

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ
A METROLOGIE

**Optimalizace plánu měření z hlediska kompatibility se systémy
konceptu průmyslu 4.0**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor: Bc. Miroslav Nekolný

Vedoucí práce: Ing. Jan Urban

Praha, 2022



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Nekolný** Jméno: **Miroslav** Osobní číslo: **476499**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Optimalizace plánu měření z hlediska kompatibility se systémy konceptu průmyslu 4.0

Název diplomové práce anglicky:

Optimization of measurements plan from the point of view to compatibility with concept system the Industry 4.0

Pokyny pro vypracování:

1. Vytvoření metodiky pro ověřování způsobilosti nových plánů měření na dotykových CMM
2. Optimalizace programů do dílčích skupin dle technologického významu
3. Úprava programů pro nasazení v tzv. Chytrém kontrolním plánu

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **15.03.2022** Termín odevzdání diplomové práce: **29.07.2022**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Jan Urban
podpis vedoucí(ho) práce

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Janu Urbanovi a Ing. Ondřeji Košťákovi za jejich výpomoc při tvorbě práce, cenné rady a trpělivost. Dále bych rád poděkoval firmě Škoda Auto a.s. za poskytnuté zázemí a vybavení, zejména celému týmu oddělení GQH-1/1.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím pramenů uvedených v příloze této práce.

V Praze dne

Podpis

Abstrakt

Diplomová práce se zaměřuje na vytváření metodiky pro ověřování vhodnosti a způsobilosti měřicího systému a měřicího procesu. V první části se práce zabývá základy souřadnicového měření, souřadnicovými měřicími stroji, snímacími systémy, měřicími sondami, hodnocením procesu měření a chybami a nejistotami měření. V druhé části práce je analyzován současný stav plánů měření, je proveden experiment pro ověření navržené metodiky pro ověřování způsobilosti a vhodnosti měřicího systému. Výsledky jsou analyzovány a vyhodnoceny. V poslední části práce je navržena metodika pro tvorbu a organizaci měřicích plánů v softwaru Zeiss Calypso.

Klíčová slova

CMM, souřadnicový měřicí stroj, dotykové snímací systémy, Cg, Cgk, opakovatelnost měření, způsobilost měření, vhodnost měření, Průmysl 4.0, chytrý kontrolní měrový plán, měřicí plán, měřicí systém, měřicí proces

Abstract

This diploma thesis focuses on creating methodology for verifying the suitability and capability of the measuring system and process. In the first part, thesis describes basics of coordinate measurement, coordinate measuring machines, measuring systems, measuring probes, evaluation of the measurement process and measurement errors and uncertainties. In the second part, current measuring plans are analyzed, an experiment is performed to verify the proposed methodology for verifying the capability and suitability of the measurement system. The results are analyzed and evaluated. In the last part of the work, a methodology for the creation and organization of the measurement plan in the Zeiss Calypso software is proposed.

Keywords

CMM, coordinate measuring machine, touch trigger tactile sensors, Cg, Cgk, measurement repeatability, measurement capability, measurement suitability, Industry 4.0, smart control measurement plan, measurement plan, measurement system, measurement process

Obsah

1.	Úvod.....	8
2.	Souřadnicové měření.....	9
2.1.	Souřadný systém.....	9
3.	Souřadnicové měřicí stroje.....	13
4.	Rozdělení souřadnicových měřících strojů	15
4.1.	Portálová konstrukce	15
4.2.	Sloupová konstrukce.....	17
4.3.	Mostová konstrukce.....	18
5.	Snímací systémy.....	20
5.1.	Dotykové snímací systémy	20
5.2.	Optické snímací systémy	22
6.	Měřicí sondy.....	25
6.1.	Konstrukční typy dotykové sondy	25
6.2.	Materiály používané na měřicí sondy.....	26
7.	Postup tvorby plánu měření.....	29
7.1.	Analýza výkresové dokumentace	29
7.2.	Snímací systém	29
7.3.	Upnutí součásti	29
7.4.	Kvalifikace snímacího systému	31
7.5.	Vyrovnání součásti	32
7.6.	Sběr dat.....	33
7.7.	Vyhodnocení dat.....	34
7.8.	Tvorba protokolů	34
8.	Hodnocení procesu měření.....	35
8.1.	Hodnocení způsobilosti měřidla dle metodiky MSA	35
8.2.	Hodnocení vhodnosti měřícího systému a procesu dle metodiky VDA 5.....	45

9.	Chyby a nejistoty měření.....	51
9.1.	Zdroje chyb a nejistot	51
9.2.	Chyby měření	52
9.3.	Standardní nejistota	53
9.4.	Rozšířená nejistota měření.....	55
10.	Současný stav tvorby nových plánů měření na souřadnicových měřicích strojích pro nové díly	57
10.1.	Vytváření metodiky pro stanovení způsobilosti měřidla	57
10.2.	Vytváření metodiky pro stanovení vhodnosti měřicího procesu dle metodiky VDA 5	61
11.	Metodika pro ověřování způsobilosti měřicích programů	62
11.1.	Přeměření současných programů	62
11.2.	Změření součástí na přesnějším stroji.....	62
11.3.	Vypočtení hodnot c_g a c_{gk} pro jednotlivé měřené charakteristiky.....	63
11.4.	Vypočtení hodnot % GR&R, % Q_{MS} a % Q_{MP} pro jednotlivé měřené charakteristiky	63
11.5.	Analýza výsledků.....	64
12.	Ověření způsobilosti a vhodnosti měřicího programu pro měření hlav válců bloku motoru 1.0 TSI EVO	65
12.1.	Volba parametrů experimentu.....	65
12.2.	Měření součástí na stroji Zeiss Prismo Ultra	66
12.3.	Měření součástí na stroji Zeiss Prismo 7	67
12.4.	Zpracování naměřených dat	67
12.5.	Analýza získaných výsledků.....	70
12.6.	Získané poznatky o měřicím procesu a systému.....	79
13.	Úprava programu pro nasazení v tzv. chytrém kontrolním měrovém plánu.....	81
13.1.	Výchozí stav programů	81
13.2.	První způsob úpravy programu	83

Optimalizace plánu měření z hlediska kompatibility se systémy konceptu průmyslu 4.0

13.3.	Druhý způsob úpravy programu	85
13.4.	Třetí způsob úpravy programu	86
13.5.	Závěrečná diskuse metodiky úprav programů pro nasazení v tzv. chytrém kontrolním měrovém plánu	88
14.	Závěr.....	89
15.	Zdroje	90
16.	Seznam obrázků, tabulek a zkratk	95
17.	Příloha č. 1: Manuál pro tvorbu měřicích programů v softwaru Zeiss Calypso	99

1. Úvod

Při výrobě strojních součástí probíhá souběžně s výrobou i jejich kontrola na souřadnicových měřicích strojích (CMM). Každá kontrolovaná součást pak má vypracovaný vlastní měřicí program, podle kterého souřadnicový měřicí stroj při měření postupuje. U měřicích programů však dosud v rámci firmy Škoda Auto a.s. nebyla posuzována ani jejich způsobilost, ani jejich vhodnost. Tato práce navrhne metodiku, dle které by tyto vlastnosti měřicích programů měly být posuzovány.

Při velkém množství různých kontrolovaných součástí a s tím spojeným i velkým množstvím měřicích programů nastává také problém, že neexistuje jednotná koncepce výstavby programů a ty se od sebe mohou značně lišit. Tato záležitost může značně prodloužit proces měření a tím pádem snížit i jeho produktivitu. Pokud je potřeba přeměřit jen určité prvky na vyrobené součásti (například při podezření na pouze jeden kazový nástroj), musí stále proběhnout celý měřicí program, jelikož nejsou měřené prvky nijak rozděleny dle společných charakteristik. Tím pádem se součást přeměřuje například celou 1 hodinu místo pouze 10 minut potřebných na změření pouze vybraných prvků, čímž se snižuje produktivita měření. V práci bude navržena metodika pro výstavbu programů a vhodné třídění prvků do skupin dle společných charakteristik.

2. Souřadnicové měření

2.1. Souřadný systém

Souřadný systém se používá k přesnému prostorovému popisu jednotlivých geometrických elementů a všech jejich bodů. Důležitým základem každého souřadného systému je jeho počátek. Vůči počátku pak můžeme porovnávat jednotlivé body, ale i elementy, které vzniknou matematickým výpočtem. Této vlastnosti využívají CMM stroje, které nejen že provádějí rozměrovou analýzu dílu, ale zároveň v daném souřadném systému zajišťují i navigaci snímacího systému stroje, který zajišťuje extrakci bodů z dílu.

U prostorových souřadných systémů je poloha bodů popsána pomocí 3 základních údajů. Např. u kartézské soustavy souřadnic jsou to vzdálenosti od počátku ve třech osách X, Y a Z, u cylindrické soustavy je to vzdálenost, úhel a souřadnice v ose Z atd. (podrobně jsou jednotlivé soustavy souřadnic zpracovány v kapitolách 2.1.3. až 2.1.5. níže).

Na CMM rozlišujeme dva souřadné systémy – souřadný systém stroje a souřadný systém součásti.

Soustavy souřadnic rozlišujeme tři hlavní:

- Kartézská soustava souřadnic
- Sférická soustava souřadnic
- Cylindrická soustava souřadnic

[2]

2.1.1. Souřadný systém stroje

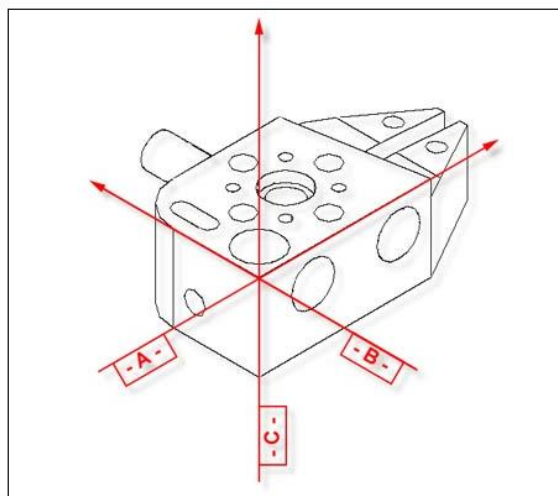
Jedná se o souřadný systém, ve kterém jsou osy systému vztaženy k samotnému měřicímu stroji. Obvykle (u strojů s kartézskou soustavou souřadnic) je osa X orientována, při pohledu na stroj zepředu, zleva doprava, osa Y je orientována zepředu dozadu a osa Z je orientována shora dolů, respektive zdola nahoru, kolmo k ostatním dvěma osám. Při měření na souřadnicovém měřicím stroji se tento souřadný systém nepoužívá, jelikož souřadný systém stroje je vztažen k nějakému pevnému bodu v rámci pracovního prostoru (například je počátek umístěn v levém horním rohu pracovního prostoru). Všechny naměřené hodnoty by pak byly vztaženy k tomuto jednomu bodu poměrně daleko od součásti a toto by bylo jednak nepřehledné, jednak by při počítání s těmito hodnotami mohlo docházet k chybám. Všechny

hodnoty, například souřadnice [3; 1; 0,5] a [4; 7; 3], by byly zvětšeny o určitou konstantu, čímž by výsledné souřadnice byly poměrně velké a nepřehledné hodnoty. Pro náš příklad by se získaly např. výsledné souřadnice [1576; 698,3; 84,85] a [1577; 704,3; 87,35]). Z tohoto důvodu se při měření na souřadnicovém měřicím stroji používá souřadný systém součásti, kde jsou všechny prvky vztaženy k jednomu bodu na součásti, jehož vztah k souřadnému systému součásti je jasný a případný přepočítání na souřadný systém součásti je tak možný. [2][3]

2.1.2. Souřadný systém součásti

Souřadný systém součásti se při souřadnicovém měření naopak využívá. Pro tento souřadný systém je charakteristické, že se souřadný systém vyrovnává vůči pevně stanovenému bodu na měřené součásti. (Jako příklad můžeme vidět vyrovnání souřadného systému na roh součásti na obrázku č. 1 níže.) Způsobů tohoto vyrovnání je několik, nejčastěji používanou metodou vyrovnání je tzv. metoda 3-2-1. Podrobněji je vyrovnání součásti touto metodou popsáno v kapitole 7.5. Všechny následně měřené body jsou tedy vztahovány k tomuto námi dříve zvolenému „nulovému“ bodu.

V současnosti si stroj, respektive software, na základě prvků zvolených pro vyrovnání a 3D CAD modelu při opakovaném měření přesné souřadnice těchto prvků změří sám, aby si mohl dopočítat počátek souřadného systému, ve kterém měří, a jeho vztah k souřadnému systému stroje. Pořád je ale třeba počítat s tím, že pokud je měřen úplně nový měřicí program, respektive je měřena zcela nová součást, je třeba jednotlivé senzory k požadovaným prvkům navést ručně. (Stroj nemá tušení, kde je součást alespoň přibližně (např. ± 1 mm) upevněna, je třeba mu toto sdělit.) [2] [3]



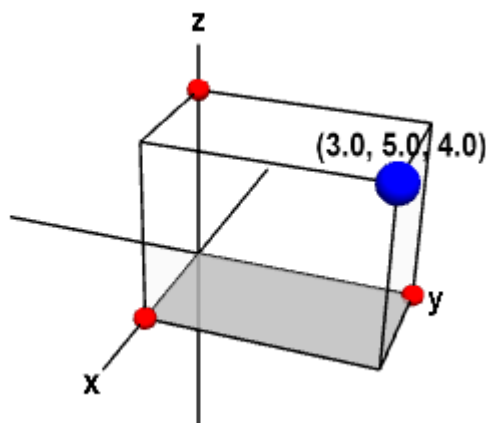
Obrázek 1: Vyrovnání součásti v souřadném systému součásti [3]

2.1.3. Kartézská soustava souřadnic

V kartézské soustavě souřadnic jsou všechny tři souřadné osy na sebe navzájem kolmé. Velikost jednotky na osách se obvykle volí stejná, není to však pravidlo. Osy X a Y leží zpravidla v horizontální rovině, osa Z je vertikální. V současnosti se používá pravotočivá soustava souřadnic. Mimo osy jsou také definovány (souřadné) roviny. Tyto jsou vymezeny vždy dvěma osami, podle kterých se i příslušně jmenují. (Například rovina xy zvýrazněná na obrázku č. 2 níže.)

Souřadnice měřeného bodu $[X; Y; Z]$ nám tedy udávají vzdálenost od počátku soustavy souřadnic po řadě v jednotlivých osách. Pořadí souřadnic je uspořádanou trojicí.

Kartézská soustava souřadnic je ze všech zde zmiňovaných soustav souřadnic tou nejrozšířenější a nejpoužívanější. [4]

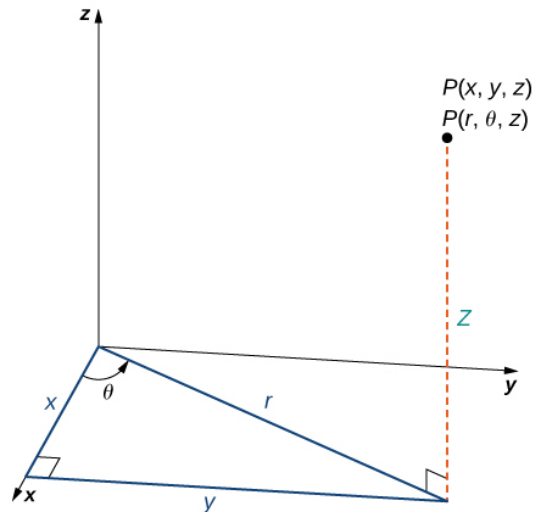


Obrázek 2: Kartézská soustava souřadnic s vyznačeným bodem a rovinou [4]

2.1.4. Cylindrická soustava souřadnic

Jako se kartézská soustava souřadnic převede z dvojrozměrného světa do trojrozměrného přidáním jedné osy z, stejně se může převést soustava polárních souřadnic z dvojrozměrného světa do trojrozměrného taktéž přidáním kolmé osy. Vznikne nám cylindrická (válcová) soustava souřadnic.

V cylindrické soustavě souřadnic je každý bod popsán uspořádanou trojicí (r, θ, z) (pro náš příklad). Dvojice souřadnic r a θ popisují polohu bodu v polárních souřadnicích v rovině xy, souřadnice z je souřadnicí na ose Z stejně jako u kartézské soustavy. Znázornění situace pro bod P je na [obrázku č. 3](#) níže. [5]

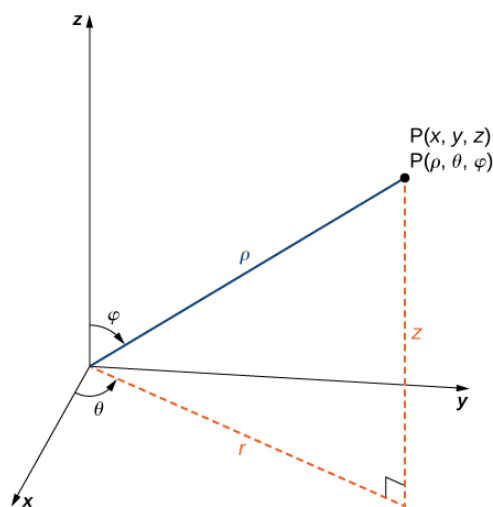


Obrázek 3: Identifikace bodu v cylindrické soustavě souřadnic [5]

2.1.5. Sférická soustava souřadnic

U kartézské soustavy souřadnic je popsána poloha bodu pomocí trojice vzdáleností, u cylindrické soustavy pomocí dvou vzdáleností a jednoho úhlu, u sférické soustavy je poloha bodu popsána pomocí dvou úhlů a jedné vzdálenosti.

Polohu bodu P ve sférické soustavě souřadnic popisuje uspořádaná trojice (ρ, θ, φ) , kde ρ udává vzdálenost popisovaného bodu od počátku soustavy souřadnic, θ (totožné jako u cylindrické soustavy) popisuje velikost úhlu, který svírá kladná poloosa X s kolmým průmětem spojnice bodu P a počátku soustavy souřadnic do roviny xy a φ popisuje velikost úhlu, který svírá kladná poloosa Z se spojnicí bodu P a počátku soustavy souřadnic. Na obrázku č. 4 je znázorněn popis bodu ve sférické soustavě souřadnic. [5]

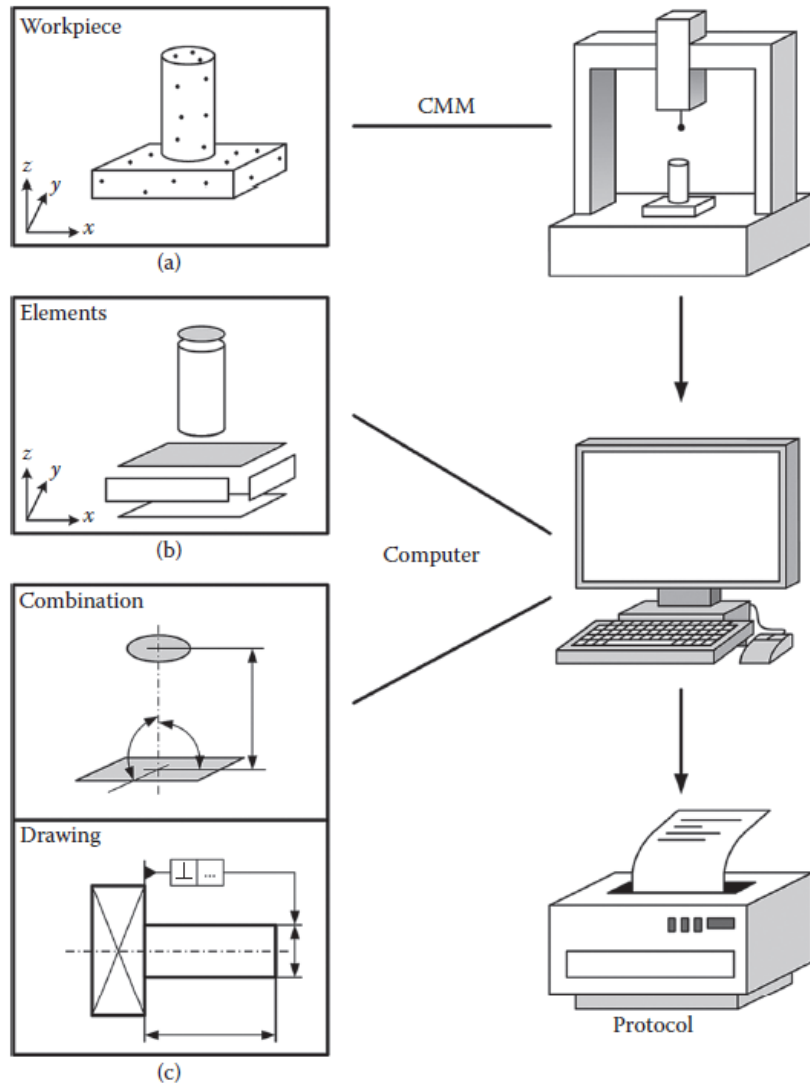


Obrázek 4: Identifikace bodu ve sférické soustavě souřadnic [5]

3. Souřadnicové měřicí stroje

Souřadnicové měřicí stroje jsou široce využívány tam, kde je třeba přesné kontroly dílů. Souřadnicové měřicí stroje mohou měřit v rozličných souřadných systémech a soustavách souřadnic, viz kapitola 2.1. Na obrázku č. 5 níže je znázorněn obvyklý průběh měření na souřadnicovém měřicím stroji. Toto měření sestává z kroků:

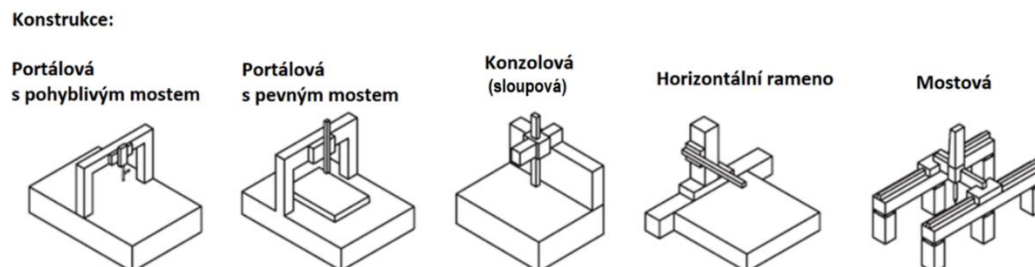
- Volba vhodné techniky souřadnicového měření pro danou aplikaci
- Vhodná volba upnutí dílu na souřadnicový měřicí stroj
- Příprava měřicího programu pro virtuální součást
- Skutečná součást je změřena na souřadnicovém měřicím stroji, souřadnice jednotlivých bodů získané senzory snímacího systému jsou poté přeneseny do počítače (Obrázek 5a)
- V počítači jsou z mraku bodů vypočítány příslušné geometrické elementy a jejich vlastnosti (velikosti, umístění, orientace, aj.) (Obrázek 5b) Pro výpočet prvků se používají rozličné matematické algoritmy, nejpoužívanější například Gaussův element, minimální opsaný čtverec, maximální vepsaný čtverec, ...
- Následně jsou vyhodnoceny příslušné geometrické tolerance a odchylky pomocí porovnání skutečných a výkresových rozměrů (Obrázek 5c), je též vygenerován výstupní protokol. [6]



Obrázek 5: Měření na souřadnicových měřicích strojích [6]

4. Rozdělení souřadnicových měřicích strojů

Souřadnicové měřicí stroje se dle typu konstrukce rozdělují na několik druhů. Jednotlivé konstrukce souřadnicových měřicích strojů budou popsány v této kapitole. Grafické znázornění jednotlivých druhů konstrukcí je na obrázku č. 6 níže. [6]



Obrázek 6: Rozdělení souřadnicových měřicích strojů dle konstrukce [6]

4.1. Portálová konstrukce

U tohoto typu měřicího stroje je nad deskou s měřenou součástí tzv. „portál“, na kterém je připevněno pohyblivé rameno s měřicími sondami. Tento „portál“ může být buď pevně, nehybně upevněn ke konstrukci stroje, nebo může být pohyblivý. Dle tohoto kritéria se tedy dále souřadnicové měřicí stroje s portálovou konstrukcí dělí na dvě hlavní kategorie. [6]

4.1.1. Portálová konstrukce s pohyblivým portálem

Souřadnicový měřicí stroj s pohyblivým portálem je jedním z nejpoužívanějších druhů měřicích strojů vůbec. Tento stroj má díky své konstrukci, kdy se na samotném pohyblivém portálu navíc může pohybovat měřící hlava, dobrý přístup k měřenému objektu z mnoha stran.

Úskalím tohoto konstrukčního provedení může být fenomén tzv. krokování, jelikož se mohou dvě strany portálu pohybovat rozdílnou rychlostí, což bude mít za následek stočení portálu. Tento efekt ovlivňuje přesnost měření součásti na různých místech pracovní desky stroje. K odstranění tohoto problému může napomoci zařízení, které dokáže kontrolovat duální pohon a polohu obou stran portálu, případně zařízení, které pohání pohyblivý portál v místě jeho středové osy.

Výhodou konstrukce s pohyblivým portálem oproti sloupové konstrukci je, že díky dvěma podpůrným sloupům je významně eliminován efekt ohýbání. Konstrukce s pohyblivým portálem má také vyšší vlastní frekvence než sloupová konstrukce. Konstrukce s pohyblivým portálem je vhodná pro měření malých a středně velkých vzorků s relativně nízkou nejistotou měření. [6]

4.1.2. Portálová konstrukce s pevným portálem

Jak již bylo popsáno výše, u konstrukce s pevným portálem je portál pevně připevněn k loži měřicího stroje, pohybuje se pracovní deska stroje s upevněnou měřenou součástí. Pracovní deska stroje, ke které je připevněn měřený díl, poskytuje možnost pohybu pouze v jedné ose. Tento design eliminuje efekt krokování, což je mimo jiné jeden z důvodů, proč téměř všechny souřadnicové měřicí stroje s nejvyšší přesností dostupné na trhu používají právě tuto konstrukci.

Hlavní výhodou měřicího stroje s pevným portálem je tuhá konstrukce. Jelikož je s pracovní deskou pohybováno uprostřed a senzor je též uprostřed, je snížena chyba měření vznikající kvůli Abbého principu.

Oproti tomu jistou nevýhodou konstrukce s pevným portálem může být to, že je snížena rychlost měření, jelikož stroj musí hýbat s těžkou, nejčastěji granitovou, deskou se součástí. Kvůli tomuto aspektu je snížena produktivita měření. Nosnost desky, respektive omezení maximální hmotnosti měřené součásti, může být v některých situacích taktéž omezením. V úvahu je třeba brát též jisté prohnutí pracovní desky stroje, které, pokud není zohledněno, může ovlivnit přesnost měření. Další nevýhodou měření na tomto stroji je potřeba prodlouženého vedení/uložení pro dlouhou pracovní desku. Tím pádem zabírá stroj více místa. Stroj s pevným portálem je zobrazen na obrázku č. 7. [1] [6]



Obrázek 7: Souřadnicový měřicí stroj portálové konstrukce s pevným portálem Zeiss O-inspect 5/4/3 [28]

4.2. Sloupová konstrukce

Stroje sloupové konstrukce mají měřicí hlavu upevněnou na pohyblivém konzolovém rameni, které se pohybuje po nosníku nad měřeným výrobkem. Samotný měřený výrobek je umístěn na pevném stole. Jelikož je stůl nepohyblivý a nemá žádné ložiskové vedení, mohou být na stroji sloupové konstrukce měřeny i relativně těžké objekty, aniž by jejich hmotnost ovlivnila přesnost měření.

Sloupový měřicí stroj je velmi agilní, jelikož se během měření pohybuje v rámci stroje poměrně malá hmotnost. Toto taktéž přispívá ke zlepšení produktivity měření. Jelikož je během měření měřená součást přístupná ze tří stran, poskytuje sloupová konstrukce dobrý přístup k měřenému dílu, ale zakládání výrobků shora není ve většině případů možné.

Nevýhodou této konstrukce je efekt ohýbání způsobený převislým konzolovým ramenem nezanedbatelné hmotnosti. Konzolový design také přispívá k nižší vlastní frekvenci systému, což může být omezením pro velikost stroje. Oprava chyb je u většiny výrobců provedena pomocí softwarových korekcí.

Měřicí stroj sloupové konstrukce disponuje dlouhým stolem, ovšem s relativně malými rozsahy měření v druhých dvou osách, což z tohoto dělá stroj vhodný pro měření hlavně dlouhých, tenkých součástí. Ukázka tohoto typu měřicího stroje je na obrázku číslo 8. [6]



Obrázek 8: Souřadnicový měřicí stroj sloupové konstrukce Zeiss Caleno [29]

Jednou z modifikací sloupového souřadnicového stroje je tzv. dvouramenná konstrukce. Tyto konstrukce stroje jsou vhodné především pro měření automobilových karoserií a součástí podobných rozměrových a tolerančních hodnot.

Dvouramenný systém sestává ze dvou zrcadlově natočených horizontálních měřicích ramen, při měření se pohybují ramena na obou stranách současně, což opět umožňuje zvyšovat produktivitu měření u tohoto systému měření. Výhodami měření pomocí dvouramenné konstrukce jsou dobrý přístup k měřenému objektu z obou stran a vysoká rychlost měření. Nevýhodou této metody je především její omezená přesnost. Kvůli konzolovému designu ramen ovlivňuje měření malá dynamická tuhost soustavy a relativně velká vnesená Abbého chyba měření.

U tohoto druhu souřadnicového měřicího stroje jsou běžné velké rozsahy měření, kdy jedna osa měření je významně větší než osa druhá. Rozměry měřené součásti podél delší osy můžou dosahovat například až 25 000 mm. Ukázka tohoto typu souřadnicového měřicího stroje je na obrázku č. 9. [6]



Obrázek 9: Dvouramenný souřadnicový měřicí stroj sloupové konstrukce DEA TORO [39]

4.3. Mostová konstrukce

Pro velmi velké součásti s objemem 10 m^3 a více s relativně těsnými tolerancemi se nejvíce hodí tzv. mostová konstrukce. Základy měřicího stroje jsou navrženy jako velmi masivní konstrukce, která pomáhá zamezit průhybům a případnému narušení vlastní konstrukce

stroje. Mohou být zabudovány v zemi, aby se odstranila nákladová hrana a aby bylo možné zajet do pracovního stroje paletovým vozíkem. Základy musí být masivní též z důvodu, aby hmotnost měřeného výrobku nenarušila základy stroje a tím neovlivnila výsledky měření. Aby se předešlo efektu krokování, jsou většinou použity systémy duálního pohonu měřicích ramen. Pro eliminaci geometrického zkreslení způsobeného při nakládání a k eliminaci vlivu teploty slouží softwarové korekce/kompensace.

Výhodou mostové konstrukce, mimo velké měřitelné rozměry (např. až $25\,000 \times 6\,000 \times 4\,000$ mm), je snadný přístup k měřené součásti pro obsluhu stroje. Jelikož se pohybuje pouze horizontální nosník, je hmotnost pohybující se části relativně malá. Pro porovnání, u běžného souřadnicového měřicího stroje portálové konstrukce (Zeiss Prismo 7) je MPE ve velikosti $(1,2 + L/350)$ μm , u stroje mostové konstrukce (Zeiss CenterMax) je to $(1,5 + L/250)$ μm , kdy L je délka v mm. U běžných strojů tohoto typu je dosahováno poměrně dobrého poměru cena/výkon, ovšem pokud je požadována zvýšená přesnost, můžou se náklady zvýšit kvůli speciálním požadavkům, jako jsou např. speciální izolované základy nebo speciální struktury (např. velké granitové – žulové – bloky). Ukázka tohoto typu měřicího stroje je na obrázku č. 10. [6]



Obrázek 10: Souřadnicový měřicí stroj mostového typu Leitz PMM G [38]

5. Snímací systémy

Snímací systémy na CMM mohou být několika druhů konstrukcí a principu fungování, v zásadě se snímací systémy dělí do dvou hlavních skupin:

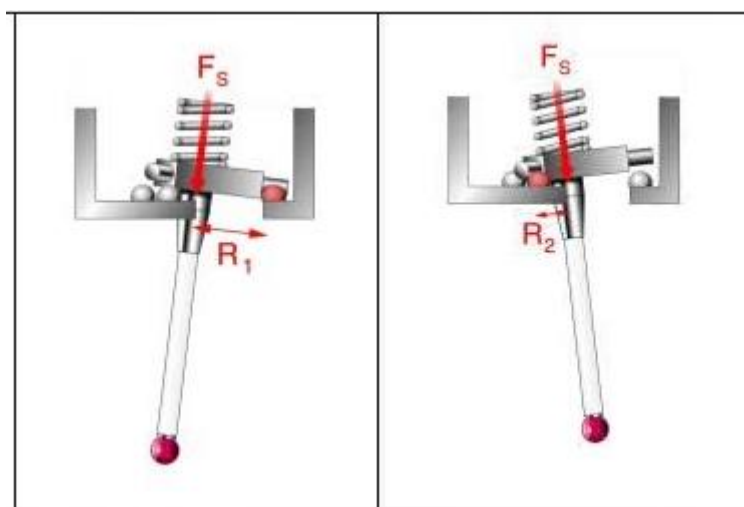
5.1. Dotykové snímací systémy

Dotykové snímací systémy sestávají z měřicí sondy, která zajišťuje kontakt s měřeným povrchem. Pokaždé, když se snímací senzor dotkne povrchu, vydá elektrický signál, který se odešle do řízení souřadnicového měřicího stroje, ten následně zaznamená přesné souřadnice bodu. Snímací dotykové systémy můžeme nadále rozdělit do tří podskupin dle principu fungování: pasivní snímací (spínací), indexovatelné snímací a aktivní snímací.

5.1.1. Spínací (pasivní) snímací dotykové systémy

Principem fungování tohoto typu dotykového snímacího systému je třibodová soustava, která je v těle sondy. Každý z těchto tří bodů funguje jako spínač. Systém je znázorněn na obrázku č. 11 níže. V současnosti bývají kuličky uvedené na obrázku již nahrazovány například piezoelektrickými prvky.

Nevýhodou tohoto typu snímacího systému může být nutnost najíždět k měřenému povrchu určitou měřicí rychlostí (běžně 5 mm/s), což může mít za následek zpomalení a navýšení času měření. Další nepřesnosti mohou vzniknout i kvůli případnému prohnutí snímačů při měření v různých směrech. V současnosti se i pro tyto nevýhody od tohoto typu snímacích dotykových systémů upouští. [23] [24]



Obrázek 11: Princip fungování spínacího dotykového systému [23]

5.1.2. Nastavitelné snímací dotykové systémy

Nastavitelné dotykové systémy, se vyznačují možným nastavením (indexováním) měřicího úhlu. Samotná dotyková sonda se tedy může oproti kolmé ose „vyklonit“ a toto umožňuje snazší měření šikmých otvorů. Nastavení může být jak manuální, tak automatické. Je-li toto nastavení úhlu manuální, nazývá se snímací hlava indexovatelná, je-li toto nastavení úhlu automatické, nazývá se snímací hlava motorická. Indexování však může do měření vnést nepřesnosti. Ukázky nastavitelných snímacích hlav jsou na obrázku č. 12 (manuální) a na obrázku č. 13 (automatické) níže. [25]



Obrázek 12: Manuální nastavitelná (indexovatelná) snímací hlava s integrovanou dotykovou spínací sondou HH-MI [25]



Obrázek 13: Automatická nastavitelná (motorická) snímací hlava s integrovanou spínací sondou Renishaw REVO 5 [31]

5.1.3. Aktivní snímací dotykové systémy

Pasivní snímací systémy využívají jednoduchý mechanismus, který umožňuje snímat vychýlení ve 3 osách. Během měření generují pružiny v měřicí sondě sílu, která odpovídá nastavenému přitlaku. Tato kontaktní síla se v průběhu měření mění, ale je vysoce opakovatelná.

Oproti tomu aktivní snímací systémy používají své motory k ovládnutí kontaktní síly mezi sondou a měřenou součástí během měření. Aktivní sonda má v každém směru paralelogram s určitou dovolenou výchylkou (většinou ± 3 mm), podle proudu procházejícího cívkou v paralelogramu se tento paralelogram vychýlí v určitém směru. Po přijetí aktivní hlavou k měřenému povrchu se mechanická dotyková sonda přetlačí do výchozí polohy a aktivní snímací hlava se ho snaží v této nulové poloze držet a upravuje přitlačnou sílu tak, aby sonda zůstala v nulovém bodě. Aktivní snímací systém umožňuje snazší měření neznámých povrchů, jelikož je možno do určité míry sledovat neznámé tvary, kontury. Na obrázku č. 14 je možno vidět příklad aktivní snímací hlavy. [26] [27]



Obrázek 14: Aktivní snímací hlava Renishaw SP80 [30]

5.2. Optické snímací systémy

Optické snímací systémy nevyužívají sondy, které by se musely měřeného povrchu dotknout, jako tomu je u výše zpracovaného dotykového snímacího systému, ale optické přístroje. V porovnání s kontaktními snímacími systémy vykazují optické systémy při měření na CMM výrazně vyšší produktivitu, jelikož je měření s nimi poměrně k dotykovým systémům

značně rychlejší. Přesnost optických měřicích strojů je však v porovnání se snímacími dotykovými systémy menší. Dle používané technologie rozdělujeme optické snímací systémy do dvou hlavních kategorií:

5.2.1. Laserové 3D skenery

Laserové 3D skenery můžeme rozdělit na dva druhy: stroje sloupového typu (laser trackery) a laserové skenovací hlavy.

Laser trackery jsou stroje, které pomocí interferujících laserových paprsků měří vzdálenost odrazového prvku v určité vzdálenosti. Při měření se pohybuje reflektorem po měřeném objektu. Měřicí hlava typu IFM vysílá dva laserové paprsky, jeden jde přímo do interferometru, druhý je vyslán směrem k reflektoru na měřené součásti a odráží se. Dle změny vlnové délky dvou paprsků v interferometru spočítá software vzdálenost měřeného objektu od hlavy, ze které jsou laserové paprsky vysílány. Ukázka skenování pomocí laser trackeru je na obrázku č. 15 níže.

Laserové hlavy jsou upínány na stroje a pracují na triangulačním principu. Laserové zařízení promítá na měřený objekt síť bodů či čar, které jsou snímány CCD kamerou pod určitým známým úhlem. Pomocí úhlu odrazu se při použití stereometrie dopočítá vzdálenost kamery od měřeného povrchu. [33]



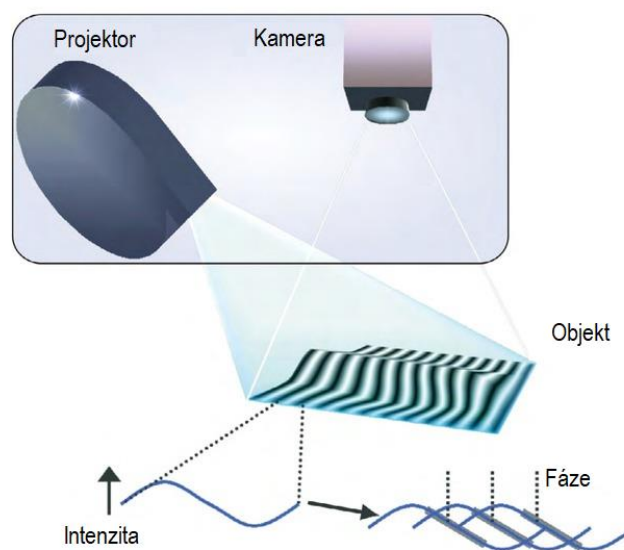
Obrázek 15: Skenování součásti pomocí laser trackeru API OT 2 core [34]

5.2.2. Optické 3D skenery

Principem skenování součásti pomocí optických 3D skenerů je pořízení snímků měřeného předmětu z několika úhlů, následně je z obrazů s pomocí metody triangulace v počítači vytvořen model měřeného předmětu. Existují dva hlavní druhy optických 3D skenerů, a těmi jsou metoda fotogrammetrie a metoda pruhové projekce.

Princip **fotogrammetrie** je nafocení povrchu součásti z různých úhlů obrazovým senzorem. Senzorem pro fotogrammetrická měření je většinou speciální digitální fotoaparát. Na měřenou součást je umístěno několik pomocných měřicích značek. Počet těchto značek závisí na složitosti výrobku. Navíc se vedle součásti umístí kalibrační tyč, jenž musí být viditelná na každé fotografii. Každá pomocná značka musí být vyfocena minimálně na třech snímcích pod různými úhly. Software následně pomocí matematických vztahů vypočítá polohy jednotlivých pomocných značek. Při vyhodnocování slouží ke konstrukci modelu i kalibrační tyč.

Při používání metody **pruhové projekce** se pomocí projektoru na snímáný objekt promítají pruhy, které pomáhají při vytváření modelu a při vykreslování tvaru povrchu. Objekt s promítnutými pruhy je zároveň snímán pomocí kamery, která je k projektoru umístěna pod známým úhlem, který se případně i mění. Ze získaných dat je v počítači vytvořen model změřené součásti. Tento princip měření není příliš vhodný pro lesklé povrchy, ty je nutné před měřením zmatnit. Taktéž průhledné povrchy jsou touto metodou neměřitelné, pro měření se dá použít nástřík křídovým sprejem. Princip pruhové projekce je znázorněn na obrázku č. 16. [33]



Obrázek 16: Princip měření metodou pruhové projekce [35]

6. Měřicí sondy

Částí kontaktního snímacího systému, která se dotýká samotného měřeného objektu, je měřicí sonda. Požadavky na měřicí sondu jsou především tuhost, tvrdost a co nejlepší dokonalost tvaru. Existuje několik druhů konstrukce sond a materiálů, ze kterých mohou být sondy vyrobeny. [7]

6.1. Konstrukční typy dotykové sondy

Existuje několik druhů konstrukce sondy, níže je seznam těch nejdůležitějších:

- Přímá sonda

Přímá sonda je nejběžnějším typem sondy používané v metrologii. Zejména kvůli své flexibilitě v používání.

- Disková sonda

Tento typ sondy je vyroben jako část koule (přesněji kulová vrstva). Tato sonda bývá využívána k měření zejména drážek a zahloubení.

- Válcová sonda

Tato sonda je, jak již název napovídá, válcové konstrukce. Má oproti ostatním druhům sond větší povrch a používá se zejména k měření tenkostěnných součástí.

- Sonda typu duté koule

Díky její dutosti se v porovnání s klasickou přímou sondou snižuje její hmotnost.

Tento typ sondy se používá pro měření hlubokých děr a hrubých povrchů.

Jednotlivé typy sond jsou zobrazeny na obrázku č. 17 níže.

Z několika přímých, případně i diskových/válcových sond či jejich kombinace, lze sestavit tzv. hvězdicovitou konfiguraci. Při použití hvězdicovité konfigurace dojde ke snížení počtu výměn měřicích hlav, což snižuje čas měření a zvyšuje produktivitu měření.

Přímá sonda



Disková sonda



**Hvězdicovitá sonda
(konfigurace)**



Válcová sonda



**Sonda typu
duté koule**



Obrázek 17: Typy měřicích sond [8]

6.2. Materiály používané na měřicí sondy

Měřicí sondy se dají vyrábět z různých materiálů, těmi hlavními jsou:

Na měřicí kuličky (příp. jiné tvary):

- Rubín

Nejpoužívanější materiál na měřicí kuličky, vhodný pro většinu běžných měřicích operací. Z rubínu mohou být vyráběny již velmi malé kuličky, od průměru 0,12 mm. Rubín není vhodným materiálem na měření součástí z hliníku a hliníkových slitin, jelikož rubín je silně afinitní k hliníku a při kontaktu s měřenou součástí z hliníkových slitin bude docházet k ulpívání hliníku na rubínové sondě, což povede k vyšší směrodatné odchylce měření a tím pádem i k větší chybě měření.

- Keramika

Keramické kuličky mají velmi malou porozitu (pórovitost). Jsou vysoce přesnou variantou měřicích kuliček, mohou být vyráběny velmi velké průměry, případně i duté (pro úsporu hmotnosti), dají se vyrábět na míru požadavkům. Keramické kuličky jsou zvláště vhodné pro skenování drsných povrchů, jako je například litina.

- Karbid wolframu

Kuličky z karbidu wolframu mají vysokou hmotnost, ale dovolují výrobu speciálních průměrů, například pro měření ozubených kol.

- Nitrid křemíku

Kuličky z nitridu křemíku jsou, stejně jako rubín, používány pro běžné měření, jsou však zvláště vhodné pro měření hliníkových povrchů.

- Diamant

Při měření kuličkou z nejtvrděšího materiálu vůbec není během skenování téměř žádné opotřebení a hromadění materiálu. Díky tomuto jsou kuličky z diamantu ideální pro měření velmi tvrdých a vysoce abrazivních součástí, jelikož v kontaktu s měřenou součástí je v každém okamžiku pouze jeden bod.

Na dřívky:

- Keramika

Keramické dřívky nabízejí vysokou tuhost a nízkou hmotnost. Díky tomuto jsou doporučeným materiálem pro dlouhé senzory/dřívky, kdy je hmotnost kritickým faktorem.

- Karbonová (uhlíková) vlákna

Karbonové dřívky představují ideální kombinaci tuhosti, hmotnosti a teplotní roztažnosti, což z tohoto materiálu dělá vhodného adepta pro dlouhé senzory/dřívky a pro náročná měření, jako je výroba s častými změnami okolní teploty.

- Karbid wolframu

Karbid wolframu poskytuje dřívům vhodnou kombinaci hmotnosti, tuhosti a teplotní roztažnosti, kdy jsou přímé dřívky z tohoto materiálu dřívky s nejvyšší použitelnou délkou.

Mimo přímé konstrukce dřívku lze též zkonstruovat dřív stupňovitý. Stupňovitý design dřívku poskytuje výhodu vyšší tuhosti dřívku, která se směrem k vrcholu senzoru redukuje. Toto zlepšení vlastností oproti přímému dřívku zlepšuje při stejné délce stabilitu senzoru, na druhou stranu je omezena měřicí délka.

Pro příklad je na obrázku č. 18 ukázána kulička z rubínu a diamantu, dřív z uhlíkových vláken a stupňovitý dřív z karbidu wolframu. [9]



Obrázek 18: Kulička z rubínu (vlevo) a z diamantu, dřík z uhlíkových vláken (vlevo) a stupňovitý dřík z karbidu wolframu [9]

7. Postup tvorby plánu měření

Proces tvorby plánu měření sestává z několika kroků:

7.1. Analýza výkresové dokumentace

Při analýze výkresové dokumentace je zjišťováno, jaké prvky je třeba změřit. Při stanovování strategie měření přihlížíme mimo jiné i k prvkům GPS – Geometrické specifikace produktu dle příslušné normy [11]. Přehledový seznam několika různých prvků GPS je na obrázku č. 19.

Geometrické tolerance		Značka
Tvaru	Přímosti	—
	Rovinnosti	▭
	Kruhovitosti	○
	Válcovitosti	⊘
	Tvaru profilu	⌒
	Tvaru plochy	⌒
Směru	Rovnoběžnosti	//
	Kolmosti	⊥
	Sklonu	∠
Polohy	Umístění	⊕
	Soustřednosti a souososti	⊙
	Souměrnosti	≡
Házení	Kruhového	↗
	Celkového	↗↘

Obrázek 19: Geometrické specifikace produktu [10]

7.2. Snímací systém

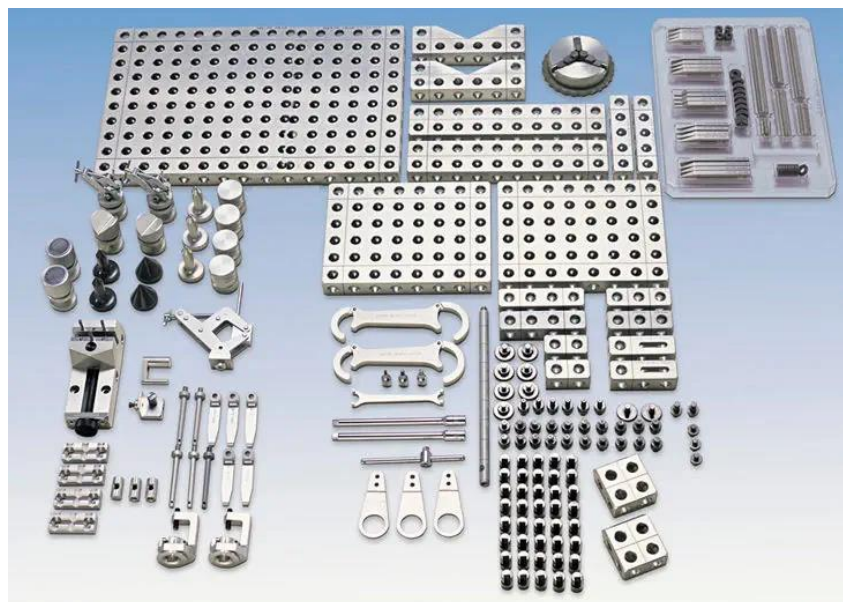
Před samotným procesem měření je důležité vhodně vybrat a nakonfigurovat snímací systém. Nejběžnějším typem snímacího systému je dotykový snímací systém, obvyklé rozmístění sond je ve stylu hvězdicovité sondy (konfigurace) z kapitoly 6.1. a obrázku č. 17, při specifických situacích však může být použita například konfigurace, kdy je sonda nakloněna o určitý úhel (pro měření šikmých děr) aj. Obecně je snaha mít co nejvíce sond v jedné snímací konfiguraci, aby se zbytečně neprodložoval čas měření při výměnách snímacích konfigurací.

7.3. Upnutí součásti

Důkladné upnutí součásti je velmi důležitým krokem v rámci procesu měření na souřadnicovém měřicím stroji. Jedním kritériem pro upnutí součásti je umístit součást tak, aby byly všechny prvky, které budou měřeny, dostupné. Druhým kritériem pro upnutí je, aby byla

součást upnuta pevně, tak, aby se v průběhu měření v žádném případě nehýbala. Případné nahýbání/posun součásti by znehodnotilo výsledky měření. Třetím aspektem, který je při upínání součásti třeba zohlednit, je sériovost zakázky. Při nedostatečném či náročném upnutí měřené součásti může být pro vysoce sériové měření mnohdy výhodnější vyrobit si jednoúčelový přípravek pro upnutí jen konkrétní měřené součásti.

Nejčastějším způsobem upínání výrobku je upínání na desku souřadnicového měřicího stroje, která v sobě má díry se závity, pomocí tzv. stavebnicových upínacích prvků, například sady upínacích prvků Alufix od firmy Witte. Příklad takové sady upínacích prvků je zobrazen na obrázku č. 20 níže. Upínání pomocí těchto prvků je založeno na principu, kdy se k sobě jednotlivé kvádry s dírami sešroubují pomocí spojovacích prvků (tzv. bajonetů) tak, aby byl získán požadovaný tvar vhodný pro dostatečné, jednoznačné a pokud možno jednoduché upnutí (respektive založení) měřeného dílu. Celá konstrukce se poté zafixuje k měřicí desce do již zmíněných děr se závity na vhodné místo tak, aby byl volný přístup ke všem měřeným prvkům. Pokud se upíná díl pro měření, o němž se ví, že bude opakováno, je vhodné si poznamenat/zapamatovat „souřadnice“/polohu děr, do nichž se celá stavebnicová konstrukce na měřicí stůl připevnila (například do díry v druhé řadě třetí zleva atp.), aby bylo i vyrovnání součásti v budoucnu rychlejší, jelikož stroj bude vědět přibližnou polohu prvků důležitých pro vyrovnání. [12]



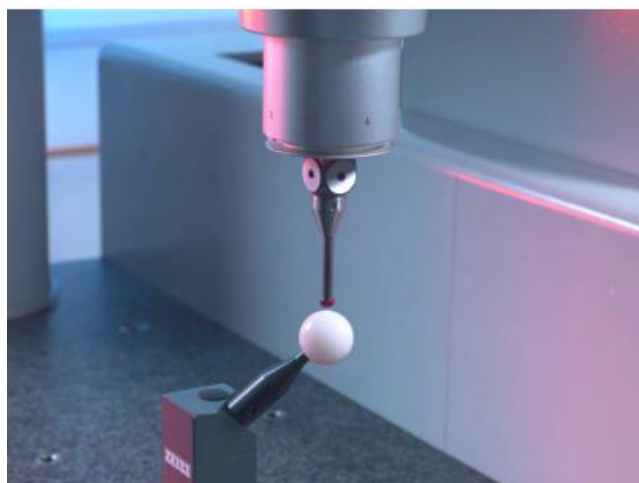
Obrázek 20: Upínací prvky Alufix od firmy Witte [13]

7.4. Kvalifikace snímacího systému

Kvalifikace snímače je nutná pro každou kombinaci kuličky a dřívku, která bude používána pro měření na dané součásti. Měřicí sensor se kvalifikuje pomocí kvalifikační koule (obrázek č. 21) nebo jiného známého kvalifikačního tělesa. V drtivé většině případů se však užívá kvalifikační koule. Je samozřejmostí, že při kvalifikaci snímače nutně musí být jak kulička senzoru, tak kvalifikační koule dokonale čistá.

Během procesu samotné kvalifikace je kvalifikační koule pevně spojena s měřicí deskou, poté jede kvalifikovaný snímač kolmo k povrchu kvalifikační koule v několika směrech. Pečlivá kvalifikace měřicího senzoru zlepšuje výsledky měření, například výsledky měření délkových rozměrů. V zásadě platí, že čím vyšší počet bodů se užije při kvalifikaci snímače, tím lepší pak budou výsledky kvalifikace. Při kvalifikaci snímače by také měly být zohledněny podmínky následného měření, například rychlost skenování by měla být podobná jak při kvalifikaci snímače, tak i při samotném měření.

Pro stroj je jediným známým bodem střed kvalifikační koule. Kvalifikace probíhá pomocí referenčního snímače. Po kvalifikaci pomocí referenčního snímače (zaměření kvalifikační koule tímto snímačem) získáme souřadnice $[X;Y;Z]$ středu kvalifikační koule a směrodatnou odchylku měření (chybu zaměření kvalifikační koule). Pomocí takto získané polohy kvalifikačního artefaktu je možné ručně navést jednotlivé kvalifikované snímače a získat tak geometrický vztah mezi polohou středu referenčního snímače a polohou kvalifikovaného snímače (včetně chyby kvalifikace). Kvalifikační koule je běžně o průměru 30 mm a je vyrobena z keramiky, jakožto materiálu s nízkou teplotní roztažností a velkou tvrdostí a pevností. [14] [15]



Obrázek 21: Kvalifikační koule [15]

7.5. Vyrovnání součásti

Při vyrovnání součásti ustavujeme souřadný systém součásti. Cílem je tedy zbavit měřenou součást všech jejích 6 stupňů volnosti. Za normálních okolností se může součást jednat otáčet kolem 3 os x , y , z (rotační stupně volnosti), jednat se též může posunovat ve 3 osách x , y , z (translační stupně volnosti). Odtud tedy již zmiňovaných 6 stupňů volnosti. Cílem při ustavování souřadného systému součásti je tedy součást „zafixovat“ jednoznačně jednat proti otáčení se ve všech osách, jednat proti jakémukoliv posunu v kterékoliv ose.

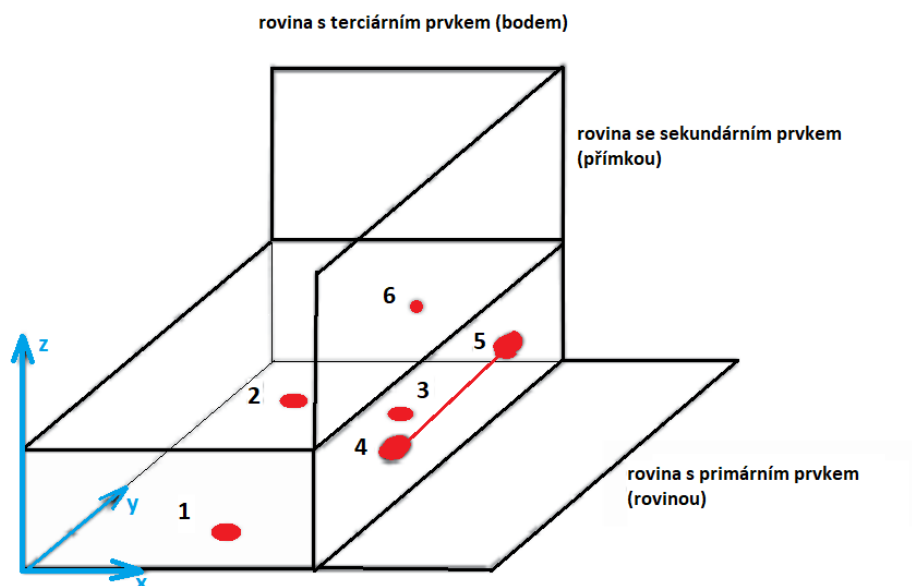
Nejběžnějším způsobem vyrovnání je tzv. *Metoda 3-2-1*. Při vyrovnání pomocí této metody se postupně odebere všech šest stupňů volnosti pomocí třech prvků, typicky pomocí trojice rovina, přímka, bod. Vyrovnání je vysvětleno také na příkladu z obrázku č. 22.

V prvním kroku se odeberou tři stupně volnosti pomocí nadefinování roviny měřené součásti. Při nadefinování roviny (která leží na měřené součásti) se odeberou součásti dva rotační stupně volnosti (součást se již nemůže otáčet kolem dvou os – dle obrázku č. 22 jde o osy x a y) a jeden translační stupeň volnosti (součást se již nemůže pohybovat podél jedné osy – dle obrázku č. 22 je součást zafixována v ose z).

Druhým prvkem, který se definuje, je přímka. Při nadefinování přímky na součásti se odeberou další dva stupně volnosti – jeden rotační (součást se již nemůže otáčet kolem své poslední osy – dle obrázku č. 22 jde o osu z) a jeden translační (součást se již nemůže pohybovat podél druhé osy – dle obrázku č. 22 jde o osu x).

Součásti zbývá poslední stupeň volnosti – translační podél osy y . Tento stupeň volnosti se odebere pomocí nadefinování bodu (na obrázku č. 22 se jedná o bod č. 6).

Po provedení takového vyrovnání je součást již zbavena všech stupňů volnosti a je tak v prostoru jednoznačně definována – a tím i souřadný systém součásti. [16] [17]



Obrázek 22: Vyrovnání pomocí metody 3-2-1 [16]

7.6. Sběr dat

Po analýze výkresu, přípravě upnutí a vyrovnání součásti a přípravě měřicích senzorů na měření můžeme přejít k samotnému sběru dat. Při sběru dat měřicí senzor dle pokynů softwaru kontroluje naprogramované prvky. Může měřit dvě skupiny prvků. Prvním typem jsou obecné tvarové plochy, druhým typem jsou geometrické elementy. Tabulka č. 1 ukazuje přehled, kolik měřených bodů je minimálně třeba pro nadefinování některých jednoduchých geometrických prvků.

Geometrický prvek	Minimální počet měřených bodů
bod	1
přímka	2
rovina	3
kružnice	3
válec	5
kužel	6
koule	4
elipsa	5
obdélník	5

Tabulka 1: Minimální počet měřených bodů pro geometrické prvky [18]

7.7. Vyhodnocení dat

Po naměření dat software (např. SW Calypso) dopočítá požadované prvky a následně u všech prvků, ať už přímo změřených či dopočítaných, porovná získané výsledky s požadavky, které byly zadány ve výkresové dokumentaci (např. toleranční pole díry, maximální hodnota rovinnosti, ...).

7.8. Tvorba protokolů

Takto získané výsledky i s jejich vztahem k požadavkům (například číselné hodnoty tolerance) jsou posléze k prohlédnutí jak v samotném počítačovém programu, tak je lze i vyexportovat ve formě protokolu, případně grafického výstupu (například znázornění hodnoty kruhovitosti/naměřeného průměru).

8. Hodnocení procesu měření

Po vypracování měřicího programu by mělo následovat posouzení způsobilosti a vhodnosti procesu měření. Způsob, jímž jsou tyto dvě vlastnosti měřicího procesu posuzovány, jsou popsány v této kapitole.

8.1. Hodnocení způsobilosti měřidla dle metodiky MSA

Posuzování způsobilosti měřidla dle MSA (Measurement Systems Analysis [36]) lze rozdělit do tří částí, respektive postupů:

- Postup 1
- Postup 2
- Postup 3

8.1.1. Postup 1

Postup 1 probíhá dle diagramu na obrázku č. 23:

V první fázi *postupu 1* je zkontrolováno, zda je rozlišení měřicího zařízení dostatečné pro daný měřicí proces. Rozlišení měřicího zařízení by mělo být menší nebo rovno 5 % tolerance nejmenšího měřeného rozměru.

Následně je program několikrát přeměřen. Ideální počet měření je 10 a více. Po přeměření součásti a získání naměřených dat je z těchto dat vypočten aritmetický průměr a směrodatná odchylka měření. Tyto vypočtené veličiny následně slouží pro výpočet koeficientů c_g a c_{gk} :

Koeficient způsobilosti měřidla c_g

Koeficient (index) způsobilosti měřidla c_g se vypočítá dle vzorce (metodika dle Bosche):

$$c_g = \frac{0,2 * T}{6 * s}; c_g \geq 1,33, \quad (1)$$

kde T je tolerance měřeného prvku a s je směrodatná odchylka naměřených hodnot:

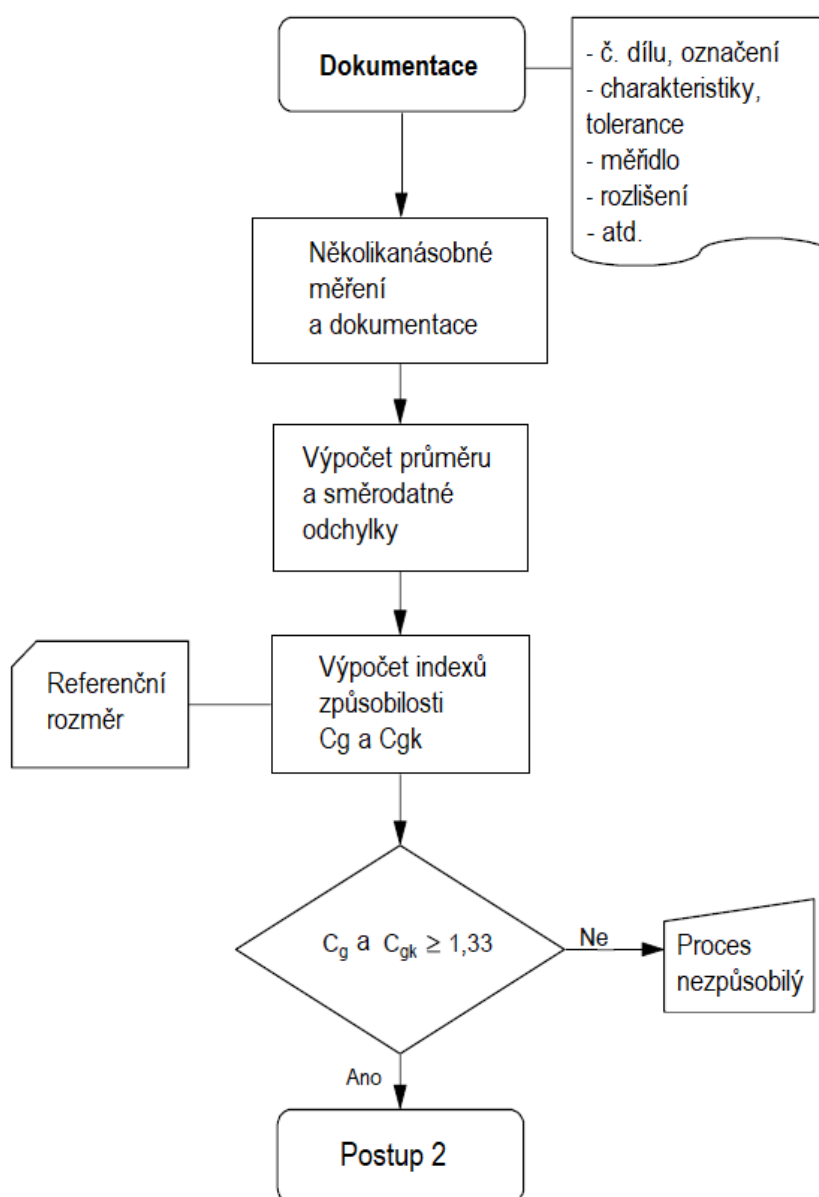
$$T = HMR - DMR; s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (2)$$

kde HMR je horní mezní rozměr, DMR je dolní mezní rozměr, n je počet naměřených hodnot, x_i je hodnota i -té naměřené hodnoty, \bar{x} je aritmetický průměr naměřených hodnot:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

(3)

Aby byl proces měření způsobilý z hlediska způsobilosti měřidla, musí být hodnota koeficientu c_g větší než nebo rovna 1,33. [19]



Obrázek 23: Diagram pro Postup 1 [32]

Minimální (kritický) index způsobilosti měřidla c_{gk}

Minimální index způsobilosti měřidla c_{gk} již posuzuje výsledky nejen z hlediska způsobilosti procesu měření, ale zároveň i z hlediska jejich strannosti. Vypočítá se dle rovnice č. 4 (metodika dle Bosche):

$$c_{gk} = \min\left(\frac{\bar{x} - (T - 0,1\Delta)}{3s}, \frac{(T + 0,1\Delta) - \bar{x}}{3s}\right); c_{gk} \geq 1,33, \quad (4)$$

kde \bar{x} je aritmetický průměr naměřených hodnot, T je referenční hodnota měřeného rozměru změřená o minimálně jeden řád přesnějším strojem (případně přesnějším strojem, který se pro dané případy měření používá jako referenční), Δ je šířka tolerančního pole měřeného rozměru a s je směrodatná odchylka měření.

Aby byl proces měření způsobilý z hlediska strannosti měření, musí být hodnota indexu c_{gk} opět větší než nebo rovna 1,33. [19]

Pokud vyjdou hodnoty obou indexů větší nebo rovny hodnotě 1,33, můžeme pokračovat do *postupu* 2. Pokud nebudou hodnoty větší nebo rovny 1,33, tedy budou menší, proces je prohlášen za nezpůsobilý. [32]

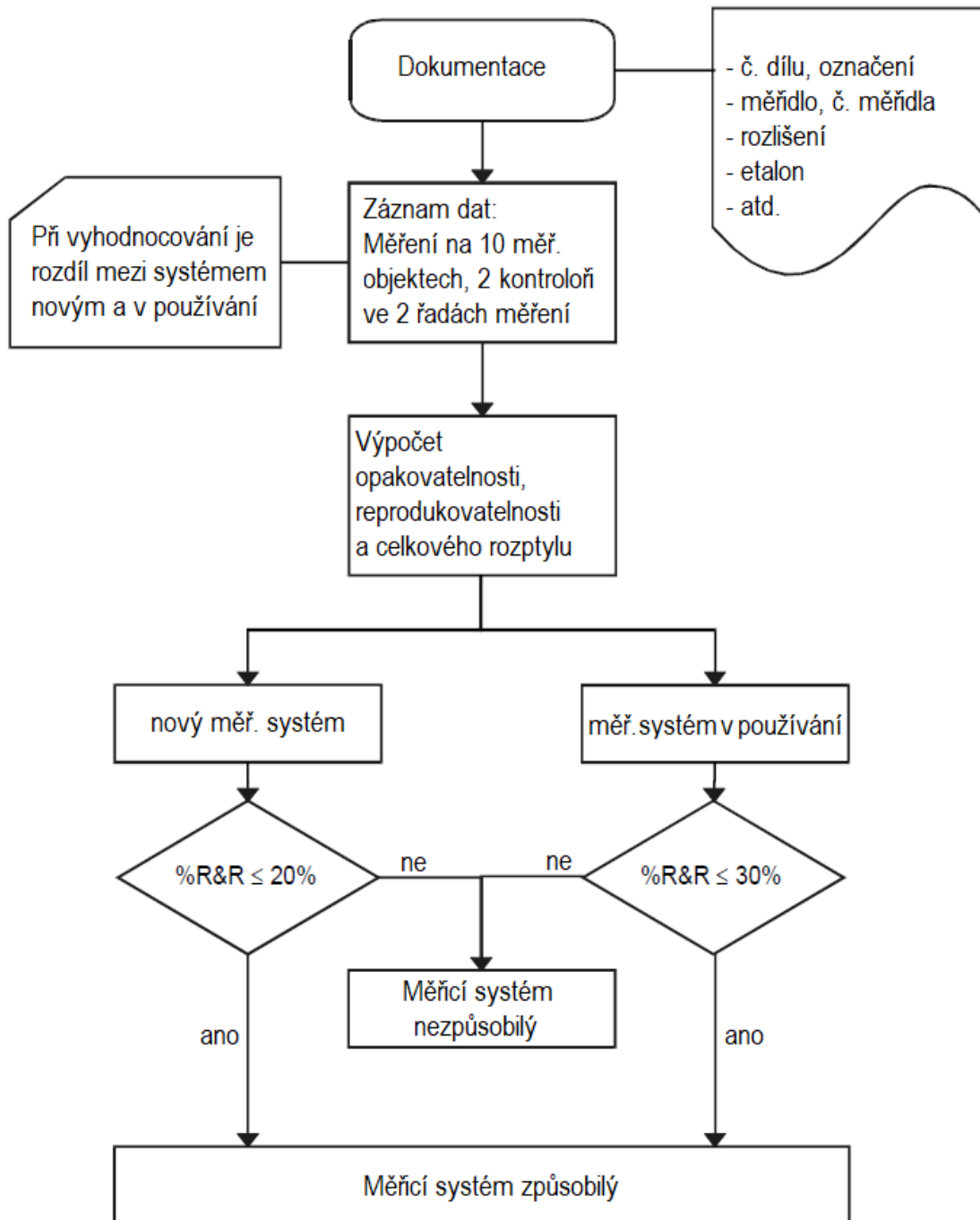
8.1.2. Postup 2

Postup 2 následuje po *postupu* 1 a zohledňuje vliv obsluhy na měřicí proces. Při tomto postupu je součást přeměřena několika kontrolory ($k \geq 2$) alespoň 10×. Se získanými daty je následně pracováno za účelem vypočítání hodnoty GR&R (gage repeatability & reproducibility) – opakovatelnosti a reprodukovatelnosti. Na obrázku č. 24 je diagram s kroky pro *postup* 2.

ARM (Average-Range-Method)

Při provádění *postupu* 2 dle metodiky ARM (metoda střední hodnoty a rozsahu) je na začátku posuzování stanoven počet kontrolorů ($k \geq 2$), počet kontrolovaných součástí ($n \geq 5$) a počet měření na jednoho kontrolora ($r \geq 2$). Je vyžadováno, aby součin $k \cdot r \cdot n$ byl větší než nebo roven 30, tj. $k \cdot r \cdot n \geq 30$. Standardní případ je situace s 2 kontrolory, 10 díly a 2 řadami měření na kontrolora.

Po naměření všech součástí všemi kontrolory je vypočítána průměrná hodnota \bar{x}_n pro každého kontrolora a každou měřenou součást a průměrné rozpětí \bar{R}_n pro každého kontrolora a každou měřenou součást.



Obrázek 24: Diagram pro postup 2 [32]

Optimalizace plánu měření z hlediska kompatibility se systémy konceptu průmyslu 4.0

Po získání všech průměrů \bar{x}_n a \bar{R}_n je vypočítána opakovatelnost systému měření EV . Opakovatelnost systému měření se vypočítá dle rovnice č. 5:

$$EV = K_1 \cdot \bar{\bar{R}}; \quad (5)$$

kde K_1 je tabulková konstanta ([32], str. 58) a $\bar{\bar{R}}$ je průměr z rozpětí.

Následně je vypočítána reprodukovatelnost měřicího systému AV . Spočítá se dle následujících vztahů:

$$\bar{x}_{diff} = \bar{x}_{max} - \bar{x}_{min} \quad (6)$$

$$AV = K_2 \cdot \bar{x}_{diff}; \quad (7)$$

kde K_2 je tabulková konstanta ([32], str. 58).

Po získání hodnot opakovatelnosti měřicího systému EV a reprodukovatelnosti měřicího systému AV je vypočtena opakovatelnost a reprodukovatelnost $GR\&R$, respektive $\% GR\&R$ dle rovnic č. 8 a 9:

$$GR\&R = \sqrt{EV^2 + AV^2} \quad (8)$$

$$\% GR\&R = \frac{GR\&R}{TOL} \cdot 100 [\%]; \quad (9)$$

kde TOL je tolerance měřeného rozměru.

Získané hodnoty $\% GR\&R$ jsou následně porovnány s požadavky na měřicí systém, tedy $\% GR\&R \leq 20 \%$ pro nové systémy, respektive $\% GR\&R \leq 30 \%$ pro systémy již používané. Pokud měřicí systém podmínce vyhovuje, měřicí systém je způsobilý. Pokud měřicí systém podmínce nevyhovuje, měřicí systém není způsobilý. [32]

ANOVA (Analysis of Variance)

ANOVA – analýza rozptylu – je oproti metodě ARM statisticky přesnější. Vyžaduje však použití statistického vybavení a statistických programů. V této kapitole bude vysvětleno zpracování výsledků dle metody ANOVA pro *postup 2*.

- P kontrolorů používá měřidlo ke změření T součástí při W opakovaných měřeních.

- Pro výpočet je zavedeno:

Průměr „kontrolor p měří součást t s opakováními“:	\dot{x}_{pt}
Průměr měření kontrolora p :	\dot{x}_p
Průměr měření části t :	\ddot{x}_t
Celkový průměr:	\bar{x}

- Součet čtverců odchylek mezi p kontrolory:

$$\sum P = t \cdot w \cdot [(\dot{x}_1 - \bar{x})^2 + (\dot{x}_2 - \bar{x})^2 + \dots + (\dot{x}_p - \bar{x})^2] \quad (10)$$

se stupněm volnosti $f_{IV} = p - 1$.

- Součet čtverců odchylek mezi t částmi:

$$\sum T = p \cdot w \cdot [(\ddot{x}_1 - \bar{x})^2 + (\ddot{x}_2 - \bar{x})^2 + \dots + (\ddot{x}_t - \bar{x})^2] \quad (11)$$

se stupněm volnosti $f_{III} = t - 1$.

- Součet čtverců odchylek přes interakce (p měří t):

$$\sum PT = w \cdot \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^t (\dot{x}_{ij} - \dot{x}_i - \ddot{x}_j + \bar{x})^2 \quad (12)$$

se stupněm volnosti $f_{II} = (p - 1) \cdot (t - 1)$.

- Součet čtverců odchylek v rozsahu opakování, kdy kontrolor p měří část t :

$$\sum E = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^t \sum_{k=1}^w (x_{ijk} - \bar{x}_{ij})^2 \quad (13)$$

se stupněm volnosti $f_I = p \cdot t \cdot (w - 1)$.

- Součet čtverců odchylek přes všechny naměřené hodnoty je:

$$\sum P + \sum T + \sum PT + \sum E. \quad (14)$$

- Následující rozptyly jsou vypočítány pro analýzu měřicího systému. Je zde rozlišeno, zda vliv interakce je či není významný.

- Rozptyly jsou podle toho vypočítány z kvocientu součtů čtverců odchylek poděleného příslušným stupněm volnosti:

$$\text{Vliv rozptylu kontrolora} \quad s_P^2 = \frac{\sum P}{f_{IV}}$$

$$\text{Vliv rozptylu částí} \quad s_T^2 = \frac{\sum T}{f_{III}}$$

V případě významné interakce

$$\text{Rozptyl interakce} \quad s_{PT}^2 = \frac{\sum PT}{f_{II}}$$

$$\text{Vliv rozptylu měřidla} \quad s_E^2 = \frac{\sum E}{f_I}$$

V případě nevýznamných interakcí

$$\text{Rozptyl ADD interakce/měřidla} \quad s_{ADD}^2 = \frac{\sum E + \sum PT}{f_I + f_{II}}$$

(15), (16), (17), (18), (19)

- **Vliv významných interakcí:**

Intervaly spolehlivosti pro úroveň $1 - \alpha$ jsou vypočítány z výrazů (20) až (23)

$$\frac{f_I}{\chi_{f_I, 1-\frac{\alpha}{2}}^2} S_E^2 \leq \sigma_E^2 \leq \frac{f_I}{\chi_{f_I, \frac{\alpha}{2}}^2} S_E^2 \quad (20)$$

$$\frac{S_E^2}{w} \left(\frac{S_{PT}^2/S_E^2}{F_{f_{II}, f_I, 1-\frac{\alpha}{2}}} - 1 \right) \leq \sigma_{PT}^2 \leq \frac{S_E^2}{w} \left(\frac{S_{PT}^2/S_E^2}{F_{f_{II}, f_I, \frac{\alpha}{2}}} - 1 \right) \quad (21)$$

$$\frac{S_{PT}^2}{tw} \left(\frac{S_P^2/S_{PT}^2}{F_{f_{III}, f_{II}, 1-\frac{\alpha}{2}}} - 1 \right) \leq \sigma_P^2 \leq \frac{S_{PT}^2}{tw} \left(\frac{S_P^2/S_{PT}^2}{F_{f_{III}, f_{II}, \frac{\alpha}{2}}} - 1 \right) \quad (22)$$

$$\frac{S_{PT}^2}{pw} \left(\frac{S_T^2/S_{PT}^2}{F_{f_{IV}, f_{II}, 1-\frac{\alpha}{2}}} - 1 \right) \leq \sigma_T^2 \leq \frac{S_{PT}^2}{pw} \left(\frac{S_T^2/S_{PT}^2}{F_{f_{IV}, f_{II}, \frac{\alpha}{2}}} - 1 \right) \quad (23)$$

- Použití vypočítaných hodnot

Měřidlo:	$VE = S_E^2$
Interakce (kontrolor měří součást):	$VW = \frac{S_{PT}^2 - S_E^2}{w}$
Operátor obsluhy:	$VP = \frac{S_P^2 - S_{PT}^2}{tw}$
Součást:	$VT = \frac{S_T^2 - S_{PT}^2}{pw}$

(24), (25), (26), (27)

- Je možno zjistit vliv jednotlivých interakcí (vynásobení konstantou 5,15 zajišťuje 99% pravděpodobnost vlivu při normálním rozdělení):

EV (rozptyl měřidla):	$EV = 5,15 \cdot \sqrt{VE}$
IA (rozptyl interakce):	$IA = 5,15 \cdot \sqrt{VW}$
AV (rozptyl operátora)	$AV = 5,15 \cdot \sqrt{VP}$
PV (rozptyl součástí)	$PV = 5,15 \cdot \sqrt{VT}$

(28), (29), (30), (31)

- *GR&R* (opakovatelnost a reprodukovatelnost měření) se vypočítá dle rovnice č. 32, % *GR&R* dle rovnice č. 33:

$$GR\&R = \sqrt{EV^2 + AV^2 + IA^2}. \quad (32)$$

$$\% GR\&R = \frac{GR\&R}{TOL} \cdot 100 [\%]; \quad (33)$$

kde *TOL* je tolerance měřeného rozměru.

Hodnoty % *GR&R* jsou po vypočtení porovnány s požadavky na měřicí systém, tedy % *GR&R* ≤ 20 % pro nové systémy a % *GR&R* ≤ 30 % pro systémy již používané. Při splnění požadavků je měřicí systém způsobilý, při nesplnění nikoliv.

- Vliv nevýznamných interakcí

$$\frac{f_I + f_{II}}{\chi_{f_I+f_{II}, 1-\alpha/2}^2} S_{ADD}^2 \leq \sigma_{ADD}^2 \leq \frac{f_I + f_{II}}{\chi_{f_I+f_{II}, \alpha/2}^2} S_{ADD}^2 \quad (34)$$

$$\frac{S_{ADD}^2}{tw} \left(\frac{S_P^2 / S_{ADD}^2}{F_{f_{III}, f_I+f_{II}, 1-\frac{\alpha}{2}}} - 1 \right) \leq \sigma_P^2 \leq \frac{S_{ADD}^2}{tw} \left(\frac{S_P^2 / S_{ADD}^2}{F_{f_{III}, f_I+f_{II}, \frac{\alpha}{2}}} - 1 \right) \quad (35)$$

$$\frac{S_{ADD}^2}{pw} \left(\frac{S_T^2 / S_{ADD}^2}{F_{f_{IV}, f_I+f_{II}, 1-\frac{\alpha}{2}}} - 1 \right) \leq \sigma_T^2 \leq \frac{S_{ADD}^2}{pw} \left(\frac{S_T^2 / S_{ADD}^2}{F_{f_{IV}, f_I+f_{II}, \frac{\alpha}{2}}} - 1 \right) \quad (36)$$

$$\frac{1}{tw} \left(\frac{f_{III}}{\chi_{f_{III}, 1-\frac{\alpha}{2}}^2} S_P^2 + (tw - 1) S_{ADD}^2 \right) \leq \sigma_P^2 + \sigma_T^2 \leq \frac{1}{tw} \left(\frac{f_{III}}{\chi_{f_{III}, \frac{\alpha}{2}}^2} S_P^2 + (tw - 1) S_{ADD}^2 \right) \quad (37)$$

- Použití vypočítaných hodnot

$$\begin{aligned} \text{Měřidlo:} & \quad VE = S_{ADD}^2 \\ \text{Operátor obsluhy:} & \quad VP = \frac{S_P^2 - S_{ADD}^2}{tw} \\ \text{Součást:} & \quad VT = \frac{S_T^2 - S_{ADD}^2}{pw} \end{aligned} \quad (38), (39), (40)$$

- Je možno zjistit vliv jednotlivých interakcí (vynásobením konstantou 5,15 zajišťuje 99% pravděpodobnost vlivu při normálním rozdělení):

$$\begin{aligned} \text{EV (rozptyl měřidla):} & \quad EV = 5,15 \cdot \sqrt{VE} \\ \text{AV (rozptyl operátora)} & \quad AV = 5,15 \cdot \sqrt{VP} \\ \text{PV (rozptyl součástí)} & \quad PV = 5,15 \cdot \sqrt{VT} \end{aligned} \quad (41), (42), (43)$$

- *GR&R* (opakovatelnost a reprodukovatelnost měření) a % *GR&R* se vypočítá dle rovnic č. 44 a 45:

$$GR\&R = \sqrt{EV^2 + AV^2} \quad (44)$$

$$\% GR\&R = \frac{GR\&R}{TOL} \cdot 100 [\%]; \quad (45)$$

kde *TOL* je tolerance měřeného rozměru.

Získané hodnoty % *GR&R* jsou následně porovnány s požadavky na měřicí systém, tedy % *GR&R* ≤ 20 % pro nové systémy a % *GR&R* ≤ 30 % pro systémy již používané. Při splnění požadavků je měřicí systém způsobilý, při nesplnění nikoliv.

[32]

8.1.3. Postup 3

Postup 3 je speciálním případem *postupu 2* a používá se pro měřicí systémy bez vlivu obsluhy (např. automatická měřicí zařízení), nebo kde je vliv obsluhy zanedbatelný. Pro zhodnocení vhodnosti měřicího zařízení se užívá index *EV*. V úvahu se berou provozní podmínky a jakékoliv vlivy s původem v měřených objektech (vlastnosti povrchu, teplotní

účinek, nečistoty aj.). Nutnou podmínku pro provedení *postupu 3* je úspěšné provedení *postupu 1*.

V rámci *postupu 3* se vybere určitý počet měřených objektů napříč celým rozsahem tolerance ($n \geq 5$) a stanoví se počet měření na objekt ($r \geq 2$), přičemž součin $r \cdot n$ musí být větší než nebo roven 20, tj. $r \cdot n \geq 20$. Standardní případ je měření 25 dílů po 2 měřeních.

Z výsledků měření se poté stanoví rozpětí pro každý měřený objekt. Následně se z těchto vypočtených rozpětí spočítá průměrná hodnota rozpětí \bar{R} . Poté je vypočtena hodnota opakovatelnosti měřicího systému EV dle rovnice č. 46.

$$EV = GR\&R = K_1 \cdot \bar{R}; \quad (46)$$

kde K_1 je tabulková konstanta ([32], str. 58) a \bar{R} je průměrné rozpětí.

Následně je vypočtena hodnota % $GR\&R$ dle vzorce:

$$\%GR\&R = \frac{EV}{TOL} \cdot 100 [\%]; \quad (47)$$

kde TOL je tolerance měřeného rozměru.

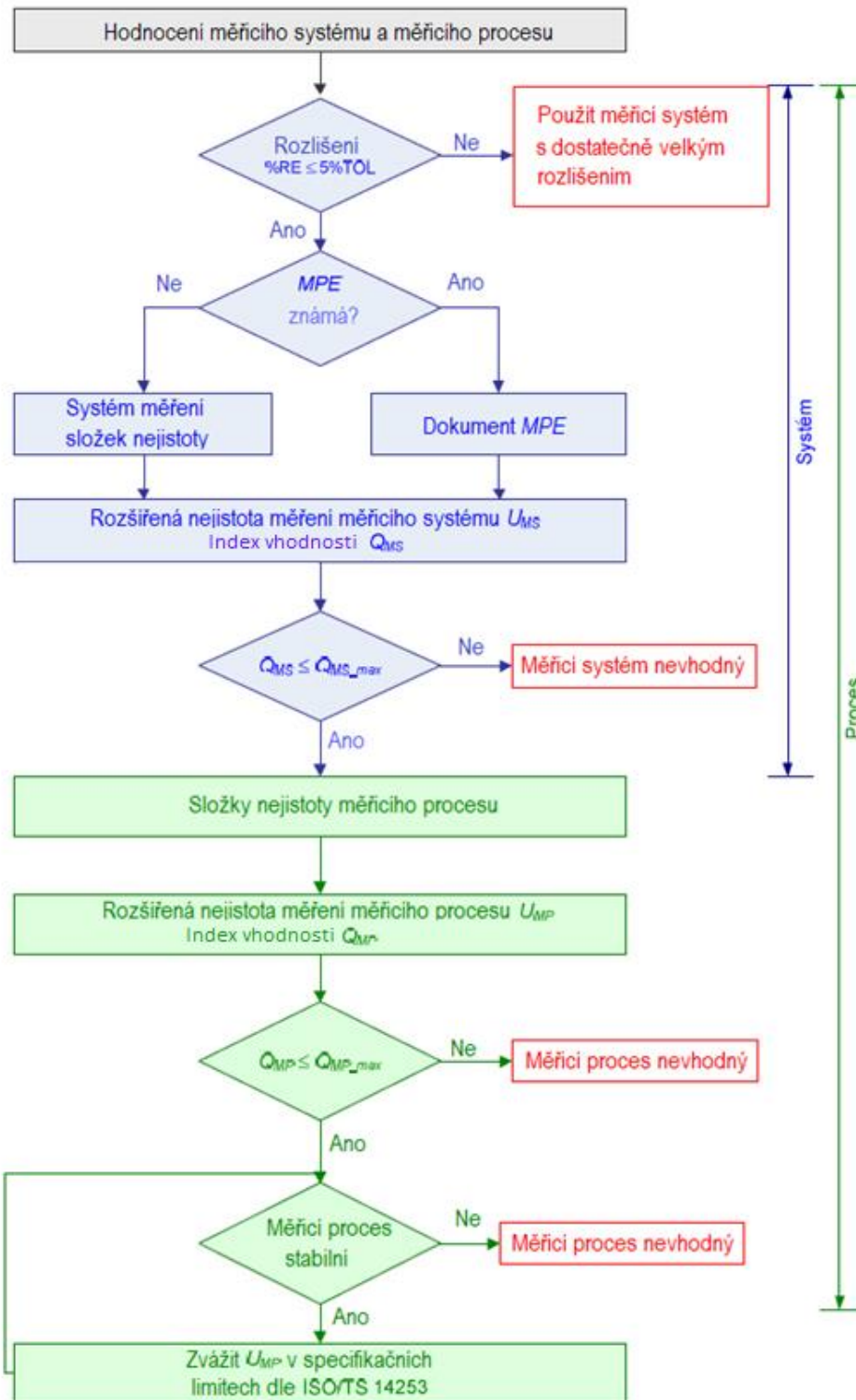
Posouzení výsledné hodnoty % $GR\&R$ poté probíhá stejně jako u *postupu 2* v kapitole 8.1.2. Pokud je hodnota menší než či rovna 20 % pro nové měřicí systémy, respektive 30 % pro používané systémy, je měřicí systém způsobilý. Pokud ne, je měřicí systém nezpůsobilý. [32]

8.2. Hodnocení vhodnosti měřicího systému a procesu dle metodiky VDA 5

Vhodnost měřicího systému a procesu se posuzuje dle metodiky VDA 5 (Verband der Automobilindustrie – viz [20]). Tato metodika hodnotí měřidlo a měřicí proces pomocí nejistot měření. Postup posuzování vhodnosti měřicího systému a procesu je zobrazen na diagramu na obrázku č. 25. Tato metodika vznikla konkrétně pro automobilový průmysl, jímž se tato práce zabývá, vychází z normy [41].

V první fázi posuzování vhodnosti měřicího systému a procesu je provedeno posouzení, zda je rozlišení měřidla/ měřicího systému dostatečné. Rozlišení musí být menší nebo rovno 5 % posuzované tolerance na součásti. Pokud není rozlišení dostatečné, měřicí systém se nedá

pro dané měření použit a je třeba použít měřicí systém s dostatečně velkým rozlišením. Pokud je však rozlišení dostatečné, může proces posuzování pokračovat k dalšímu kroku, k práci s veličinou MPE a výpočtu veličin u_{MS} , U_{MS} a Q_{MS} . [20]



Obrázek 25: Diagram pro posuzování vhodnosti měřicího systému a procesu dle VDA 5 [20]

8.2.1. $MPE, u_{MS}, U_{MS}, Q_{MS}$

Veličina MPE (maximum permissible error) – česky největší dovolená chyba měření – označuje mezní chybu měřicího systému. U většiny souřadnicových měřicích strojů je velikost MPE známa a zaručena výrobcem. Pokud je velikost MPE známa, usnadní se následný výpočet veličin u_{MS} a U_{MS} , pokud známa není, veličiny u_{MS} a U_{MS} však lze i přesto vypočítat.

Veličina u_{MS} označuje kombinovanou standardní nejistotu měřicího systému. Spočítá se dle následujících vztahů:

- Pokud je známa hodnota MPE , pak se u_{MS} spočítá dle rovnice č. 48:

$$u_{MS} = \sqrt{\frac{MPE^2}{3}} \rightarrow u_{MS} = \frac{MPE}{\sqrt{3}} \quad (48)$$

- Pokud je v měřicím systému více známých hodnot MPE , pak se u_{MS} spočítá dle rovnice č. 49:

$$u_{MS}^2 = \left(\frac{MPE_1^2}{3}\right) + \left(\frac{MPE_2^2}{3}\right) + \dots + \left(\frac{MPE_n^2}{3}\right) \rightarrow$$

$$\rightarrow u_{MS} = \sqrt{\left(\frac{MPE_1^2}{3}\right) + \left(\frac{MPE_2^2}{3}\right) + \dots + \left(\frac{MPE_n^2}{3}\right)} \quad (49)$$

- Pokud však není známa hodnota veličiny MPE , spočte se u_{MS} dle rovnice č. 50:

$$u_{MS} = \sqrt{u_{CAL}^2 + \max(u_{EVR}^2, u_{RE}^2) + u_{BI}^2 + u_{LIN}^2 + u_{MS_REST}^2}; \quad (50)$$

kde u_{CAL} je nejistota kalibrace na etalonu, u_{EVR} je opakovatelnost na etalonech, u_{RE} je rozlišení měřicího systému, u_{BI} je nejistota z bias, u_{LIN} je nejistota linearity, u_{MS_REST} je nejistota z dalších zdrojů (v rámci měřicího systému).

Veličina U_{MS} označuje rozšířenou nejistotu měřicího systému. Vypočte se dle rovnice č. 51.

$$U_{MS} = k \cdot u_{MS}; \quad (51)$$

kde k je faktor pokrytí, tabulková konstanta ([20], tab. 4, str. 39) a u_{MS} je kombinovaná standardní nejistota měřicího systému.

Veličina Q_{MS} označuje index vhodnosti měřicího systému. Spočítá se dle rovnice č. 52:

$$Q_{MS} = \frac{2 \cdot U_{MS}}{TOL} \cdot 100 [\%]; \quad (52)$$

kde U_{MS} je rozšířená měřicí nejistota měřicího systému, TOL je hodnota posuzované tolerance měřeného znaku.

Následně se porovná hodnota Q_{MS} s hodnotou maximálního přípustného indexu vhodnosti měřicího systému $Q_{MS_{max}}$:

$$Q_{MS} \leq Q_{MS_{max}}. \quad (53)$$

Pokud je hodnota Q_{MS} menší nebo rovna hodnotě $Q_{MS_{max}}$ (běžně se uvažuje $Q_{MS_{max}} = 15 \%$), lze pokračovat dále v procesu posuzování vhodnosti měřicího systému a procesu, dle diagramu na obrázku č. 25, tedy na část, kdy se posuzuje pouze měřicí proces. Pokud je hodnota Q_{MS} větší než hodnota $Q_{MS_{max}}$, měřicí systém je nevhodný.

Případně lze dopočítat i hodnotu minimální přípustné tolerance měřicího systému T_{MIN_UMS} . Hodnota této minimální přípustné tolerance se spočte dle rovnice č. 54:

$$T_{MIN_UMS} = \frac{2 \cdot U_{MS}}{Q_{MS_{max}}} \cdot 100 [\%]. \quad (54)$$

[20]

8.2.2. u_{MP}, U_{MP}, Q_{MP}

V druhé fázi postupu posuzování vhodnosti měřicího zařízení a procesu se posuzuje již jen měřicí proces.

Veličina u_{MP} označuje kombinovanou standardní nejistotu měřicího procesu. Spočítá se dle rovnice č. 55:

$$u_{MP} = \sqrt{u_{CAL}^2 + \max(u_{EVR}^2, u_{EVO}^2, u_{RE}^2) + u_{BI}^2 + u_{LIN}^2 + u_{AV}^2 + u_{GV}^2 + u_{STAB}^2 + u_{OBJ}^2 + u_T^2 + u_{REST}^2 + \sum_i u_{IAI}^2}; \quad (55)$$

kde u_{CAL} je nejistota kalibrace na etalonu, u_{EVR} je opakovatelnost na etalonech, u_{EVO} je opakovatelnost na testovací součásti bez vlivu operátora, u_{RE} je rozlišení měřicího systému, u_{BI} je nejistota z bias, u_{LIN} je nejistota linearity, u_{AV} je opakovatelnost operátorů, u_{GV} je opakovatelnost měřicích systémů, u_{STAB} je opakovatelnost napříč časem, u_{OBJ} je nejistota z nehomogenity zkoušené součásti, u_T je nejistota z teploty, u_{REST} je nejistota z dalších zdrojů, u_{IAI} je nejistota z interakce/í.

Vzorec z rovnice č. 55 zahrnuje pouze doporučený výčet nejistot dle VDA 5, v reálném procesu měření je třeba zvážit všechny možné vlivy a zdroje nejistot.

Veličina U_{MP} označuje rozšířenou měřicí nejistotu měřicího procesu. Spočítá se dle rovnice č. 56:

$$U_{MP} = k \cdot u_{MP}; \quad (56)$$

kde k je faktor pokrytí, tabulková hodnota ([20], tab. 4, str. 39) a u_{MP} je kombinovaná standardní nejistota měřicího procesu.

Veličina Q_{MP} označuje index vhodnosti měřicího procesu. Spočte se dle rovnice č. 57:

$$Q_{MP} = \frac{2 \cdot U_{MP}}{TOL} \cdot 100 [\%]; \quad (57)$$

kde U_{MS} je rozšířená měřicí nejistota měřicího procesu, TOL je hodnota posuzované tolerance měřeného znaku.

Následně je hodnota Q_{MP} porovnána s hodnotou maximálního přípustného indexu vhodnosti měřicího procesu dle rovnice č. 58.

$$Q_{MP} \leq Q_{MP_{max}}. \quad (58)$$

Pokud je hodnota Q_{MP} menší nebo rovna hodnotě $Q_{MP_{max}}$ (obvykle $Q_{MP_{max}} = 30\%$), je možno měřicí proces prohlásit za vhodný z hlediska hodnoty Q_{MP} a pokračovat v procesu dále. Pokud je však hodnota Q_{MP} větší než hodnota $Q_{MP_{max}}$, měřicí proces je prohlášen za nevhodný.

Další veličinou, kterou je možné u procesu dopočítat, je hodnota minimální přípustné tolerance měřicího procesu T_{MIN_UMS} . Spočte se dle rovnice č. 59:

$$T_{MIN_UMS} = \frac{2 \cdot U_{MP}}{Q_{MP_{max}}} \cdot 100 [\%]. \quad (59)$$

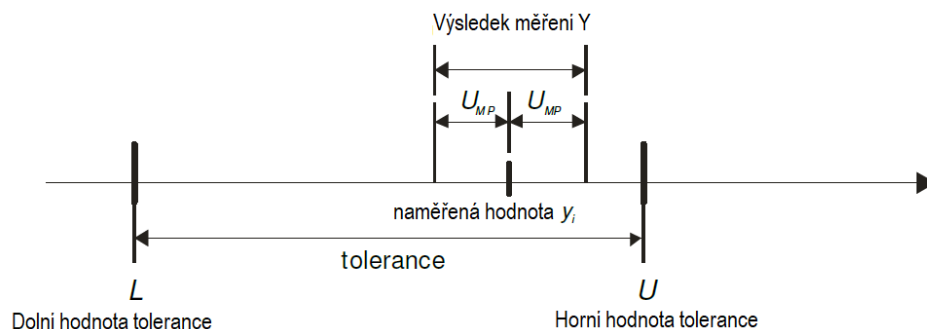
[20]

8.2.3. Posouzení měřicího procesu dle ISO/TS 14253

Pokud je po analýze indexu způsobilosti měřicího procesu prohlášen měřicí proces za vhodný, následuje posouzení měřicího procesu dle normy ISO/TS 14253 [37].

Tato norma říká, že pokud má být proces prohlášen za vhodný a stabilní, musí výsledek měření (naměřená hodnota $\pm U_{MP}$) ležet uvnitř tolerančních mezí. Znázornění tohoto posouzení je na obrázku č. 26 níže. Pokud vyhovuje měřicí proces požadavkům, je možno ho prohlásit za vhodný. Pokud měřicí proces požadavkům této normy nevyhovuje, je prohlášen za nevhodný.

[20]



Obrázek 26: Vhodný výsledek dle normy ISO/TS 14253 [20]

9. Chyby a nejistoty měření

Proces měření a jeho výsledek jsou nedělitelně spjaty s chybami a nejistotami měření. Nejistota měření je dle [40] definována jako: „*Parametr přidružený k výsledku měření, který charakterizuje rozptyl hodnot, v němž leží s určitou pravděpodobností pravá hodnota měřené veličiny.*“ Chyba měření je dle [40] definována jako „*rozdíl mezi skutečnou hodnotou měřené veličiny a hodnotou zjištěnou měřením*“. Pro správně nastavený proces a výsledek vyhovující požadavkům je třeba znát hodnotu chyb a nejistot měření a udržet jejich hodnoty v rámci předepsaných požadavků. Příčin, které způsobují nejistoty měření, může být mnoho.

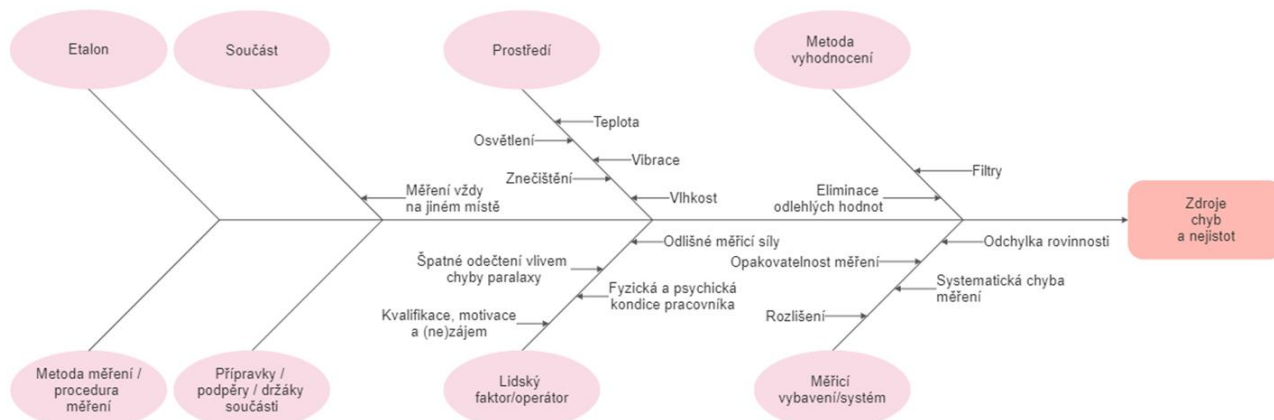
9.1. Zdroje chyb a nejistot

Níže je seznam vybraných zdrojů chyb, které mohou způsobovat nepřesnosti měření:

- Etalon
- Měřicí vybavení/systém
 - o rozlišení
 - o odchylka rovinnosti / systematická chyba měření
 - o opakovatelnost měření
- Prostředí
 - o teplota
 - o osvětlení
 - o vibrace
 - o znečištění
 - o vlhkost
- Lidský faktor / operátor
 - o odlišné měřicí síly
 - o špatné odečtení vlivem chyby paralaxy
 - o fyzická a psychická kondice pracovníka
 - o kvalifikace, motivace a (ne)zájem
- Součást
 - o Stejná charakteristika je měřena pokaždé na jiném místě
- Metoda měření / procedura měření
 - o Způsob, jakým je měření prováděno nebo zvolená strategie vzorkování mohou ovlivnit výsledek měření. Výsledek měření mohou ovlivnit i matematické postupy používané pro získání hodnot.

- Přípravky/podpěry/držáky součástí
- Metoda vyhodnocení
 - o Například filtry, eliminace odlehlých hodnot, ...

Pro zlepšení způsobilosti měření je třeba zvažovat všechny možné zdroje nejistot ovlivňující výsledek měření. Všechny možné zdroje nejistot jsou zpracovány v Ishikawa diagramu na obrázku č. 27 níže. [20]



Obrázek 27: Ishikawa diagram s možnými zdroji chyb a nejistot

9.2. Chyby měření

Chyby vyskytující se v procesu měření sestávají ze známých a neznámých systematických chyb od celé škály zdrojů a příčin. Existují rozdílné typy chyb měření:

- Náhodné chyby
Náhodné chyby jsou způsobovány nekontrolovanými náhodnými činiteli. Mohou být charakterizovány směrodatnou odchylkou či typem rozdělení.
- Systematické chyby (známé a neznámé)

Systematické chyby jsou charakterizovány velikostí a znaménkem (+ či -). Dobrým základem pro výpočet systematické chyby může být rozdíl mezi průměrem naměřených hodnot a referenční hodnotou:

$$B_i = |\bar{x}_g - x_m|; \quad (60)$$

kde \bar{x}_g je aritmetický průměr naměřených hodnot a x_m je referenční hodnota (obvykle změřená přesnějším měřidlem).

- Odlehlosti

Odhledlosti jsou způsobeny neopakovanými mimořádnými událostmi při měření. Mechanické či elektrické vlivy (např. vibrace či amplituda napětí) mohou způsobit odlehlosti. Častým původcem odlehlostí jsou lidské chyby, jako jsou chyby při čtení či psaní nebo špatné zacházení s měřicím vybavením. Odlehlosti je nemožné předem odhadnout, ale v procesu měření se mohou objevit a objeví.

[20]

9.3. Standardní nejistota

Standardní nejistota je základním ukazatelem nejistoty. Standardní nejistota se označuje u a je rovna směrodatné odchylce příslušného rozdělení pravděpodobnosti. Dle způsobu získání se dělí do dvou skupin na:

- nejistoty získané statistickými metodami z měřených údajů – *nejistoty stanovené metodou A* (značené u_A)
- nejistoty stanovené jiným způsobem – *nejistoty stanovené metodou B* (značené u_B).

Tyto nejistoty se dělí podle metod, dle kterých jsou určovány, ovšem běžně bývají (nesprávně) nazývány *nejistotami typu A* a *nejistotami typu B*.

[20] [21]

9.3.1. Standardní nejistota stanovená metodou A

Jak již bylo popsáno výše, standardní nejistota stanovená metodou A se získává pomocí statistické analýzy naměřených údajů.

Hodnocení této standardní nejistoty může probíhat dle techniky ANOVA (Analysis of Variance), která zohledňuje a kvantifikuje efekty několika vlivových faktorů. V této práci se ovšem nebude tento způsob nijak podrobněji rozebírat, podrobný princip a postup této techniky je popsán v [20] a [22].

Druhým způsobem hodnocení a kvantifikace standardní nejistoty stanovené metodou A je postup, který pracuje se směrodatnou odchylkou měření s_x . Postup probíhá následovně: Nejprve je vypočtena hodnota směrodatné odchylky měření dle rovnice č. 61.

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

(61)

kde n je počet měření, x_i je hodnota i -tého změřeného prvku a \bar{x} je aritmetický průměr naměřených hodnot:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n x_i$$

(62)

Po vypočtení směrodatné odchylky se pro získání příslušné standardní chyby u_A její hodnota podělí odmocninou z počtu měření:

$$u_A = \frac{s_x}{\sqrt{n}}$$

(63)

[20] [22]

9.3.2. Standardní nejistota stanovená metodou B

Nejistota, která nemůže být stanovena/nejde stanovit pomocí metody A (na základě statistických výsledků) je stanovena metodou B. Nejistota stanovená touto metodou zahrnuje vliv vnějších dějů na měřicí proces. Zdroji těchto informací mohou být:

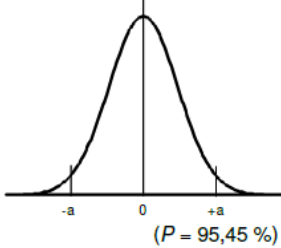
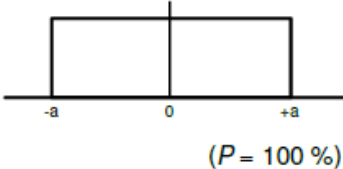
- údaje z předchozích měření
- zkušenosti nebo obecné znalosti chování a vlastností příslušných materiálů a nástrojů (stejných nebo podobných)
- specifikace výrobce
- data z kalibračních nebo jiných certifikátů
- nejistoty příslušící referenčním údajům

Standardní nejistota stanovená metodou B se spočítá pomocí transformace limitů chyby dle typu rozdělení dat (rovnice č. 64). Při výpočtu je třeba vynásobit variační limit a (či jiný horní či spodní zvolený limit) distribučním faktorem b pro příslušné rozdělení dat. Pokud není použité rozdělení známo, použití rovnoměrného rozdělení je nejbezpečnější možností.

$$u_B = a * b$$

(64)

V tabulce č. 2 níže je uveden distribuční faktor a příslušná rovnice pro dvě nejčastější rozdělení dat.

Typ rozdělení	Funkce ($P =$ pravděpodobnost, že hodnota leží v intervalu $\pm a$)	Distribuční faktor b	Standardní nejistota typu B
Normální (Gaussovo rozdělení)		$\frac{1}{2}$	$u_B = \frac{a}{2}$
Rovnoměrné		$\frac{1}{\sqrt{3}}$	$u_B = \frac{a}{\sqrt{3}}$

Tabulka 2: Přehled standardní nejistoty stanovené metodou B pro normální a rovnoměrné rozložení [20]

[20]

9.3.3. Kombinovaná standardní nejistota

Po vypočtení standardní nejistoty stanovené metodou A a standardní nejistoty stanovené metodou B se kombinovaná standardní nejistota u spočítá jako úhlopříčka obdélníka o rozměrech u_A a u_B :

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

(65)

9.4. Rozšířená nejistota měření

Pro normální rozdělení pokrývá kombinovaná standardní nejistota interval rozložení výsledků zhruba se 66% pravděpodobností. Pro pokrytí větší části intervalu se kombinovaná standardní nejistota ještě násobí koeficientem rozšíření k . Výsledný součin se nazývá rozšířená nejistota měření a značí se U , případně U_{MP} .

$$U = k * u$$

(66)

V tabulce číslo 3 níže jsou pro přehled hodnoty koeficientu rozšíření k pro jednotlivé pravděpodobnosti pokrytí intervalu (pro velký počet opakovaných měření, $n > 30$). V praxi se běžně používá $k = 2$ pro pravděpodobnost 95 % a $k = 3$ pro pravděpodobnost 99 %.

P	k
0,80	1,28155
0,90	1,64485
0,95	1,95996
0,98	2,32635
0,99	2,57583
0,999	3,29053
0,9999	3,71902

Tabulka 3: Přehled koeficientu rozšíření k pro různé pravděpodobnosti pokrytí P ($n > 30$) [21]
[20] [21]

10. Současný stav tvorby nových plánů měření na souřadnicových měřicích strojích pro nové díly

V rámci výrobního a následného měřicího procesu v rámci výroby ve firmě Škoda Auto a.s. jsou vytvářeny měřicí programy pro každou měřenou součást v různých fázích opracování. Tyto měřicí programy jsou vytvářeny v softwaru Calypso. Problémem však je, že v současnosti není vytvořena žádná jednotná architektura/koncepce stavby programů z hlediska posloupnosti měření jednotlivých elementů a jednotného, kompatibilního značení. Toto může přinášet problém zejména z důvodu zhoršené orientace v programu pro obsluhu měřicích strojů, která s programy pracuje a na strojích samotné měření provádí, ale i z hlediska zhoršené orientace v protokolech s naměřenými hodnotami, jelikož některé protokoly obsahují i několik stovek naměřených údajů. Toto může ve výsledku vést též k navýšení času měření a tím pádem snížení produktivity měřicího procesu. Dalším z problémů, který špatná organizace měřicího plánu přináší, je, že pokud je potřeba zkontrolovat/přeměřit pouze jeden z měřených prvků (pro příklad například vložku válců), musí měření proběhnout v celé délce programu, jelikož není jasná návaznost mezi jednotlivými měřenými charakteristikami, jednotlivými prvky a jednotlivými podskupinami v rámci měření. V rámci této práce vznikne metodika pro rozdělování měřicího programu a prvků v něm do podskupin tak, aby se usnadnila manipulace s měřicím programem a orientace v něm.

U procesu měření lze nalézt další problém v tom, že u tohoto není doposud nijak řešena způsobilost měřidla, ani vhodnost měřidla či procesu. Vhodnými způsoby, jak hodnotit tyto aspekty výrobního procesu je hodnocení dle metodiky MSA a dle metodiky VDA 5. Jedním z cílů této práce je navržení metodiky pro ověřování způsobilosti nových měřicích programů vč. navržení rozhodovacích kritérií pro vyhodnocení.

10.1. Vytváření metodiky pro stanovení způsobilosti měřidla

10.1.1. Vytváření metodiky pro stanovení způsobilosti měřidla dle c_g

Pro hodnocení způsobilosti měřidla dle koeficientu c_g je třeba znát dva údaje, a to:

- velikost tolerančního pole T měřené charakteristiky
- směrodatnou odchytku s naměřených hodnot.

Velikosti tolerančního pole T se pro jednotlivé měřené charakteristiky dají získat přímo z měřicího plánu v programu Calypso, případně se dají vyčíst z výkresů.

Směrodatná odchylka s se ovšem musí z naměřených hodnot vypočítat dodatečně (dle rovnice č. 61). Jelikož je třeba vypočítat hodnotu směrodatné odchylky u mnoha desítek až stovek charakteristik a měření probíhá opakovaně, může dodatečný výpočet probíhat pomocí počítačového softwaru, například pomocí programu Microsoft Excel z kancelářského balíku Office, kam se naměřená data překopírují a pro každý měřený element se následně nechá vypočítat směrodatná odchylka pomocí příslušné funkce. Pro vypovídající hodnotu směrodatné odchylky a pro získání vypovídající hodnoty koeficientu způsobilosti měřidla c_g musí měření proběhnout opakovaně, minimálně 10×, ideálně 20× a více.

Po získání hodnot velikosti tolerančního pole T a směrodatné odchylky s pro všechny měřené charakteristiky se může přistoupit k samotnému výpočtu hodnoty koeficientu c_g pro každou jednu charakteristiku dle rovnice č. 67:

$$c_g = \frac{0,2 * T}{6 * s}; c_g \geq 1,33 \quad (67)$$

V rámci interního předpisu pro kontrolu způsobilosti ve firmě Škoda Auto a.s. se ale používá vztah mírně upravený:

$$c_g = \frac{0,2 * T}{4 * s}; c_g \geq 1,33 \quad (68)$$

Zlomek má nižší hodnotu jmenovatele, než je definováno v normě, tudíž je koeficient používaný v rámci Škoda Auto a.s. „mírnější“ než koeficient dle normy.

Aby se dal proces měření považovat za způsobilý z hlediska způsobilosti měřidla, musí být hodnota koeficientu c_g větší než nebo rovna hodnotě 1,33. Cílem každého programátora je tedy nastavit program tak, aby u všech měřených charakteristik vyšly vypočtené koeficienty c_g a c_{gk} větší než 1,33. Při optimalizaci měřicího procesu je ideálním výsledkem úprava procesu tak, aby se hodnota koeficientu ideálně držela nad 1,33.

10.1.2. Vytváření metodiky pro stanovení způsobilosti měřidla dle c_{gk}

Pro hodnocení způsobilosti procesu měření dle koeficientu c_{gk} je třeba znát celkem čtyři hodnoty, a to:

- aritmetický průměr naměřených hodnot \bar{x}
- referenční hodnotu měřeného rozměru T změřenou minimálně o jeden řád přesnějším strojem (případně přesnějším strojem, který se pro dané případy měření používá jako referenční),
- velikost tolerančního pole měřené charakteristiky Δ
- směrodatnou odchylku s .

Aritmetický průměr naměřených hodnot \bar{x} se snadno získá buď přímo z měřicího programu Calypso, případně se dá získat dodatečným zpracováním naměřených hodnot, například pomocí programu Excel z kancelářského balíku Microsoft Office.

Referenční hodnotu měřeného rozměru T je třeba změřit na minimálně o jeden řád přesnějším stroji, než na kterém bude probíhat daný měřicí proces, případně strojem, který se používá pro referenční měření. V případě měření ve Škoda Auto a.s. je tímto přesnějším strojem stroj *Zeiss Prismo ultra* umístěný v měrovém středisku kvality výroby komponentů. Toto měření musí proběhnout na přesnějším stroji, jelikož v užívaném vzorci je tolerance měřeného prvku vynásobena konstantou 0,1, tudíž je třeba mít přesnější hodnotu, od které se tato desetkrát zmenšená hodnota tolerance bude odčítat, aby výsledky měly vypovídající hodnotu. Měření probíhá několikrát, minimálně desetkrát, z naměřených hodnot se poté vypočítá aritmetický průměr, který se užije jako referenční hodnota.

Velikosti tolerančního pole Δ se pro jednotlivé měřené prvky dají získat přímo z měřicího plánu v programu Calypso, případně se dají vyčíst z výkresů.

Směrodatná odchylka s se ovšem musí z naměřených hodnot vypočítat dodatečně. Jedním z postupů, jak tuto hodnotu vypočítat, je použití počítačového programu Excel z kancelářského balíku Microsoft Office, kam se získaná data překopírují a pomocí příslušné funkce se pro jednotlivá měření vypočítají jejich směrodatné odchylky. Používání softwaru Excel a jeho funkcí na tento výpočet je vhodné kvůli složitosti vzorce pro výpočet směrodatné odchylky.

Pro získání vypovídajících hodnot pro směrodatnou odchylku měření s je třeba dané měření provést opakovaně, minimálně $10\times$, ideálně $20\times$ a více.

Po získání všech potřebných hodnot se může koeficient způsobilosti procesu c_{gk} měření spočítat dle rovnice č. 69:

$$c_{gk} = \min\left(\frac{\bar{x} - (T - 0,1\Delta)}{3s}, \frac{(T + 0,1\Delta) - \bar{x}}{3s}\right); c_{gk} \geq 1,33 \quad (69)$$

Hodnota koeficientu je rovna menší hodnotě ze dvou podělených rozdílů v závorce.

Aby se dal proces měření považovat za způsobilý z hlediska způsobilosti měřicího procesu, musí být hodnota koeficientu c_{gk} opět rovna nebo větší než 1,33. Ideálním cílem optimalizace měřicího procesu je tedy navrhnout a uzpůsobit měřicí proces tak, aby měření všech prvků mělo koeficient c_{gk} větší než 1,33.

10.1.3. Vytváření metodiky pro stanovení opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření % GR&R

Výpočet hodnoty opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření $GR\&R$, respektive % $GR\&R$ probíhá dle metodiky ANOVA, podle rovnic č. 70 a 71.

$$GR\&R = \sqrt{EV^2 + AV^2} \quad (70)$$

$$\% GR\&R = \frac{GR\&R}{TOL} \cdot 100 [\%]; \quad (71)$$

Jelikož výpočet předchozích veličin EV a AV je matematicky velmi náročný, používá se k výpočtu hodnoty % $GR\&R$ matematický a statistický software. Po získání hodnoty % $GR\&R$ je tato konfrontována s požadavkem na % $GR\&R_{max}$, pro nové měřicí systémy 20 %, pro již používané měřicí systémy 30 %.

10.2. Vytváření metodiky pro stanovení vhodnosti měřicího procesu dle metodiky VDA 5

10.2.1. Vytváření metodiky pro stanovení vhodnosti měřicího systému dle

Q_{MS}

Index způsobilosti měřicího systému Q_{MS} lze vypočítat dle rovnice č. 72.

$$Q_{MS} = \frac{2 \cdot U_{MS}}{TOL} \cdot 100 [\%]$$

(72)

Jelikož je výpočet předchozí veličiny U_{MS} matematicky náročný, používá se k výpočtu její hodnoty (a následně i samotného indexu Q_{MS}) matematický a statistický software. Po získání hodnoty je hodnota Q_{MS} porovnána s požadavkem na její maximální hodnotu, běžně s hodnotou 15 %. Pokud je vypočtená hodnota Q_{MS} menší nebo rovna maximální hodnotě, lze měřicí systém považovat za vhodný.

10.2.2. Vytváření metodiky pro stanovení vhodnosti měřicího systému dle

Q_{MP}

Index způsobilosti procesu měření Q_{MP} lze vypočítat dle rovnice č. 73.

$$Q_{MP} = \frac{2 \cdot U_{MP}}{TOL} \cdot 100 [\%]$$

(73)

Jelikož je výpočet předchozí veličiny U_{MP} matematicky náročný, používá se k výpočtu její hodnoty (a následně i samotného indexu Q_{MP}) matematický a statistický software. Po získání hodnoty je hodnota Q_{MP} porovnána s požadavkem na její maximální hodnotu, běžně touto hodnotou bývá 30 %. Pokud je vypočtená hodnota Q_{MP} menší nebo rovna maximální hodnotě, lze proces měření považovat za vhodný.

11. Metodika pro ověřování způsobilosti měřicích programů

Metodika pro ověření způsobilosti měřicích programů se dělí do několika kroků:

- 1) Přeměření současných programů
- 2) Změření součásti na přesnějším stroji
- 3) Vypočtení hodnot c_g a c_{gk} pro jednotlivé měřené charakteristiky
- 4) Vypočtení hodnot $\% GR\&R$, $\% Q_{MS}$ a $\% Q_{MP}$ pro jednotlivé měřené charakteristiky
- 5) Případná optimalizace programu

11.1. Přeměření současných programů

V rámci prvního bodu analýzy měřicích programů je nutno nechat měření součásti několikrát proběhnout, ideální počet měření je 10 a více. Opakované měření slouží k omezení náhodných vlivů na měření. Naměřené hodnoty pro jednotlivé charakteristiky (rozměry, geometrické tolerance, ...) jsou vyexpedovány ve formě protokolů či ve formě textových souborů obsahujících naměřené hodnoty. Hodnoty jsou následně přeneseny/překopírovány do programu, v kterém je lze zpracovat, například do programu Excel z kancelářského balíku Microsoft Office.

V tomto programu jsou hodnoty dále zpracovány, jsou u nich vypočteny potřebné dodatečné veličiny (šířky tolerančních polí, průměry, směrodatné odchylky, ...)

11.2. Změření součásti na přesnějším stroji

Pro další práci s daty a pro výpočet koeficientů c_g a c_{gk} je třeba získat referenční hodnoty rozměrů, které se budou dále používat při výpočtech již zmíněných koeficientů.

Tyto referenční hodnoty rozměrů se získají pomocí měření na nejméně o řád přesnějším stroji, v případě měření ve firmě Škoda Auto a.s. je tímto strojem souřadnicový měřicí stroj *Zeiss Prismo Ultra* s MPE o velikosti $(0,5 + L/500) \mu m$. Pro porovnání, u stroje, na kterém probíhá měření součásti za normálních podmínek (*Zeiss Prismo 7*), má MPE hodnotu $1,4 + \frac{L}{350} \mu m$. Referenční hodnoty musí být změřeny na přesnějším stroji z důvodu, že ve vzorci na výpočet koeficientu c_{gk} se od referenční hodnoty odečítá, respektive se k ní přičítá, hodnota tolerance vynásobena konstantou 0,1, tudíž je třeba mít přesnou hodnotu referenčního rozměru, aby byly výsledky vypovídající. *Zeiss Prismo Ultra* není o řád přesnější než *Zeiss Prismo 7*, ale svou přesností je již na fyzikálních hranicích možností přesného měření. V rámci

závodu firmy Škoda Auto a.s. se však jedná o nejpřesnější dostupný stroj, proto se používá jako referenční.

Měření na přesnějším stroji by opět mělo proběhnout několikrát, ideálně by počet měření měl být 10 či větší. Toto slouží k eliminaci náhodných vlivů na měření. Po několikanásobném změření požadovaných prvků se výsledky vyexpedují ve formě protokolů, případně ve formě textových souborů a přenesou se do programu na jejich statistické zpracování, například do programu Excel z kancelářského balíku Microsoft Office. V tomto programu jsou následně vypočítány aritmetické průměry z naměřených hodnot, případně další statistické veličiny.

11.3. Vypočtení hodnot c_g a c_{gk} pro jednotlivé měřené charakteristiky

Pomocí programu Excel, případně v matematickém či statistickém softwaru, jsou dle vzorců pro koeficienty c_g a c_{gk} vypočteny hodnoty těchto koeficientů pro jednotlivé charakteristiky. Následuje analýza všech vypočtených hodnot koeficientů z hlediska velikosti. Výsledky se dělí dle hodnot takto:

Velikost koeficientu c_g/c_{gk}	Četnost
$x < 1,33$	n_1
$x \in (1,33; 2,5)$	n_2
$x \in (2,5; 10)$	n_3
$x \in (10; 50)$	n_4
$x \in (50; 100)$	n_5
$100 < x$	n_6

Tabulka 4: Rozdělení výsledků dle velikosti koeficientu

11.4. Vypočtení hodnot % GR&R, % Q_{MS} a % Q_{MP} pro jednotlivé měřené charakteristiky

Po získání a zpracování naměřených a referenčních hodnot se pomocí specializovaného matematického či statistického softwaru vypočítají hodnoty opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření % GR&R a indexů vhodnosti měřicího systému a procesu % Q_{MS} , % Q_{MP} pro jednotlivé měřené charakteristiky. Pro zpracování hodnot v rámci závodu Škoda Auto a.s. je tímto softwarem program Yarovyn od firmy Diribet spol. s r.o.

11.5. Analýza výsledků

11.5.1. Analýza výsledků c_g a c_{gk}

Pokud se v souboru měřených charakteristik najde alespoň jedna charakteristika s hodnotou koeficientu c_g a/či c_{gk} menší než předepsaných 1,33, je program prohlášen za nezpůsobilý a je třeba ho přepracovat tak, aby vykazoval větší způsobilost měřidla či měřicího procesu.

Avšak i v případě, kdy vyjde u všech charakteristik hodnota koeficientů c_g a/či c_{gk} větší či rovna 1,33 a proces tím pádem může být prohlášen za způsobilý, může být program vrácen programátorovi k přepracování. K tomuto případu dojde, pokud budou hodnoty koeficientů c_g a/či c_{gk} až příliš velké (řádově desítky až stovky, ovšem zhruba od hodnoty 50 se jedná o velké hodnoty, tedy četnosti n_5 až n_6 v tabulce č. 4). Pokud jsou zjištěny takto vysoké hodnoty koeficientů, jedná se o podklad pro další analýzu, zda není program měřen s až příliš velkým důrazem na přesnost přesahující požadavky z výkresu. Proces měření je poté také zbytečně pomalý a tím je v rozporu s požadavkem na dobrou produktivitu měření. Programátor by tedy měl měření prvků s takto vysokými hodnotami koeficientů přepracovat tak, aby se hodnoty c_g a c_{gk} držely ideálně v intervalu četností n_2 až n_3 , maximálně n_4 . Ke snížení hodnot koeficientů a zlepšení využití strojního času běžně pomáhá hlavně zrychlení měření.

11.5.2. Analýza výsledků % GR&R, % Q_{MS} a % Q_{MP}

Pokud po analýze změřených charakteristik vychází u charakteristiky hodnota veličiny % GR&R, % Q_{MS} či % Q_{MP} mimo požadavky (více než 15 % u % Q_{MS} a 30 % u % Q_{MS} a % Q_{MP}), je prohlášen měřicí systém za nezpůsobilý či nevhodný v rámci dané charakteristiky. Mělo by následovat přepracování měřicího programu, případně přepracování experimentu.

12. Ověření způsobilosti a vhodnosti měřicího programu pro měření hlav válců bloku motoru 1.0 TSI EVO

Pro vyzkoušení metodiky pro ověřování způsobilosti a vhodnosti měřících procesů v rámci firmy Škoda Auto a.s. byl navržen experiment, při kterém bylo provedeno měření hlav válců na bloku motoru 1.0 TSI EVO (na obrázku č. 28).



Obrázek 28: Měřená součást (blok motoru 1.0 TSI EVO)

12.1. Volba parametrů experimentu

Bylo zvoleno celkem deset výrobních kusů, z pěti výrobních strojů. Na každém stroji jsou dva upínače pro obrábění, byly tedy zvoleny kusy po jednom z každého upínače.

V tabulce č. 5 níže je seznam kombinací strojů a upínačů pro vybrané součásti.

Stroj č.	Upínač č.
1	1
1	2
2	1
2	2
3	1
3	2
4	1
4	2
6	1
6	2

Tabulka 5: Kombinace výrobních strojů a upínačů u měřených součástí

Pro experiment bylo zvoleno měření na dvou souřadnicových měřicích strojích, na stroji *Zeiss Prismo Ultra* s velikostí MPE $\left(0,5 + \frac{L}{500}\right) \mu\text{m}$ a na stroji *Zeiss Prismo 7* s velikostí MPE $\left(1,4 + \frac{L}{350}\right)$. Data naměřená na stroji *Zeiss Prismo Ultra* byla pro tento experiment brána jako data referenční.

12.2. Měření součástí na stroji Zeiss Prismo Ultra

Na stroji *Zeiss Prismo Ultra* proběhlo celkem patnáct měření, a to na pěti součástech po třech měřeních. U dvou strojů bylo zvoleno měření součástí vyrobených na prvním upínači, u zbylých tří strojů bylo zvoleno měření součástí vyrobených na druhém upínači. V tabulce č. 6 je seznam součástí změřených na stroji *Prismo Ultra*.

Stroj č.	Upínač č.	Počet měření
1	1	3
2	1	3
3	2	3
4	2	3
6	2	3

Tabulka 6: Přehled součástí měřených na Zeiss Prismo Ultra

Měření na stroji probíhalo při konstantní teplotě 19,5 °C. Součásti musely po dodání z výroby zůstat po dobu několika hodin odstaveny v laboratoři s nastavenou teplotou, aby se v celém objemu ochladily na požadovanou teplotu 19,5 °C. Pokud by součásti neměly požadovanou teplotu, ale byly stále teplejší, v průběhu měření by průběžně chladly, čímž by

docházelo k chybné kompenzaci teplotní roztažnosti (která se odvíjí od teploty změřené na začátku měření) a do výsledků by se tím pádem vnašela chyba.

Délka jednoho měření byla přibližně 55 minut. Souhrnná délka všech 15 měření byla dohromady zhruba 16 až 17 hodin. Z výsledků měření byly vygenerovány soubory s naměřenými hodnotami, DFQ soubory sloužící ke snazšímu zpracování naměřených dat ve statistickém softwaru a PDF protokoly s výsledky měření.

12.3.Měření součástí na stroji Zeiss Prismo 7

Na stroji *Zeiss Prismo 7* bylo změřeno všech deset součástí z tabulky č. 5, každá součást byla změřena dvakrát. Celkem tedy proběhlo dvacet měření.

Měření probíhalo při teplotě 22 °C. Součásti musely být po dodání z výroby odstaveny po dobu několika hodin v laboratoři, aby získaly cílenou teplotu a aby tedy do měření nebyla vnesena chyba vzniklá chybnou teplotní kompenzací. Stejný postup byl proveden i u součástí, které byly dříve měřeny na stroji *Zeiss Prismo Ultra*, které se musely naopak po dodání z laboratoře s teplotou 19,5 °C vytemperovat na vyšší teplotu.

Délka jednoho měření byla přibližně 49 minut. Souhrnná délka všech 20 měření byla zhruba 18 až 19 hodin. Po získání výsledků měření byly vygenerovány soubory s naměřenými hodnotami, DFQ souboru sloužící ke snazšímu zadání získaných dat do statistických programů a PDF protokoly s naměřenými hodnotami.

12.4.Zpracování naměřených dat

Po získání výstupů z naměřených dat byla tato zpracována pomocí aplikace Excel z kancelářského balíku Microsoft Office. Data byla roztríděna dle měřicího stroje, následně u každého měřicího stroje byly přidány filtry hodnot dle výrobního stroje, dle upínače a dle čísla měření u každé součásti. Pro každou měřenou charakteristiku byla vypočtena průměrná hodnota napříč všemi kombinacemi strojů a upínačů. K jednotlivým charakteristikám byla doplněna hodnota dolní a horní toleranční meze.

Po zpracování dat v Excelu byla provedena analýza měřicího systému a procesu pomocí cloudové aplikace *Yarvyn* od firmy Diribet spol. s r.o. Z důvodu výpočetních kapacit programu byla naměřená data (celkem 560 charakteristik) rozdělena do 6 částí zhruba po 100 charakteristikách.

Jako první byla nadefinována měřicí úloha. Do programu byl nahrán DFQ soubor, který nadefinoval jednotlivé prvky, jejich názvy, charakteristiky a tolerance. Následovala ruční korekce chybějících a chybných hodnot.

Druhým krokem byla specifikace měřicího systému. Byly nahrány referenční hodnoty. Jako reference bylo zvoleno pět měřených součástí z jednotlivých výrobních strojů, jako referenční hodnoty byly zvoleny průměrné hodnoty pro jednotlivé součásti z různých výrobních strojů (hodnoty z měření na stroji *Zeiss Prismo Ultra*).

Třetím krokem bylo nadefinování experimentu typu 1 v rámci měřicího systému. Do programu byly z Excelu nakopírovány naměřené hodnoty jednotlivých charakteristik pro příslušné výrobní stroje ve třech sadách dle čísla měření (hodnoty z měření na stroji *Zeiss Prismo Ultra*).

Čtvrtým krokem bylo nadefinování experimentu typu 2, již v rámci měřicího procesu. V této fázi se zadávaly naměřené hodnoty ze stroje *Zeiss Prismo 7*. Nejprve byl zvolen počet opakování: 2, počet úrovní: 2 a počet dílů: 5. Tím bylo zadávání dat rozděleno podle čísla upínače – 1 či 2. Následně byly zadány získané hodnoty pro jednotlivé naměřené charakteristiky ze zpracovaných dat v Excelu. V každém opakování se použila data z deseti měření. Na obrázku č. 29 je ukázka z prostředí programu, ve kterém se zadávala naměřená data.

Přístroj	Díl	Rovinnost_41F 1	0341-B-41F1_ X	Uhel 41F1
Opakování 1				
1 UP1	1	0.0173194	193.1158358	19.4943385
	2	0.0144114	193.0846728	19.5011986
	3	0.0143921	193.1093528	19.5060204
	4	0.0168294	193.1011521	19.4951047
	5	0.0084664	193.1097483	19.4990527
2 UP2	1	0.0179921	193.0774773	19.4979618
	2	0.0142098	193.1094312	19.5071871
	3	0.0165586	193.112625	19.5136407
	4	0.0144268	193.0733843	19.4935641
	5	0.00866	193.074166	19.5014988

Obrázek 29: Ukázka zadání dat do experimentu typu 2 v rámci MP

Optimalizace plánu měření z hlediska kompatibility se systémy konceptu průmyslu 4.0

Posledním, pátým krokem už bylo pouze seznámení se s hodnotami c_g , c_{gk} , $\%Q_{MS}$, $\%Q_{MP}$, U_{MS} , U_{MP} , $\%GRR$ a ndc , které program Yarovyn z obdržených dat vypočítal. Výsledné hodnoty těchto veličin bylo možné následně též z programu stáhnout ve formě protokolů PDF. Na obrázku č. 30 je ukázka prezentace výsledků v prostředí programu Yarovyn, na obrázku č. 31 je ukázka prezentace výsledků v PDF protokolech. Analýza výsledných hodnot bude provedena v následujících kapitolách.

Název Validačního aktu
1,0 TSI evo OP 30 část 1
Komentář k Validačnímu aktu
Nekolný_DP

Celkový výsledek je: **Nevhodný**

Hledat

	Název ↑	Kód	$\%Q_{MS}$	$\%Q_{MP}$	U_{MS}	U_{MP}	$\%GRR$	ndc
⌌	0341-B-41F1_X	2	1.935	106.569	0.000967	0.0533	115.779	0
⌌	0341-B-41F2_X	4	1.176	46.388	0.00118	0.0464	49.351	0
⌌	0341-B-41F3_X	5	1.188	53.002	0.00119	0.053	58.73	0
⌌	0448-B-41B1_Uhel	22	0.389	4.497	0.00129	0.0148	4.905	1.03
⌌	0448-B-41B1_Uhel1	40	0.537	5.682	0.00177	0.0188	8.523	0.25
⌌	0448-B-41B1_Uhel2	58	0.365	6.621	0.00121	0.0218	7.39	0.93

Obrázek 30: Ukázka prezentace výsledků v prostředí programu Yarovyn

Měřicí úloha

Celkové vyhodnocení

Nevhodný

Referenční díly

	Kód	Název	Datum kalibrace
1.		Stroj 1	
2.		Stroj 2	
3.		Stroj 3	
4.		Stroj 4	
5.		Stroj 6	

Přehled výsledků

Kód	Název	Referenční interval		$\%Q_{MS}$	C_g	C_{gk}	$\%Q_{MP}$	$\%GRR$	ndc
1	Rovinnost_41F1	0	0.1	0.229	58.294	58.294	6.69	7.098	3.99
2	0341-B-41F1_X	193.033	193.133	1.935	6.892	6.892	106.569	115.779	0
3	Uhel 41F1	19.17	19.83	0.0418	318.979	318.979	2.574	3.122	2.47
4	0341-B-41F2_X	189.983	190.183	1.176	11.338	11.338	46.388	49.351	0
5	0341-B-41F3_X	189.983	190.183	1.188	11.224	11.224	53.002	58.73	0

Obrázek 31: Prezentace výsledků v protokolu PDF

12.5. Analýza získaných výsledků

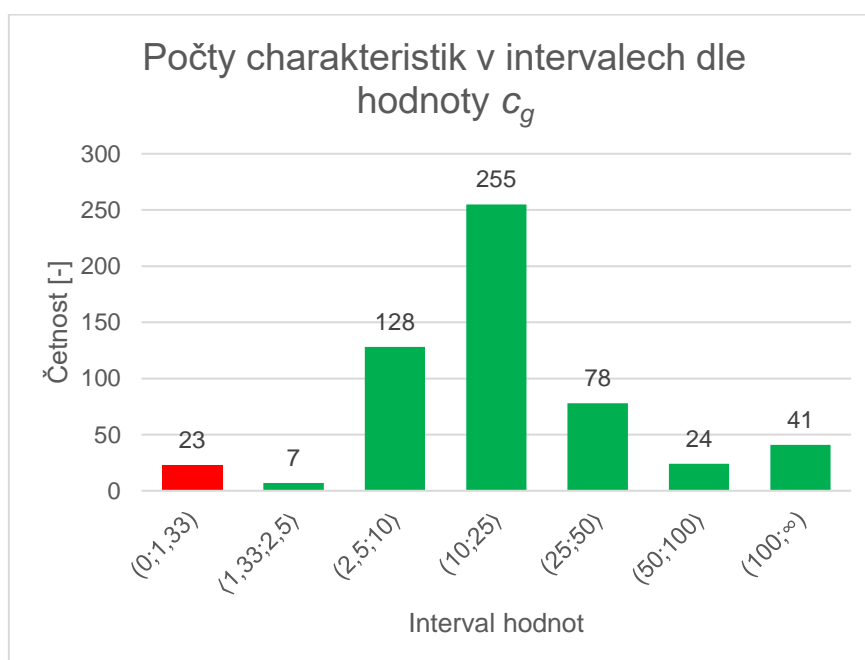
Z vygenerovaných PDF protokolů byla data přenesena do programu Microsoft Excel pro další práci s nimi.

12.5.1. Analýza výsledků c_g

Po provedení analýzy výsledků z hlediska koeficientu c_g bylo zjištěno, že požadavkům ($c_g \geq 1,33$) vyhovuje 95,89 % měřených charakteristik, tedy 4,11 % charakteristik požadavkům nevyhovuje. Rozložení charakteristik do skupin dle hodnot je v tabulce č. 7 a znázorněno v grafu na obrázku č. 32. Červeně vyznačený interval označuje hodnoty nevyhovující požadavkům, zelené intervaly označují hodnoty vyhovující požadavkům.

Interval hodnot	Absolutní četnost	Relativní četnost
(0; 1,33)	23	4,1 %
(1,33; 2,5)	7	1,3 %
(2,5; 10)	128	23,0 %
(10; 25)	255	45,8 %
(25; 50)	79	14,2 %
(50; 100)	24	4,3 %
(100; ∞)	41	7,4 %

Tabulka 7: Četnost hodnot c_g v intervalech dle hodnoty



Obrázek 32: Rozložení prvků v intervalech dle hodnoty c_g

Je možné pozorovat, že většina charakteristik (82,9 %) se pohybuje hodnotou koeficientu c_g v intervalu (2,5; 50). U těchto charakteristik tedy hodnota koeficientu

vyhovuje požadavkům, dokonce je u nich i prostor pro optimalizaci měření (zejména zrychlení skenování) za účelem uspořené strojního času.

Při analýze charakteristik, které požadavkům nevyhovují (v tabulce č. 8 je přehled všech), je možno si všimnout, že všechny vyhodnocované charakteristiky jsou stejného typu. Jedná se o vyhodnocení průměrů prvků metodou největší vepsané kružnice (největší kružnice, ve které se nenachází žádný z měřených bodů). Tato metoda vyhodnocení není v rámci měření a sestavování programů běžná, obvykle se používá metoda nejmenších čtverců (neboli také metoda Gauss – obsah ploch uvnitř a vně kruhu je stejný a minimální). Metoda vyhodnocení pomocí největší vepsané kružnice je na rozdíl od Gaussovy metody velmi citlivá na odlehle hodnoty. Mimo této vlastnosti je dalším možným problémem i velmi úzce nastavená hodnota tolerance u všech problematických charakteristik. Kombinace těchto dvou faktorů může být příčinou nepříznivých výsledků. Proto není takto nastavená strategie měření pro vyhodnocování těchto charakteristik vhodná.

Název	DMR	HMR	C_g
Prumer_16B10_veps	12,006	12,024	0,392
Prumer_16B13_veps	12,006	12,024	0,46
Prumer_16B15_veps	12,006	12,024	0,502
Prumer_15B20a_veps	12,006	12,024	0,51
Prumer_16B15a_veps	12,006	12,024	0,513
Prumer_16B12_veps	12,006	12,024	0,521
Prumer_15B22_veps	12,006	12,024	0,55
Prumer_16B10a_veps	12,006	12,024	0,624
Prumer_15B21_veps	12,006	12,024	0,706
Prumer_15B23_veps	12,006	12,024	0,729
Prumer_15B23a_veps	12,006	12,024	0,742
Prumer_15B24_veps	12,006	12,024	0,75
Prumer_16B12a_veps	12,006	12,024	0,752
Prumer_15B22a_veps	12,006	12,024	0,767
Prumer_16B11_veps	12,006	12,024	0,823
Prumer_15B20_veps	12,006	12,024	0,835
Prumer_15B24a_veps	12,006	12,024	0,875
Prumer_16B11a_veps	12,006	12,024	0,953
Prumer_15B25a_veps	12,006	12,024	0,962
Prumer_16B14_veps	12,006	12,024	1,01
Prumer_15B25_veps	12,006	12,024	1,139
Prumer_15B21a_veps	12,006	12,024	1,147
Prumer_16B13a_veps	12,006	12,024	1,153

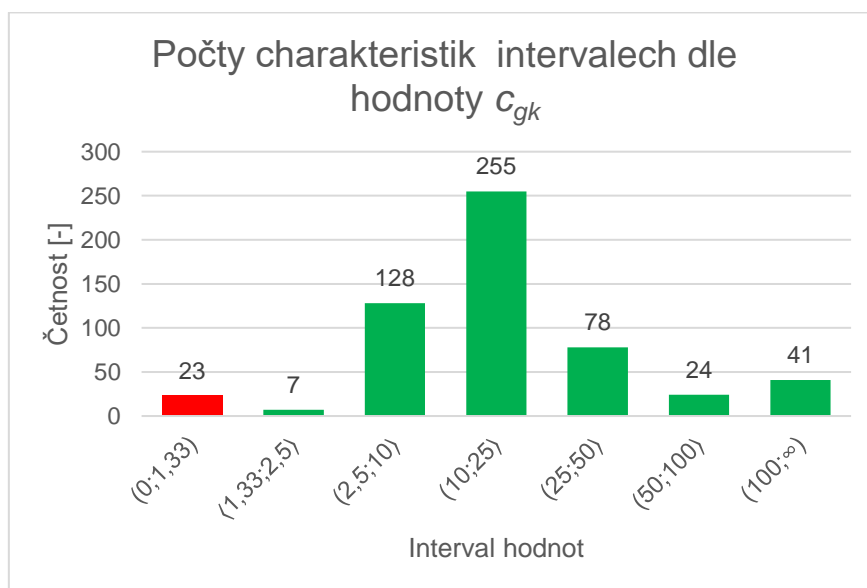
Tabulka 8: Prvky s hodnotou koeficientu c_g nevyhovující požadavkům

12.5.2. Analýza výsledků c_{gk}

Po výpočtu hodnot c_{gk} bylo zjištěno, že hodnotu c_{gk} větší nebo rovnu požadovaným 1,33 má 95,89 % charakteristik, 4,11 % charakteristik nevyhovuje požadavkům. Četnost charakteristik (absolutní i relativní) v intervalech dle hodnot je v tabulce č. 9 a znázorněna v grafu na obrázku č. 33. Červeně vyznačený interval označuje hodnoty nevyhovující požadavkům, zelené intervaly označují hodnoty vyhovující požadavkům.

Interval hodnot	Absolutní četnost	Relativní četnost
(0; 1,33)	23	4,1 %
(1,33; 2,5)	7	1,3 %
(2,5; 10)	128	23,0 %
(10; 25)	255	45,9 %
(25; 50)	78	14,0 %
(50; 100)	24	4,3 %
(100; ∞)	41	7,4 %

Tabulka 9: Četnost hodnot c_{gk} v intervalech dle hodnoty



Obrázek 33: Rozložení prvků v intervalech dle hodnoty c_{gk}

Hodnota koeficientu c_{gk} u většiny charakteristik (82,9 %) leží v intervalu (2,5; 50). Tyto hodnoty koeficientu jsou uspokojivé, dokonce takovéto hodnoty poskytují prostor pro optimalizaci měřicího procesu (zejména zvýšení rychlosti skenování). Zrychlení povede ke zkrácení měřicího procesu a tím pádem i k ušetření drahého strojního času.

Název	DMR	HMR	C_{gk}
Prumer_16B10_veps	12,006	12,024	0,392
Prumer_16B13_veps	12,006	12,024	0,46
Prumer_16B15_veps	12,006	12,024	0,502
Prumer_15B20a_veps	12,006	12,024	0,51
Prumer_16B15a_veps	12,006	12,024	0,513
Prumer_16B12_veps	12,006	12,024	0,521
Prumer_15B22_veps	12,006	12,024	0,55
Prumer_16B10a_veps	12,006	12,024	0,624
Prumer_15B21_veps	12,006	12,024	0,706
Prumer_15B23_veps	12,006	12,024	0,729
Prumer_15B23a_veps	12,006	12,024	0,742
Prumer_15B24_veps	12,006	12,024	0,75
Prumer_16B12a_veps	12,006	12,024	0,752
Prumer_15B22a_veps	12,006	12,024	0,767
Prumer_16B11_veps	12,006	12,024	0,823
Prumer_15B20_veps	12,006	12,024	0,835
Prumer_15B24a_veps	12,006	12,024	0,875
Prumer_16B11a_veps	12,006	12,024	0,953
Prumer_15B25a_veps	12,006	12,024	0,962
Prumer_16B14_veps	12,006	12,024	1,01
Prumer_15B25_veps	12,006	12,024	1,139
Prumer_15B21a_veps	12,006	12,024	1,147
Prumer_16B13a_veps	12,006	12,024	1,153

Tabulka 10: Charakteristiky s hodnotou koeficientu c_g nevyhovující požadavkům

Při analýze nevyhovujících prvků lze pozorovat, že všechny charakteristiky jsou stejného typu. Jedná se o charakteristiky vyhodnocované nikoliv běžnou metodou vyhodnocení (Gauss), ale metodou největší vepsané kružnice. Toto, v kombinaci s poměrně velmi úzkými tolerancemi u měřených charakteristik, může být jednou z příčin, proč dané charakteristiky nevyhovují požadavkům z hlediska koeficientu c_{gk} .

12.5.3. Analýza výsledků % Q_{MS}

Po vypočtení hodnot indexu vhodnosti měřicího systému Q_{MS} pro všechny změřené charakteristiky byla stanovena hranice pro maximální hodnotu této veličiny dle rovnice č. 74 na 15 %.

$$Q_{MS} \leq Q_{MS_{max}}; Q_{MS_{max}} = 15 \%$$

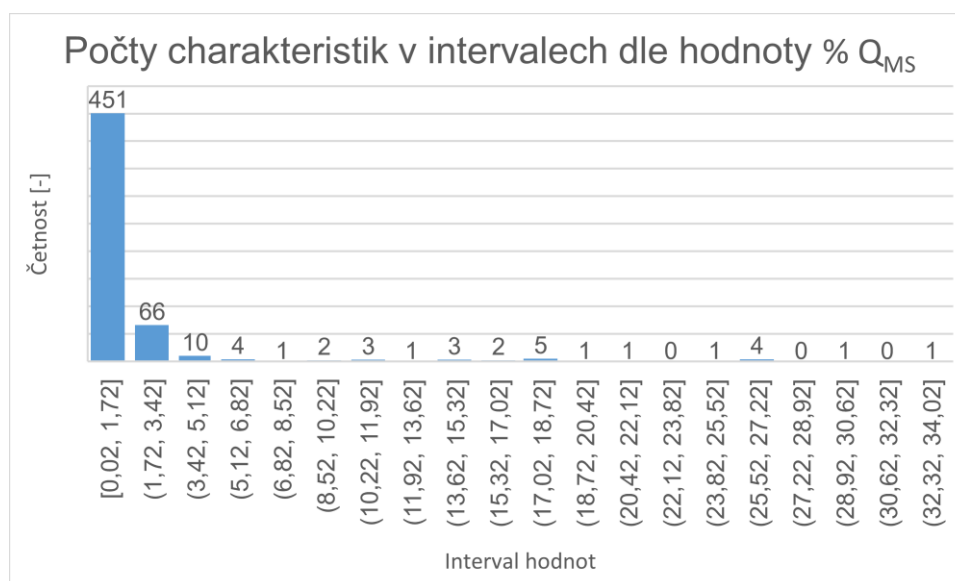
(74)

Hodnotu % Q_{MS} menší než maximální přípustnou je možno najít u 96,96 % charakteristik, tedy 3,04 % předepsaným požadavkům nevyhovuje. V tabulce č. 11 jsou hodnoty absolutní a relativní četnosti charakteristik v jednotlivých intervalech dle hodnoty.

Interval hodnot	Absolutní četnost	Relativní četnost
(0; 0,33)	74	13,3 %
(0,33; 0,64)	109	19,6 %
(0,64; 0,95)	125	22,4 %
(0,95; 1,26)	70	12,6 %
(1,26; 1,57)	57	10,2 %
(1,57; 2,5)	61	11,0 %
(2,5; 4)	27	4,8 %
(4; 10)	11	2,0 %
(10; 20)	15	2,7 %
(20; 30)	7	1,3 %
(30; 40)	1	0,2 %

Tabulka 11: Četnost hodnot % Q_{MS} v intervalech dle hodnoty

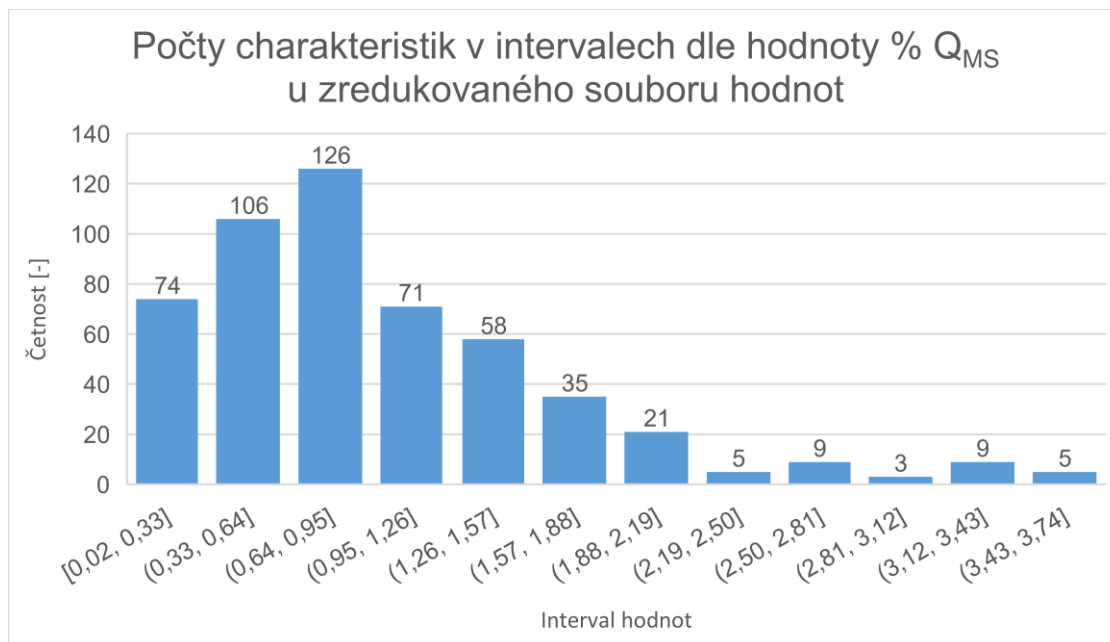
Ze získaných hodnot % Q_{MS} byl v programu Microsoft Excel vytvořen histogram. Tento histogram je možno vidět na obrázku č. 34.



Obrázek 34: Rozložení prvků v intervalech dle hodnoty % Q_{MS}

Jelikož lze pozorovat, že histogram z vypočtených hodnot % Q_{MS} nemá téměř žádnou vypovídající hodnotu, bylo za účelem vypracování názornějšího histogramu přistoupeno k redukci prvků pomocí Grubbsova testu odlehlých hodnot. Pomocí tohoto testu bylo detekováno a ze statistického souboru dat vyloučeno celkem 35 prvků s hodnotou v intervalu

(3,86; 34,012). Ze zredukovaného souboru dat byl vytvořen histogram. Tento histogram je na obrázku č. 35.



Obrázek 35: Rozložení prvků v intervalech dle hodnoty % Q_{MS} u zredukovaného souboru hodnot

Je možno pozorovat, že rozdělení dat neodpovídá normálnímu rozdělení, nýbrž je vrchol posunut směrem k nižším hodnotám. Toto poukazuje na poměrně dobře nastavený měřicí systém a výsledky jeho indexu způsobilosti. Nelze však pominout vyloučené, extrémní hodnoty.

V tabulce č. 12 je seznam charakteristik s extrémní (požadavkům nevyhovující) hodnotou indexu % Q_{MS} .

Název	DMR	HMR	% Q_{MS}	C_g
Prumer_16B10_veps	12,006	12,024	34,012	0,392
Prumer_16B13_veps	12,006	12,024	28,991	0,46
Prumer_16B15_veps	12,006	12,024	26,558	0,502
Prumer_15B20a_veps	12,006	12,024	26,14	0,51
Prumer_16B15a_veps	12,006	12,024	25,975	0,513
Prumer_16B12_veps	12,006	12,024	25,614	0,521
Prumer_15B22_veps	12,006	12,024	24,235	0,55
Prumer_16B10a_veps	12,006	12,024	21,376	0,624
Prumer_15B21_veps	12,006	12,024	18,887	0,706
Prumer_15B23_veps	12,006	12,024	18,287	0,729
Prumer_15B23a_veps	12,006	12,024	17,974	0,742
Prumer_15B24_veps	12,006	12,024	17,77	0,75
Prumer_16B12a_veps	12,006	12,024	17,73	0,752
Prumer_15B22a_veps	12,006	12,024	17,373	0,767
Prumer_16B11_veps	12,006	12,024	16,205	0,823
Prumer_15B20_veps	12,006	12,024	15,967	0,835
Prumer_15B24a_veps	12,006	12,024	15,246	0,875

Tabulka 12: Prvky s hodnotou % Q_{MS} nevyhovující požadavkům

Do tabulky č. 12 byly všechny charakteristiky s hodnotou % Q_{MS} větší než 15 % záměrně nakopírovány i s příslušnými hodnotami koeficientu c_g , čímž má být poukázáno na fakt, že nevyhovujícími charakteristikami jsou přesně stejné charakteristiky, které nevyhovují ani požadavkům na hodnotu koeficientu c_g (ani c_{gk}).

Jedná se o charakteristiky, které jsou vyhodnocovány netypickým způsobem, kdy se nepoužívá metoda vyhodnocení nejmenších čtverců (Gaussova), ale metoda vyhodnocení prostřednictvím největší vepsané kružnice. Ve spojení s nastavenými poměrně úzkými hodnotami tolerance může být toto příčinou neuspokojivých hodnot indexu % Q_{MS} .

12.5.4. Analýza výsledků % Q_{MP}

U všech měřených charakteristik byla vypočtena hodnota indexu vhodnosti měřicího procesu Q_{MP} . Na měřené charakteristiky je kladen požadavek, aby jejich hodnota indexu Q_{MP} byla menší či rovna 30 % dle rovnice č. 75.

$$Q_{MS} \leq Q_{MP_{max}}; Q_{MP_{max}} = 30 \%$$

(75)

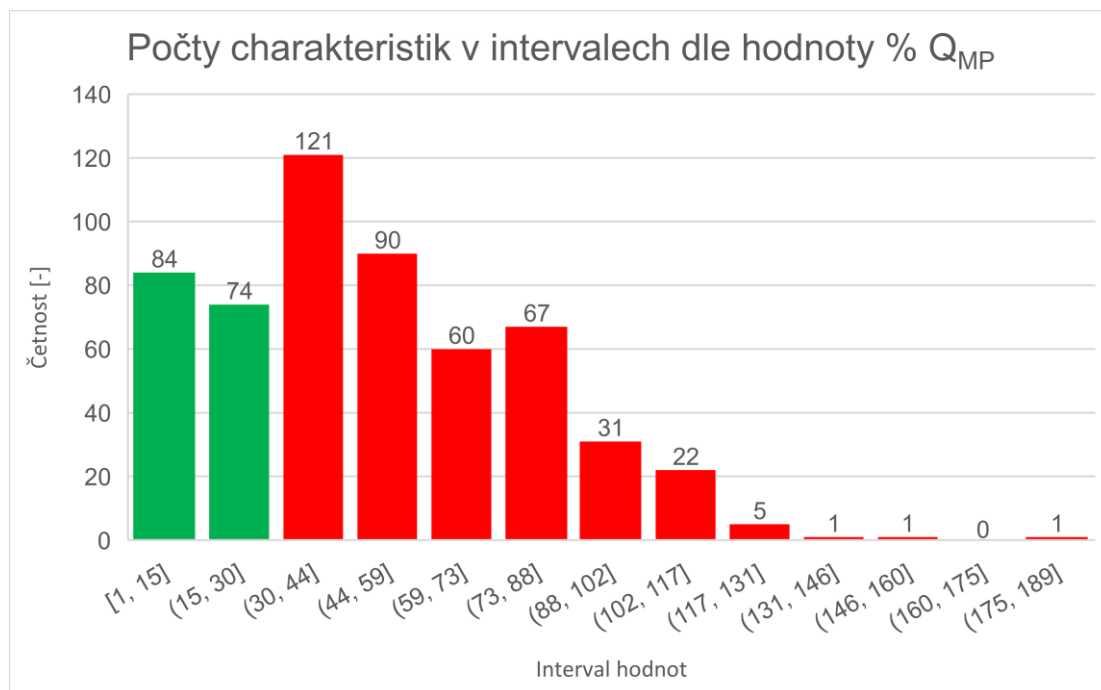
Z analýzy získaných dat vyplynulo, že požadavkům na hodnotu indexu vyhovuje 28,75 % charakteristik, zbylých 71,25 % měřených charakteristik je z hlediska měřicího

procesu nezpůsobilých. V tabulce č. 13 je přehled četností hodnot % Q_{MP} v jednotlivých intervalech.

Interval hodnot	Absolutní četnost	Relativní četnost
(0; 15)	82	14,7 %
(15; 30)	76	13,6 %
(30;45)	121	21,7 %
(45;60)	96	17,2 %
(60;75)	65	11,7 %
(75; 90)	64	11,5 %
(90;105)	27	4,8 %
(105;125)	22	3,9 %
(125;150)	3	0,5 %
(150;200)	1	0,2 %

Tabulka 13: Četnost charakteristik % Q_{MP} v intervalech dle hodnoty

Na obrázku č. 36 je histogram vypočtených hodnot % Q_{MP} . Zeleně jsou vyznačeny intervaly vyhovující požadavkům na index, červeně jsou vyznačeny intervaly požadavkům nevyhovující.



Obrázek 36: Rozložení prvků v intervalech dle hodnoty % Q_{MP}

Velký podíl nevyhovujících charakteristik poukazuje na špatně nastavený měřicí proces. Možné příčiny tohoto výsledku budou podrobněji popsány v kapitole 12.6.

12.5.5. Analýza výsledků % GRR

Po vypočtení opakovatelnosti a reprodukovatelnosti % *GRR* u všech charakteristik bylo zjištěno, že požadavkům na hodnotu dle rovnice č. 76 vyhovuje 23,04 % charakteristik, zbylých 76,96 % charakteristik požadavkům nevyhovuje.

$$\% GR\&R \leq \% GR\&R_{max}; \% GR\&R_{max} = 30 \%$$

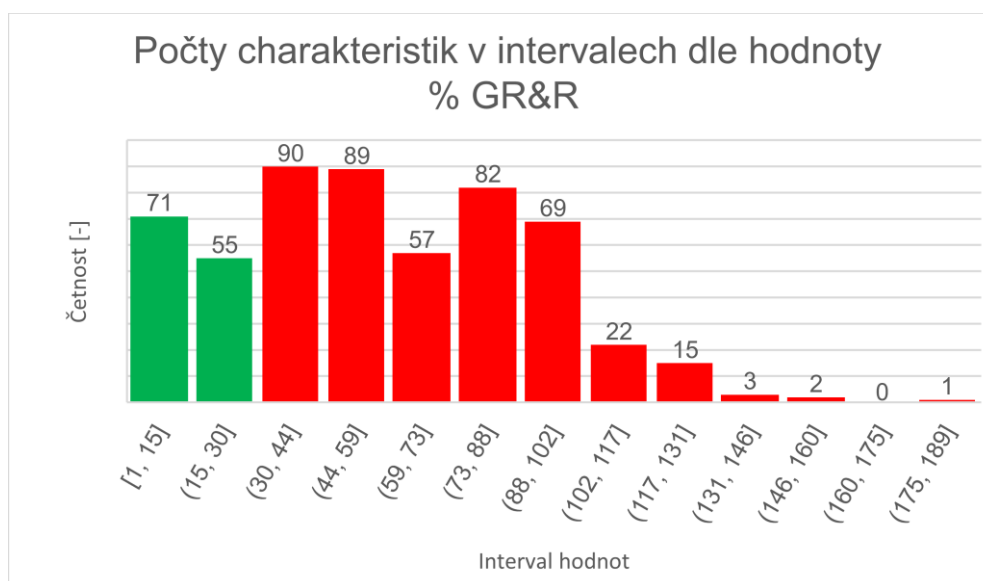
(76)

V tabulce č. 14 je znázorněna četnost hodnot % *GR&R* v jednotlivých intervalech.

Interval hodnot	Absolutní četnost	Relativní četnost
(0; 15)	71	12,7 %
(15; 30)	55	9,9 %
(30;45)	91	16,3 %
(45;60)	93	16,7 %
(60;75)	62	11,1 %
(75; 90)	83	14,9 %
(90;105)	64	11,5 %
(105;125)	30	5,4 %
(125;150)	6	1,1 %
(150;200)	2	0,4 %

Tabulka 14: Četnost hodnot % *GR&R* v intervalech dle hodnoty

Na obrázku č. 37 je histogram vypočtených hodnot opakovatelnosti a reprodukovatelnosti % *GR&R*. Zeleně vyznačené intervaly a k nim příslušející četnosti vyhovují požadavkům, červeně vyznačené nikoliv. Analýza *GR&R* tedy koresponduje s výsledky analýzy % *Q_{MP}*.



Obrázek 37: Rozložení prvků v intervalech dle hodnoty % *GR&R*

Velký podíl charakteristik nevyhovujících požadavkům poukazuje na špatně nastavený měřicí proces, popř. na výběr nedostatečně velkého reprezentativního počtu měřených vzorků. Možné příčiny těchto výsledků budou podrobněji popsány v kapitole 12.6.

12.6. Získané poznatky o měřicím procesu a systému

Po analýze výsledků z několika hledisek vyloučily tyto závěry, zpracované do tabulky č. 15:

Hodnoceno dle veličiny:	Podíl vyhovujících charakteristik:	Podíl nevyhovujících charakteristik:
c_g	95,89 %	4,11 %
c_{gk}	95,89 %	4,11 %
% Q_{MS}	96,96 %	3,04 %
% Q_{MP}	28,75 %	71,25 %
% $GR\&R$	23,04 %	76,96 %

Tabulka 15: Výsledky hodnocení měřicího systému a procesu dle několika hledisek

Z poznatků získaných z analýzy naměřených a vypočtených dat vyplývá, že měřicí systém je nastavený správně, ovšem měřicí proces je nastaven chybně. Tyto závěry znamenají, že měření jednotlivých součástí samostatně je v pořádku a dá se považovat za relevantní a přesné, ale hodnocení měření napříč více měřeními součástmi z různých výrobních strojů není vhodné.

Negativní výsledek u indexů vhodnosti měřicího procesu $\% Q_{MP}$ a opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měřicího procesu $\% GR\&R$ může být způsoben několika důvody. Do měření součástí z různých výrobních strojů je vnesena variabilita napříč těmito výrobními stroji, kdy už jen rozdílná kvalita výroby poznamenává výsledné průměrné hodnoty velkou měrou. Ukázka tohoto jevu je pro několik charakteristik znázorněna v tabulce č. 16.

Charakteristika	Jm. hodnota [mm]	T [mm]	Min [mm] (výr. stroj)	Max [mm] (výr. stroj)	$\frac{max - min}{T}$
Poloha_15B20	0	0,2	0,055718 (stroj 4)	0,12501 (stroj 1)	34,65 %
Poloha_15B24a	0	0,2	0,032844 (stroj 6)	0,115343 (stroj 2)	41,25 %
Poloha_65B13_10H7_a	0	0,2	0,03446 (stroj 6)	0,119204 (stroj 3)	42,37 %
0052~B~18B10_Y	-17,562	0,1	-17,5848 (stroj 4)	-17,5351 (stroj 6)	49,66 %

Tabulka 16: Poměr rozptylu hodnot vůči tolerancím u vybraných charakteristik

V rámci tabulky je možno vidět v prvním sloupci název dané charakteristiky, v druhém sloupci je její jmenovitá hodnota, ve třetím sloupci je hodnota tolerance příslušející k dané charakteristice. Ve čtvrtém a pátém sloupci je u každé charakteristiky vypsána příslušná minimální a maximální naměřená hodnota. U minimální i maximální hodnoty je vždy vypsán i výrobní stroj, na kterém byla daná součást vyrobena.

Jak velký vliv na výsledky měření může mít již zmíněná odlišnost kvality výroby na jednotlivých strojích, ukazuje šestý sloupec. Například u měřené charakteristiky „0052~B~18B10_Y“ se od sebe minimální a maximální naměřená hodnota liší o téměř polovinu tolerančního pole.

Tato velká rozmanitost vyrobených součástí pak zásadně poznamenává posuzování způsobilosti měřicího procesu, jelikož se neporovnávají součásti ze stejně opotřebovaných strojů. (Při výrobě se prioritně zakládají stroje 1, 2, 3, stroj 6 se k výrobě součástí používá méně než stroje s nižším číslem, tím pádem je stroj 6 méně opotřebovaný a dosahuje lepších výsledků.)

Dalším faktorem, který může být jednou z příčin negativních výsledků při posuzování měřicího procesu, je malý počet měření. Pro experiment zpracovaný v této práci bylo navrženo měření deseti součástí dvakrát, tudíž bylo naměřeno celkem dvacet měření. Tento počet měření se jeví jako nedostatečný, jelikož vzhledem k výše již zmíněným značně rozličným výsledkům není příliš prostoru pro „otupení extrémů“, pro zprůměrování extrémních hodnot. V rámci experimentu bylo změřeno pouze dvacet měření z kapacitních důvodů, měrové středisko bylo vytíženo mimo experimentu i běžnou sériovou výrobou a měření součástí z ní.

Pro případné budoucí posuzování způsobilosti a vhodnosti měřicího procesu v rámci závodu Škoda Auto a.s. je tedy výsledkem této práce doporučení, aby probíhala studie pokud možno dlouhodobá, s velkým množstvím měření a měřených součástí. Navrhovaný počet měřených součástí a měření je 10 součástí po 10 měřeních provedených na každé z nich. Při stanovování experimentu je však třeba brát v potaz časovou náročnost takto vysokého počtu měření (při 100 měřeních může být časová dotace až 100 hodin) a je třeba zohlednit, zda má dané měrové středisko potřebné volné kapacity.

Pokud nebude možno provést dlouhodobou studii s velkým počtem měření, pro posuzování měřicího procesu není hodnocení pomocí indexu způsobilosti měřicího procesu % QMP a opakovatelnosti a reprodukovatelnosti % GR&R vhodná.

13. Úprava programu pro nasazení v tzv. chytrém kontrolním měrovém plánu

V rámci měření součástí na souřadnicových měřicích strojích ve firmě Škoda Auto a.s. jsou vytvářeny měřicí programy v softwaru Calypso od firmy Zeiss, dle kterých postupuje měřicí stroj při samotném měření.

Problémem však je, i vzhledem k zapojení procesu měření do konceptu *Průmysl 4.0* a *Chytrého kontrolního měrového plánu*, že jelikož je každý program vystavěn jiným způsobem a kvůli rozdílnému přístupu různých programátorů, je stavba měřicích programů různá, nestejná, stavba programů postrádá koncepci. Jedním z cílů této práce je navržení koncepce pro třídění prvků do skupin a podskupin a pro výstavbu programů.

Při měření dle sestavených programů může probíhat měření buď celého programu najednou, nebo může být změřena jen část programu. Při měření pouze části programu je možno provést toto měření třemi způsoby:

- 1) Měřené prvky jsou vybrány pomocí výběru jednotlivých prvků.
- 2) Měřené prvky jsou vybrány pomocí výběru jednotlivých skupin prvků.
- 3) Měřené prvky jsou rozděleny na jednotlivé „runy“ (z angl. běžet, český ekvivalent „běhy“), tyto jsou poté měřeny jednotlivě. Nevýhoda tohoto způsobu je však v tom, že nelze spustit měření více runů najednou, není možno vytvořit „frontu“ měření, po doběhnutí každého jednotlivého runu musí operátor spustit další ručně.

Nejpraktičtější možností pro měření pouze části měřicího programu je možnost č. 2, tedy rozdělení měřených prvků do skupin. Tento způsob třídění měřených prvků bude navržen a rozvinut v této části práce.

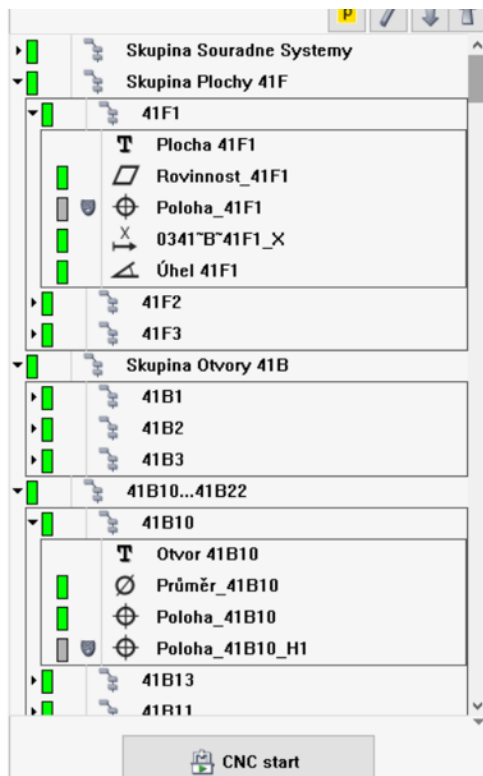
Příklad realizace zamýšlené koncepce bude proveden na programu pro měření hlav válců na bloku motoru 1.0 TSI EVO. Sestavování plánů měření probíhá v softwaru Calypso od firmy Zeiss, proto budou všechny ukázkové obrázky v této kapitole pořízené v tomto softwaru.

13.1. Výchozí stav programů

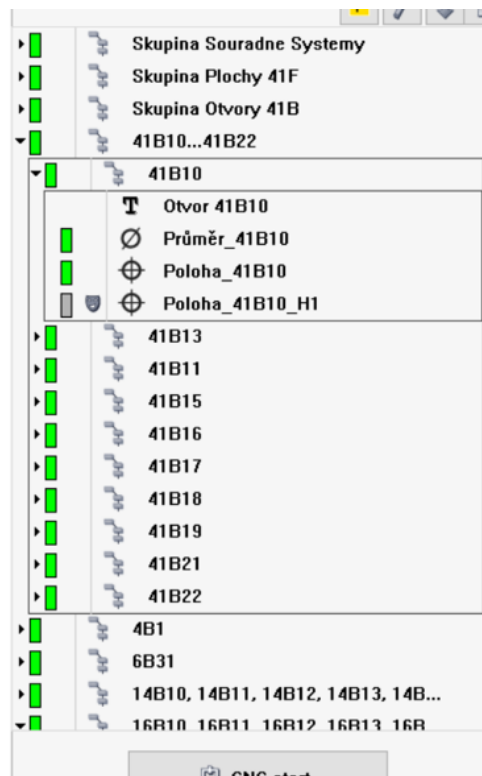
Jak je možno vidět na obrázcích č. 38 až 40 níže, v současné době je i v rámci jednoho programu běžné, že se jednotlivé skupiny prvků pojmenovávají rozdílně. Například na obrázku č. 38 lze vidět pojmenování skupiny prvků „*Skupina Plochy 4F1*“, na obrázku č. 40 je však skupina prvků pojmenována již pouze číslem, bez pojmenování typu měřených prvků, „*41B10...41B22*“. Avšak, jak si lze všimnout na obrázku č. 39, i v rámci jednoho programu je

Optimalizace plánu měření z hlediska kompatibility se systémy konceptu průmyslu 4.0

skupina prvků, která je pojmenovaná jen číslem, nazvaná jinak, a to vyjmenováním všech podskupin „64B10, 64B11, 64B12, 64B13, 64B14, 64B15“.



Obrázek 38: Organizace stromu s prvky u původního plánu měření



Obrázek 40: Organizace stromu s prvky u původního plánu měření

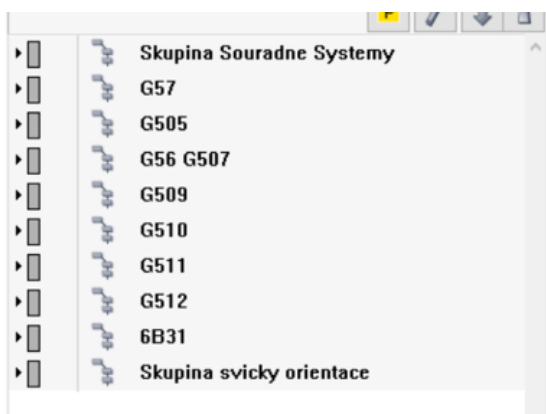


Obrázek 39: Organizace stromu s prvky u původního plánu měření

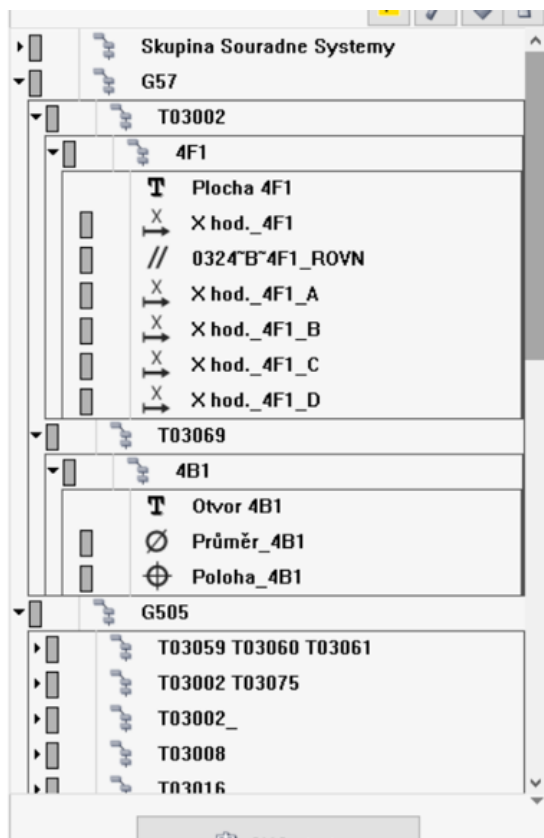
13.2. První způsob úpravy programu

Prvním navrženým způsobem třídění prvků do skupin dle nulových bodů obráběcích strojů (na obrázku č. 41 je možno vidět celý měřicí program roztríděný do složek dle nulových bodů). Nulový bod označuje hranici, do které se nástroj pohybuje rychloposuvem, za nulovým bodem už je rychlost pohybu nástroje snížena. V rámci každé složky nulového bodu jsou vytvořeny podsložky dle nástrojů, pomocí kterých byly prvky vytvořeny (na obrázku č. 42 lze vidět organizaci měřených prvků do skupin dle nulových bodů a v rámci jednotlivých skupin pak dle nástrojů). Při více používaných nulových bodech či nástrojích byly nulové body, respektive nástroje, napsány za sebe s mezerami mezi jednotlivými pojmenováními.

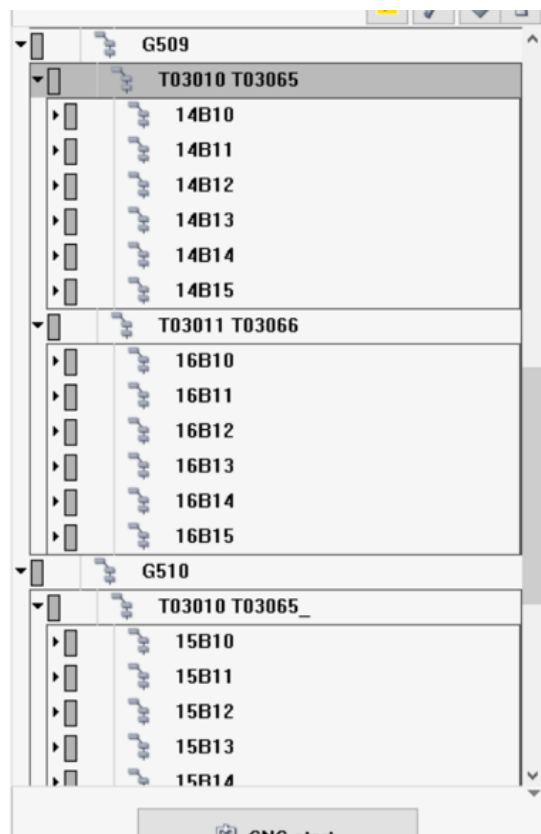
Problém při zvoleném systému třídění a pojmenovávání skupin a podskupin však nastal, když se v rámci různých skupin prvků vyskytly podskupiny se stejnou sadou používaných nástrojů. Software Calypso nepovoluje, aby se dvě složky v rámci jednoho měřicího programu jmenovaly stejně, proto byla vždy druhá tvořená složka pojmenována jako „*nástroj nástroj nástroj*“ (Příklad tohoto problému lze vidět na obrázku č. 43 u podskupin „*T03010 T03065*“ a „*T03010 T03065_*“.) Problém s tímto způsobem řešení stejného pojmenování však může být, že symbol podtržítka „_“ na konci pojmenování skupiny, respektive podskupiny, by mohl při čtení/zapisování/zpracování programů strojům činit problémy. U lidí by pak hrozila mýlka při manipulaci s programem. Proto musel být navržen jiný systém třídění a pojmenovávání, který tento vzniklý problém řeší elegantnějším způsobem. Na obrázku č. 44 jsou pro porovnání stavy programů před úpravou a po úpravě.



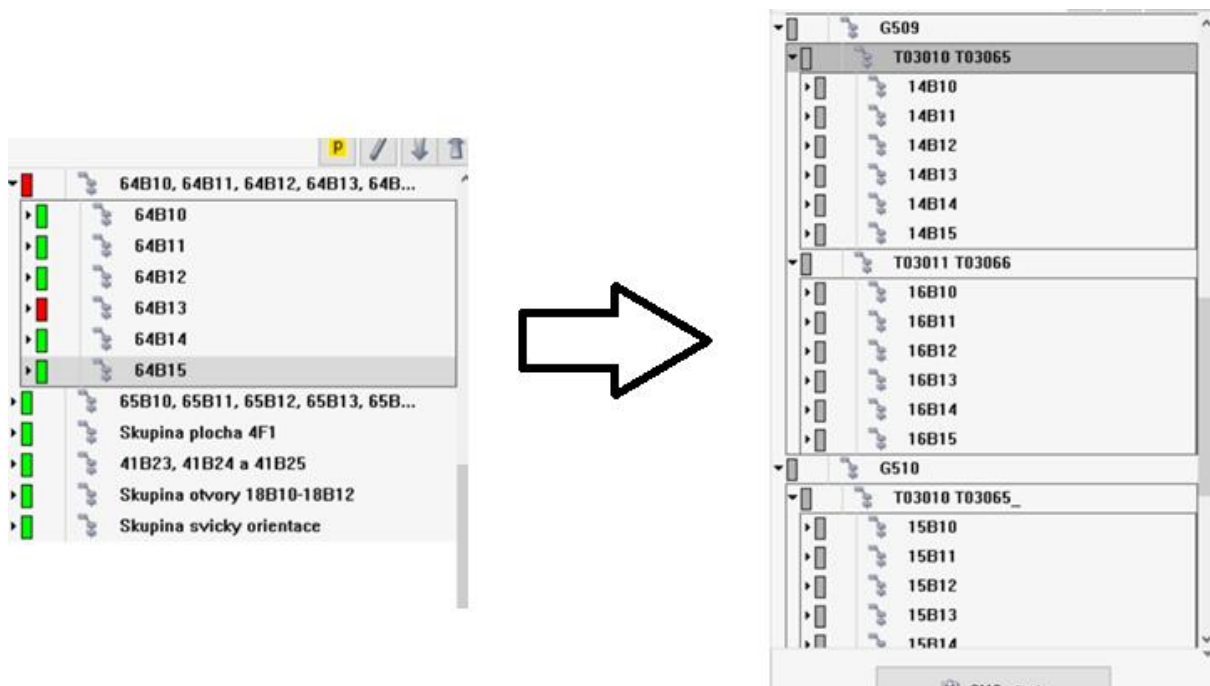
Obrázek 41: Roztrídění prvků do skupin dle nulových bodů



Obrázek 42: Roztříděné prvky do skupin dle nulových bodů a do podskupin dle nástrojů



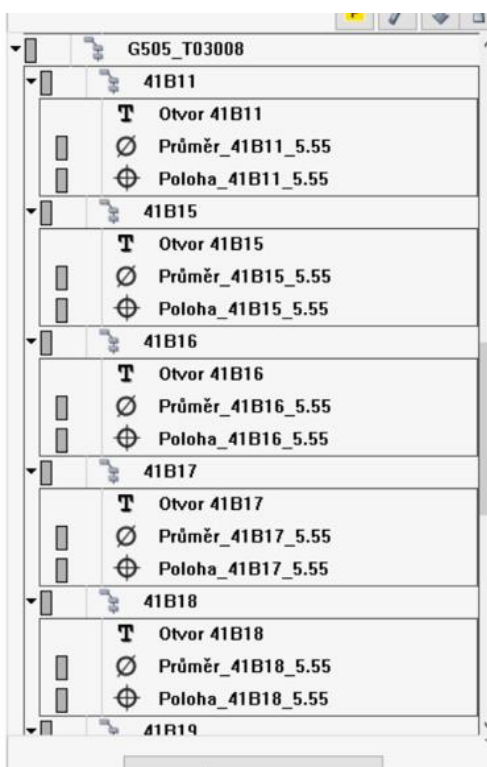
Obrázek 43: Pojmenování podskupin (v různých skupinách) se stejnou sadou nástrojů



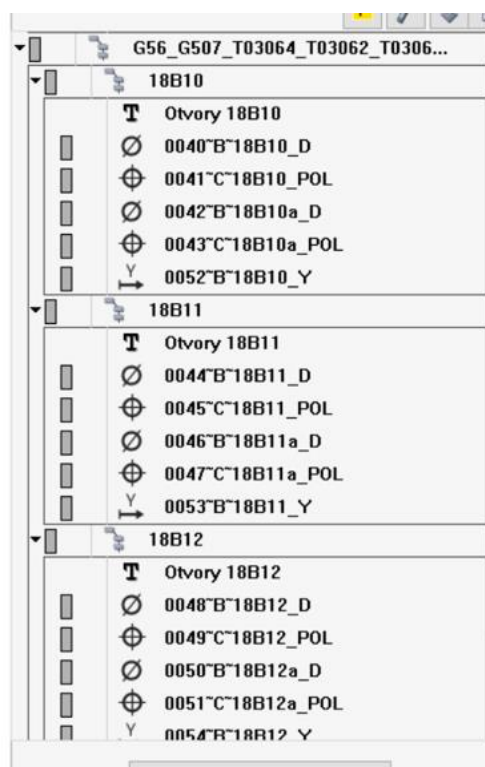
Obrázek 44: Porovnání původního stavu programu se stavem po 1. úpravě

13.3. Druhý způsob úpravy programu

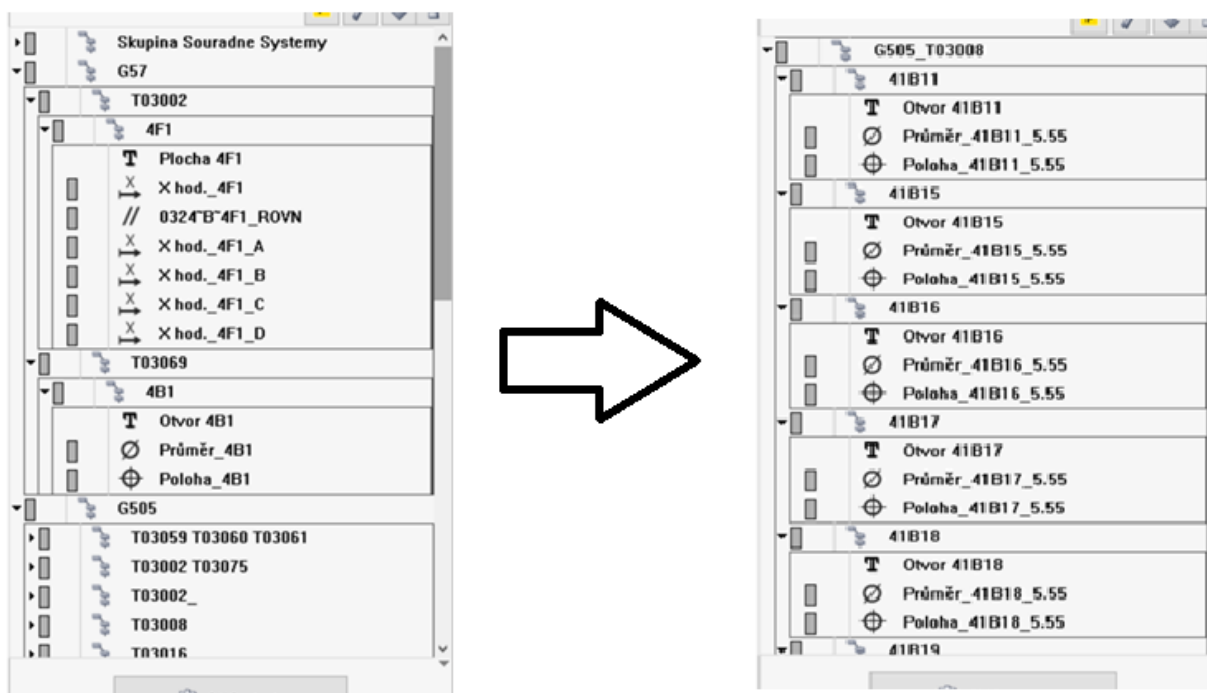
Jako řešení nastalých problémů s pojmenováváním skupin, respektive podskupin se stejnými názvy, byl navržen následující postup. Měřené prvky se třídí do skupin, které mají klíč k pojmenovávání: „*nulový bod_nulový bod_nástroj_nástroj_nástroj*“ (příklad pro skupinu s více nulovými body a s více nástroji). Tímto se předejde problémům s dualitami názvů, jelikož kombinace nulového bodu s nástrojem (či více nástroji) je vždy unikátní. Příklad aplikace tohoto systému pojmenování je možné vidět na obrázku č. 45 (příklad pro jeden nulový bod a jeden nástroj) a na obrázku č. 46 (příklad pro několik nulových bodů a několik nástrojů). Na obrázku č. 47 je porovnání stav programu po první úpravě se stavem po druhé úpravě.



Obrázek 45: Roztříděné prvky do skupin dle kombinace nulového bodu a nástroje



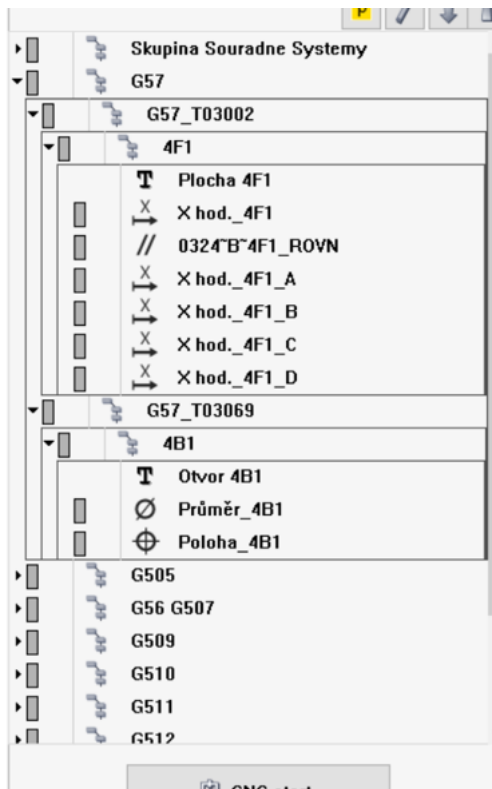
Obrázek 46: Roztříděné prvky do skupin dle kombinace několika nulových bodů a několika nástrojů



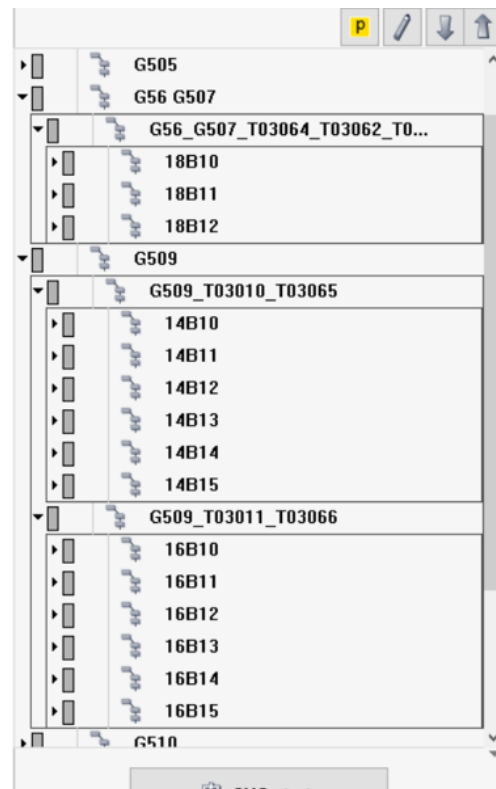
Obrázek 47: Porovnání programu ve stavu po 1. úpravě s programem po 2. úpravě

13.4. Třetí způsob úpravy programu

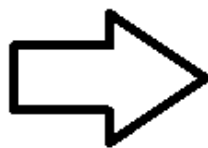
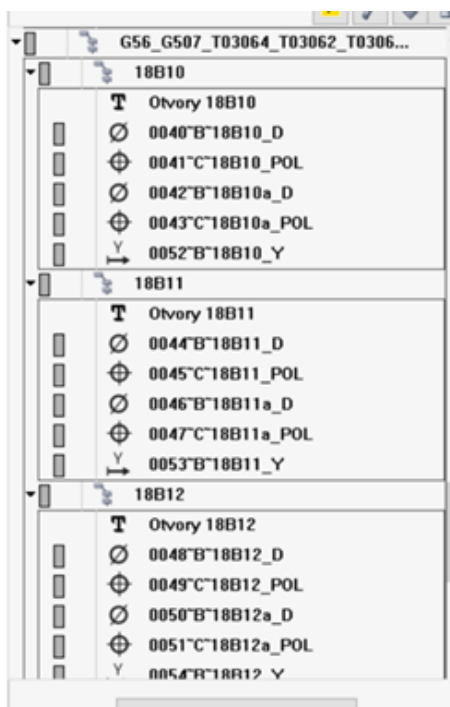
V rámci třetího navrženého způsobu třídění prvků do složek a jejich pojmenování byl navržen postup, kdy je program rozřazen do skupin dle nulových bodů a v rámci těchto skupin jsou prvky rozříděny do podskupin dle stejného klíče, jako v předchozí podkapitole 13.3 (tedy klíče „nulový bod_nulový bod_nástroj_nástroj_nástroj“). Při více nulových bodech jsou v rámci názvů skupin napsány tyto nulové body s mezerami mezi nimi. Příklad tohoto systému je na obrázku č. 48 (jeden nulový bod a jeden nástroj) a na obrázku č. 49 (několik nulových bodů a několik nástrojů). Na obrázku č. 50 je možno vidět porovnání stavu programu po druhé úpravě se stavem po druhé úpravě.



Obrázek 48: Roztříděné prvky do skupin dle nulových bodů a do podskupin dle kombinace nulového bodu a nástroje



Obrázek 49: Roztříděné prvky do skupin dle několika nulových bodů a do podskupin dle kombinace několika nulových bodů a několika nástrojů



Obrázek 50: Porovnání programu ve stavu po 2. úpravě s programem po 3. úpravě

13.5.Závěrečná diskuse metodiky úprav programů pro nasazení v tzv. chytrém kontrolním měrovém plánu

Jako nejvhodnější se tedy dle všeho jeví „třetí“ navržený způsob třídění prvků do (pod)skupin a pojmenovávání těchto (pod)skupin (z kapitoly 13.4.). Skupiny a podskupiny by se dle navržené metodiky měly pojmenovávat následujícím způsobem:

Skupiny: „*nulový bod nulový bod*“

Podskupiny: „*nulový bod_nulový bod_nástroj_nástroj_nástroj*“.

S tímto způsobem pojmenovávání by neměl být žádný formální problém v programu Calypso, neměly by nastat komplikace při použití stejné sady nástrojů u dvou skupin prvků, jelikož v názvech podskupin vznikají unikátní názvy kombinací nulových bodů a sady používaných nástrojů. Takto nastavené měřicí plány by měly umožnit adaptivní kontrolu dílů, jelikož bude v případě potřeby možno zkontrolovat např. jen prvky obráběné určitým nástrojem s daným nulovým bodem a nebude nutno měřit úplně celý měřicí program. V příloze č. 1 je zpracován manuál pro programátory, jak mají třídit měřené prvky do podskupin a skupin (a tyto podskupiny a skupiny pojmenovávat) při vypracovávání nových měřicích plánů pro měření součástí na souřadnicových měřicích strojích.

14. Závěr

Pro měřicí proces integrovaný do zamýšlené koncepce *Průmysl 4.0* je třeba, aby měřicí systémy a procesy byly způsobilé a vhodné. Dosud ale nebyla v rámci firmy Škoda Auto a.s. tato problematika nijak hodnocena. V této práci byla navržena metodika pro hodnocení způsobilosti měření pomocí veličin c_g , c_{gk} a $\% GR\&R$ a vhodnosti měření pomocí veličin $\% Q_{MS}$ a $\% Q_{MP}$. Byl proveden experiment pro ověření navržené metodiky. V rámci experimentu bylo hodnoceno celkem deset součástí z pěti výrobních strojů. Výsledkem experimentu bylo zjištění, že se hodnoty veličin c_g , c_{gk} a $\% Q_{MS}$ u většiny vyšetřovaných charakteristik držely v rámci předepsaných tolerancí. Naproti tomu u veličin $\% Q_{MP}$ a $\% GR\&R$ vyšly u většiny vyšetřovaných charakteristik hodnoty mimo předepsané tolerance. Předpokládanými důvody tohoto negativního výsledku je vnesení variability výroby do experimentu a malý počet měřených součástí. Důvody jsou podrobně analyzovány v kapitole 12.6. Pro budoucí experimenty, při kterých se bude ověřovat měřicí proces, je vhodné použít více měření a měřených součástí.

Pro bezproblémovou integraci a maximální efektivitu měřicího procesu v rámci konceptu *Průmysl 4.0* je též zapotřebí stanovit jednotnou koncepci měřicích programů. V rámci firmy Škoda Auto a.s. dosud není zavedena žádná jednotná koncepce pro stavbu a výstavbu měřicích programů, obsahem práce je navržení metodiky pro vytváření měřicích programů. Dle navrhované metodiky se měřené prvky budou dělit do skupin a podskupin dle společných charakteristik – používaných nástrojů a používaných nulových bodů strojů.

15. Zdroje

- [1] SEKER, Roman. Vyjadřování nejistot při kalibraci měřidel [online]. Brno, 2010 [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28238. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. JÍŘÍ PERNIKÁŘ, CSc.
- [2] Intro to Coordinate Metrology: Understanding the CMM: The Coordinate System. Hexagon Manufacturing Intelligence | Hexagon MI [online]. Seongnam: Hexagon AB, 2022 [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/solutions/technical-resources/metrology-101/intro-to-coordinate-metrology>
- [3] Understanding Coordinate Systems. IGeomet [online]. Helmel Engineering Products, 2020 [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <http://www.geomet-cmm-software.com/KB/Chapter5/KB10010.htm>
- [4] Cartesian coordinates. Math Insight [online]. Django, 2022 [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: https://mathinsight.org/cartesian_coordinates
- [5] Calculus Volume 3: 2.7 Cylindrical and Spherical Coordinates. OpenStax [online]. Rice University: Rice University, 2022 [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://openstax.org/books/calculus-volume-3/pages/2-7-cylindrical-and-spherical-coordinates>
- [6] Coordinate measuring machines and systems [online]. Second edition. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2012. Manufacturing engineering and materials processing. ISBN 978-1-4200-1753-3.
- [7] Styli for touch probes. Renishaw: enhancing efficiency in manufacturing and healthcare [online]. Breda: Renishaw, 2022 [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/en/styli-for-touch-probes--6333>
- [8] STYLI AND ACCESSORIES: Product catalogue [online]. In: . Hexagon AB and / or its subsidiaries and affiliates, 2019, s. 71. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/products/coordinate-measuring-machines/cmm-sensors/accessories/styli-and-accessories>
- [9] ZEISS Styli for Coordinate Measuring Machines: The Perfect Match for your Measuring Tasks. ZEISS United States of America, optical and optoelectronic technology [online]. Zeiss International, 2022 [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology/products/accessories/stylus-systems/styli.html>
- [10] KAŠPAROVÁ, Růžena. Tolerování rozměru a geometrické tolerance: Prezentace na téma: "Tolerování rozměru a geometrické tolerance" [online]. SlidePlayer.cz [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/13543490/>

- [11] ČSN EN ISO 1101 (014120). *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Geometrické tolerování - Tolerance tvaru, orientace, umístění a házení*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2020.
- [12] HRBKOVÁ, Eliška. Problematika měření obecných tvarových ploch s využitím CMM [online]. Praha, 2016 [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/66029/F2-BP-2016-Hrbkova-Eliska-Bakalarska_prace.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Libor Beránek, Ph.D.
- [13] Modular clamping plate Alufix series. Witte Barskamp GmbH & Co. KG - Auf Prazision fixiert [online]. Witte Barskamp GmbH & Co., 2022 [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://www.directindustry.com/prod/horst-witte-gera-tebau-barskamp-kg/product-13232-367790.html>
- [14] Measurement Good Practice Guide: CMM measurement strategies [online]. 2014 [cit. 2022-04-05]. ISSN 1368-6550
- [15] FLACK, David. Measurement Good Practice Guide No. 41: CMM measurement strategies [online]. 2014. Middlesex: Queen's Printer and Controller of HMSO, 2014, 2014, 119 s. [cit. 2022-04-12]. ISSN 1368-6550. Dostupné z: <https://eprintspublications.npl.co.uk/2044/1/mgpg41.pdf>
- [16] Figure 3: Resultant geometric variation of a fixtured workpiece Part I: A simulation. ResearchGate [online]. ResearchGate, 2022 [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Datum-planes-in-3-2-1-fixturing-method_fig3_26470712
- [17] 3-2-1 Principle of Location (Six Point Principle) Degree Of Freedom Controlled By 3-2-1 Location Principle - With Image. Mecholic [online]. Mecholic, 2022 [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://www.mecholic.com/2017/11/3-2-1-principle-of-location-six-point.html>
- [18] CALYPSO – základní program, návod k obsluze, Divize Industrielle Messtechnik GmbH D-73446 Oberkochen, Datum vydání: 03/11, 2011
- [19] Quality Management in the Bosch Group | Technical Statistics: 10. Capability of Measurement and Test Processes [online]. 10. Stuttgart: Robert Bosch, 2020 [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: https://assets.bosch.com/media/global/bosch_group/purchasing_and_logistics/information_for_business_partners/downloads/quality_docs/general_regulations/bosch_publications/booklet-no10-capability-of-measurement-and-test-processes_en.pdf

- [20] Quality Management in the Automotive Industry: Capability of Measurement Processes [online]. 2011. Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA), 2010 [cit. 2022-04-12]. ISSN 0943-9412. Dostupné z: <https://dastmardi.ir/wp-content/uploads/2020/11/VDA-5-Capability-of-Measurement-Processes.pdf>
- [21] CHYBY A NEJISTOTY MĚŘENÍ [online]. In: . Brno: Masarykova Univerzita. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/ped/podzim2009/FY2BP_FM3/CHYBY_A_NEJISTOTY.pdf
- [22] A.I.A.G. – Chrysler Corp., Ford Motor Co., General Motors Corp., Measurement Systems Analysis, Reference Manual, 4th edition., Michigan, USA, 2010.
- [23] Technical note #2: Multi-Point Feature and CMM Inherent Errors. Geomet—Universal CMM Software [online]. Helmel Engineering Products, 2020 [cit. 2022-04-26]. Dostupné z: <http://www.geomet-cmm-software.com/tn-002.htm>
- [24] URBAN, Jan. Vliv strategie měření na výslednou způsobilost reálných měřicích procesů na CMM [online]. Praha, 2017 [cit. 2022-04-26]. Studie k dizertační práci. České vysoké učení technické v Praze
- [25] HH-MI Manuální snímací hlava: HH-MI – Manuální indexovatelná snímací hlava s integrovanou dotykovou spínací sondou. Hexagon Manufacturing Intelligence | Hexagon Manufacturing Intelligence [online]. Seongnam: Hexagon AB, 2022 [cit. 2022-04-26]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-cz/products/coordinate-measuring-machines/cmm-sensors/probe-heads/hhmi-manual-probe-head>
- [26] Active or passive scanning. Renishaw: enhancing efficiency in manufacturing and healthcare [online]. Renishaw, 2022 [cit. 2022-04-26]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/cmmsupport/knowledgebase/en/active-or-passive-scanning--22140>
- [27] The Scanning Sensor at the End of Your CMM is One of Your Primary Data Sources.: Innovative Metrology & Styling Solutions. CMM Machines & Software | CMM Manufacturer | Wenzel America [online]. Michigan: Momentum, 2022 [cit. 2022-04-26]. Dostupné z: <https://www.wenzelamerica.com/wp-content/uploads/2021/10/wenzel-cmm-scanning-productivity-white-paper.pdf>
- [28] The optical solution with the right touch: ZEISS O-INSPECT. ZEISS United Kingdom, optical and optoelectronic technology [online]. 2022 [cit. 2022-06-14]. Dostupné z: <https://www.zeiss.co.uk/metrology/products/systems/optical-measurement/o-inspect.html>
- [29] ZEISS CALENO: Multisenzorový měřicí stroj s horizontálním ramenem. ZEISS Česká republika [online]. 2022 [cit. 2022-06-14]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/souradnicove-merici-stroje/stojanove-merici-stroje-s-horizontalnim-ramenem/caleno.html>

- [30] SP80 a SP80H: Skenovací sonda SP80 kombinuje možnost použití velmi dlouhých doteků s mimořádně vysokou přesností. Je jednoznačnou volbou pro mnoho náročných měřicích úloh. Renishaw: zvyšování efektivity ve výrobě a zdravotní péči [online]. 2022 [cit. 2022-06-14]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/sp80-a-sp80h--6686>
- [31] REVO® high performance 5-axis measurement system. *Renishaw* [online]. [cit. 2022-05-30]. Dostupné z: <https://www.renishaw.se/resourcecentre/sv/download/brochure-revo-high-performance-5-axis-measurement-system--124508>
- [32] ŠTĚPÁN, Jaroslav. Nejistota měření v procesu měření: Příručka k „Prokazování způsobilosti měřicích systémů“ [online]. Mladá Boleslav: Škoda Auto, 2014 [cit. 2022-06-24].
- [33] PALÁSEK, Vítězslav. SOUŘADNICOVÉ MĚŘÍCÍ STROJE (CMM) S OPTICKÝM SNÍMACÍM SYSTÉMEM A OPTICKÉ CMM [online]. Brno, 2009 [cit. 2022-06-24]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/13554/final-thesis.pdf?sequence=6&isAllowed=y> . Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Perníkář, CSc.
- [34] Laser Trackers – From Inspection to Manufacturing. *Engineering.com* [online]. engineering.com, 2022 [cit. 2022-06-24]. Dostupné z: <https://www.engineering.com/story/laser-trackers-from-inspection-to-manufacturing>
- [35] Three-dimensional shape acquisition by fringe projection. *STEMMER IMAGING* [online]. Suresnes: STEMMER IMAGING, 2022 [cit. 2022-07-27]. Dostupné z: <https://www.stemmer-imaging.com/fr-fr/donnees/cameras-three-dimensional-shape-acquisition-by-fringe-projection/>
- [36] Down, Michael. Measurement System Analysis: Reference Manual. Automotive Industry Action Group, 2010.
- [37] ISO/TS 14253-4:2010. Geometrical product specifications (GPS): Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment — Part 4: Background on functional limits and specification limits in decision rules. 1. ISO, 2010.
- [38] Leitz PMM-G [online]. Hexagon AB, 2022 [cit. 2022-07-25]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-cz/products/coordinate-measuring-machines/gantry-cmms/leitz-pmmg>
- [39] TORO [online]. Hexagon AB, 2022 [cit. 2022-07-25]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/coordinate-measuring-machines/horizontal-arm-cmms/dea-toro>
- [40] TNI 01 0115 (010115). Mezinárodní metrologický slovník: Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny. 02/2009. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2009.

- [41] ISO 22514-7:2021. Statistical methods in process management — Capability and performance: Part 7: Capability of measurement processes. 08/2021. 2021.

16. Seznam obrázků, tabulek a zkratk

Seznam obrázků:

Obrázek 1: Vyrovnání součásti v souřadném systému součásti [3]	10
Obrázek 2: Kartézská soustava souřadnic s vyznačeným bodem a rovinou [4]	11
Obrázek 3: Identifikace bodu v cylindrické soustavě souřadnic [5]	12
Obrázek 4: Identifikace bodu ve sférické soustavě souřadnic [5].....	12
Obrázek 5: Měření na souřadnicových měřicích strojích [6].....	14
Obrázek 6: Rozdělení souřadnicových měřicích strojů dle konstrukce [6]	15
Obrázek 7: Souřadnicový měřicí stroj portálové konstrukce s pevným portálem Zeiss O-inspect 5/4/3 [28].....	16
Obrázek 8: Souřadnicový měřicí stroj sloupové konstrukce Zeiss Caleno [29]	17
Obrázek 9: Dvouramenný souřadnicový měřicí stroj sloupové konstrukce DEA TORO [39]	18
Obrázek 10: Souřadnicový měřicí stroj mostového typu Leitz PMM G [38].....	19
Obrázek 11: Princip fungování spínacího dotykového systému [23]	20
Obrázek 12: Manuální nastavitelná (indexovatelná) snímací hlava s integrovanou dotykovou spínací sondou HH-MI [25]	21
Obrázek 13: Automatická nastavitelná (motorická) snímací hlava s integrovanou spínací sondou Renishaw REVO 5 [31]	21
Obrázek 14: Aktivní snímací hlava Renishaw SP80 [30]	22
Obrázek 15: Skenování součásti pomocí laser trackeru API OT 2 core [34]	23
Obrázek 16: Princip měření metodou pruhové projekce [35]	24
Obrázek 17: Typy měřicích sond [8].....	26
Obrázek 18: Kulička z rubínu (vlevo) a z diamantu, dřík z uhlíkových vláken (vlevo) a stupňovitý dřík z karbidu wolframu [9].....	28
Obrázek 19: Geometrické specifikace produktu [10]	29
Obrázek 20: Upínací prvky Alufix od firmy Witte [13]	30
Obrázek 21: Kvalifikační koule [15].....	31
Obrázek 22: Vyrovnání pomocí metody 3-2-1 [16].....	33
Obrázek 23: Diagram pro Postup 1 [32]	36
Obrázek 24: Diagram pro postup 2 [32].....	38
Obrázek 25: Diagram pro posuzování vhodnosti měřicího systému a procesu dle VDA 5 [20]	46
Obrázek 26: Vhodný výsledek dle normy ISO/TS 14253 [20].....	50

Obrázek 27: Ishikawa diagram s možnými zdroji chyb a nejistot	52
Obrázek 28: Měřená součást (blok motoru 1.0 TSI EVO).....	65
Obrázek 29: Ukázka zadání dat do experimentu typu 2 v rámci MP.....	68
Obrázek 30: Ukázka prezentace výsledků v prostředí programu Yarovyn.....	69
Obrázek 31: Prezentace výsledků v protokolu PDF.....	69
Obrázek 32: Rozložení prvků v intervalech dle hodnoty c_g	70
Obrázek 33: Rozložení prvků v intervalech dle hodnoty c_{gk}	72
Obrázek 34: Rozložení prvků v intervalech dle hodnoty % Q_{MS}	74
Obrázek 35: Rozložení prvků v intervalech dle hodnoty % Q_{MS} u zredukovaného souboru hodnot.....	75
Obrázek 36: Rozložení prvků v intervalech dle hodnoty % Q_{MP}	77
Obrázek 37: Rozložení prvků v intervalech dle hodnoty % GR&R	78
Obrázek 38: Organizace stromu s prvky u původního plánu měření	82
Obrázek 39: Organizace stromu s prvky u původního plánu měření	82
Obrázek 40: Organizace stromu s prvky u původního plánu měření	82
Obrázek 41: Roztřídění prvků do skupin dle nulových bodů.....	83
Obrázek 42: Roztříděné prvky do skupin dle nulových bodů a do podskupin dle nástrojů.....	84
Obrázek 43: Pojmenování podskupin (v různých skupinách) se stejnou sadou nástrojů.....	84
Obrázek 44: Porovnání původního stavu programu se stavem po 1. úpravě	84
Obrázek 45: Roztříděné prvky do skupin dle kombinace nulového bodu a nástroje.....	85
Obrázek 46: Roztříděné prvky do skupin dle kombinace několika nulových bodů a několika nástrojů	85
Obrázek 47: Porovnání programu ve stavu po 1. úpravě s programem po 2. úpravě	86
Obrázek 48: Roztříděné prvky do skupin dle nulových bodů a do podskupin dle kombinace nulového bodu a nástroje.....	87
Obrázek 49: Roztříděné prvky do skupin dle několika nulových bodů a do podskupin dle kombinace několika nulových bodů a několika nástrojů	87
Obrázek 50: Porovnání programu ve stavu po 2. úpravě s programem po 3. úpravě	87

Seznam tabulek:

Tabulka 1: Minimální počet měřených bodů pro geometrické prvky [18]	33
Tabulka 2: Přehled standardní nejistoty stanovené metodou B pro normální a rovnoměrné rozložení [20]	55
Tabulka 3: Přehled koeficientu rozšíření k pro různé pravděpodobnosti pokrytí P ($n > 30$) [21]	56
Tabulka 4: Rozdělení výsledků dle velikosti koeficientu	63
Tabulka 5: Kombinace výrobních strojů a upínačů u měřených součástí	66
Tabulka 6: Přehled součástí měřených na Zeiss Prismo Ultra	66
Tabulka 7: Četnost hodnot c_g v intervalech dle hodnoty	70
Tabulka 8: Prvky s hodnotou koeficientu c_g nevyhovující požadavkům	71
Tabulka 9: Četnost hodnot c_{gk} v intervalech dle hodnoty	72
Tabulka 10: Charakteristiky s hodnotou koeficientu c_g nevyhovující požadavkům	73
Tabulka 11: Četnost hodnot % Q_{MS} v intervalech dle hodnoty	74
Tabulka 12: Prvky s hodnotou % Q_{MS} nevyhovující požadavkům	76
Tabulka 13: Četnost charakteristik % Q_{MP} v intervalech dle hodnoty	77
Tabulka 14: Četnost hodnot % GR&R v intervalech dle hodnoty	78
Tabulka 15: Výsledky hodnocení měřicího systému a procesu dle několika hledisek	79
Tabulka 16: Poměr rozptylu hodnot vůči tolerancím u vybraných charakteristik	79

Seznam použitých zkratk:

CMM – souřadnicový měřicí stroj

MPE – největší dovolená chyba měření

IFM – typ laserové hlavy (laser trackeru)

CCD kamera – charge-coupled device – světlocitná kamera s integrovaným okruhem

GPS – geometrické specifikace produktu

SW – software

MSA – measurement systems analysis – analýza měřicích systémů [36]

c_g – koeficient způsobilosti měřidla

c_{gk} – Minimální (kritický) index způsobilosti měřidla

HMR – horní mezní rozměr

DMR – dolní mezní rozměr

GR&R – opakovatelnost a reprodukovatelnost měření

ARM – average-range-method – metoda střední hodnoty a rozsahu

ANOVA – analysis of variance – analýza rozptylu

VDA 5 – verband der automobilindustrie [20]

u_{MS} – kombinovaná standardní nejistota měřicího systému

U_{MS} – rozšířená nejistota měřicího systému

Q_{MS} – index vhodnosti měřicího systému

u_{MP} – kombinovaná standardní nejistota měřicího procesu

U_{MP} – rozšířená nejistota měřicího procesu

Q_{MP} – index vhodnosti měřicího procesu

u_A – standardní nejistota stanovená metodou A

u_B – standardní nejistota stanovená metodou B

u – kombinovaná standardní nejistota

U – rozšířená nejistota měření

17. Příloha č. 1: Manuál pro tvorbu měřicích programů v softwaru Zeiss Calypso

Pro zapojení měřicího procesu do konceptu *Průmysl 4.0* a zapojení jednotlivých měřicích plánů do *Chytrého kontrolního měrového plánu* je třeba sjednotit koncepci výstavby a stavby měřicích programů. Při rozdělování měřených prvků a charakteristik do skupin a podskupin je třeba držet se těchto instrukcí:

1) Analýza měřených prvků

U každého měřeného prvku musí být zjištěno, jakým nástrojem (příp. nástroji) byl daný prvek vyroben. Též musí být zjištěno, jaký byl pro výrobu daného prvku nastaven nulový bod (příp. nulové body) na stroji.

2) Tvorba podskupin měřených prvků v softwaru Zeiss Calypso

Po analýze měřených prvků a k nim příslušejících kombinací nulových bodů stroje a nástrojů, které dané prvky vyrobily, následuje roztrídění prvků do podskupin. Všechny prvky se stejnou kombinací nulového bodu a nástroje jsou v rámci softwaru *Zeiss Calypso* roztríděny do společných podskupin s názvem vytvořeným dle klíče:

„nulový bod_nástroj“.

Při kombinaci více používaných nulových bodů a více používaných nástrojů u dané skupiny prvků je podskupina nazvána dle klíče:

„nulový bod_nulový bod_nástroj_nástroj_nástroj“.

3) Tvorba skupin měřených prvků v softwaru Zeiss Calypso

Po vytvoření podskupin dle klíče v bodě 2 následuje vytvoření skupin. Tyto skupiny sdružují měřené prvky (respektive jejich podskupiny) dle používaného nástroje, případně stejné kombinace používaných nástrojů. Skupiny se nazývají dle klíče:

„nulový bod nulový bod“.

Příklad systematického pojmenování:

Název skupiny: „G56_G507“

Název podskupiny v této skupině: „G56_G507_T0364_T0362“