15 Výpočet kombinované standardní nejistoty měřicího procesu  $u_{MP}$  za použití MPE
- 4.2-16 Výpočet kombinované standardní nejistoty měřicího procesu  $u_{MP}$  ze statistické analýzy
- 4.2-17 Hranice vyhovující hodnoty indexu vhodnosti měřicího procesu  $Q_{MP}$
- 5.3-1 Výpočet koeficientu způsobilosti měřidla  $c_g$  s rozšířením pole způsobilosti
- 5.3-2 Výpočet kritického koeficientu způsobilosti měřidla  $c_{gk}$  s rozšířením pole způsobilosti
- 5.4-1 Vyhodnocení rozlišení indikace

## **Seznam příloh**

Příloha 1 - Grafické a číselné výstupy ze SW Minitab 16

Příloha 2 - ANALÝZA NEJISTOT

## **Seznam použitého softwaru**

- Microsoft Excel 365
- Minitab 16
- Yarovyn
- Calypso 7.6.0805