

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ**



**MOŽNOSTI OPTIMALIZACE
PLÁNŮ MĚŘENÍ VYUŽÍVANÝCH
PRO KONTROLU DÍLŮ NA CMM**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE
2021**

ONDŘEJ STRÁNSKÝ

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Stránský** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **459889**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Možnosti optimalizace plánů měření využívaných pro kontrolu dílů na CMM

Název diplomové práce anglicky:

Optimization of measurement plans used for inspection of parts on CMM

Pokyny pro vypracování:

Souřadnicové měřicí stroje a snímací systémy využívané v průmyslu, proces kontroly dílu s využitím CMM.
Strategie měření a vliv jednotlivých parametrů na produktivitu a přesnost procesu měření.
Metody využívané pro analýzu a hodnocení procesu měření.
Analýza plánu měření a optimalizace strategie měření pro snížení času měření, při zachování potřebné přesnosti.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Libor Beránek, Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS


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

Datum zadání diplomové práce: **30.10.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **17.01.2021**

Platnost zadání diplomové práce: _____


Ing. Libor Beránek, Ph.D.
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.

1.12.2020
Datum převzetí zadání

Stránský
Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pod vedením mého školitele Ing. Libora Beránka, Ph.D.

V Praze _____

Bc. Ondřej Stránský

Poděkování

Děkuji Ing. Liboru Beránkovi, Ph.D. za vedení diplomové práce, odborné připomínky týkající se vypracování a za pomoc s praktickou částí.

Dále děkuji Ing. Janu Urbanovi za získání měřeného dílu, plánu měření a přípravku.

V neposlední řadě děkuji rodině, přítelkyni a přátelům za veškerou pomoc (morální i věcnou), jež mi v průběhu nejen tvorby práce, ale i v průběhu celého studia poskytli.

Abstrakt

Práce je zaměřená na souřadnicovou měřicí techniku, konstrukční řešení, parametry mající vliv na kvalitu měření, metody kvalitativního hodnocení procesu měření a na možnosti optimalizace plánu měření. V praktické části jsou poznatky ověřeny na reálném dílu.

Klíčová slova

Souřadnicová měřicí technika, souřadnicové měřicí stroje (SMS), analýza systému měření, optimalizace plánu měření

Abstract

The work is focused on coordinate measuring technology, design solutions, parameters affecting the quality of measurement, methods of qualitative evaluation of the measurement process and the possibility of optimizing the measurement plan. In the practical part, the findings are verified on a real part.

Keywords

Coordinate measuring technology, coordinate measuring machines (CMM), Measurement System Analysis (MSA), optimization of the measurement plan



Obsah

Zadání práce	1
Prohlášení	2
Poděkování	3
Abstrakt	4
1 Úvod	7
2 Souřadnicové měřicí stroje a snímací systémy využívané v průmyslu, proces kontroly dílu s využitím CMM.....	8
2.1 Definice souřadnicového měřicího stroje (CMM)	8
2.2 Konstrukce snímačů CMM	10
2.3 Kompenzace	22
2.4 Postup / Princip měření.....	26
3 Strategie měření a vliv jednotlivých parametrů na produktivitu a přesnost procesu měření.....	35
3.1 Měření kruhovými drahami na válci	37
3.2 Měření kulových ploch a nakloněných rovin	39
4 Metody využívané pro analýzu a hodnocení procesu měření	41
4.1 Měření, chyby měření a nejistoty	41
4.2 Matematický pohled na nejistoty měření	44
4.3 Užívaná terminologie	48
4.4 Způsobilost výrobního systému a systému měření	52
4.5 Metodika analýzy systému měření dle MSA.....	54
5 Současný stav řešené problematiky	60
5.1 Vyhodnocení naměřených dat	63



6	Optimalizace strategie měření pro snížení času měření při zachování potřebné přesnosti	71
6.1	Rozdíl měření oproti původnímu programu	71
6.2	Vyhodnocení optimalizovaného plánu měření	73
6.3	Srovnání plánů měření a další optimalizace	83
6.4	Závěr kapitoly	84
7	Závěr	87
8	Bibliografie	89
9	Seznam příloh.....	94
10	Seznam obrázků	95



1 Úvod

Práce popisuje přehled současné souřadnicové měřicí techniky, zaměřuje se na kartézsky uspořádané stroje, důvody a výhody jejich využití. Popsány jsou jejich varianty, konstrukční uspořádání, korekce a kompenzace. Je popsán proces kontroly dílu s využitím CMM a využití dat z kontroly nad rámec posouzení shody jednotlivého dílu, ale i jako prostředek pro regulaci výrobního procesu. Popsány jsou strategie měření a vliv vybraných parametrů na produktivitu a přesnost měření. Pozornost je zaměřena na strategie měření válcových děr a kuželů.

Dále se snaží čtenáře uvést do problematiky hodnocení a analýzy procesu měření. Kromě metodiky analýzy procesu měření MSA je nastíněn pohled na nejistoty měření, jejich význam v případě rozhodování v blízkosti toleranční meze a matematický pohled na nejistoty. Pro orientaci v problematice je práce doplněna stručným přehledem používané terminologie v dané oblasti. Jako hlavní hodnotící parametr jsou popsány indexy způsobilosti procesu C_p , C_{pk} a indexy způsobilosti systému měření C_g , C_{gk} společně se způsoby výpočtu.

V praktické části je demonstrována analýza a optimalizace plánu měření s cílem zkrácení potřebného času bez zhoršení kvality měření na vybraném dílu pomocí zvýšení rychlosti skenování vybraných prvků. Zkrácení času měření jednotlivého dílu má za následek zvýšení kapacity měrového střediska, rychlejší zpětnou vazbu pro řízení výrobního procesu a s tím spojené snížení nákladů. V průběhu analýzy byly odhaleny nedostatky plánu měření mající vliv na kvalitu výsledků a jsou navrženy změny plánu měření pro zkvalitnění a zrychlení procesu měření.

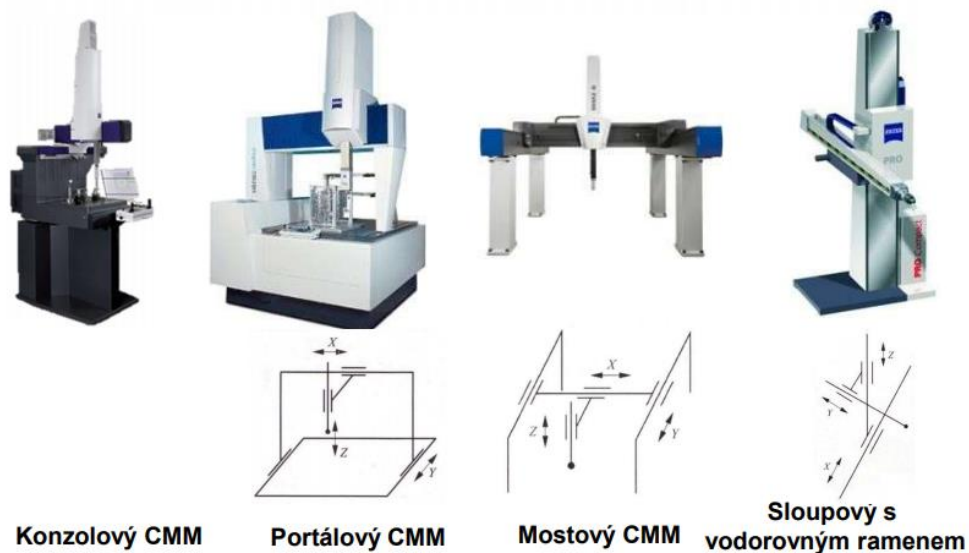


2 Souřadnicové měřicí stroje a snímací systémy využívané v průmyslu, proces kontroly dílu s využitím CMM

2.1 Definice souřadnicového měřicího stroje (CMM)

Souřadnicové měřicí stroje (SMS), označované i CMM (z anglického Coordinate Measuring Machine), jsou stroje měřící geometrii fyzických objektů pomocí extrahovaných bodů ze součásti zvoleným snímacím systémem. Existuje mnoho typů sond, například mechanické, optické, laserové a další. [1]

Základní rozdělení CMM dle systému snímání bodů je na dotykové a bezdotykové (optické). Dle konstrukce lze rozlišovat kartézské a nekartézské. [2]

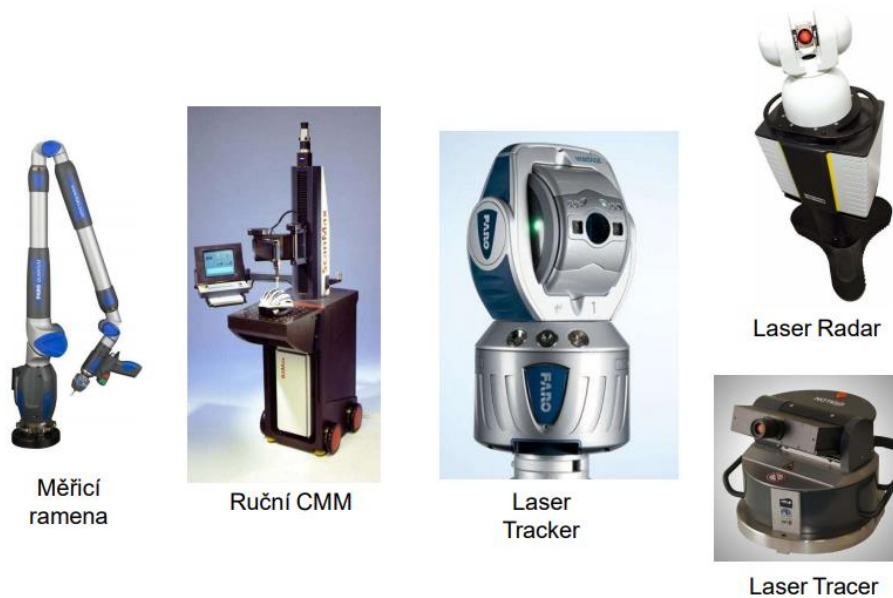


Obrázek 1 – Kartézsky uspořádané měřicí stroje [2]

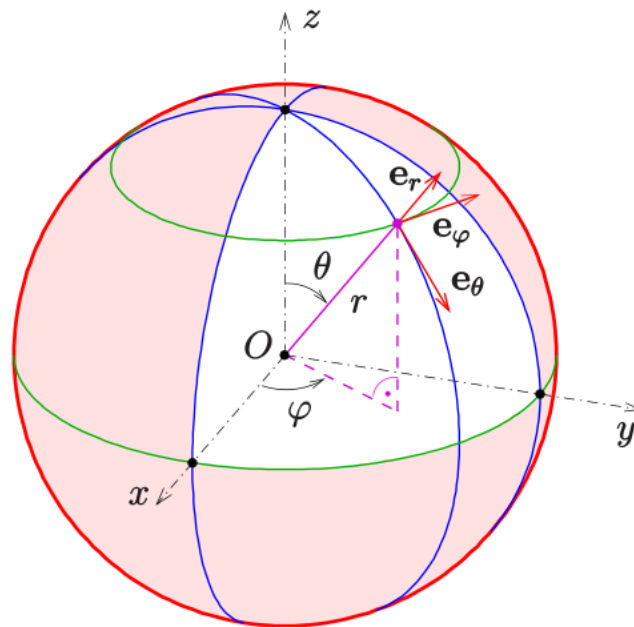


Tabulka 1 - Přehled vybraných globálních výrobců CMM [3]

Francie	Renault CMM Romer CMM
Itálie	DEA Poli Coord3 Prima
Japonsko	Mitutoyo
Německo	Leitz Metrology Zeiss CMM Wenzel Mora Steiffelmeyer
Španělsko	Trimek CMM
Švédsko	CE Johansson
Švýcarsko	Metromec Tesa Vision Leica Geosystems
USA	Starret a Sheffield Helmel Taurus, Elm Systems Resource engineering Starrett... a další
Velká Británie	W & A metrology Eley & Warren, LK Tool, Notsa, Vickers Maxicheck, IMS – International Metrology Systems



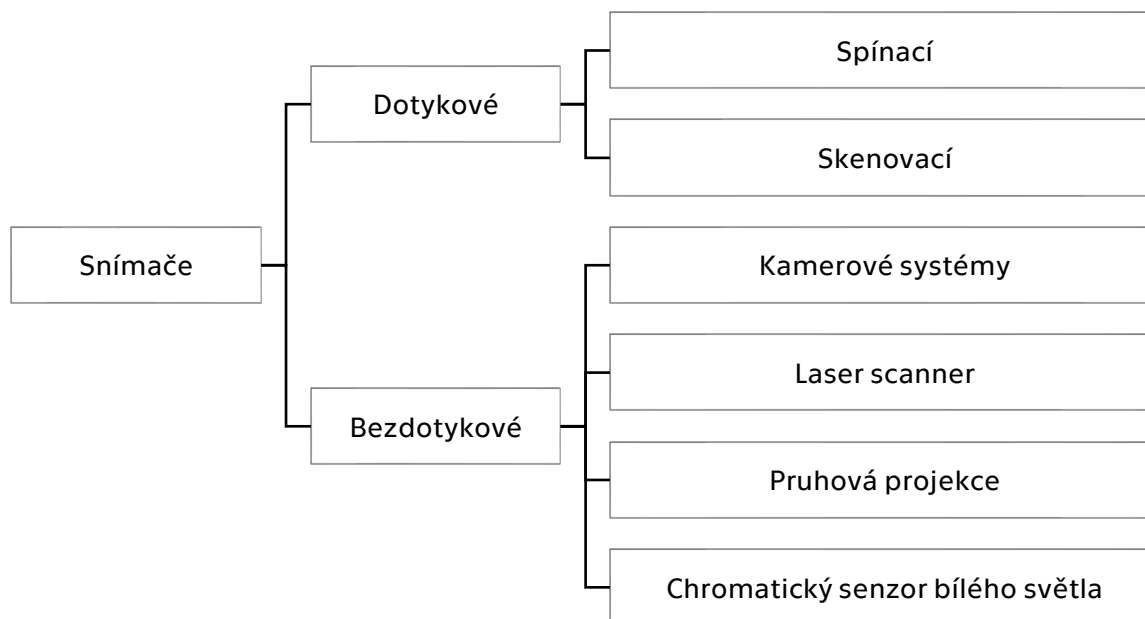
Obrázek 2 – Nekartézsky uspořádané měřicí stroje [2]



Obrázek 3 – Vektor v kartézských a polárních souřadnicích [4]

2.2 Konstrukce snímačů CMM

Snímače se dle konstrukce rozlišují na dotykové a bezdotykové. Dotykové snímače jdou dále dělit na spínací a skenovací.



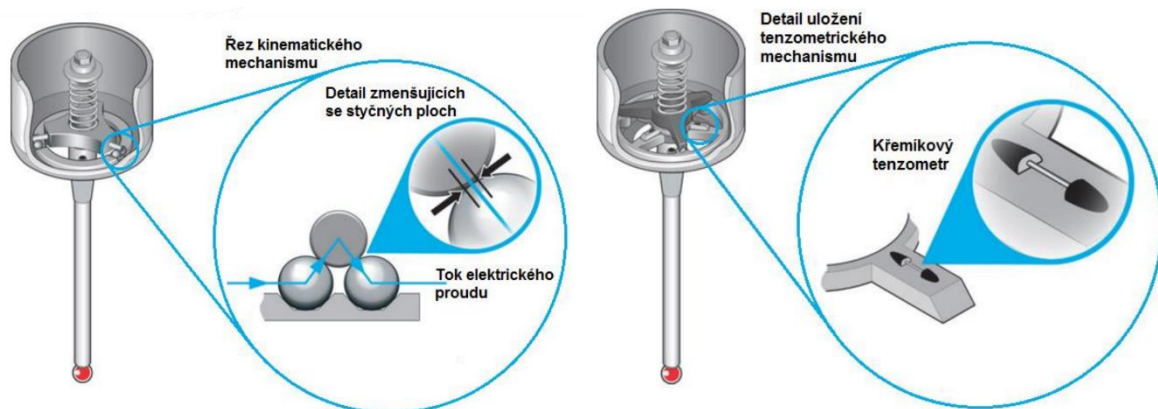
Obrázek 4 – Základní rozdělení snímačů [2]

Výhodou dotykových snímačů je menší náchylnost na znečištění měřených dílů. Dotek snímacího systému dokáže (v omezené míře) rozhrnout zbytky emulze po obrábění a jiné nečistoty. [2]

2.2.1 Spínací sondy

Výstupním signálem je u těchto sond logická 0 (kulička se nedotýká) a logická 1 (došlo k doteku). Sonda nemůže předat informace o směru dotyku a měří pouze nespojitě body. [2]

Využívá se jednoduchého elektrického obvodu. Elektrický obvod má 3 kontakty po 120° a v případě doteku je obvod rozpojen. Dále mohou být spínací sondy založeny na principu magnetické indukce, optickém principu nebo tenzometrickém a dalším. [3]



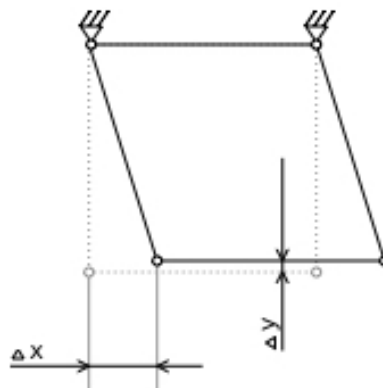
Obrázek 5 – Elektrická (vlevo) a tenzometrická (vpravo) spínací sonda [5]

2.2.2 Skenovací sondy

Skenovací sondy snímají stovky bodů z povrchu součásti, díky tomu umožňují získat lepší představu o tvaru a rozměru součásti. Skenování probíhá kontinuálně v neustálém kontaktu kulička–díł. Standardní jsou rychlosti snímání od 2000 do 6000 bodů za vteřinu. [3]

Podstatným konstrukčním prvkem je tzv paralelogram, jehož pomocí dochází k linearizaci výchylky. Výhoda tohoto uspořádání je, že při dotyku dochází k výchylce hlavně v jednom směru (na obr. směr x). Výchylka ve směru y je pak velmi malá.

$$\Delta x \gg \Delta y \quad (1)$$



Obrázek 6 – Paralelogram



Konstrukce využívající paralelogramy se objevují u robustních skenovacích hlav z důvodů požadavků na potřebný prostor. Ve srovnání s kulovou plochou u spínacích sond se jedná o zpřesnění a zároveň zvětšení pracovního rozsahu.

Pro stálý a nepřetržitý dotek kuličky v průběhu skenování je nutné generovat přitlačnou sílu. Základní možností je generovat sílu pasivně tj. mechanickým elementem (pružinou). Žádoucí přitlačná síla je pak dosahována pouze v případě vhodné vzdálenosti měřený kulička–díl.

$$F = k \cdot \Delta y \quad (2)$$

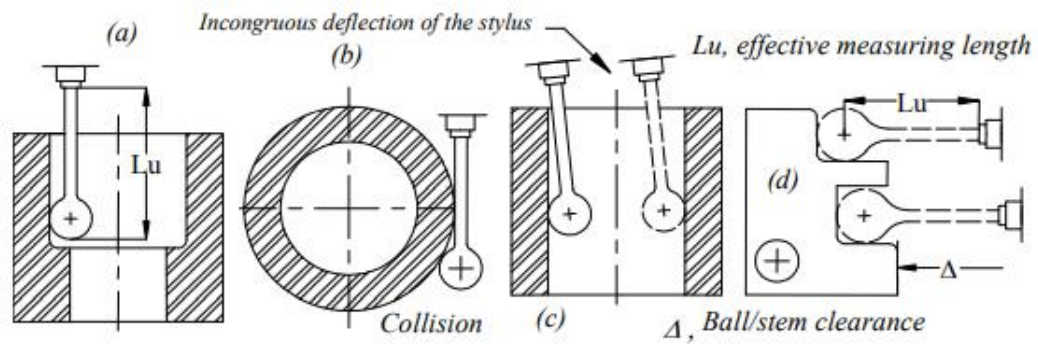
Druhou možností je generovat sílu aktivně (například lineárními motory). Výhodou je nastavení a udržení konstantní přitlačné síly v průběhu měření a zvětšení pracovního rozsahu. Nevýhodou je nárok na prostor (větší skenovací hlava) ve srovnání s mechanickým elementem (pružinou). [2]

2.2.3 Doteky

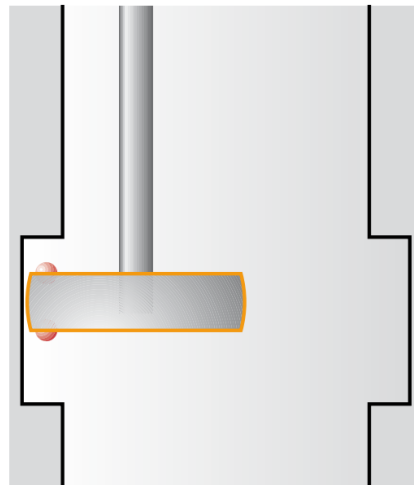
Z hlediska konstrukce doteků jsou hlavními parametry průměr koncového tělesa (kuličky), celková délka, průměr dířku a efektivní činná délka. Dále jdou rozlišovat doteky dle tvaru

- Přímé doteky
- Hvězdicové doteky
- Bodové doteky
- Doteky s kulovou plochou
- Válcové doteky
- Diskové doteky [3]

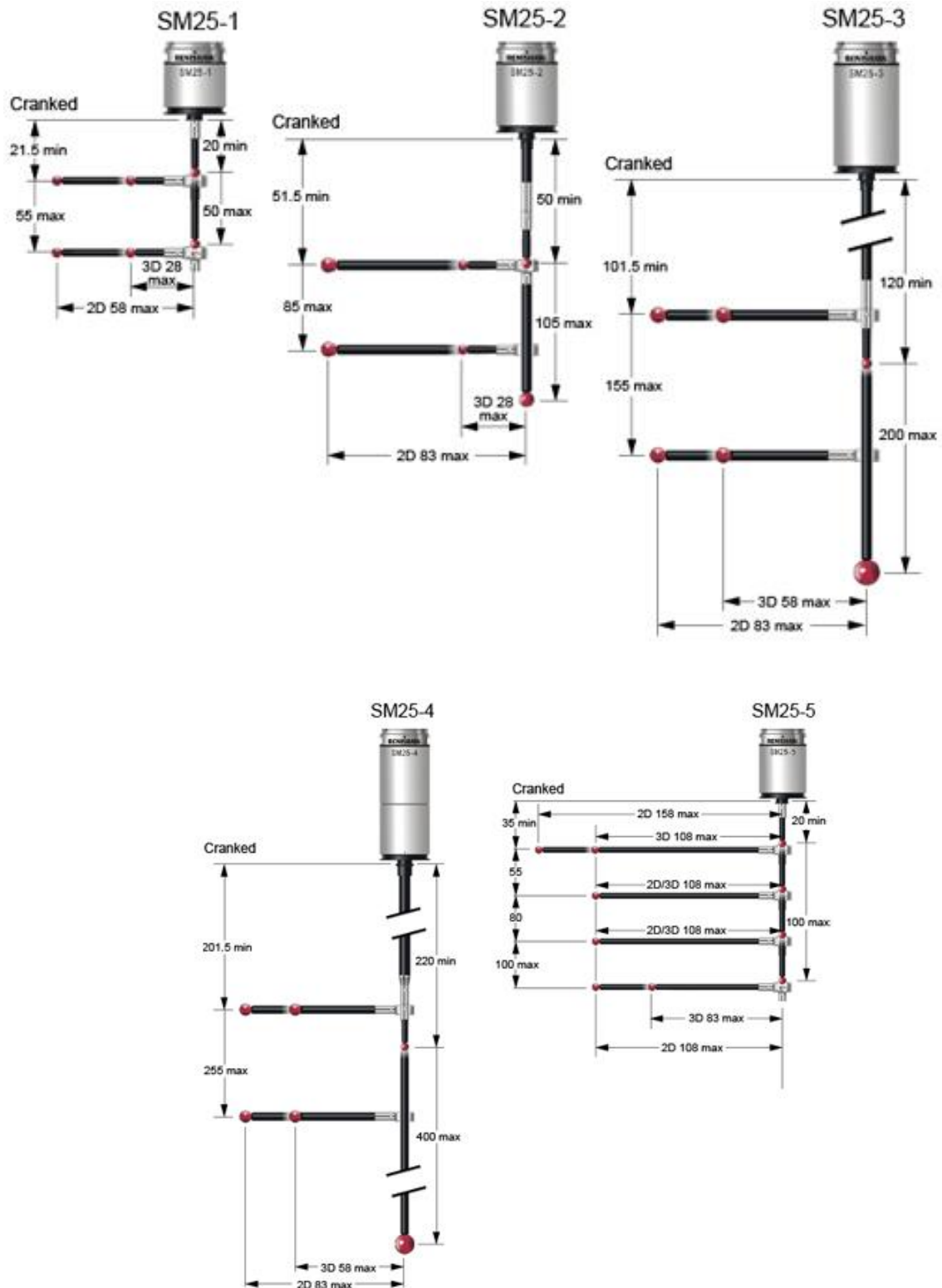
Konfigurace doteku je závislá i na použité snímací hlavě. Výrobci udávají maximální možnou délku přímého doteku, maximální boční vyložení a váhu.



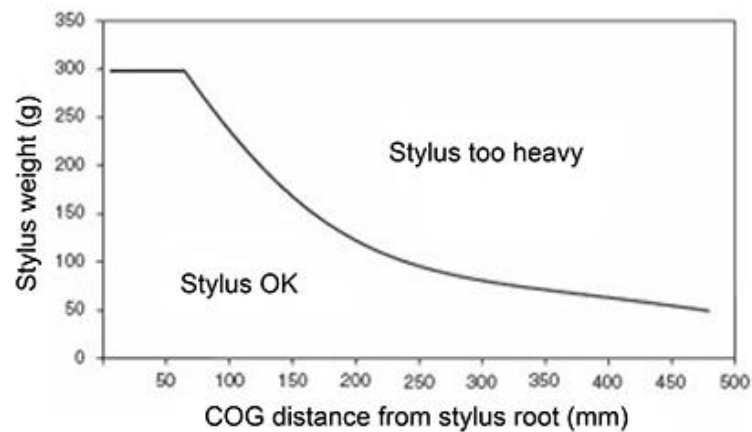
Obrázek 7 – Požadavky na dotek; zleva: efektivní délka, dotek dříkem, ohyb doteku, rozměry doteku pro měření v těsných prostorech [6]



Obrázek 8 – Měření vnitřní drážky diskovým dotykem [7]



Obrázek 9 – Maximální vyložení pro snímací hlavu SM25 [7]



Graf 1 – Závislost maximální hmotnosti doteku na vzdálenosti těžiště od snímací hlavy u SP80 [7]

Tabulka 2 – Srovnání variant snímací hlavy SM25 [7]

Typ hlavy	SM25-1 / SH25-1	SM25-2 / SH25-2	SM25-3 / SH25-3	SM25-4 / SH25-4	SM25-5 / SH25-5
Efektivní					
dosah	20–50	50–105	120–200	220–400	20–100
doteku	(20–50)	(20–75)	(20–100)	(20–200)	(20–100)
[mm]					
Maximální					
dovolená	20 mm (7 g)	20 mm (3 g)	20 mm (9 g)	20 mm (7 g)	20 mm (10 g)
délka a	30 mm (10 g)	40 mm (8 g)	50 mm (10 g)	100 mm (8 g)	50 mm (10 g)
váha	40 mm (13 g)	50 mm (10 g)	75 mm (15 g)	150 mm (9 g)	75 mm (11 g)
	50 mm (14 g)	75 mm (11 g)	100 mm (15 g)	200 mm (15 g)	100 mm (12 g)
Maximální					
dovolený					
průhyb	0.5 mm	0.5 mm	0.5 mm	0.5 mm	0.3 mm
doteku					

Ve srovnání rozměrově větší a robustní hlavy SP80 s lehkou a rozměrově malou snímací hlavou SM25 je vidět, že masivnější hlava dovoluje upnout mnohem větší a těžší konfigurace snímačů.



Tabulka 3 – Tabulka srovnání snímacích hlav SP25 (otočná) a SP80 [7]

	SP25	SP80
rozsah měření	±0,5 mm	±2,5 mm
dotek	max 14 g ¹	max 500 g
	max 400 mm	max 1000 mm
přítlačná síla	max 0,5 N (r) max 0,3 N (φ)	max 4,5 N
rozměr	ø25 mm	80x80x150 mm

2.2.4 Materiál kuličky

2.2.4.1 Rubín

Syntetický oxid hlinitý tj. rubín vyhovuje většině aplikací. Jedná se o jeden z nejtvrdějších materiálů. Kuličky se vyznačují hladkým povrchem, vynikající pevností v tlaku a vysokou odolností proti mechanickému opotřebení. Není vhodný pro kontrolu dílů z hliníkových slitin, kdy může docházet k adheznímu otěru a usazování hliníku na kuličce (v takovém případě se doporučuje využít nitrid křemíku). Druhou nevhodnou aplikací je kontrola dílců z litiny, kdy může docházet k opotřebení povrchu kuličky otěrem (v těchto aplikacích se doporučuje využít oxid zirkoničitý). [7]

2.2.4.2 Nitrid křemíku

Podobně jako rubín se vyznačuje velkou tvrdostí a odolností vůči opotřebení. Nedoporučuje se pro kontrolu dílů z oceli, kdy může docházet k opotřebení otěrem. Typickou aplikací je kontrola dílů z hliníkových slitin. [7]

¹ V případě přímého doteku

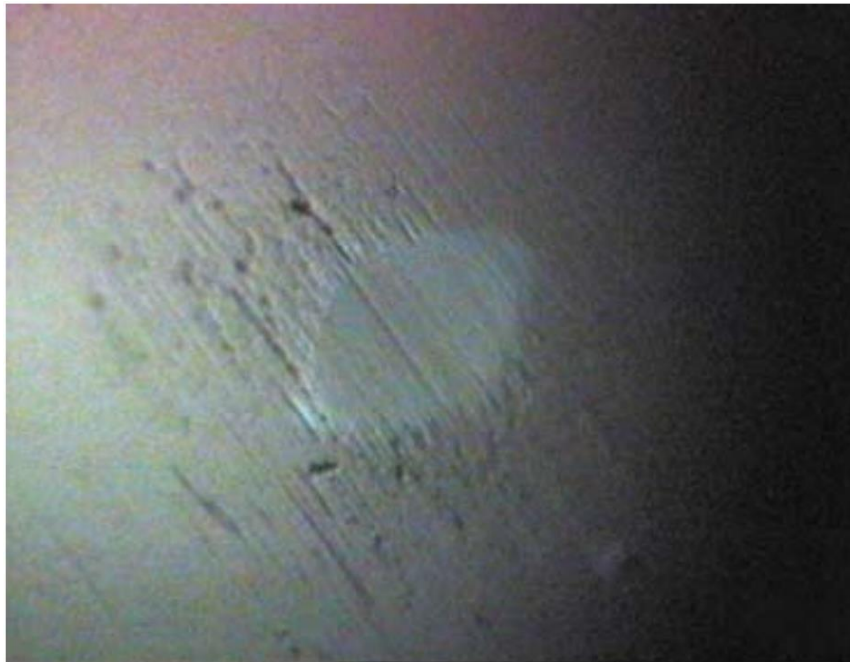


2.2.4.3 Oxid zirkoničitý

Má podobné vlastnosti jako rubín (tvrdost, odolnost opotřebení), ale díky svým vlastnostem povrchu se používá pro kontrolu litinových součástí. [7]

Tabulka 4 – Srovnání materiálů kuliček doteků [7]

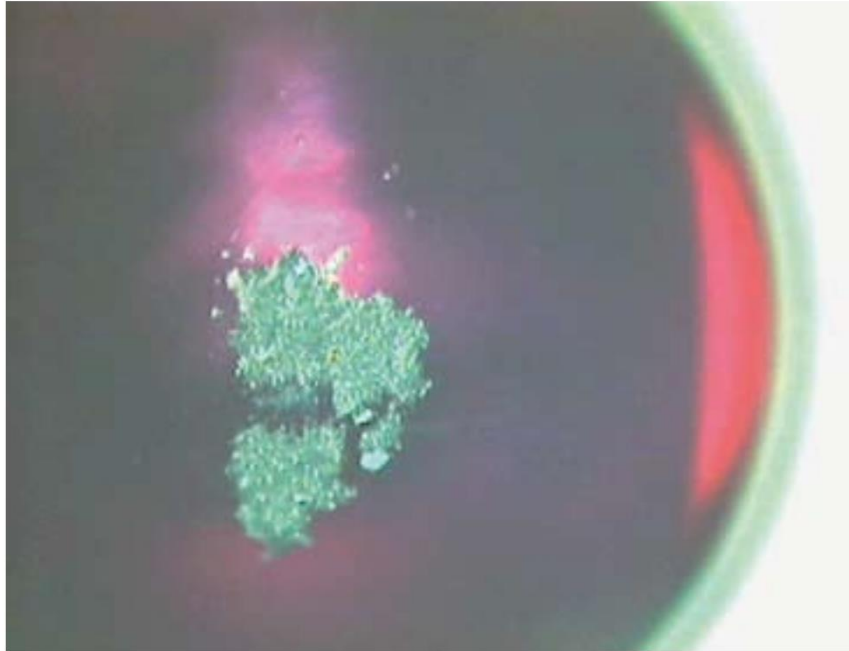
Materiál	rubín	nitrid křemíku	oxid zirkoničitý
	Monokrystalický syntetický rubín	Lisovaný nitrid křemíku Si_3N_4	Sintrovaný oxid zirkoničitý ZrO_2
Struktura	monokrystal	polykrystal	polykrystal
Čistota [%]	99,9	90	90–95
Hustota [gcm^{-3}]	3,9	3,0–3,2	6,05
Tvrdost [HV]	2300	1600	1200
Pevnost v tlaku [MPa]	2100	3000	2000
Pevnost v ohybu [MPa]	400–700	850	1000
Lomová houževnatost K_{1c} [$\text{MN/m}^{3/2}$]	1	6	10



Obrázek 10 – Škrábance na povrchu rubínové kuličky [7]



Obrázek 11 – Nános hliníku na rubínové kuličce [7]



Obrázek 12 – Nános nečistot na rubínové kuličce po 350 m měření [7]

2.2.5 Materiál dříku

2.2.5.1 Ocel

Je častým materiálem pro výrobu kompaktních doteků. Při délce kratší cca 30 mm poskytují optimální poměr tuhosti a hmotnosti.

2.2.5.2 Karbid wolframu

Je vhodným řešením při potřebě minimálního průměru dříku. Nevýhodou je vyšší hmotnost.

2.2.5.3 Keramika

Při délkách nad 30 mm mají keramické dříky tuhost porovnatelnou s ocelí a výrazně menší hmotnost než karbid wolframu. V případě kolize poskytují dodatečnou ochranu sondy – dotek se roztříští.



2.2.5.4 Uhlíková vlákna

Ve srovnání s karbidem wolframu je jejich váha přibližně o 20 % menší. Výhodou je dobrá tepelná stabilita.

2.2.5.5 Hliník

Výhodou hliníku je jeho hmotnost – využívá se pro výrobu prodloužení. Naopak nevýhodou je velká teplotní roztažnost, jež však lze kompenzovat. Díky velké teplotní vodivosti dokáže rychle vyrovnávat teplotní gradienty ve svém objemu.

2.2.5.6 Titan

V porovnání s hliníkem má lepší teplotní stálost, má dobrou tuhost v ohybu a je lehký. [7]

Tabulka 5 – Srovnání materiálů [2]

Materiál		Koeficient teplotní roztažnosti [10⁻⁶ K⁻¹]	Teplotní vodivost [W/mK]	Hustota [g/cm³]	Modul pružnosti [GPa]
wolfram karbid	K20	5,0	81,4	14,8	540
keramika	Al ₂ O ₃	8,1	29	3,9	380
titan	TiAl6V4	9,3	6,3	4,4	115
ocel	St52	11,8	50	7,85	210
hliník	AlMg4,5M n	23,8	125	2,7	70



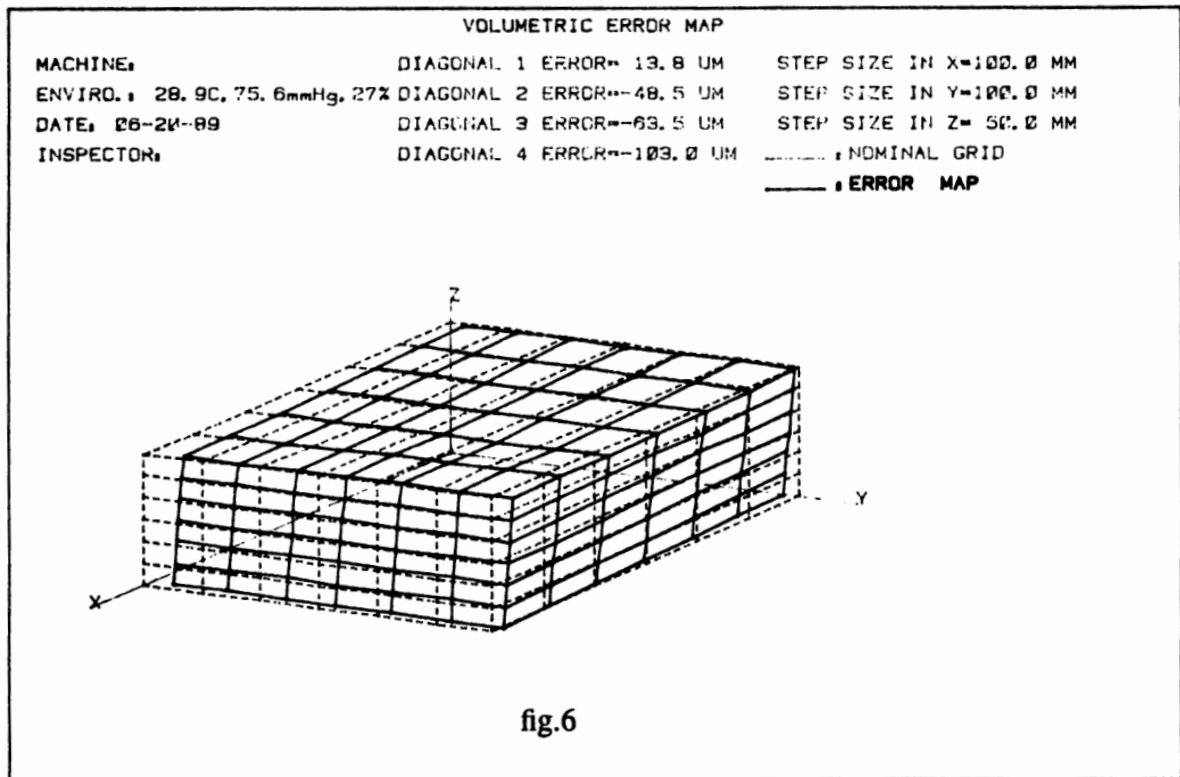
uhlíková vlákna tyč	ThermoFit D=3,5 mm	-1,1	620	1,9	540
nerezová ocel	V2A	16	14	7,9	210
invar ocel	Ni36	1,3	10,5	8,1	140
rubín	99% Al ₂ O ₃	4,5	36	3,9	430
nitrid křemíku	SiN	3,2	40	3,1	320
oxid zirkonu	ZrO ₂	10,5	2,5	6,1	200

2.3 Kompenzace

2.3.1 Volumetrická kompenzace

Souřadnicové stroje jsou vyráběny s přísnými tolerancemi. I přes to samy o sobě nejsou dokonale přesné – existují chyby. Kartézská konstrukce má 21 geometrických chyb, v každé ose 3 rotační a 3 translační chyby, 3 chyby kolmosti.

Většinu nepřesností CMM lze opravit korekcí v kontroleru CMM. Geometrické chyby musí být nejprve změřeny (mapování) a následně se dají minimalizovat nebo eliminovat skrze algoritmy v softwaru CMM. [8] S rozvojem řídicí techniky došlo k rozvolnění nároků na přesnost výroby CMM díky dosahování požadované přesnosti pomocí softwarových korekcí. Moderním přístupem je využívání CAA – Computer Aided Accuracy. Jde o kompenzaci chyb pomocí CAA matice v celém měřicím prostoru. Pozornost je směřována k získání přesné korekční mapy co nejsnazším a nejrychlejším způsobem. [9] [10]



Obrázek 13 – Znárodnění korekční mapy [9]

2.3.2 ČSN EN ISO 10 360 Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM)

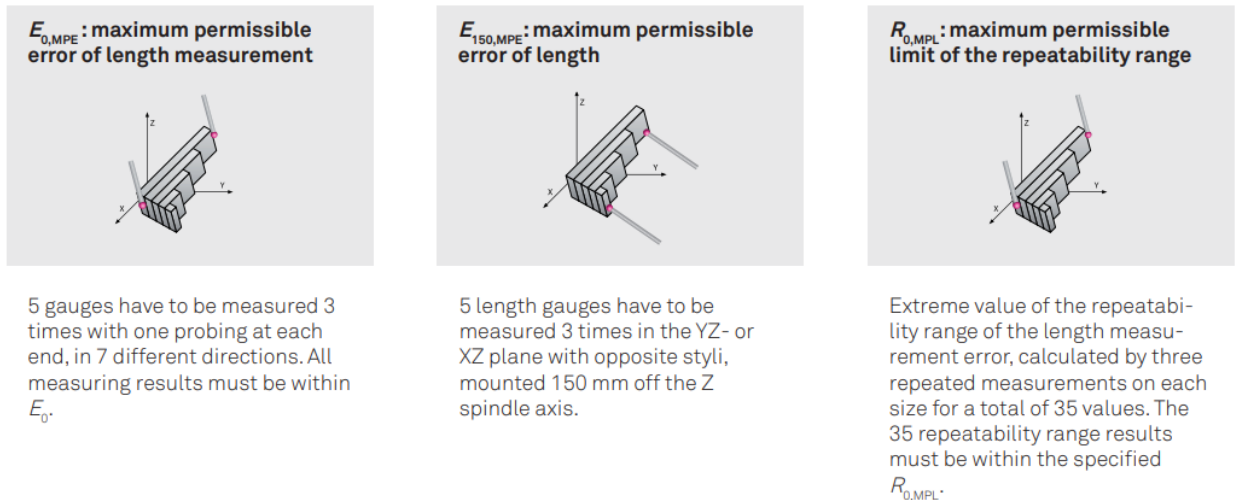
Soubor norem specifikuje výrobcem stanovené přijímací zkoušky způsobilosti a periodické zkoušky pro kartézské CMM s kontaktními snímacími hlavami v režimu snímání diskretních bodů. Zkoušky se snaží potvrdit, že stroj dosahuje maximální dovolené chyby délkového rozměru udávaného výrobcem.

ISO 10 360-2 definuje následující zkoušky při specifikovaných podmínkách

- Zkouška chyby indikace kalibrované zkušební délky bez odsazení hrotu snímacího doteku
- Zkouška reprodukovatelnosti měření kalibrované zkušební délky



- Zkouška chyby indikace kalibrované zkušební délky se specifikovaným odsazením hrotu snímacího doteku [11]



Obrázek 14 – Schéma zkoušek chyb indikace zkušební délky [8]

Výsledkem je chyba indikace CMM, E, při měření rozměru obvykle v jednom z následujících tvarů

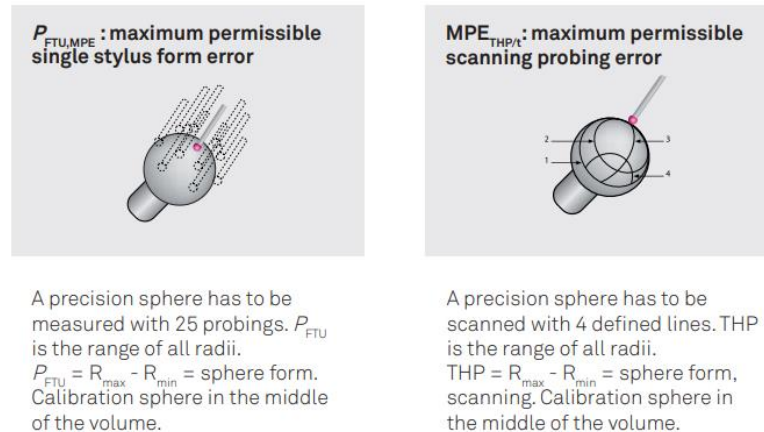
$$E_{L,MPE} = \pm(A + L/K) [\mu m] \quad (3)$$

$$E_{L,MPE} = \pm \min[(A + L/K); B] [\mu m] \quad (4)$$

$$E_{L,MPE} = \pm B [\mu m] \quad (5)$$

Přejímací zkoušky

Chyba indikace CMM, P, snímacího systému se měří na přesné kouli, odlišné od koule dodané výrobcem pro účely kvalifikace snímacího systému. Výsledkem je chyba tvaru jednotlivého doteku (P_{FTU}), případně chyba tvaru složeného doteku (P_{FTE}). Získaná chyba je porovnávána s maximální dovolenou chybou. [12]



Obrázek 15 – Schéma zkoušek chyb indikace tvaru doteků [8]

2.3.3 Kalibrace, verifikace, kvalifikace

Termíny jsou často nepřesně zaměňovány a může docházet k pochybnostem.

Kvalifikace snímacího systému je prováděna na každodenní bázi (např. při změně konfigurace snímačů – změna doteku, prodloužení atp.), jedná se o pravidelnou součást přípravy měření.

Verifikace (zkoušení) CMM je prováděna v periodických intervalech (rok, měsíc, den, směna) ke zjištění, zdali CMM dosahuje parametrů specifikovaných výrobcem.

Kalibrace CMM, tak jak je vnímána v anglické literatuře, se provádí při instalaci a následně v případě potřeby pro zjištění a korekci 21 kinematických chyb stroje, často se označuje jako získávání korekčních map (error mapping). [12]

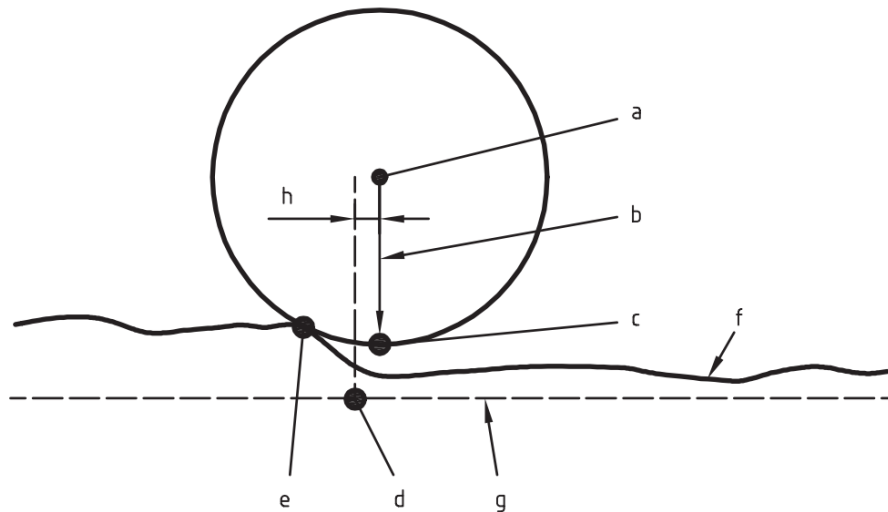
2.3.4 Kompenzace kuličky doteku

Pro přesné měření je nutné přesně určit polohu doteku (tj. nejčastěji kuličky) v prostoru v souřadnicovém systému stroje. Pro zjištění korekčních parametrů (zejména poloměr a střed kuličky) se měří přesná kalibrační



koule. [8] Snímá se minimálně 9 bodů a parametry se ukládají pro každý dotek samostatně. [2]

Nutnost korigovat poloměr kuličky je jasná z obrázku.



Obrázek 16 – Korekce poloměru kuličky [13]

- | | | | |
|---|-----------------------|---|---------------------|
| a | Indikovaný bod měření | e | Aktuální bod dotyku |
| b | Korekční vektor hrotu | f | Skutečný prvek |
| c | Korigovaný bod měření | g | Jmenovitý prvek |
| d | Cílový bod dotyku | h | Polohová chyba |

2.4 Postup / Princip měření

2.4.1 Analýza výkresové dokumentace

Před vlastním měřením je nutné si ujasnit, jaké prvky je nutné měřit, jaká je jejich poloha a jakým způsobem půjde měření provést, tedy jaká je přístupnost měřených prvků. Z těchto parametrů pak vystávají požadavky na způsob měření, na měřicí stroj, konfiguraci měřicí hvězdice a další.



2.4.2 Definování upnutí

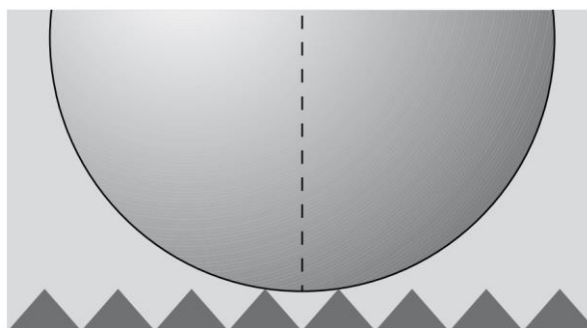
Pro úspěšné měření je třeba součást upnout v pracovním prostoru stroje. Je třeba zajistit přístupnost měřených prvků a stabilitu měřeného dílu. Při větším množství dílů stejného typu je vhodné uvažovat i manipulaci s díly a jejich zakládání do měřicího stroje.

2.4.3 Konfigurace a kvalifikace snímacího systému

Konfigurace dotykové hvězdice vychází z požadavků vyplývajících z měřeného dílu. Je třeba aby konfigurace umožňovala přístup k měřeným prvkům.

Z hlediska rozměrů sondy je podstatná hlavně její délka a průměr mající vliv převážně na tuhost. Málo tuhá sonda se ohýbá a vnáší tak další nepřesnosti do měření. V případě použití prodlužovacích nástavců je dalším zdrojem nepřesnosti nejen ohyb, ale i geometrická chyba nástavce. [8] V praxi se proto upřednostňuje uspořádání s co nejmenším počtem spojů dotyku (jedná se o potenciální zdroj deformace).

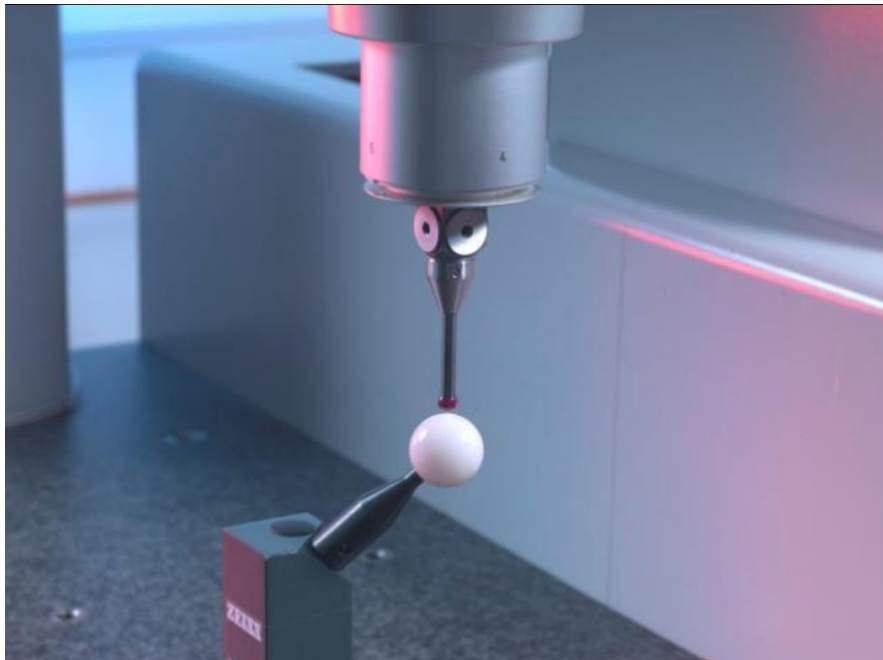
Pro zamezení dotyku dříku je vhodné použít kuličku s velkým průměrem. Při použití kuličky s velkým průměrem se však omezujeme z hlediska průměru malých otvorů a jiných prvků. V případě skenování drsných povrchů kuličkou s velkým poloměrem dochází k mechanické filtraci.



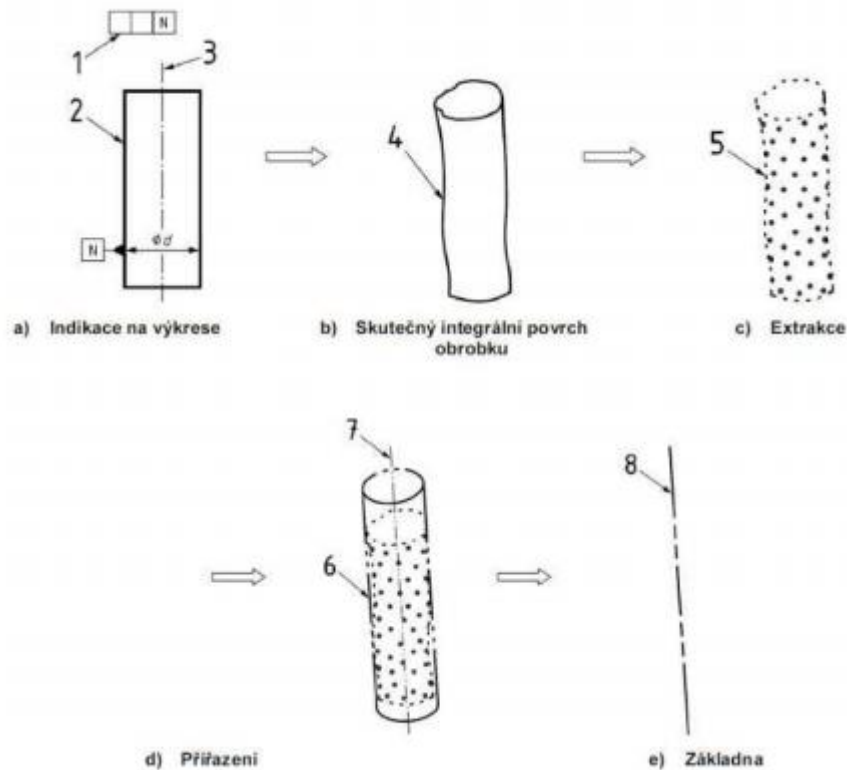
Obrázek 17 – Mechanická filtrace kuličkou na drsném povrchu [7]



CMM nemá informace o jiném dotyku, než je referenční snímač. Pro měření s jiným dotykem, než referenčním je nutné provést tzv. kvalifikaci snímacího systému. Kvalifikace doteku probíhá na známé kulové ploše a provádí se pro každý dotek samostatně. Nejprve je v prostoru stroje referenčním snímačem zaměřen známý artefakt (kalibrační koule), následně je tento artefakt zaměřen sestaveným snímačem. Tím je získán přenos informací mezi měřicí konfigurací a referenčním snímačem.



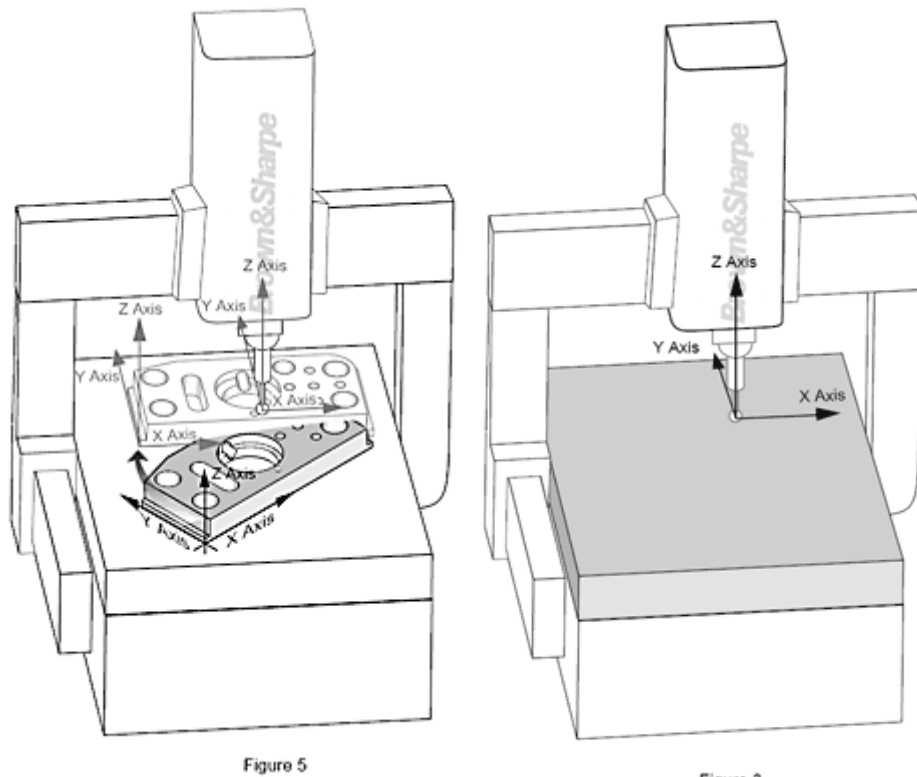
Obrázek 18 – Snímání kvalifikační koule referenčním snímačem [12]



Obrázek 19 – Schéma způsobu určení geometrické základny [2]

2.4.4 Stanovení základního bodu v prostoru a polohy dalších bodů na měřené součásti

Vyrovnáním se rozumí určení polohy a orientace součásti v pracovním prostoru stroje. Jedná se tedy o určení transformace souřadnicového systému součásti do souřadnicového systému stroje. Využívají se standardní metoda, 3D přřasování, metoda RPS a metoda 6P. Dochází k zdefinování lokálního souřadnicového systému. Základní bod vychází přímo z vyrovnání – jedná se o střed souřadnicového systému součásti. Od tohoto bodu se určují polohy všech ostatních měřených bodů pomocí souřadnic (osy x , y , z). Měřením jsou určovány další body na povrchu součásti.



Obrázek 20 – Rozdíl mezi souřadným systémem stroje a součásti [8]

2.4.5 Výpočet geometrických prvků (elementů) z měřených bodů

Z extrahovaných bodů lze následně vypočítat geometrické prvky (elementy), a to různými způsoby. Jako základní geometrické prvky se rozumí přímka, plocha, kruh, koule, kužel, elipsa a válec. [2]

Elementy, které nelze měřit přímo je nutné získat matematicky z naměřených prvků a nazývají se konstruované prvky. Typickým příkladem je středová kružnice rozmístěných děr nebo průsečík os válců. [8]

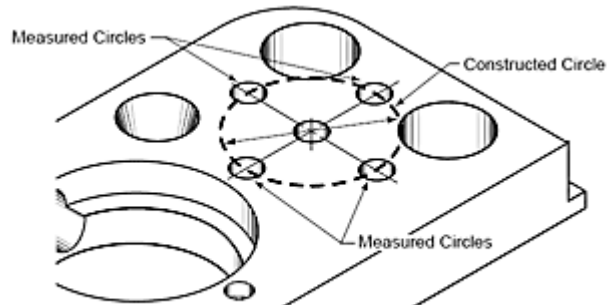


Figure 11

Obrázek 21 – Konstruovaná kružnice ze středů děr [8]

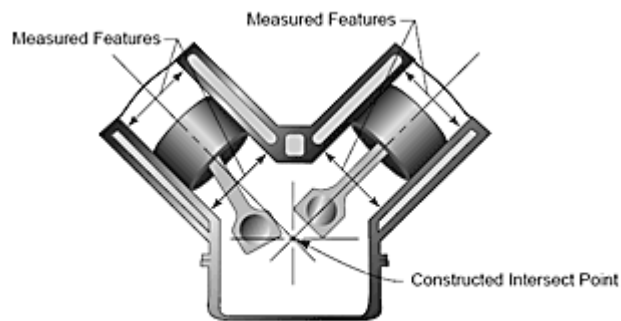


Figure 12

Obrázek 22 – Průsečík os dvou válců motoru [8]

2.4.6 Vyjádření charakteristik z geometrických prvků

Z geometrických prvků (elementů) se následně vyjadřují další charakteristiky rozměru a geometrické tolerance. Porovnáním vzdálenosti bodu změřeného na součásti a proloženého prvku tak lze získat úchytku pro daný bod. Porovnáním těchto vzdáleností pak lze vyhodnotit míru shody součásti s požadovanými vlastnostmi.

Na výpočet charakteristik mají vliv i metody výpočtu, způsob filtrace a další.
[2]



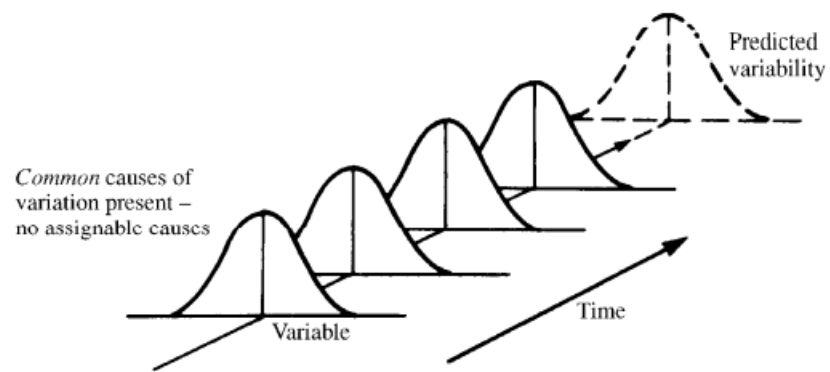
2.4.7 Vyhodnocení měření a tvorba protokolů

Měření je zakončeno vyhodnocením shody a vytvořením protokolu – z hlediska dílu je tedy určováno, zdali je výrobek ve shodě či nikoliv.

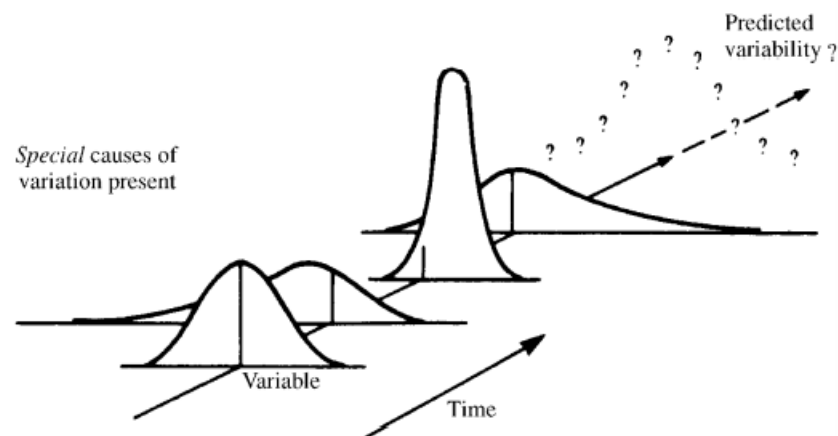
Další informační hodnotu může měření přinášet z hlediska regulace výrobního procesu. Myšlenkou je detekovat a korigovat odchylky, ještě než se projeví v defekty.

Hlavním nástrojem je SPC – Statistical Process Control tj. metoda spoléhající se na statistické nástroje vycházející z měřených dat.

Metoda vyžaduje ustálený proces, který je schopen dosáhnout požadovaných výsledků (je způsobilý). Z dlouhodobě získávaných dat lze následně získávat statistická data, dopočítat varovné a regulační meze. Mezi výhody implementace patří snížení zmetkovosti, zvýšení produktivity, zvýšení využití zdrojů, zvětšení uspokojení zákazníka, snížení nákladů a další.

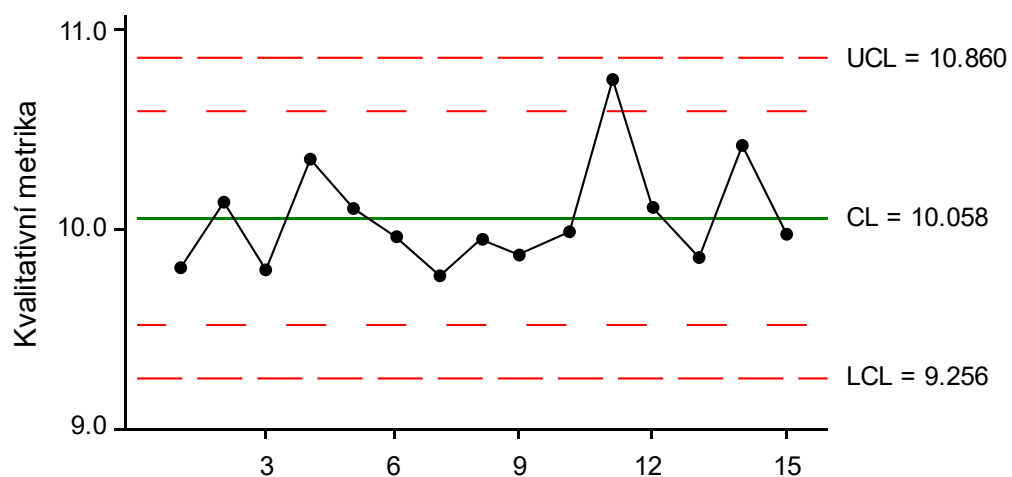


(a)



(b)

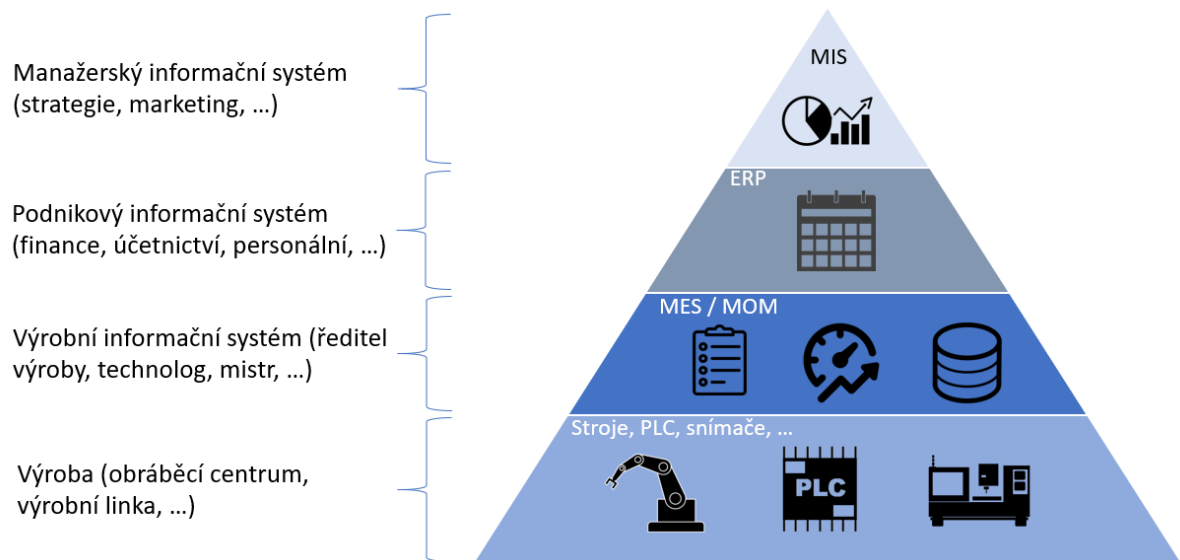
Obrázek 23 – Ustálený proces (nahore) a neustálený proces se speciálními příčinami variability [14]



Obrázek 24 – Příklad řízeného procesu (UCL a LCL: horní a dolní regulační mez) [15]



Výsledky měření se zaznamenávají, vyhodnocují a dále využívají nad rámec zjištění shody/neshody jednoho dílu. Nástrojem pro regulaci procesu integrující SPC jsou tzv. systémy MES – Manufacturing Execution Systems. MES pracují v reálném čase a jsou mezičlánkem mezi obchodními systémy a sběrem dat.



Obrázek 25 – Zařazení MES [16]

Hlavní funkce MES

- Management výrobních procesů
- Plánování produkce
- Hodnocení produkce
- Management nevýrobních časů
- Management kvality
- Dohledatelnost výroby
- Sběr dat
- Hodnocení výkonnosti

Hlavní výhody využívání systémů

MES

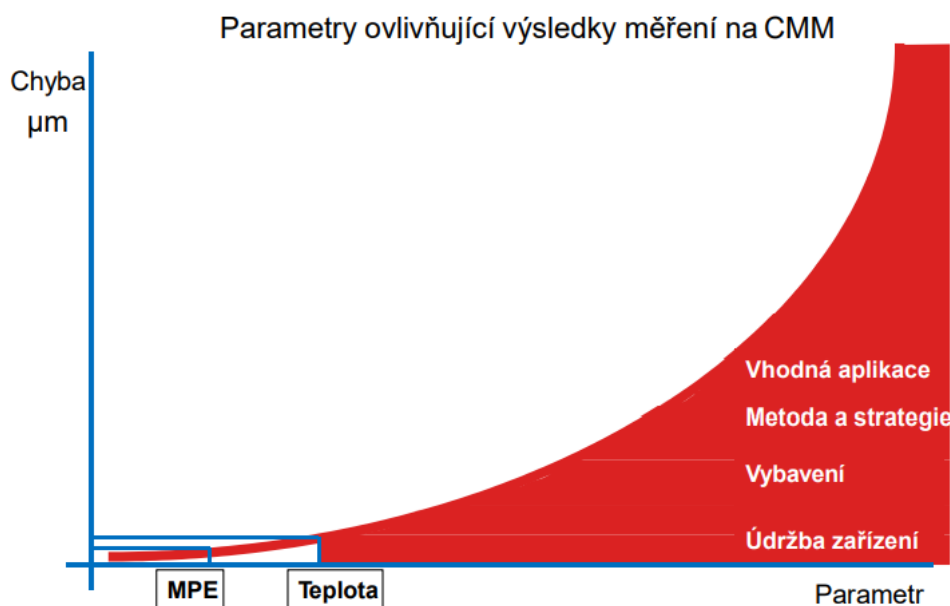
- Dohledatelnost ve výrobě
- Zajištění přesných dat o výrobě
- Snížení nevýrobních časů
- Zvýšení celkové efektivity zařízení (OEE)
- Snížení skladových zásob
- Možnost přesného ekonomického vyhodnocení výroby [16]



3 Strategie měření a vliv jednotlivých parametrů na produktivitu a přesnost procesu měření

Při snaze dostat se co nejpřesnějších výsledků měření je možné se setkat s názory řešícími hlavně maximální dovolenou chybu, případně teplotu (prostředí, dílu). Tyto parametry však nemají takový vliv na chybu měření jako údržba zařízení, vybavení, metoda a strategie měření a způsob aplikace systému měření.

Detekce vlivů těchto parametrů může být obtížnější, ale o to větší má význam tyto vlivy hodnotit.



Obrázek 26 – Parametry ovlivňující výsledky měření na CMM [2]

Každý proces měření se zároveň vyznačuje určitou variabilitou. Zdroje variability při měření na CMM lze zařadit do pěti skupin: stroj, součást, prostředí, strategie, obsluha.



Obrázek 27 – Zdroje variability systému měření [2]

Obvyklé zdroje variability při měření na CMM

Měřicí stroj

- Parametry přesnosti
- Měřicí rozsah
- Senzorika
- Software
- Konstrukce
- Korekce chyb

Měřená součást

- Teplota
- Očištění
- Materiál
- Elasticita
- Tvarové odchylky

Okolní prostředí

- Teplota (+ její kolísání)
- Teplotní gradienty
- Vibrace podlahy
- Znečištění

Strategie měření

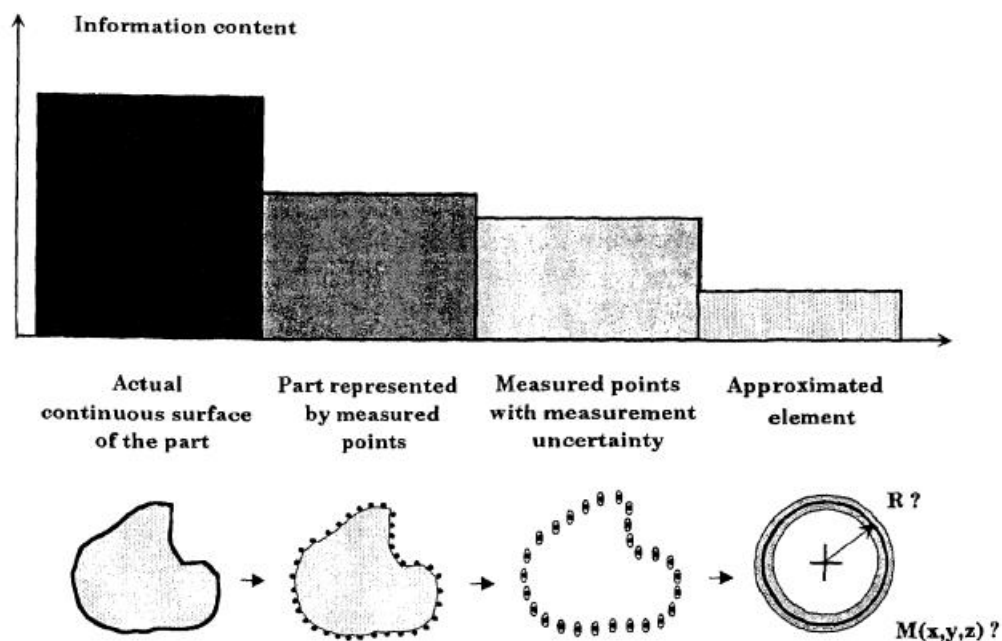
- Výběr snímačů
- Měřicí metoda
- Filtry
- Poloha a orientace součásti
- Metoda vyhodnocení



Obsluha stroje

- Kvalifikace a školení
- Vyrovnání součásti
- Upnutí součásti
- Kvalifikace snímačů
- Kolize [2]

Při měření dochází k redukci informační hodnoty. Reálnou součást s reálným povrchem popisují naměřené body mající vlastní nejistotu. Z bodů je pak vypočítána a vyhodnocována charakteristika zaměřená na určitou vlastnost prvku.

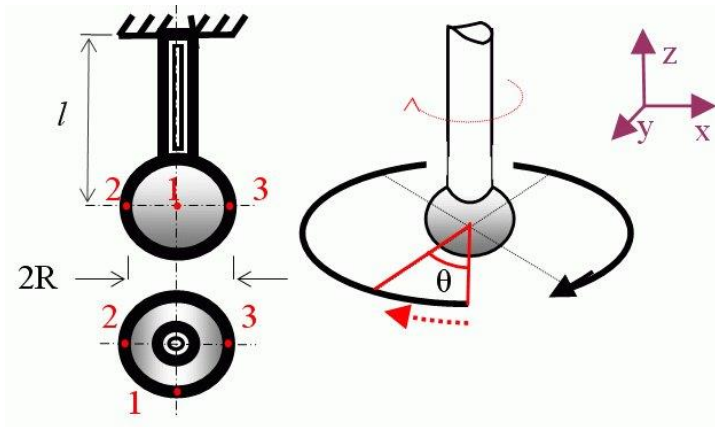


Obrázek 28 – Informační hodnota zleva: skutečný povrch, naměřené body, body s nejistotou, aproximovaný element [17]

3.1 Měření kruhovými drahami na válci

Velké množství inženýrských součástí měřených na CMM má větší množství kontrolovaných válcových prvků. V případě měření válců rovnoběžných

s osou dotyku dochází k pohybu stroje ve dvou osách. Kulička dotyku následuje kruhovou dráhu.

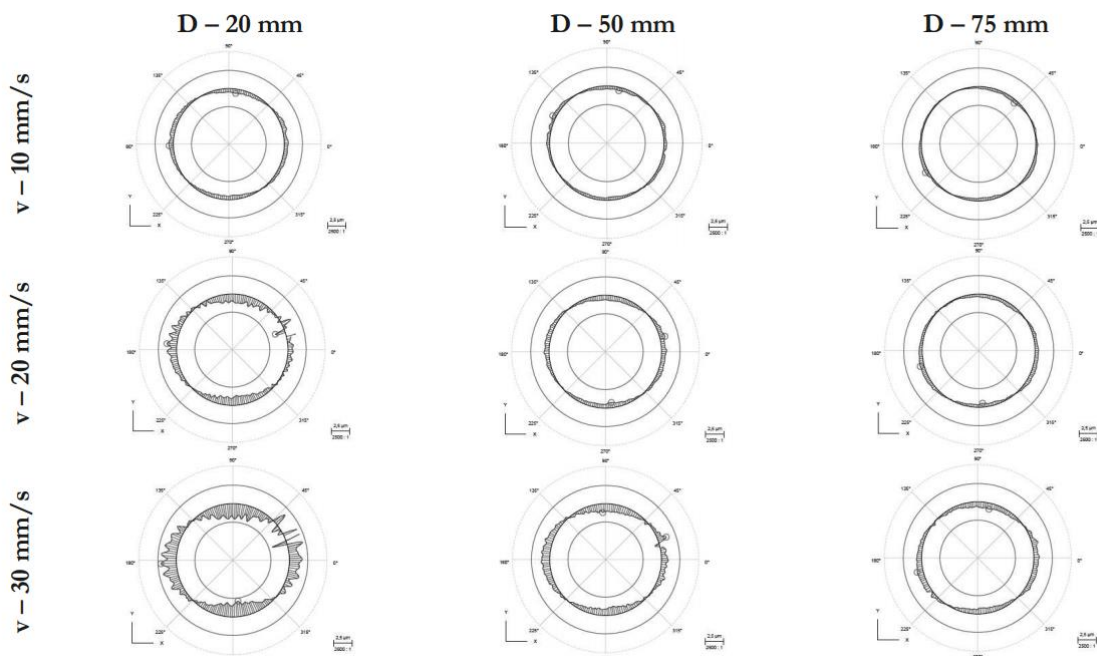


Obrázek 29 – Kulička doteku následující kruhovou dráhu v rovině xy [18]

Řízený stroj se snaží udržet kuličku ve stálém kontaktu s měřeným dílem definovanou silou. To produkuje nároky na řídicí systém stroje.

Obvyklou praxí je u kruhových drah využívat menší rychlosti skenování.

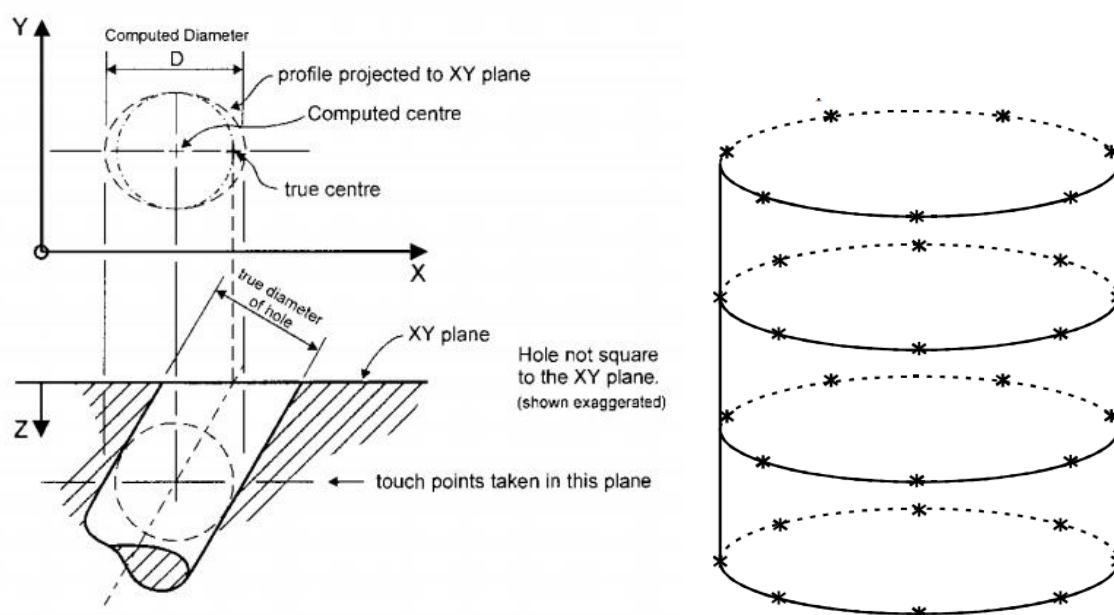
Způsobitelného měření lze však dosahovat i při použití vyšších rychlostí skenování, avšak v závislosti na průměru díry. [19]



Obrázek 30 – Grafické znázornění naměřených dat v závislosti na průměru a rychlosti skenování [19]



Měření na válci je vhodné provádět ve vícero výškových hladinách. Při měření pouze v jednom řezu není možné získat informace o skutečné ose válce, lze však získat alespoň základní informace o poloze a průměru válce. Snímané body, respektive jejich počet, by si v sousedních řezech neměly odpovídat pokud měříme strategií, kdy snímáme malé množství (jednotky) bodů. Při skenování bychom naopak měli na jednom prvku v různých řezech využívat pokud možno stejné strategie snímání i počty bodů.



Obrázek 31 – Měření válcové díry v jednom řezu (vlevo) a snímání ve vícero řezech (vpravo) [20]

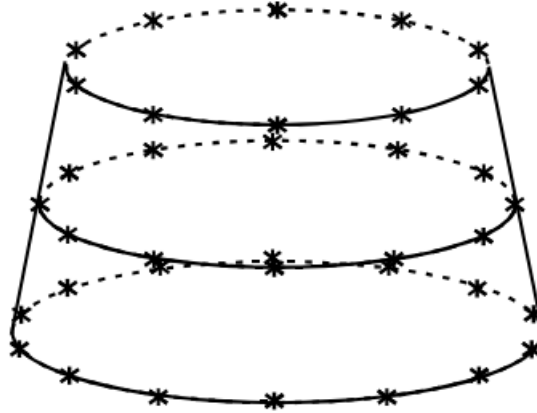
3.2 Měření kulových ploch a nakloněných rovin

V případě měření kulových ploch, nevhodně orientovaných rovin nebo měření pomocí drah ve tvaru spirály je nutné pohyb stroje řídit ve třech osách. Dochází ke změnám směru normály doteku ve všech osách. Situace je pro řízení náročnější a je nutné redukovat rychlost snímání.

Dalším jevem, který provází měření tvarových ploch je tzv. slip effect. Při skenování kuželu v kruhových řezech směr normály povrchu nenáleží do roviny řezu. Řídicí systém se snaží o stálý kontakt kuličky s měřeným dílem



danou silou, avšak normála povrchu směřuje mimo plochu řezu. Výsledkem může být šplhání kuličky směrem k vrcholu kuželu tj. tzv. slip effect. [2]



Obrázek 32 – Rozmístění bodů na kuželu [20]



4 Metody využívané pro analýzu a hodnocení procesu měření

Základní informace ohledně kvality měření poskytuje samotná nejistota měření. Základní informace ohledně nejistot představuje GUM: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.

Pro hodnocení a analýzu procesu měření v průmyslu jsou nejčastěji využívány metody popsané v příručce MSA – Analýza systémů měření. Je třeba zdůraznit, že pro jakoukoliv analýzu měření platí, že analýza měření je maximálně tak kvalitní, jako je kvalita dat do ní vstupující.

Ideální měřicí systém má statistické vlastnosti jako nulový rozptyl, stoprocentní pravděpodobnost správné klasifikace atp. Kvalitu systému určují statistické vlastnosti získaných dat. Pro celkovou vhodnost systému měření jsou však podstatné i nestatistické vlastnosti jako jsou náklady nebo snadnost použití. [21]

4.1 Měření, chyby měření a nejistoty

Je třeba vždy předpokládat, že žádné měření není absolutně přesné. Výsledek měření je vždy pouze aproximací nebo odhadem měřené veličiny. Výsledek měření je tedy kompletní pouze pokud je tato aproximace doplněna nejistotou. [22]

Ve všech měřeních se vyskytují chyby projevující se odchylkou mezi naměřenou hodnotou a její pravou hodnotou.

Základní model měření lze vyjádřit

$$NH = RH + E \quad (6)$$

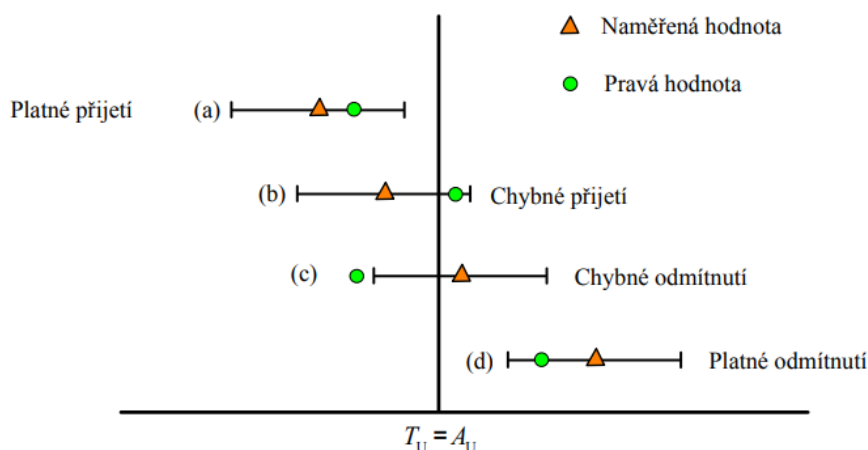
Kde NH značí naměřenou hodnotu (measured quantity value), RH značí referenční hodnotu (reference quantity value) a E znamená celkovou chybu



měření (error). [23] „Chyba měření nemá být zaměňována s výrobní chybou nebo omylem.“ [24]

4.1.1 Rozhodování v blízkosti toleranční meze

Udávat nejistotu měření jako součást výsledku měření je podstatné hlavně v případech, kdy je naměřená hodnota v blízkosti toleranční meze.

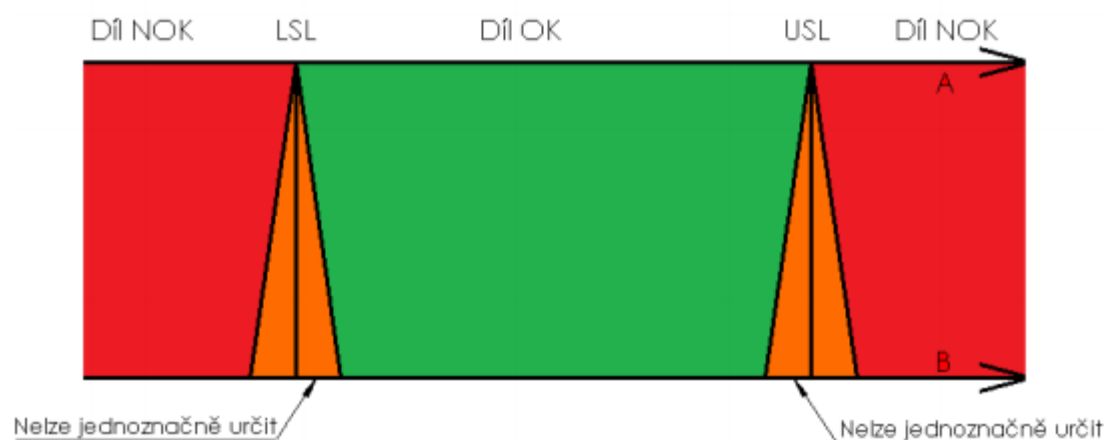


Obrázek 33 – Rozhodování v blízkosti toleranční meze [25]

Na obrázku je rozhodování v případech, kdy je naměřená hodnota v blízkosti toleranční meze. Pravé hodnoty (zelená kolečka) nejsou při rozhodování známy. Případy b) a c) vedou k chybnému rozhodnutí, v případě c) je naznačena situace, kdy pravá hodnota leží mimo interval pokrytí (viz dále).

Zvětšování nejistoty sice zvětšuje pravděpodobnost, že skutečná hodnota půjde logicky přiřadit k naměřené hodnotě, ale zároveň zvětšuje šířku pásma, ve kterém nelze jednoznačně rozhodnout o přijetí/nepřijetí dílu. V případech, kdy se díly s výsledky náležící do pásma nejednoznačného rozhodnutí berou jako díly ve shodě se specifikací, se mluví o tzv. riziku odběratele (odběratel riskuje, že přijatý dodaný díl ve skutečnosti není ve

shodě). V opačném případě se mluví o riziku dodavatele – dodavatel na sebe bere riziko, že díl ve shodě se specifikací bude označen jako v neshodě a nebude prodán.



Obrázek 34 – Pásma shody (zeleně), neshody (červeně) a nejednoznačného určení (oranžově) [26]

Podstatnou částí výsledku je proto nejistota měření. Nejistotu definujeme jako „parametr přidružený k výsledku měření, který charakterizuje rozptýlení hodnot, jež by mohly být důvodně přisuzovány k měřené veličině“. [27] Nejistota je mírou kvality výsledku měření. [27] Nejčastěji se nejistota vyjadřuje jako směrodatná odchylka

$$A' = (A \pm U) \quad (7)$$

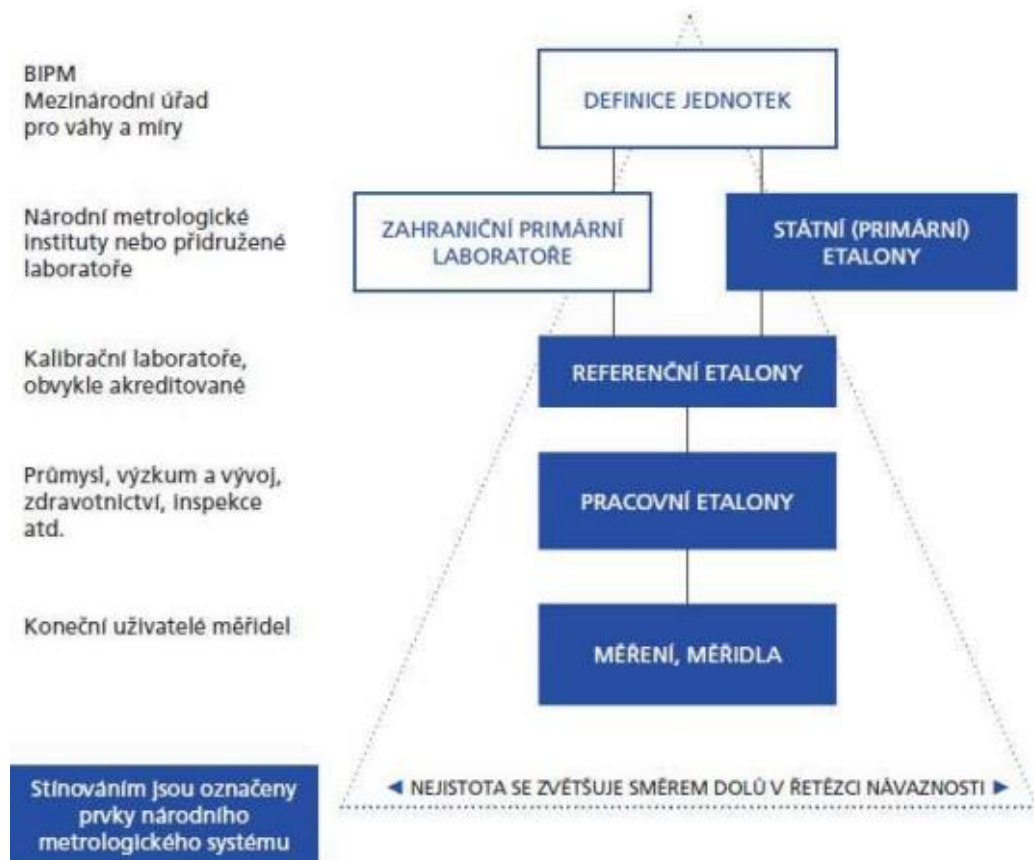
nebo polovinou šířky intervalu se stanovenou pravděpodobností pokrytí. [24]

Na základě chyby měření lze stanovit rozšířenou nejistotu U

$$U = k \times u(\Delta x) \quad (8)$$

Kde k značí koeficient rozšíření, $u(\Delta x)$ celkovou kombinovanou nejistotu měření. [27] Podrobněji je vydefinována nejistota v kapitole 4.2.

Výsledek měření musí být vyjadřován naměřenou hodnotou společně s nejistotou a jednotkou. K výsledku měření musí být připojen protokol zaručující dohledatelnou metrologickou návaznost. [28]



Obrázek 35 – Řetězec metrologické návaznosti

4.2 Matematický pohled na nejistoty měření

Základní metoda k porozumění nejistot je metoda dle GUM (Guide to the expression of uncertainty in measurement). Základní filozofie metody GUM spočívá v měření veličiny X , na kterou je nahlíženo jako na stochastickou neznámou s pravděpodobnostní funkcí.

Ve většině případů není měřená veličina měřena přímo ale je určována z N jiných hodnot X_1, X_2, \dots, X_N skrze funkci:

$$Y = f(X_{\{1\}}, X_{\{2\}}, \dots, X_{\{N\}}) \quad (9)$$

Měřená veličina y je získána měřením vstupů x_1, x_2, \dots, x_N z funkce

$$y = f(x_{\{1\}}, x_{\{2\}}, \dots, x_{\{N\}}) \quad (10)$$



V některých případech se využívá aritmetického průměru z n nezávislých měření Y_k

$$y = \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_k = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n f(X_{1,k}, X_{2,k}, \dots, X_{N,k}) \quad (11)$$

kde

$$\bar{X}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_{i,k} \quad (12)$$

Individuální měřené hodnoty q_k se liší kvůli náhodným vlivům. Experimentální rozptyl měřených hodnot, který určuje rozptyl σ^2 rozdělení pravděpodobnosti q je dán vztahem

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2 \quad (13)$$

Experimentální standardní odchylka je pak kladným kořenem této rovnice – získáváme tak **nejistotu typu A**.

Důvod dělení na nejistoty typu A a typu B se používá pro zvýraznění různých způsobů používaných k jejich evaluaci a pro snadnější diskuzi. Vyhodnocování obou typů nejistot je založeno na rozdělení pravděpodobnosti a nejistoty obou typů jsou charakterizovány rozptyly standardních odchylek.

Nejistota typu B je zjišťována pomocí metody založené na zkušenosti nebo jiné informaci. „Jedná se o složky nejistot, které vznikají v důsledku náhodných chyb nebo odchylek, o kterých nejsme schopni získat přímé informace na základě místní realizace daného měření nebo které vznikají na základě náhodných chyb a odchylek v rámci jiných procesů měření, které ovšem mají s daným procesem měření nějakou souvislost (klasickým takovým případem je např. nejistota v důsledku kalibrace používaného měřidla).“ [27]

V případě sčítání veličin se postupuje následovně.

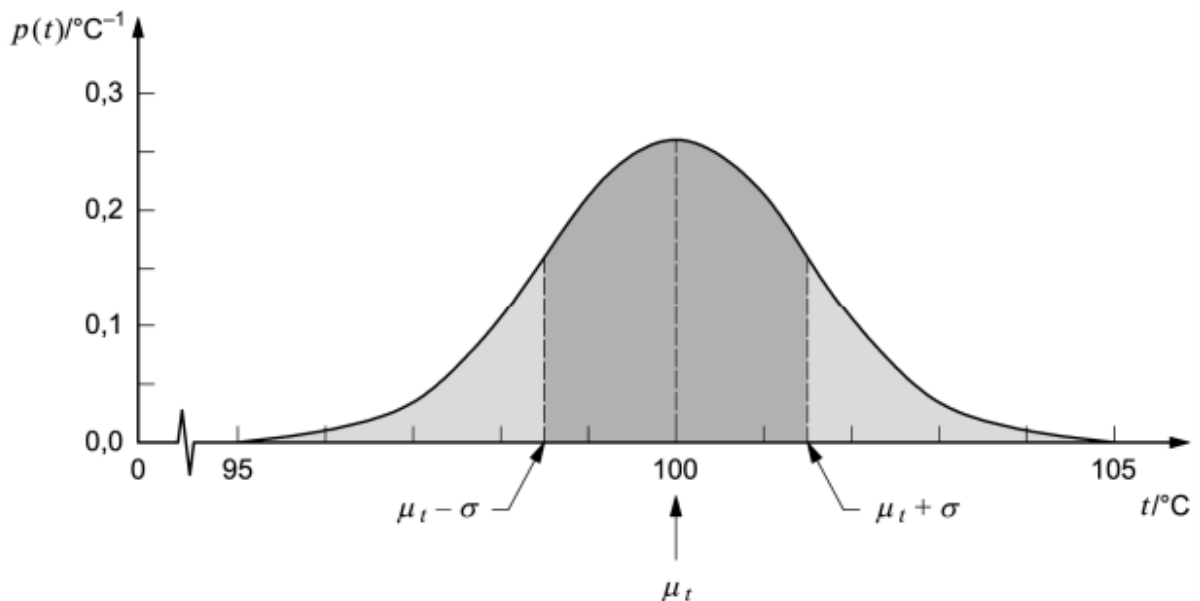


$$(A \pm a) + (B \pm b) = (A + B) \pm \sqrt{a^2 + b^2} \quad (14)$$

Veličiny A a B mají nejistoty a a b . V případě součtu velkého množství veličin pak jde celková nejistota vyjádřit pomocí vztahu

$$u_c = \sqrt{u_{A1}^2 + u_{A2}^2 + \dots + u_{AN}^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + \dots + u_{BN}^2} \quad (15)$$

(Výběrová) směrodatná odchylka se obvykle definuje jako odmocnina z rozptylu veličiny $\sigma = \sqrt{s^2} = \sqrt{\text{var}(x)}$ tedy představuje míru statistické variability v případě, že se jedná o normální (Gaussovo) rozdělení. [29]



Obrázek 36 – Grafické znázornění četnosti a rozptylu hodnot při opakovaném měření teploty (normální rozdělení) [29]

Předpokládejme normální rozdělení hodnot veličiny x se středem v nule ($\mu = 0$) a směrodatnou odchylkou rovnou jedné ($\sigma = 1$). Pro hustotu pravděpodobnosti pak platí následující

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}x^2} \quad (16)$$

Plocha pod křivkou je rovna 1, rozptyl je roven 1, maximum se nachází v bodě $[1; \frac{1}{\sqrt{2\pi}}]$, inflexní body se nacházejí v $x = +1$ a $x = -1$.



Pro pravděpodobnost, že náhodně vybraná hodnota x leží v intervalu mezi $\mu - n\sigma$ a $\mu + n\sigma$ platí rovnice:

$$F(\mu + n\sigma) - F(\mu - n\sigma) = \Phi(n) - \Phi(-n) = \operatorname{erf}\left(\frac{n}{\sqrt{2}}\right) \quad (17)$$

kde

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dt \quad (18)$$

je kumulovaná pravděpodobnost (Cumulative Distribution Function, CDF) a funkci

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (19)$$

nazýváme chybovou funkcí. [30]

S využitím těchto vztahů lze určit pravděpodobnost (výsledek rovnice).

Tabulka 6 – Výsledky pravděpodobnosti [30]

n	$p = F(\mu + n\sigma) - F(\mu - n\sigma)$
1	0.682689492137
2	0.954499736104
3	0.997300203937
4	0.999936657516
5	0.999999426697
6	0.999999998027

Tedy platí, že jedna náhodně vybraná hodnota patří do intervalu mezi $\mu - 1\sigma$ a $\mu + 1\sigma$ s pravděpodobností 68,27 %. Podobně pravděpodobnost pro (rozšířený) interval mezi $\mu - 2\sigma$ a $\mu + 2\sigma$ je 95,45 %. – interval je rozšířen koeficientem rozšíření $n = 2$.

Dalším využitím těchto vztahů lze úvahu otočit a ptát se na šířku intervalu pro danou pravděpodobnost. V tomto případě se mluví o intervalu spolehlivosti (tj výpočet koeficientu n). [29]



Na tomto místě je vhodné připomenout, že v praxi je sice případ normálního (Gaussova) rozložení častý, nikoliv však jediný možný, často má rozdělení například posunuté maximum mimo střed intervalu nebo může být průběh zcela odlišný.

4.3 Užívaná terminologie

4.3.1 Přesnost (Accuracy)

Jedná se o těsnost shody mezi naměřeným výsledkem ($y = \bar{Y}$ tj nejčastěji aritmetickým průměrem) a pravou hodnotou měřené veličiny. [27] Jedná se o míru systematické chyby měření.

Příručka MSA doporučuje pro tuto definici přesnosti využívat spíše termín strannost, neboť přesnost může být definována různými definicemi. [21]

4.3.2 Pravdivost, správnost (Trueness)

Pravdivost představuje těsnost shody mezi průměrem naměřených hodnot a pravou hodnotou (případně referenční hodnotou). [27]

4.3.3 Pravá (skutečná) hodnota (True value)

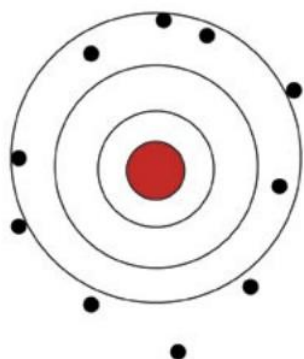
Pojem je vcelku samozřejmý. Jedná se o hodnotu, které chceme měřením dosáhnout např. skutečný (pravý) rozměr výrobku, skutečnou (pravou) hodnotu proudu atp. Na obrázku dole se jedná o střed terče. [27]

4.3.4 Preciznost (Precision)

Těsnost souhlasu mezi jednotlivými nezávislými výsledky měření. [27]



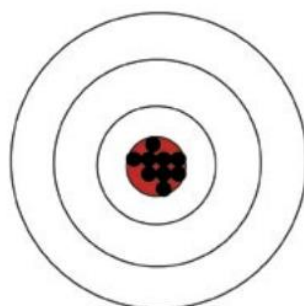
Střelba je pravdivá
Není precizní



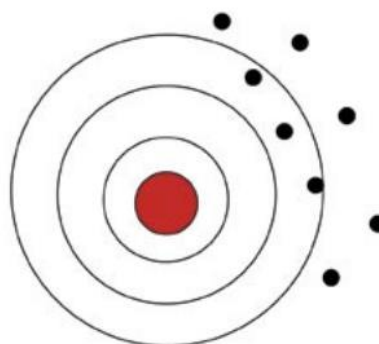
Je precizní
Není pravdivá



Je přesná a pravdivá
Je precizní



Není přesná ani pravdivá
Není precizní



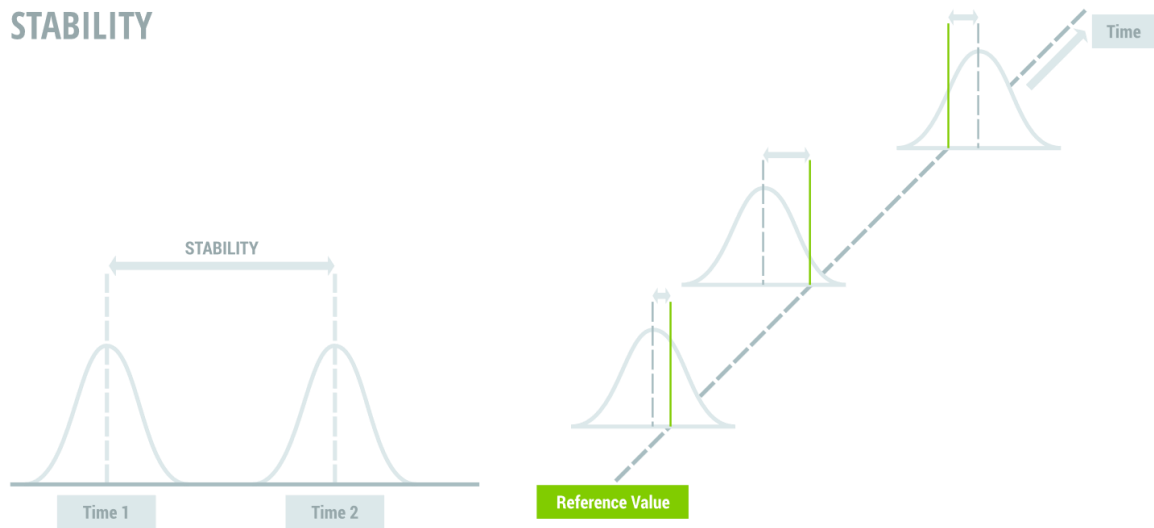
Obrázek 37 – Grafické znázornění termínů na příkladu střelby na terč [27]

4.3.5 Stabilita (Drift)

V případě měření jednoho dílu daným systémem měření v dostatečně dlouhém časovém úseku je možné získávat různou pravdivost. O stabilitě jde tedy uvažovat jako o změně pravdivosti v čase. [21]



STABILITY



Obrázek 38 – Stálost měřidla [31]

4.3.6 Linearita (Linearity)

Jedná se o rozdílnost pravdivosti v závislosti na rozsahu měření.



Obrázek 39 – Perfektní linearita (zeleně), konstantní vychýlení a zvětšující se vychýlení [31]



4.3.7 Variabilita šíře

4.3.7.1 Opakovatelnost (Repeatibility)

Opakovatelnost označuje variabilitu získanou měřením jednoho operátora, jedním přístrojem na jednom znaku, a to na jednom dílu, někdy je označována jako variabilita operátora. [21]

4.3.7.2 Reprodukovatelnost (Reproducibility)

Při měření stejného dílu stejným přístrojem je možné získat různou variabilitu průměru různými operátory. Reprodukovatelností se tedy rozumí variabilita mezi operátory. [21]

4.3.7.3 GRR – Gauge Repeatibility and Reproducibility

Opakovatelnost a reprodukovatelnost měřidla (GRR) označuje rozptyl skládající se z rozptylu uvnitř systému a mezi systémy. Jedná se tak o odhad kombinované variability opakovatelnost a reprodukovatelnosti. [21]

$$\sigma_{GRR}^2 = \sigma_{reprodukovatelnost}^2 + \sigma_{opakovatelnost}^2 \quad (20)$$

4.3.7.4 Citlivost (Sensitivity)

Nejmenším vstupem znamenajícím změnu výstupního signálu je citlivost. [21]

4.3.7.5 Konzistence

Jedná se o opakovatelnost v čase, určuje tedy rozdíl ve variabilitě měření na delším časovém úseku. [21]



4.3.7.6 Uniformita

Podobně jako u linearity chyba, může být i variabilita rozdílná v pracovním rozsahu měřidla. [21]

4.3.8 Variabilita systému

Příručka MSA do této kategorie řadí způsobilost (viz níže) a výkonnost.

4.3.8.1 Výkonnost (Performance)

Jedná se o celkový účinek zdrojů variability v čase. Zahrnuje složky

- Způsobilost
- Stabilita a konzistence

V případě, že chyby jsou náhodné a nezávislé lze výkonnost vyjádřit:

$$\sigma_{\text{výkonnost}}^2 = \sigma_{\text{způsobilost}}^2 + \sigma_{\text{stabilita}}^2 + \sigma_{\text{konzistence}}^2 \quad (21)$$

4.4 Způsobilost výrobního systému a systému měření

Způsobilost systému je jeho schopnost produkovat výstupy uvnitř specifikovaných mezí. Indexy způsobilosti má smysl vyhodnocovat u procesů ve statisticky ustáleném stavu. Indexy kvantifikují přirozenou variaci vůči specifikačním mezím. Ve výrobních systémech i v systémech měření se jedná o základní sledované parametry.

Základní představu o schopnostech systému představuje parametr C_p

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (22)$$

USL (Upper Specification Limit) a LSL (Lower Specification Limit) značí horní a dolní toleranční meze, jejich rozdílem je šířka tolerančního pole.



Tento parametr C_p odhaduje, čeho je proces schopný dosáhnout za předpokladu, že je výstupem normální rozdělení s průměrem ve středu intervalu mezi USL a LSL . Jedná se tedy o schopnosti stroje při ideálním seřízení.

Druhým sledovaným parametrem je parametr C_{pk} . Tento parametr je podobný předchozímu, avšak bere v úvahu, že průměr výstupu se nemusí nacházet ve středu intervalu USL a LSL .

$$C_{pk} = \min\left(\frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma}\right) \quad (23)$$

Parametry C_p a C_{pk} se používají pro výrobní procesy. Pro proces měření se využívají parametry C_g a C_{gk} .

C_g porovnává variabilitu měření s částí tolerance. Hodnota C_g větší než 1 (při výpočtu dle Forda) nebo 1,33 (při výpočtu dle Bosche) značí, že proces měření má pro daný proces dostatečně úzkou variabilitu.

$$C_g = \frac{0,2 \cdot \text{Tolerance}}{6s} \quad (24)$$

kde 0,2 značí část tolerance (15 % při výpočtu dle Forda, 20 % při výpočtu dle Bosche),

s značí směrodatnou odchylku opakovaného měření.

Parametr C_{gk} bere navíc v úvahu i strannost měření a přidává jí k porovnání variability měření s tolerancí. Laicky řečeno se snaží odpovědět na otázku, zda je odečítaná hodnota ve shodě se skutečnou hodnotou. Opět se pro hodnocení využívá mezní hodnota 1 a 1,33.

$$C_{gk} = \min\left(\frac{\bar{x} - (x_r - 0,1 \cdot T)}{3s_g}, \frac{(x_r + 0,1 \cdot T) - \bar{x}}{3s_g}\right) \quad (25)$$

kde 0,1 značí část tolerance (7,5 % při výpočtu dle Forda, 10 % při výpočtu dle Bosche),

\bar{x} značí průměrnou hodnotu všech měření,

x_r referenční hodnotu,

T značí šířku tolerančního pole $T = USL - LSL$



s značí směrodatnou odchylku opakovaného měření.

Druhou možností, jak vypočítat parametry C_g a C_{gk} je z celkové variability procesu

$$C_g = k \cdot \frac{\hat{\sigma}_{tot}}{S_g} \quad (26)$$

$$C_{gk} \min \left(\frac{\bar{x} - (x_r - m \cdot \hat{\sigma}_{tot})}{3S_g}; \frac{(x_r - m \cdot \hat{\sigma}_{tot}) - \bar{x}}{3S_g} \right) \quad (27)$$

kde $\hat{\sigma}_{tot}$ značí odhad směrodatné odchylky výrobního procesu,

Za k se dosazuje 0,15 při výpočtu dle Forda, 0,2 při výpočtu dle Bosche

Za m se dosazuje 0,45 při výpočtu dle Forda, 0,6 při výpočtu dle Bosche. [2]

Příručka MSA nahlíží na způsobilost jako na variabilitu systému:

Způsobilost dle MSA označuje odhad kombinované variability měření na krátkodobém vyhodnocení. V případě jednoduché způsobilosti zahrnuje složky

- Strannosti nebo linearity
- Opakovatelnost a reprodukovatelnosti

V případě, že chyby jsou náhodné a nezávislé jde vyjádřit:

$$\sigma_{zp\u00fcsobilost}^2 = \sigma_{strannost (linearita)}^2 + \sigma_{GRR}^2 \quad (28)$$

V případě použití CMM jsou chyby korelovány a nelze je vyjádřit podle tohoto vztahu. [21]

4.5 Metodika analýzy systému měření dle MSA

Mezi základní doporučení definující vhodný systém měření patří

1) Práh citlivosti a citlivost pro měření

Práh citlivosti měřicího přístroje by měl být jednou desetinou (nebo menší) než je tolerance procesu.

Případy regulace procesu posuzuje metodika 6-sigma nebo se posuzují k celkové variabilitě podle MSA.



- 2) Systém měření je ve statistické stabilitě
Variabilita systému je způsobena náhodnými příčinami, ne zvláštními (chaotickými) příčinami.
- 3) Statistické vlastnosti se nacházejí v očekávaném rozsahu
Velikost chyb měření je v očekávaném rozsahu a je přiměřená účelu měření.

Vlastní analýza problému měření pak probíhá v několika krocích

1. Identifikace problémů

Prvním krokem k analýze a řešení problémů spojených s měřením je určení a identifikace oblastí, na které je třeba zaměřit pozornost. Podstatné je pokusit se oddělit variabilitu měření a variabilitu procesu.

2. Identifikace týmu

Počet lidí zabývajících se problémem závisí na složitosti problému. List řešení problému uvádí členy týmu a jejich funkce.

3. Vývojový diagram systému měření a procesu

Tým by se měl pokusit prozkoumat historii daného problému, měl by přezkoumat dřívější vývojové diagramy. Z následující diskuze může vyplynout požadavek na rozšíření týmu.

4. Diagram příčin a následků

Z historie a dřívějších diagramů příčin a následků může vyjít alespoň částečné řešení problému.

5. Plánování – Provedení – Studie – Realizace

Vědecké studii PDSA předchází plánování experimentů, shromažďování dat, určení stability a formulace hypotéz a jejich prověření.

6. Možné řešení a důkaz o opravě

Předběžná studie se snaží o validaci řešení, například experimentem. Je možné provést i další studie variability.

7. Institucionalizace změny

Cílem je změna procesu tak, aby se daný problém nemohl v budoucnosti objevit. Může se jednat o změnu norem, nebo školicích materiálů. [21]



4.5.1 Analýza výsledků

Pro posouzení přijatelnosti zařízení na dané použití se výsledky analýzy vyhodnocují.

Chyba polohy

Určuje se na základě analýzy strannosti a linearity. Kritériem přijatelnosti je významná odlišnost od nuly nebo maximální dovolená chyba. Maximální dovolenou chybu stanovuje postup kalibrace měřidla.

Chyba šíře

Posuzuje se velikost poměru variability systému měření vůči variabilitě výrobního procesu nebo vůči toleranci dílu. Konečná kritéria závisí na prostředí systému měření, účelu měření a mají být odsouhlasena zákazníkem. Praktická zásada zní:

Chyba $<10\%$ – systém je přijatelný

Chyba $10\text{--}30\%$ – systém může být přijatelný (v závislosti na důležitosti, nákladech a použití)

Chyba $>30\%$ – systém je nepřijatelný. [21]

4.5.2 Replikovatelné systémy měření

Hlavní zdroje variability jsou obvykle přístroj, operátor a samotná použitá metoda.

Vhodné použití, pokud platí

- Provádí se studie dvou faktorů nebo podmínek měření plus opakovatelnosti systému měření
- Zanedbatelný účinek variability uvnitř dílu
- Není statistická interakce mezi operátory a díly
- Rozměrově stálé díly [21]



4.5.3 Zkušební postup pro

4.5.3.1 Určení stability

Realizace studie začíná zajištěním výběru a jeho referenční hodnoty, případně se místo vzorku zvolí výrobní díl (vzorový výběr). Dále jsou periodicky prováděna měření vzorového výběru.

Výsledky se analyzují graficky, nebo numericky.

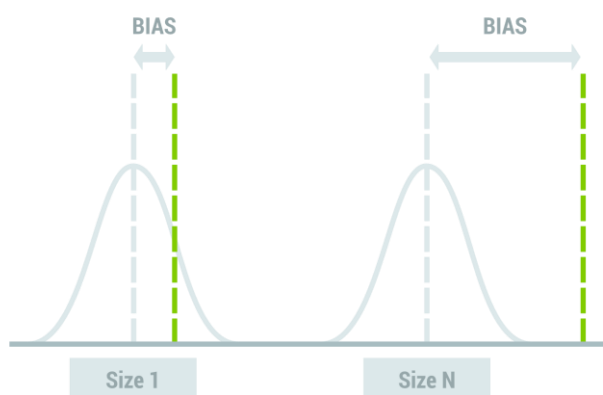
4.5.3.2 Určení vychýlení měření

V daném případě mluví příručka MSA o studii určování strannosti.

Je nutné zajistit výběr a určit jeho referenční hodnotu vůči návazném etalonu. Tento výběr (díl) se následně n -krát změří ($n > 10$). Průměrná hodnota z naměřených hodnot se použije jako referenční hodnota.

Následně jeden z operátorů měří běžným způsobem tento výběr n -krát.

Výsledky se analyzují graficky a následně numericky.

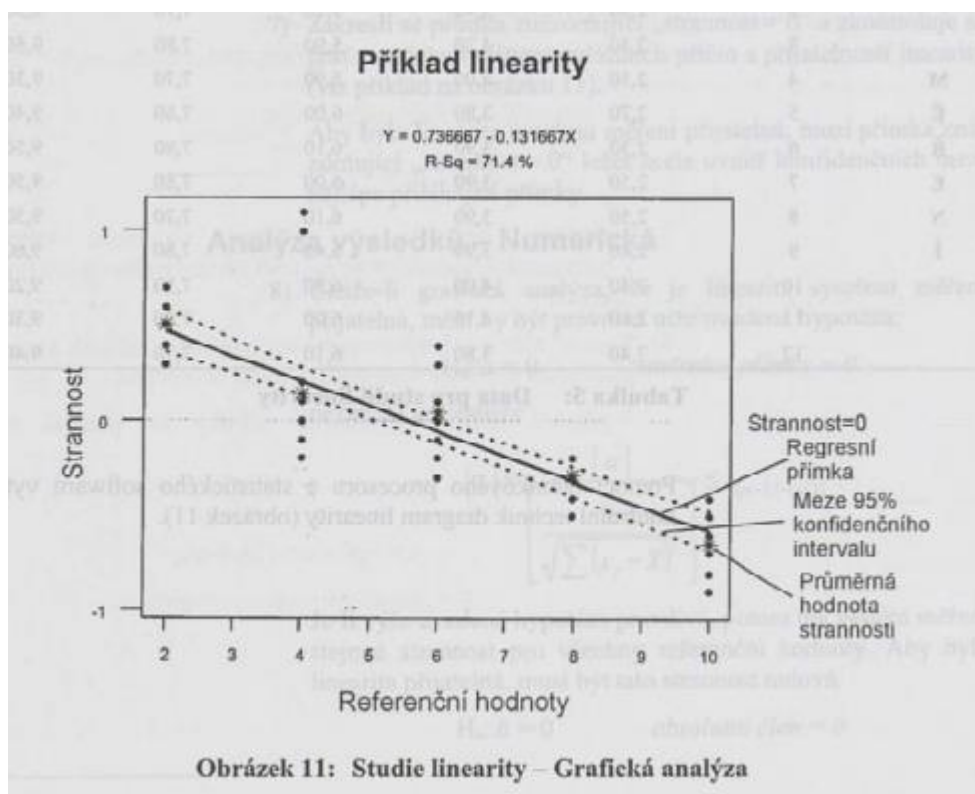


Obrázek 40 – Znázornění vychýlení měření [31]



4.5.3.3 Určení linearity

Je vybráno vícero dílů (>5), jež pokrývají rozsah měřidla. Pro výběr dílů je následně nutné získat referenční hodnoty a změřené hodnoty pracovníky obsluhy (pracovníci obsluhy měří díl >10krát). Výsledky se analyzují graficky a numericky.



Obrázek 41 – Studie linearity – grafická analýza [21]

4.5.3.4 Určení opakovatelnosti a reprodukovatelnosti

Studie lze provádět pomocí velké řady technik, mezi hlavní patří metoda založená na rozpětí, metoda založená na průměru a rozpětí a metoda ANOVA. Tyto metody ignorují variabilitu uvnitř dílu, na což je třeba brát zřetel při nakládání se zjištěnou variabilitou.

Metoda založená na rozpětí umožňuje rychlou aproximaci variability, avšak bez rozkladu na opakovatelnost a reprodukovatelnost.



Metoda založená na průměru a rozpětí dokáže určit odhad opakovatelnosti i reprodukovatelnosti, avšak nedokáže určit jejich interakci.

Metoda ANOVA je robustní statistická metoda umožňující analyzovat jakékoliv experimentální seřízení, zajistit přesný odhad rozptylů i získat informace ohledně interakcí a vlivů operátorů. Nevýhodou jsou složitější výpočty a nutná statistická znalost pro interpretaci výsledků.



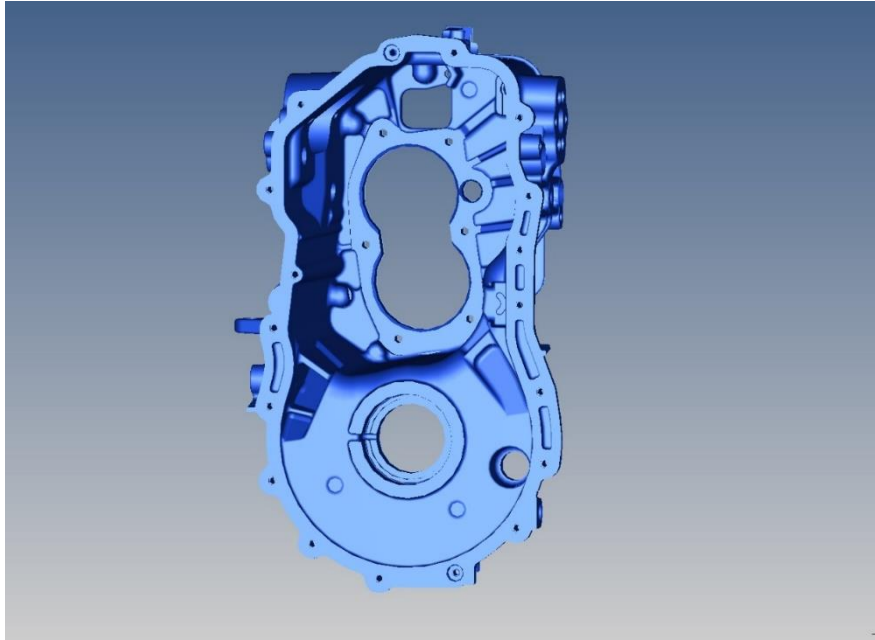
5 Současný stav řešené problematiky

Pro danou problematiku byl vybrán díl z převodovkové skříně. Díl je vyroben z materiálu AlSi9Cu3 tj. z hliníkové slitiny. Díl je vyráběn vysokotlakým odléváním a následným obráběním funkčních ploch. V současnosti je výroba i měření daného dílu v ustáleném stavu.

Tabulka 7 – Informace o měřeném dílu a plánu měření

Číslo dílu	040121_C01_01
Číslo výkresu	ODQ 301 103 B
Název dílu	Skrin_Prevodovky_MQ_200
Materiál	AlSi9Cu3
Současný plán měření	Prevodovka_ODQ_301_103_B
Počet vyhodnocovaných charakteristik	355 z toho 52 geometrických
	<ul style="list-style-type: none">- 14 polohy- 4 rovinnosti- 6 kolmosti- 4 rovnoběžnosti- 1 sklonu- 12 kruhovitosti- 5 válcovitosti- 6 soustřednosti

Díl byl společně s přípravkem zapůjčen ze společnosti ŠKODA AUTO a.s.



Obrázek 42 – CAD model dílu



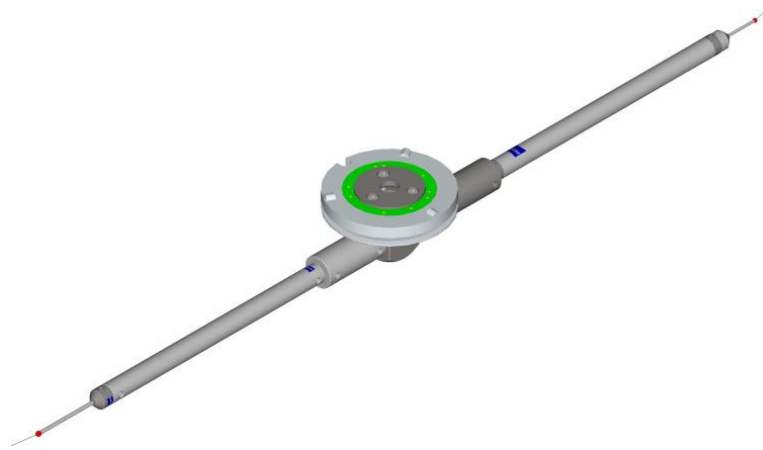
Obrázek 43 – Měření na CMM Carl Zeiss Prismo se skenovacím systémem Vast Gold



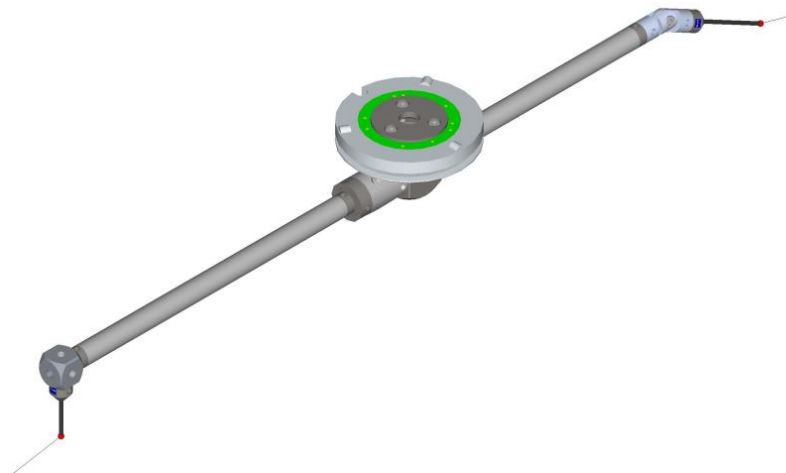
Měření jak původního, tak optimalizovaného plánu probíhalo na CMM Carl Zeiss Prismo se skenovacím systémem Vast Gold.

K měření daného dílu se využívají tři konfigurace snímačů podrobněji popsané v příloze (rozměry snímačů, prodloužení atd).

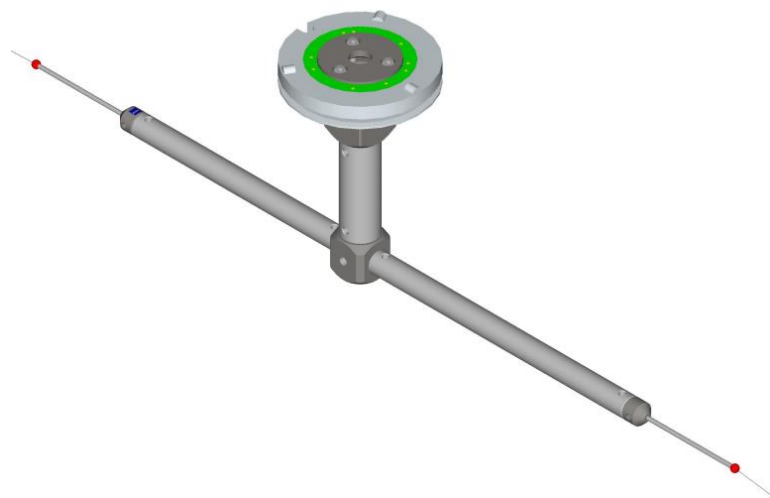
Snímače jsou zakončeny rubínovými kuličkami.



Obrázek 44 – Snímač 108



Obrázek 45 – Snímač 109



Obrázek 46 – Snímač 110

5.1 Vyhodnocení naměřených dat

Program byl na daném dílu spuštěn v 11 bězích – pro každý prvek tím bylo získáno 11 hodnot. Je pravděpodobné, že díl nebyl dokonale očištěn, což je vidět z naměřených hodnot. Kulička projíždí ve stejných drahách a může rozhrnout nečistoty (v prvním, druhém běhu). Hodnoty se pak mohou v některém měření výrazně lišit vůči zbylým výsledkům. Podobně se může stát, že v některém měření mohla kulička najet např. na zrnko prachu, což se mohlo projevit výraznou odchylkou od ostatních hodnot. Situace je řešena eliminací odlehlých hodnot.

Tabulka 8 – Úprava hodnot na jedné z charakteristik

Charakteristika 055_3B0_KRUH

	Před úpravou	Po úpravě
Měření 1	0,005395	–
Měření 2	0,005026	–
Měření 3	0,003928	0,003928
Měření 4	0,003497	0,003497
Měření 5	0,003613	0,003613



Měření 6	0,003728	0,003728
Měření 7	0,003807	0,003807
Měření 8	0,003946	0,003946
Měření 9	0,004186	0,004186
Měření 10	0,003627	0,003627
Měření 11	0,003792	0,003792
Průměr	0,004049645	0,003791644
Směrodatná odchylka	0,000609172	0,000208585
Vyhodnocení Cg	0,656629314	1,917683

Podobná situace jako v případě charakteristiky 055 nastává u následujících charakteristik (pro tuto úpravu byly zvoleny charakteristiky u kterých platí $C_g < 1,33$ před úpravou). Úpravou byly eliminovány maximálně dvě hodnoty na výsledcích jedné charakteristiky.

Tabulka 9 – Seznam charakteristik, kde koeficient $C_g < 1,33$ před a po eliminaci odlehlých hodnot

Označení charakteristiky	Před úpravou		Po úpravě	
	sm odchylka	Cg	sm odchylka	Cg
055_3B0_KRUH	0,000609	0,656629	0,000208	1,917683
060_3B0_KRUH	0,000788	0,507862	0,000267	1,496487
061_3B0_VALC	0,000519	0,964034	0,000313	1,595166
064_3B01_KRUH	0,002347	0,1704566	0,000265	1,505911
069_3B01_KRUH	0,000625	0,639650	0,000143	2,78132
070_3B01_VALC	0,001323	0,3778493	0,000280	1,77996
111_3B04_KRUH	0,000647	0,5149873	0,000316	1,054777
115_3B04_KRUH	0,000637	0,523063	0,000449	0,74091
116_3B04_VALC	0,000684	0,7311470	0,000469	1,063968
121_3B04_X	0,003564	0,9353445	0,002478	1,34519



123_3B04_X-57	0,001015	1,1488647	0,000802	1,453477
144_11B11_POL	0,003131	1,064609	0,001907	1,747436
172_61B13_Y=A2S1=A424	0,003337	0,9989197	0,0024911	1,338107
174_61B14_Y=A2S1=A425	0,003298	1,0107539	0,002463	1,353257
191_61B21_Y=A2S2=A436	0,003243	1,0279038	0,002460	1,354666
193_61B21_POL=A2S2=A 436.Y	0,003243	1,0279038	0,002460	1,354666
196_61B22_Y=A2S2=A43 1	0,003197	1,0426114	0,002454	1,357946
198_61B22_POL=A2S2=A 431.Y	0,003197	1,0426103	0,002454	1,35794

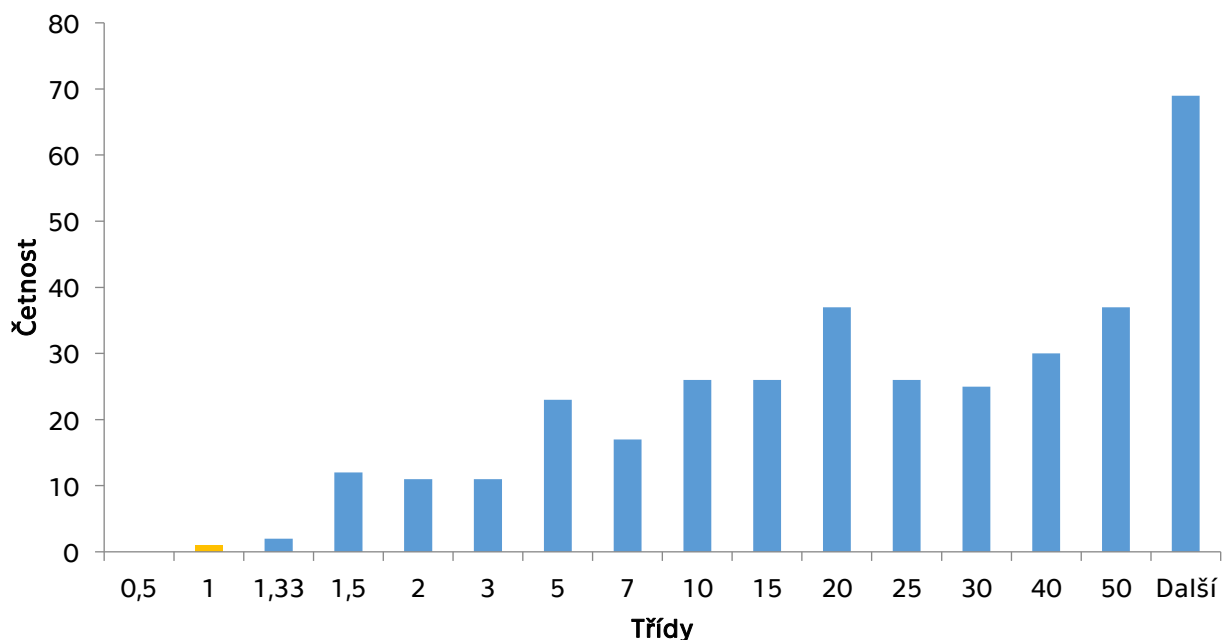
Většina hodnot po úpravě splňuje hodnotící podmínku

$$C_g > 1,33 \quad (29)$$

Jak je vidět z histogramu hodnot C_g všech naměřených charakteristik hodnotící podmínku nesplňuje malé množství charakteristik.



Histogram Cg původního plánu



Graf 2 – Histogram hodnot Cg původního plánu

Následující prvky podmínku pro parametr Cg nesplňují. Jedná se o prvky s úzkými tolerančními poli.

Tabulka 10 – Tabulka nezpůsobilých charakteristik při měření původním plánem

Charakteristika	šířka tol. pole [mm]	Cg	Průměr	Směrodatná odchylka
111_3B04_KRUH	0,01	1,0547769	0,0048889	0,000316023
115_3B04_KRUH	0,01	0,7409099	0,004987213	0,000449897
116_3B04_VALC	0,015	1,0639681	0,00516165	0,000469939

5.1.1 Charakteristiky 111, 115 a 116

Charakteristika 111 vyhodnocuje kruhovitosť z kružnice označené jako 3B04-173 – kružnice je průměru 15,52 mm. Pro daný průměr byla zjištěna

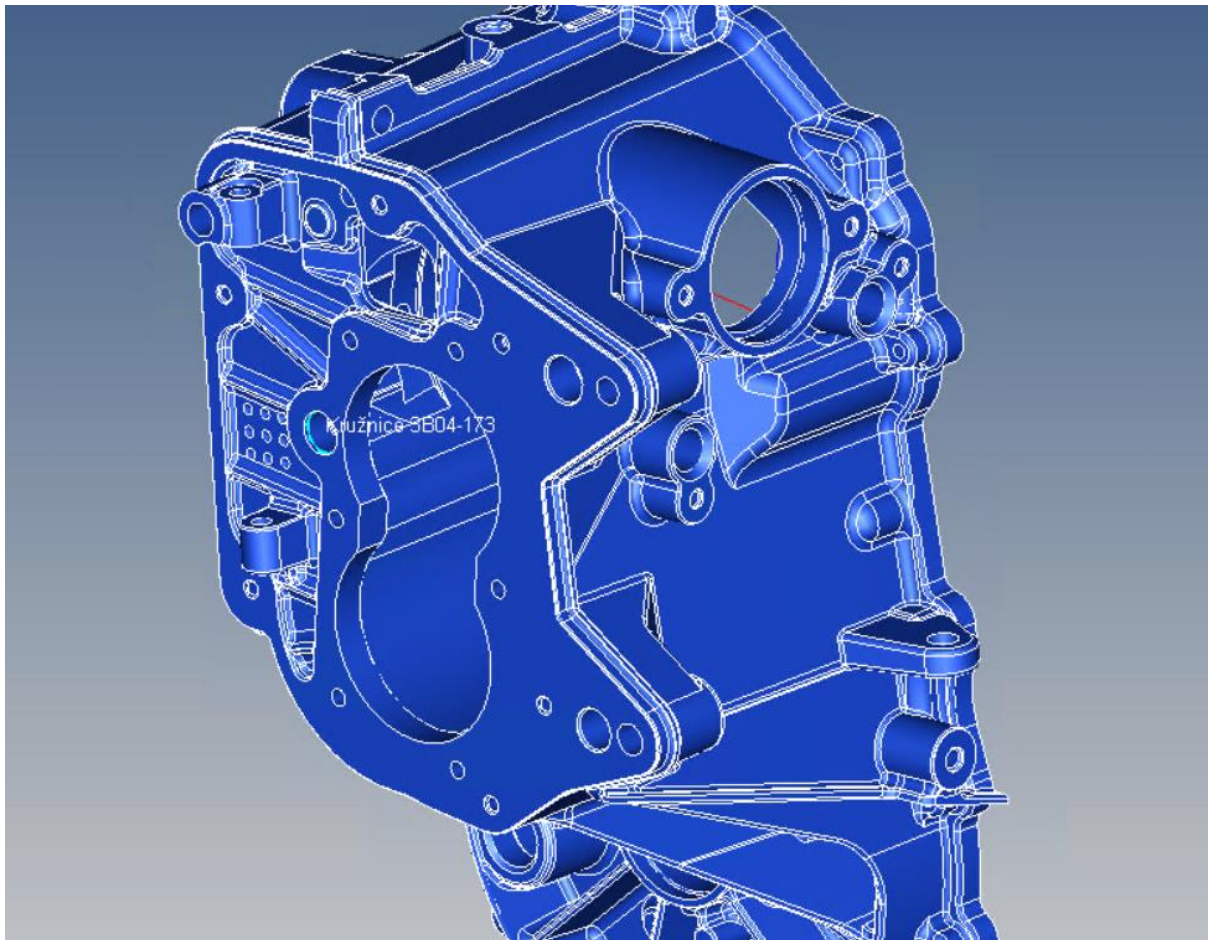


doporučená maximální rychlost 10 mm/s (v případě faktoru bezpečnosti 100 %) avšak na povrchu s velmi nízkou drsností.

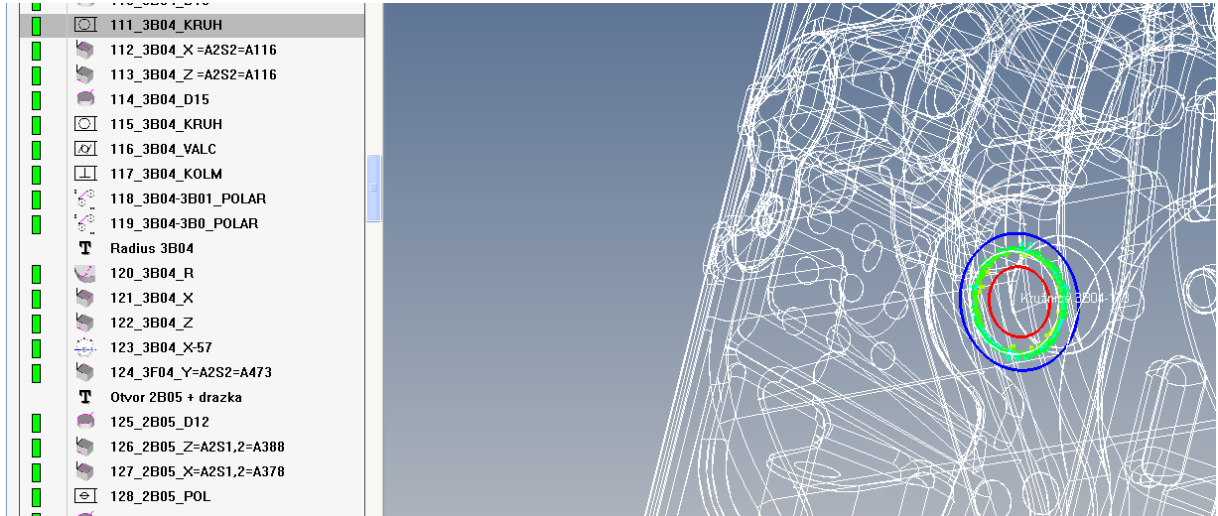
Optimalizace rychlostí probíhala s bezpečnostním faktorem 80 %. Pro daný prvek by proto vycházela doporučená rychlost 8 mm/s.

V případě charakteristiky 115 je situace stejná jako v předchozím případě. Vyhodnocovaná je kruhová dráha ve stejné díře, v jiné hladině.

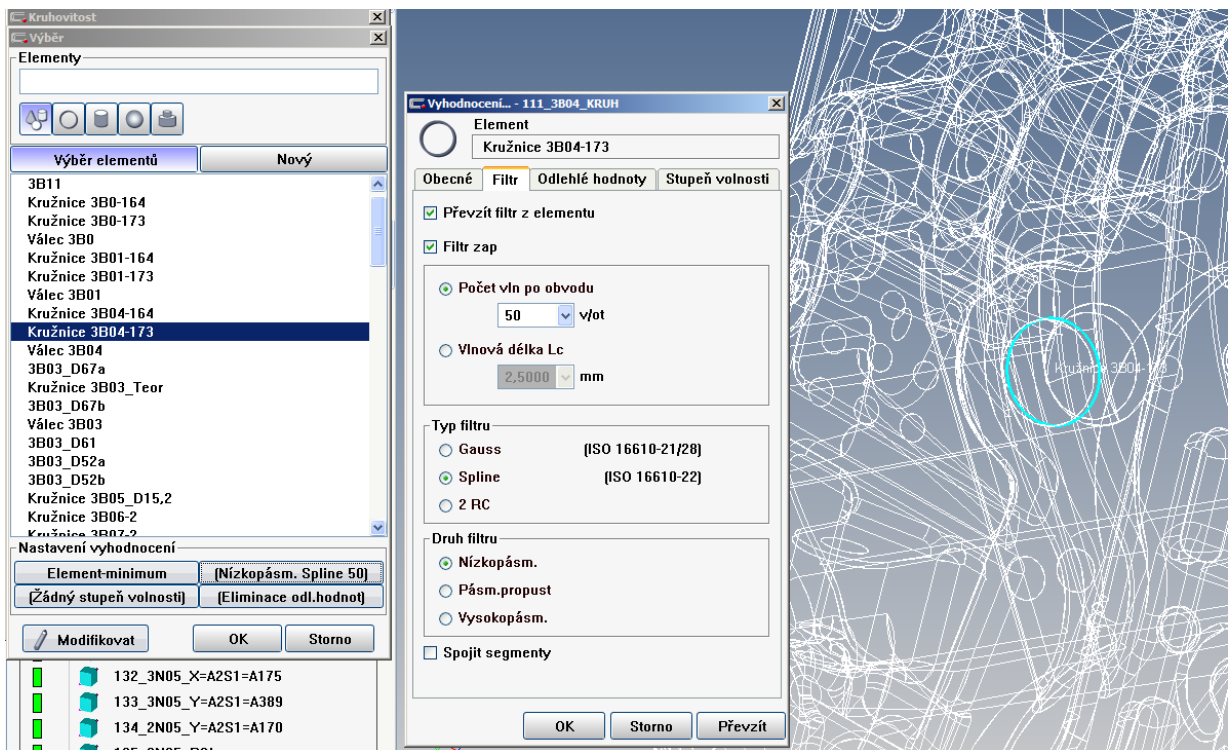
Charakteristika 116 je vyhodnocována z kruhových drah dvou předchozích charakteristik.



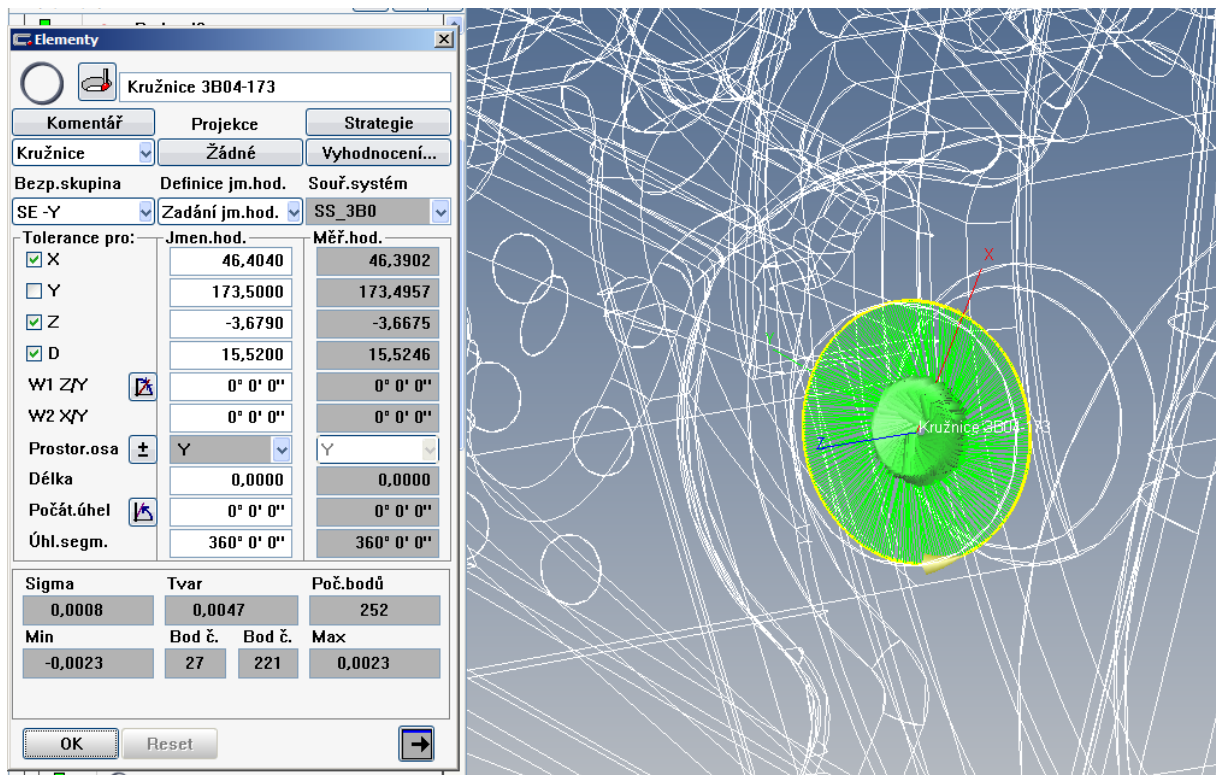
Obrázek 47 – Umístění elementu na součásti (charakteristika 111)



Obrázek 48 – Vizualizace vyhodnocení naměřených dat na modelu



Obrázek 49 – Nastavení filtrování hodnot na kružnici 3B04

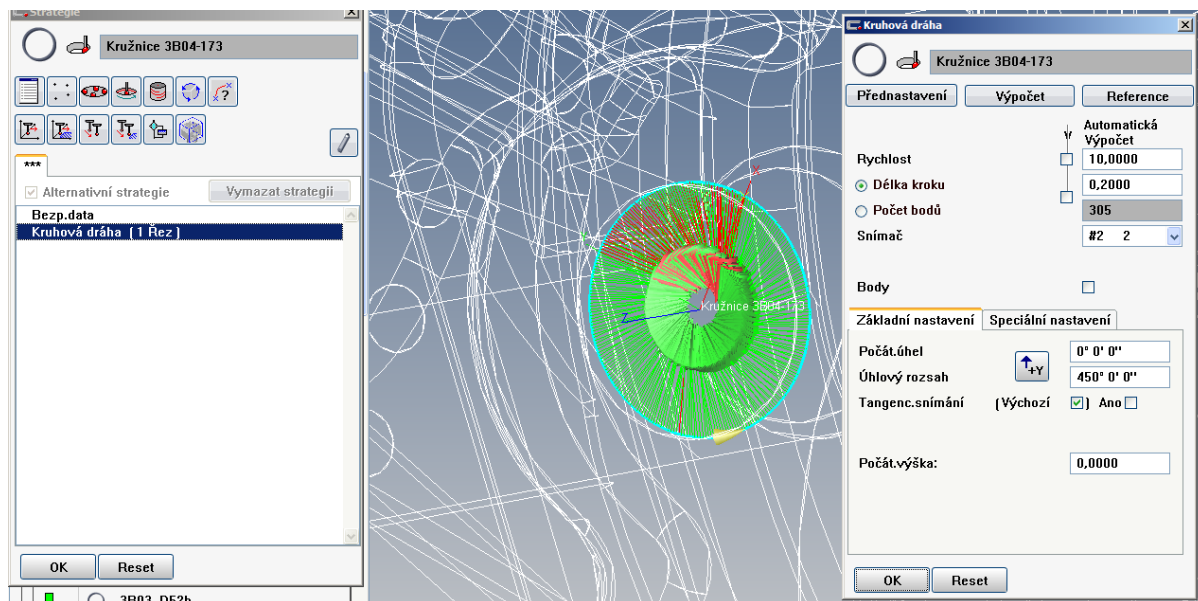


Obrázek 50 – Vyhodnocování elementu Kružnice 3B04 (počet vyhodnocovaných bodů 252)

Daný prvek na součásti (válcová díra) je vyhodnocován ze dvou řezů. U každého řezu je pro vyhodnocování v programu zapnutá filtrace, avšak hodnoty filtrované nejsou, protože z jednoho řezu je získán malý počet bodů (252 bodů). Počet naměřených bodů nespĺňuje Nyquistovo kritérium, proto nejsou body reálně filtrovány, jak je vidět i z vizualizace naměřených dat.

Filtraci hodnot popisuje norma ČSN EN ISO 12181-2. Norma popisuje Nyquistovo kritérium i problematiku klamného signálu. Norma doporučuje minimálně 7krát více bodů na hodnotu cut-off tedy v daném případě doporučuje vyhodnocovat minimálně 350 bodů při filtru 50 vln na otáčku. [32]

Je možné snímat větší počet bodů bez vlivu na rychlost (stroj dokáže sbírat body z povrchu součásti s vysokou rychlostí). V případě výskytu odlehlé hodnoty by tato byla odfiltrována. Odlehlá hodnota může znehodnocovat výsledky obzvláště při měření geometrických tolerancí.



Obrázek 51 – Nastavení snímání kružnice 3B04 (počet snímaných bodů 305)

Vzhledem k omezenému času v laboratořích bylo toto chování objeveno až při vyhodnocování naměřených hodnot. Náprava nefunkčnosti filtru proto nebyla provedena.

Při dalším zkoumání plánu měření byla nefunkčnost filtru odhalena i na dalších charakteristikách (viz dále).



6 Optimalizace strategie měření pro snížení času měření při zachování potřebné přesnosti

Měření probíhalo na stejném stroji a stejnými snímači jako původní program.

Jako referenční hodnoty pro výpočet parametru C_{gk} jsou využívány hodnoty průměru z měření původního plánu. Pro získání referenčních hodnot by však bylo vhodnější použít stroj dosahující vyšší přesnosti.

Nicméně cílem práce je porovnat vliv optimalizace na měřené výsledky a takto lze postupovat, abychom mohli porovnat vliv optimalizované strategie na způsobilost procesu měření. Plány má proto smysl porovnávat vůči sobě.

Program byl spuštěn desetkrát, tím bylo získáno 10 hodnot pro každou charakteristiku.

6.1 Rozdíl měření oproti původnímu programu

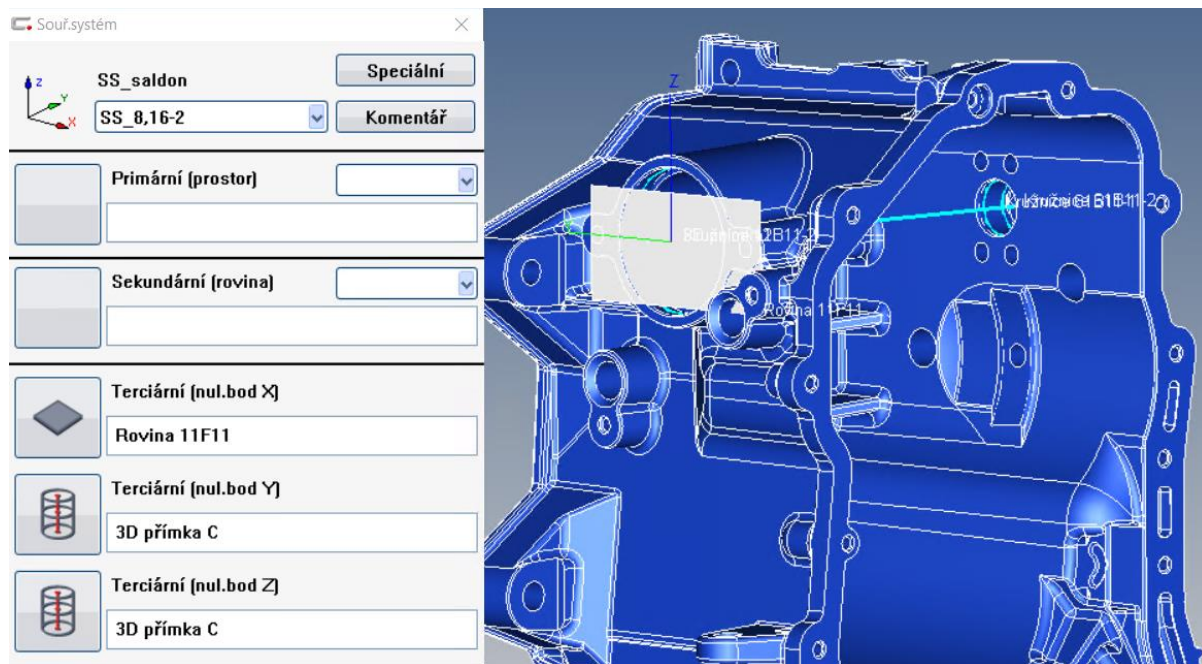
Ke změnám v programu došlo v oblasti rychlostí skenování na válcových dírách, na rovinách (čelech) a došlo ke změně pořadí měření elementů ve snaze eliminovat zbytečnou výměnu snímačů.

K eliminaci výměny nedošlo z důvodu sestavení plánu měření. K vyhodnocení je využíván (pomocný) souřadný systém SS_saldon. Válec 2B05 je zaměřován v tomto souřadném systému – vynucuje proto zaměření pomocného SS před prvkem samotným. Na kvalitu výsledků by neměla vliv změna pořadí měření tj. prvně válec a pak souřadný systém, byl by však nutný větší zásah do způsobu vyhodnocování charakteristik. Bohužel není

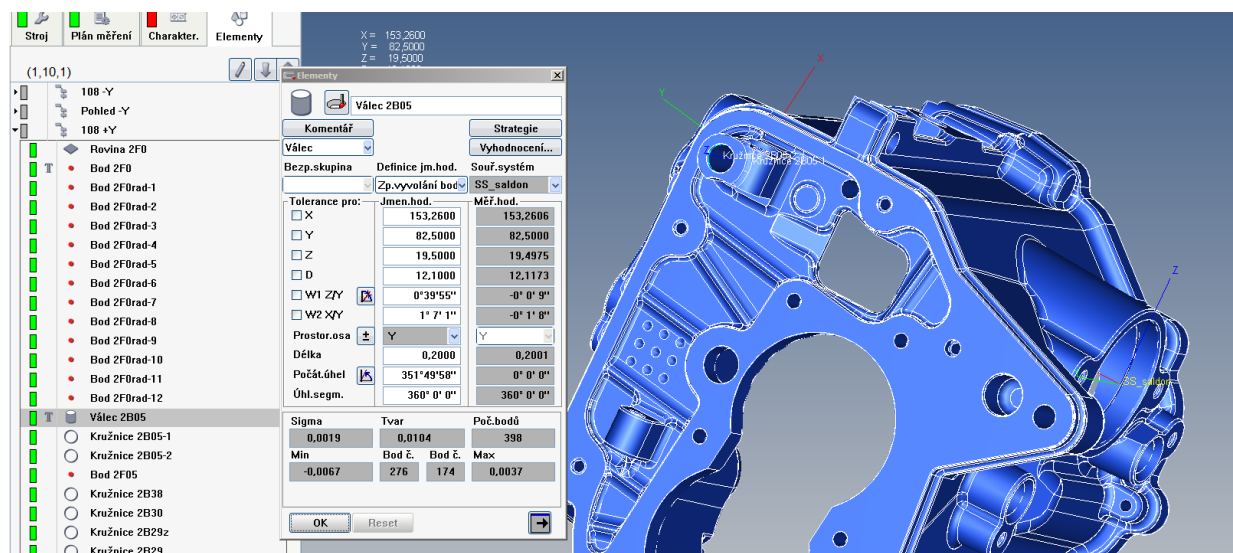


známo zasazení systému měření do výroby, proto nebyla výměna eliminována.

Byl proveden zásah do upnutí dílu – upínky byly seřizeny na větší přítlak. Tento zásah se mohl projevit do hodnot měření.



Obrázek 52 – Souřadný systém SS_saldon



Obrázek 53 – Válec 2B05 zaměřovaný v SS_saldon vynucující nadbytečnou výměnu konfigurace snímačů



6.2 Vyhodnocení optimalizovaného plánu měření

I v případě nového plánu je třeba přikročit k eliminaci odlehlých hodnot.

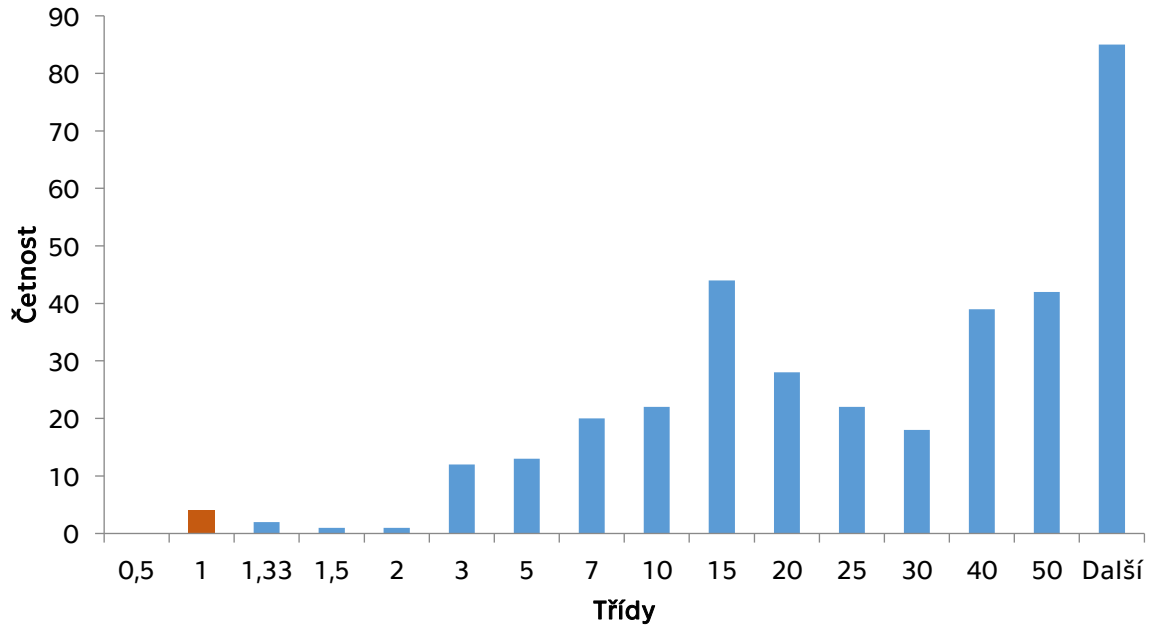
Tabulka 11 – Seznam nezpůsobilých charakteristik vyhodnocený z dat bez eliminace odlehlých hodnot

Charakteristika	Před úpravou		Po úpravě	
	Cg	Cgk	Cg	Cgk
075_3B03_KRUH	0,7147907	0,5001710	2,689642	2,460297
082_3B03_VALC	1,29553774	1,0055854	3,791897	3,384337
111_3B04_KRUH	0,7026855	0,4058782	0,702686	0,405878
115_3B04_KRUH	0,6969674	0,3907460	0,696967	0,390746
116_3B04_VALC	0,8805612	0,6746449	0,880561	0,674645
120_3B04_R	1,09169791	0,988098	1,091698	0,988099
121_3B04_X	0,5354226	0,5235547	0,535423	0,523555
123_3B04_X-57	1,18781278	1,12207621	1,187813	1,122076
152_11B11_KOLM	6,11611582	-0,309046	6,116116	-0,30905
165_11B15_Y=A2S1=A27 4	8,6358014	-1,1302277	8,635801	-1,13023

Ne všechny prvky z tabulky vykazují přítomnost odlehlých hodnot – proto nebyly upravovány. Těmto charakteristikám je věnována další pozornost.

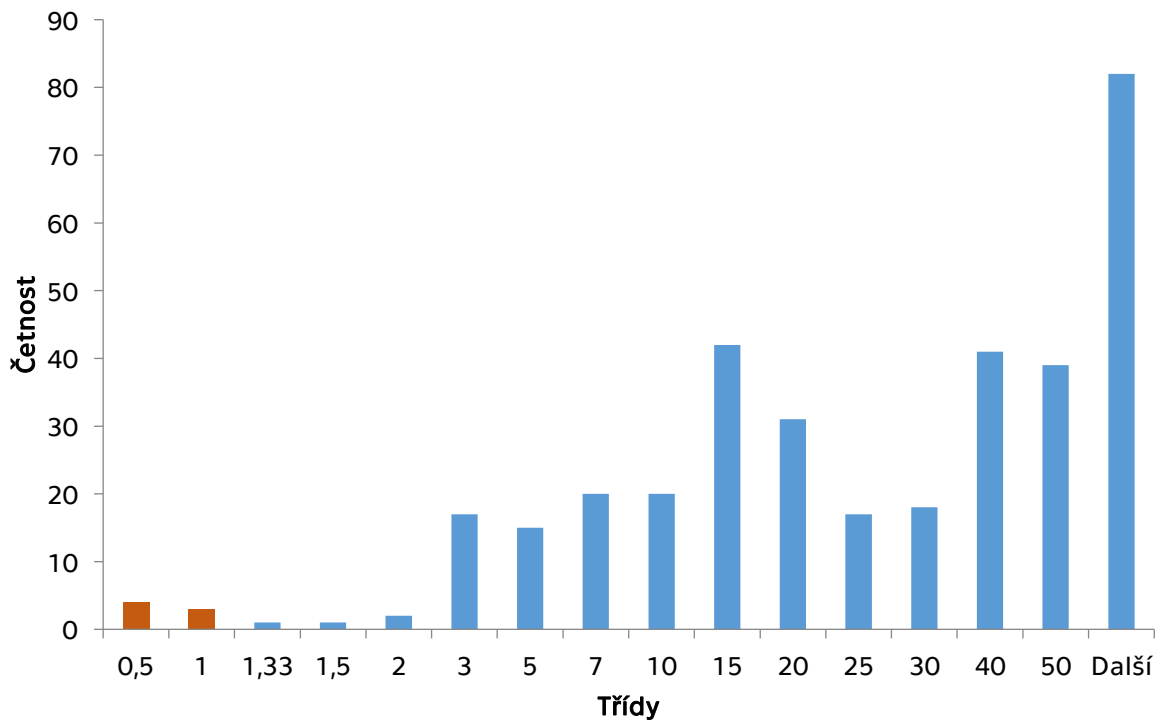


Histogram Cg optimalizovaný



Graf 3 – Histogram hodnot Cg optimalizovaného plánu

Histogram Cgk



Graf 4 – Histogram hodnot parametru Cgk optimalizovaného plánu



Charakteristiky nevyhovující podmínkám

$$C_g > 1,33 \text{ \& } C_{gk} > 1,33 \quad (30)$$

Tabulka 12 – Seznam nezpůsobilých charakteristik nového (optimalizovaného) plánu

Charakteristika	Šířka tol. pole	Průměr	Směrodatná odchylka
111_3B04_KRUH	0,01	0,002523588	0,000474371
115_3B04_KRUH	0,01	0,00297025	0,000478262
116_3B04_VALC	0,015	0,00446651	0,00056782
120_3B04_R	0,2	0,00454785	0,006107
121_3B04_X	0,1	0,00481088	0,006226
123_3B04_X-57	0,035	57,00649496	0,000982
152_11B11_KOLM	0,05	46,42298742	0,000273
165_11B15_Y=A2S1=A274	0,1	57,00664621	0,000386

Charakteristiky 111, 115 a 116 se potýkají se stejným jevem popsáním ve vyhodnocení původního (neoptimalizovaného) plánu – jsou měřeny stejně, nebylo přikročeno k navyšování ani snižování rychlosti, je nefunkční filtrace hodnot.

6.2.1 Charakteristiky 120, 121 a 123

Obě charakteristiky (120 a 121) jsou vyhodnocovány z jednoho prvku tj. z kružnice 3B04. Charakteristiky vyhodnocují polohu středu kružnice a její průměr.

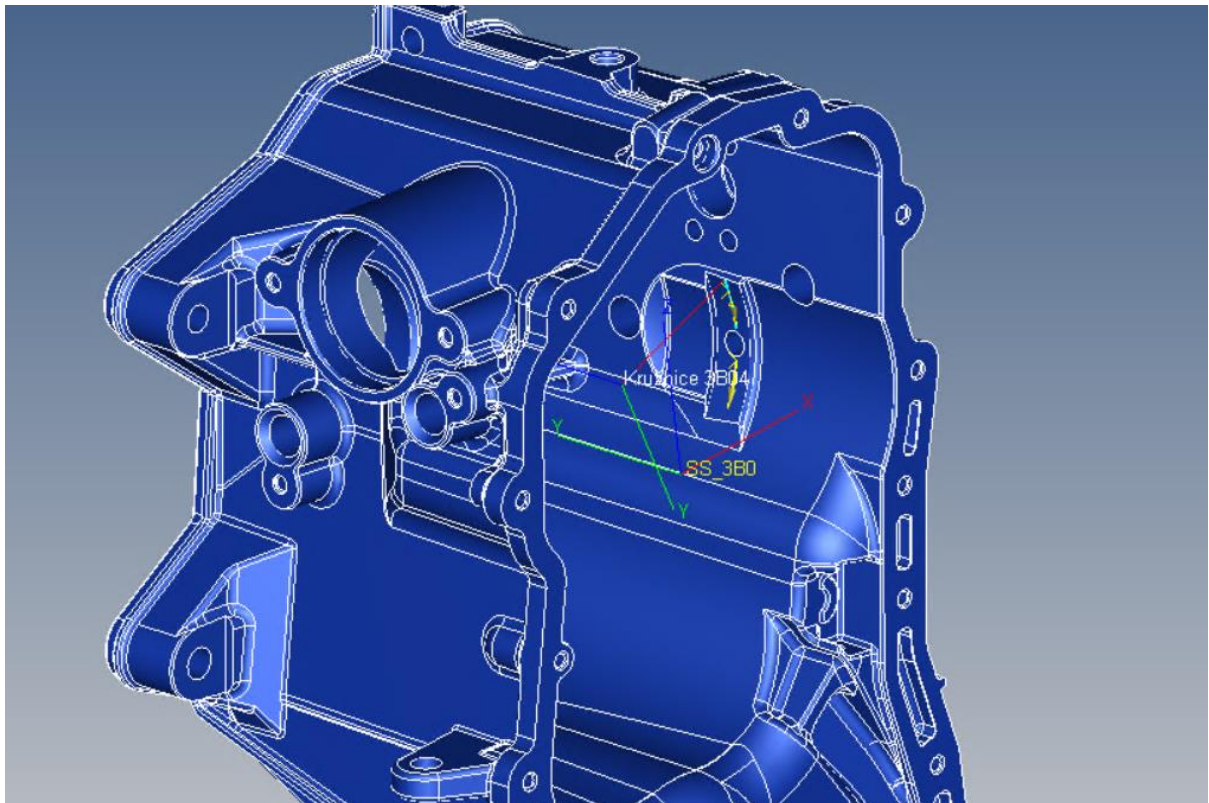
Kruhová dráha, respektive její dvě části má rádius R57 a dráhy mají úhlovou dráhu 13 a 17 stupňů.



Charakteristika 123 se vyhodnocuje z kružnice 3B04 a z projekce bodu umístěného na stejné ploše jako tato kružnice.

Na tomto místě je vhodné klást otázky ohledně vypovídající hodnoty polohy středu kružnice o průměru 114 mm měřené z úhlové dráhy celkem 30 stupňů.

Tyto otázky však přesahují rozsah této práce.



Obrázek 54 – Vyhodnocování kružnice 3B04

6.2.2 Charakteristika 152_11B11_KOLM

Charakteristika je vyhodnocována z 3D přímky (osa válcových děr) a z roviny 11F11. 3D přímka je vyhodnocována z kružnic 61B11-1, 61B11-2 a 11B11-2.

U všech prvků došlo k optimalizaci rychlostí.

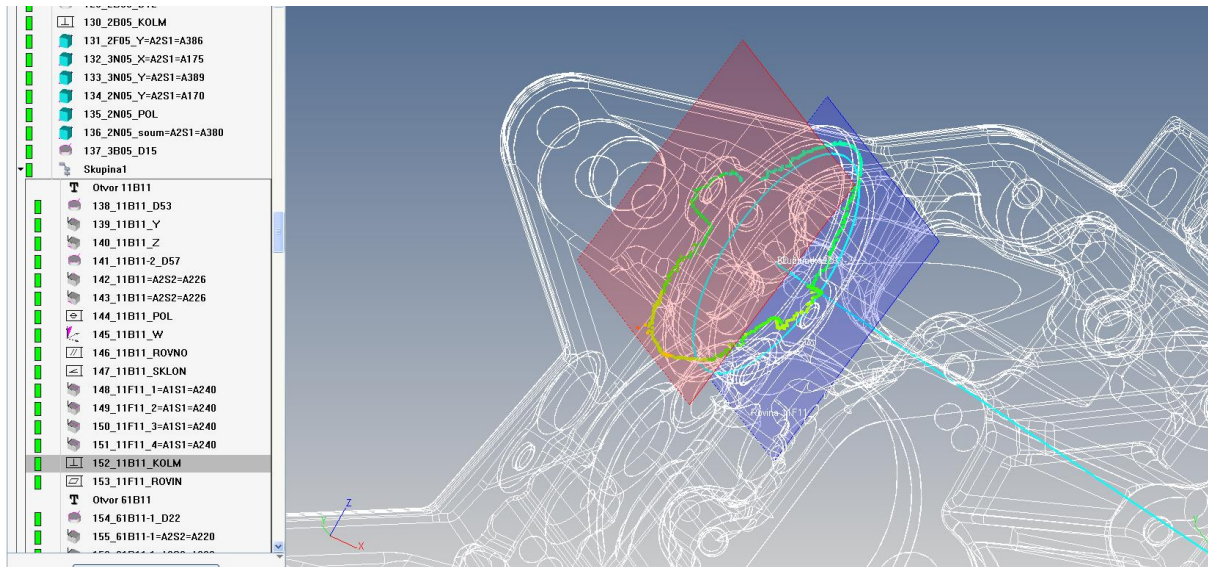
U dané charakteristiky parametr C_g splňuje podmínku

$$C_{g152} = 6,12 \quad (31)$$

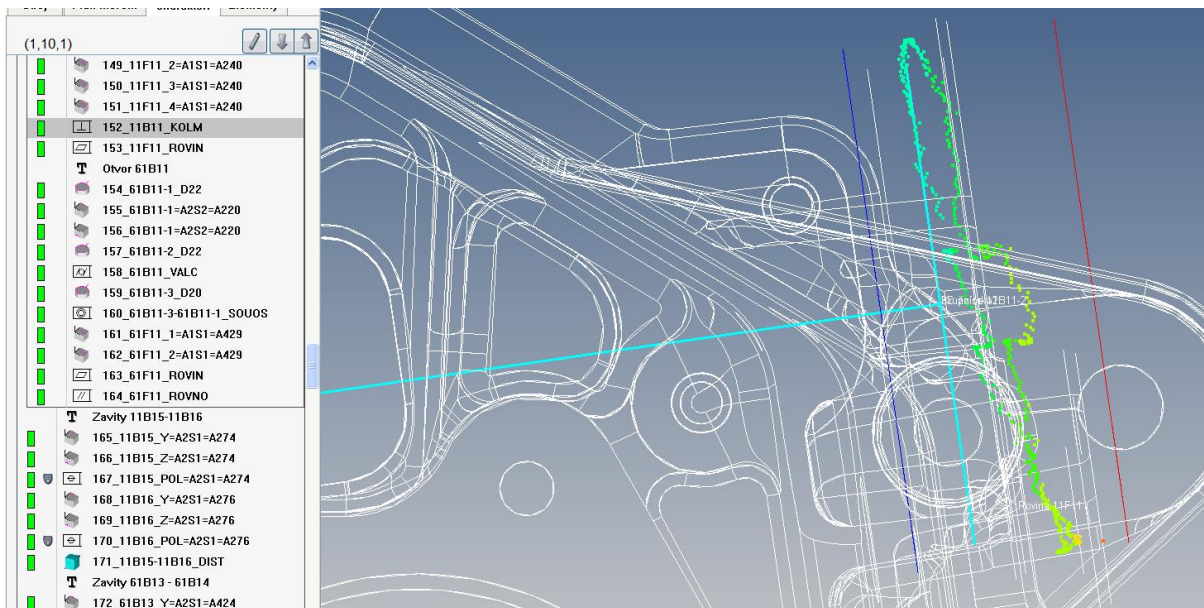
$$C_{g152} > 1,33 \quad (32)$$



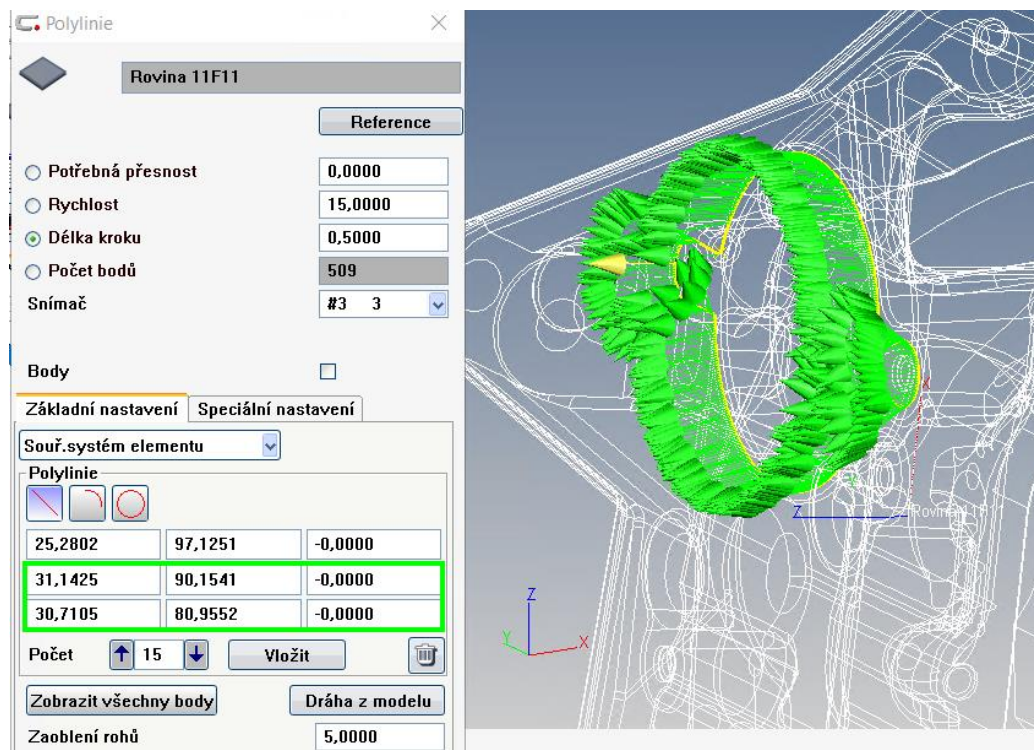
Analýzou naměřených hodnot bylo zjištěno, že u daného prvku reálně nefunguje filtrace (v daném případě není spuštěna). Charakteristiky jsou proto náchylné na výskyt odlehlých hodnot.



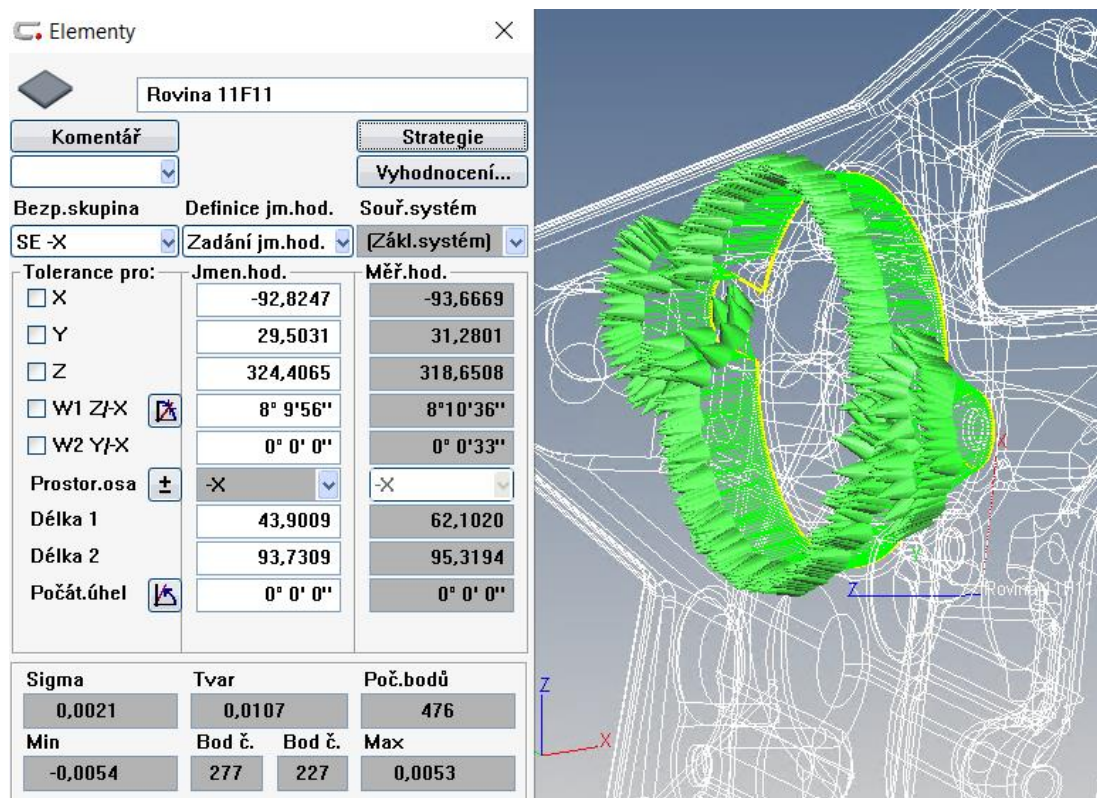
Obrázek 55 – Vizualizace naměřených bodů



Obrázek 56 – Vizualizace naměřených bodů



Obrázek 57 – Nastavení skenování roviny 11F11 (délka kroku 0,5, počet skenovaných bodů 509)

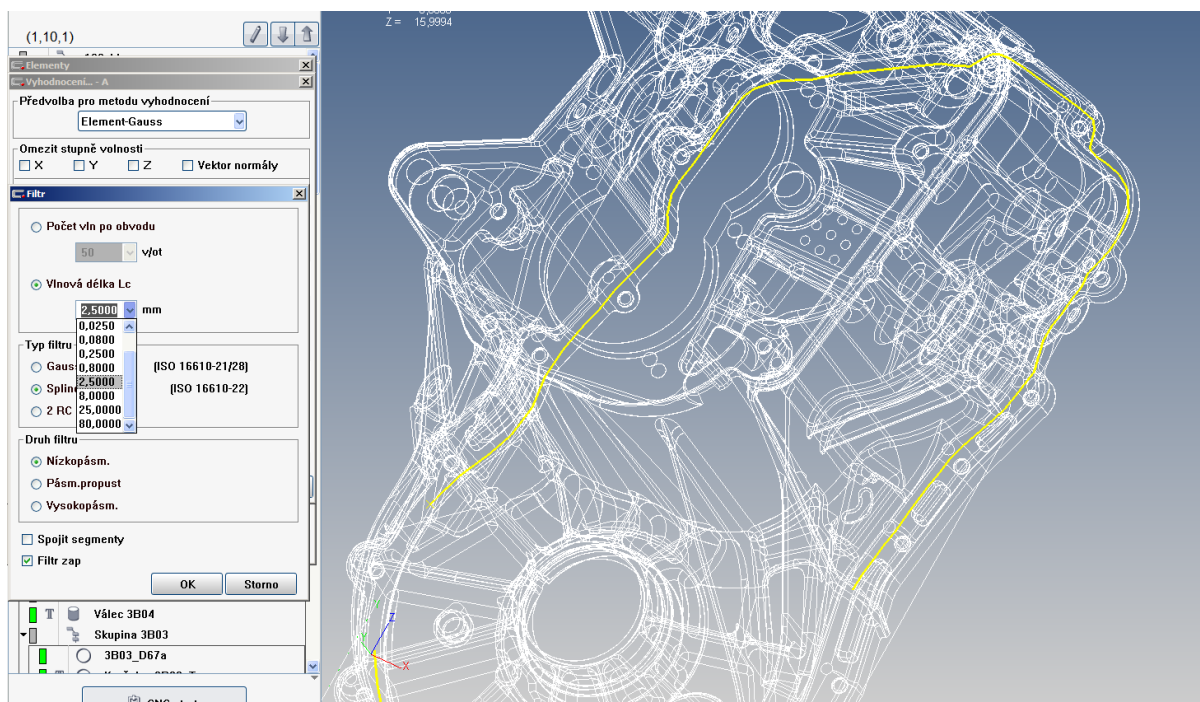


Obrázek 58 – Vyhodnocování roviny 11F11 (počet vyhodnocovaných bodů 476)

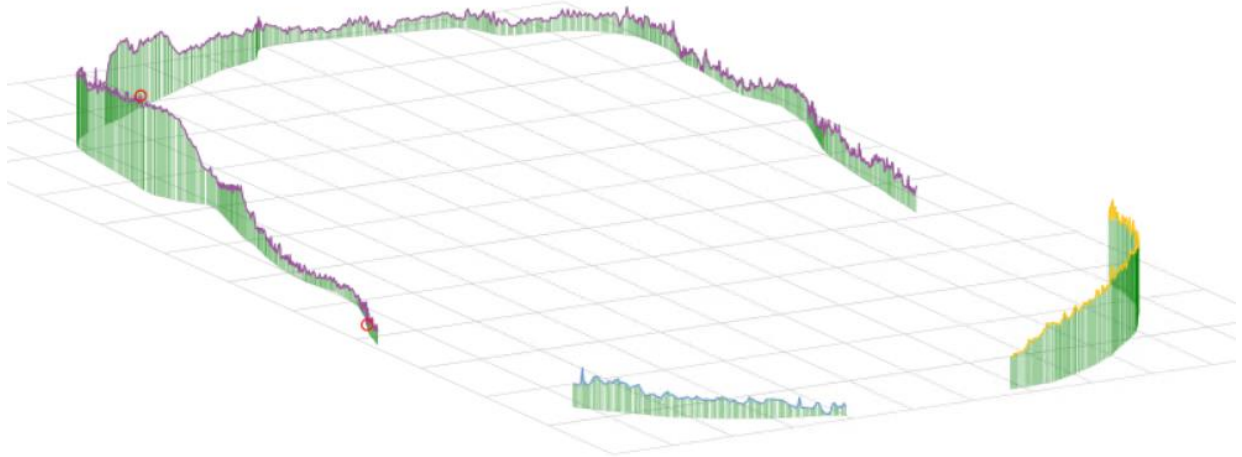


6.2.3 Charakteristika 025 (Rovina A)

Při zpracování hodnot bylo zjištěno, že filtr reálně nepracuje ani v případě roviny A, která se účastní vyrovnání. Podobně jako v případě kružnice 3B04 není naměřen dostatek bodů pro funkčnost filtru, protože není splněno Nyquistovo kritérium.



Obrázek 59 – Nastavení filtrace na rovině A



Obrázek 60 – Vizualizace naměřených bodů na rovině A

6.2.4 Charakteristika 165_11B15_Y=A2S1=A274

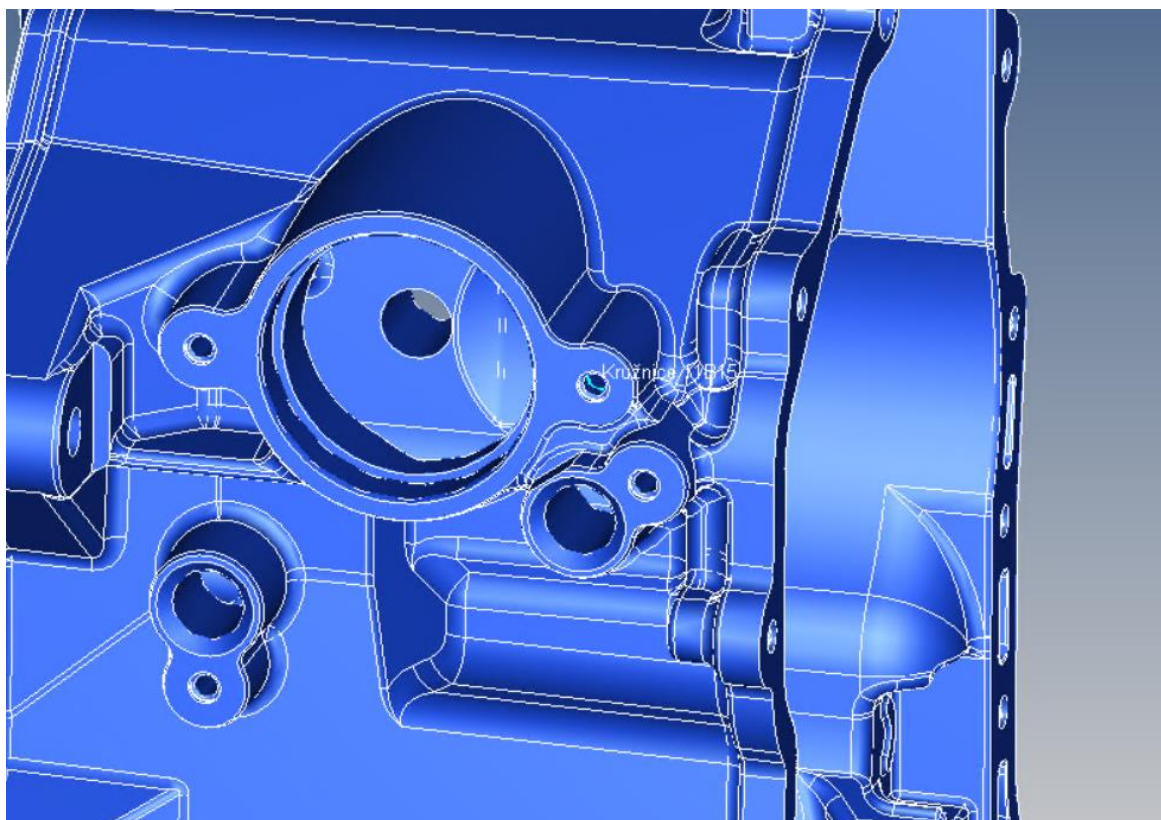
Charakteristika je vyhodnocována pomocí „kružnice“ 11B15, dráhou ve tvaru spirály (jedná se o díru se závitem) v souřadném systému SS_saldon. Snímáno je 32 bodů (1 otáčka). Rychlost měření tohoto prvku nebyla upravována.

V případě všech závitových děr na součásti (nejen 11B11) není využito funkce samostředění. Účel této funkce je orientovat kuličku mezi vrcholky závitu a držet ji ve stálém kontaktu. Bez této funkce záleží na tom, jak stroj do díry najede – stroj může do díry najet tak, že ke kontaktu dojde na vrcholku závitu. V takovém případě se stroj snaží držet kuličku v jednom bodě kontaktu a dochází k výraznému sklouzávání kuličky (slip effect), výsledky jsou pak zatíženy značnou chybou.

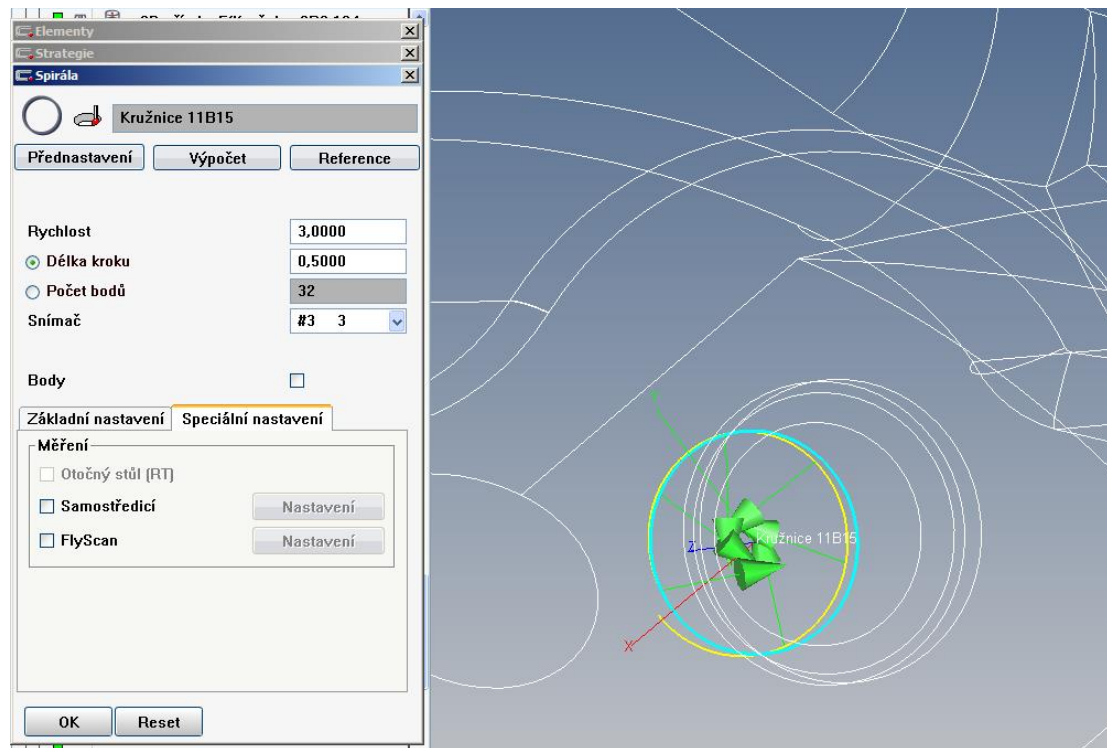
V daném případě by bylo vhodným doporučením nejen zapnutí funkce samostředění ale i zvýšení počtu snímaných bodů (kružnice 11B15 je vyhodnocována z 5 bodů).



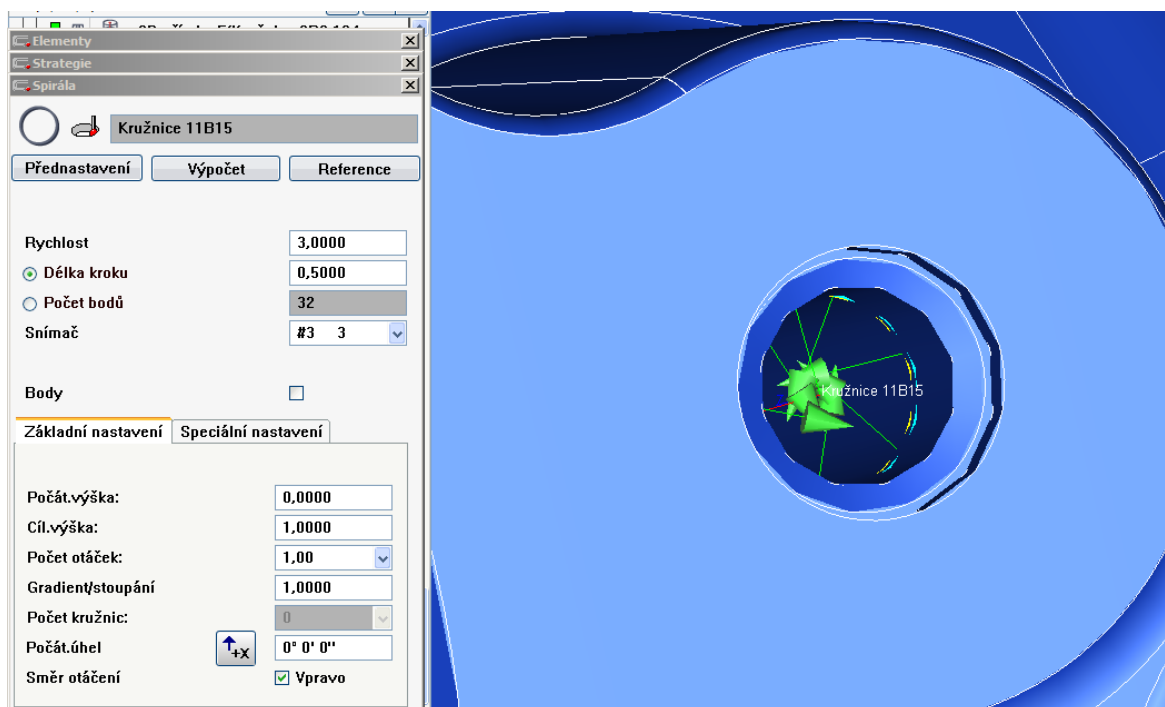
Díry se závitem jsou na daném dílu (dle výrobce) kontrolovány hlavně kvůli seřízení pozice závitníků ve výrobním procesu.



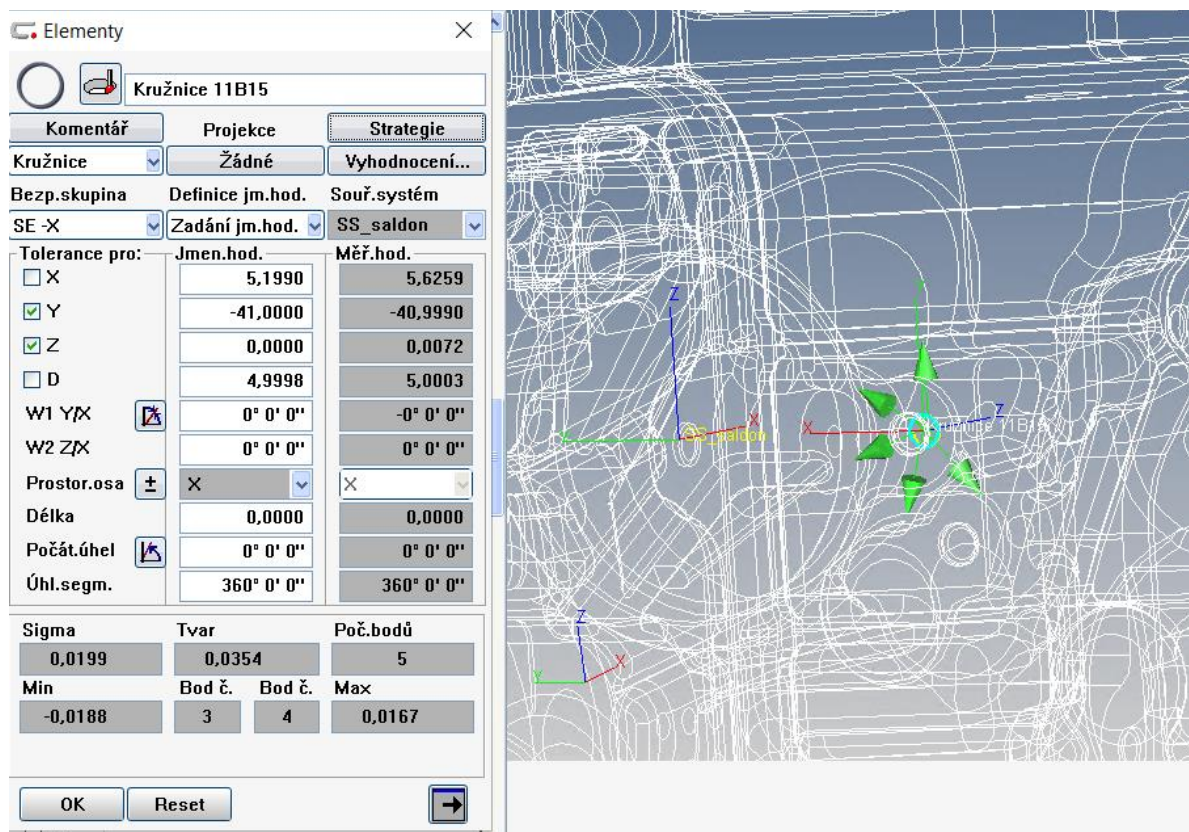
Obrázek 61 – Pozice prvku na součásti



Obrázek 62 – Možnost zapnutí funkce samostředění



Obrázek 63 – Nastavení snímání bodů (délka kroku 0,5, 32 snímaných bodů)



Obrázek 64 – Nastavení vyhodnocení (počet vyhodnocovaných bodů 5)

6.3 Srovnání plánů měření a další optimalizace

Dalším prostorem pro zkrácení času měření pramení z hodnocení příjezdů a odjezdů snímacího systému k měřené součásti. Plán měření je nastaven tak, že ve více případech najíždí při měření prvku ve více hladinách (typicky měření díry v několika řezech) zpět k bezpečné oblasti a následně zpět k povrchu prvku. Tyto odjezdy mají vlastní opodstatnění – jedná se o bezpečnostní prvek. V případě nutnosti dodatečně doměřit charakteristiky (např. původní výsledek je zatížen přílišnou chybou kvůli nedostatečnému očištění dílu aj.) stroj nenajíždí k měření nejkratší cestou z bodu, ve kterém se zrovna nachází, ale najíždí z bezpečné oblasti.

Zanechat v plánu měření zbytečné přejezdy znamená usnadnit dodatečné měření za cenu delšího času měření jednotlivého dílu. Eliminovat zbytečné přejezdy znamená zkrácení doby měření a zvýšení kapacity měrového



střediska, ale i zvýšení pravděpodobnosti kolizí při dodatečném měření. Pro erudované rozhodnutí by bylo nutné hodnotit i přípravu měřených dílů (správné očištění atp.) a četnost nutnosti doměřování.

Tabulka 13 – Tabulka srovnání a další optimalizace

	naměřená doba	rozdíl oproti původnímu programu
Původní program	0:27:49	
Nový program (zvýšení rychlostí vybraných prvků)	0:24:57	-10,31%
Doba nadbytečných příjezdů/odjezdů	0:01:14	
Faktor odhadu redukce příjezdů/odjezdů	80%	
Doba (nadbytečné) výměny	0:00:45	
Možnost další optimalizace (eliminace výměny)	0:24:12	-13,02%
Možnost další optimalizace (eliminace výměny, redukce příjezdů/odjezdů)	0:23:12	-16,58%

Hodnoty v tabulce byly získány měřením časů ze záznamu běhu programů na stroji.

Z hlediska možné redukce příjezdů/odjezdů byl proveden předpoklad, že by tyto nadbytečné pohyby nebylo možné odstranit úplně, ale šly by však výrazně redukovat. Na příkladu měření válcové díry ve dvou řezech by stroj nevyjížděl na bezpečnou skupinu, ale například do středu díry. Pro další odhady času měření je proto zaveden faktor odhadu redukce příjezdů/odjezdů předpokládající redukci těchto časů o 80 %.

Časy jsou porovnávány vždy vůči původnímu plánu pomocí vztahu

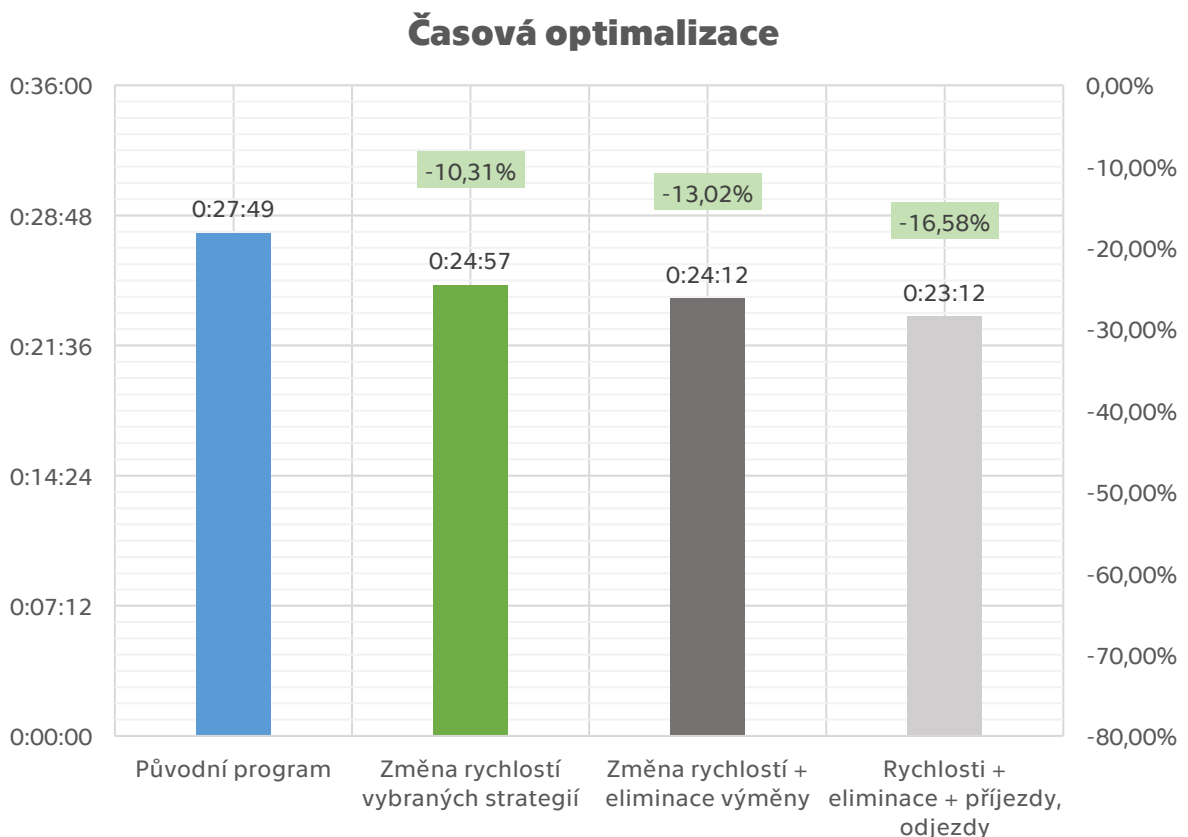
$$\Delta = \frac{\text{nový} - \text{původní}}{\text{původní}} \cdot 100 [\%] \quad (33)$$



6.4 Závěr kapitoly

V kapitole jsou probrány problematické části plánu měření a doporučení, jakým způsobem se těmto problémům vyvarovat.

Další časová optimalizace je možná. Plán měření je sestaven takovým způsobem, že vynucuje návrat k již použité konfiguraci snímačů. Tato výměna je vynucena kvůli použití pomocného lokálního souřadnicového systému. Eliminace této výměny je možná bez vlivu na kvalitu měření, avšak vyžaduje zásah do způsobu vyhodnocování charakteristik (pozdější vyhodnocení). Časová úspora je v případě eliminace zbytečné výměny společně s optimalizací rychlosti skenování vybraných prvků 13 % oproti původnímu plánu.



Graf 5 – Zhodnocení časové optimalizace vůči původnímu plánu



Oproti původnímu plánu se podařilo zkrátit čas měření o 10 %, při eliminaci výměny konfigurace snímačů je předpokládaná časová úspora 13 % oproti původnímu plánu. Při redukci doby příjezdů a odjezdů je předpokládaná časová úspora 16 % proti původnímu plánu. Poslední navržené změny (eliminace výměny a redukce dob příjezdů a odjezdů) nebyly experimentálně ověřeny.



7 Závěr

Práce popisuje souřadnicové měřicí stroje, jejich konstrukční uspořádání a konstrukci snímačů. Popsané jsou využívané kompenzace pro zpřesnění procesu měření. Byl popsán postup kontroly dílu pomocí CMM a využití dat nad rámec posouzení shody/neshody jednoho dílu, tedy i pro statistické řízení procesu.

Dále byly v práci nastíněny vlivy strategií na produktivitu a přesnost měření. Pozornost je věnována strategiím měření na válcových prvcích a na kuželech v závislosti na orientaci prvku v prostoru stroje. Aby bylo možné hodnotit proces měření, jsou v práci nastíněny metody využívané pro analýzu procesu měření včetně nejvyužívanější metodiky dle MSA. Je popsán význam nejistot měření obzvláště v případě rozhodování v blízkosti toleranční meze a je popsán pohled na nejistoty z matematického hlediska. Metody hodnocení a analýzy procesu měření doplňuje základní přehled využívané terminologie. Jako hlavní hodnotící parametry jsou uvedeny indexy způsobilosti výrobního procesu, procesu měření a způsoby jejich výpočtu.

Poznatky jsou využity v praktické části, na reálném díle části převodovky zapůjčeného ze společnosti Škoda a.s. S dílem byl získán i přípravek a současně využívaný plán měření. Při analýze současného plánu měření byly objeveny nedostatky týkající se způsobu skenování, způsobu filtrace hodnot a sestavení plánu měření mající vliv na kvalitu výsledků a rychlost měření. Bohužel byly tyto nedostatky objeveny až ve fázi vyhodnocování výsledků a před dalšími optimalizujícími opravami nebyly odstraněny.

Navýšením rychlostí skenování na vybraných prvcích bylo dosaženo zkrácení času měření o 10 % se srovnatelnou kvalitou měření na reálném dílu. Pro zkvalitnění a další zrychlení plánu měření byly identifikovány a doporučeny



změny plánu měření s předpokládaným efektem zkvalitnění výsledků měření a dalšího zvýšení rychlosti měření.

Poznatky pro další optimalizaci nebyly experimentálně ověřeny spuštěním plánu měření z důvodu časové dotace v laboratořích školy v návaznosti na epidemiologická opatření v souvislosti s pandemií Covid-19.



8 Bibliografie

- [1] Coordinate Measuring Machines (CMM). *East Coast Metrology, LLC* [online]. Boston, MA: CIM, 2020 [cit. 2020-10-08]. Dostupné z: <https://eastcoastmetrology.com/resources/equipment-types/cmm/>
- [2] BERÁNEK, Libor. *Průmyslová metrologie*. Praha, 2019.
- [3] DOLÁK, David. *Rešerše souřadnicových měřících strojů CMM a měřících ramen CMMs*. Brno, 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Miroslav Opl.
- [4] Kugelkoord-lokale-Basis-s.svg. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2020-10-08]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kugelkoord-lokale-Basis-s.svg>
- [5] HORÁČEK, Kryštof. *Aplikace měřících sond v procesu frézování na CNC stroji MCV1210*. Brno, 2019. Diplomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce Aleš Polzer.
- [6] GROUS, Ammar. *Applied Metrology for Manufacturing Engineering* [online]. 1st. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2011 [cit. 2021-01-03]. ISBN 9781118622551. Dostupné z: doi:10.1002/9781118622551
- [7] *Renishaw* [online]. Renishaw plc, 2001-2020 [cit. 2020-12-16]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/>
- [8] Úvod do souřadnicového měření. *Hexagon Manufacturing Intelligence* [online]. Praha: Hexagon MI, 2020 [cit. 2020-10-09]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-cz/solutions/technical-resources/metrology-101/intro-to-coordinate-metrology>



- [9] PAHK, H. a M. BURDEKIN. Computer Aided Volumetric Error Calibration of Co-Ordinate Measuring Machine using the Base as a Metrological Reference. DAVIES, B. J., ed., B. DAVIES. *Proceedings of the Twenty-eighth International* [online]. 1st ed. London: Macmillan Education UK, 1990, s. 469-476 [cit. 2020-12-17]. ISBN 978-1-349-10892-3. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-349-10890-9_64
- [10] GaSKA, A., J. SŁADEK, K. OSTROWSKA et al. Analysis of changes in coordinate measuring machines accuracy made by different nodes density in geometrical errors correction matrix. *Measurement* [online]. 2015, **68**, 155-163 [cit. 2020-12-17]. ISSN 02632241. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2015.02.056
- [11] ČSN EN ISO 10360-2: *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) - Část 2: Souřadnicové měřicí stroje používané pro měření lineárních rozměrů*. Český normalizační institut, 2002.
- [12] *Measurement Good Practice Guide No. 42: CMM Verification*. Hampton Road: National Physical Laboratory, 2001, . ISSN 1368-6550.
- [13] ČSN EN ISO 10360-1: *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) - Část 1: Slovník*. Český normalizační institut, 2001.
- [14] OAKLAND, John. *Statistical process control*. 5th ed. Oxford: Butterworth, 2003. ISBN 07-506-5766-9.
- [15] PENFIELD, Daniel. ControlChart. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2011 [cit. 2021-01-13]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ControlChart_cz.svg
- [16] MES - Manufacturing Execution System. *MES center: where manufacturing is powered by IT* [online]. Hvězdoňovice: MES Centrum



- [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <http://mescenter.org/en/articles/108-mes-manufacturing-execution-system>
- [17] MANTEL, Matthias. *Coordinate Measuring Machines: A Modern Inspection Tool in Manufacturing*. New Jersey, USA, 1993. Thesis. New Jersey Institute of Technology.
- [18] ALI, Salah. Probing System Characteristics in Coordinate Metrology. *Measurement Science Review* [online]. 2010, 10(4) [cit. 2021-01-09]. ISSN 1335-8871. Dostupné z: doi:10.2478/v10048-010-0023-5
- [19] URBAN, Jan, Libor BERANEK, Michal KOPTIŠ, Jan ŠIMOTA a Ondřej KOŠŤÁK. Influence of CMM scanning speed and inspected feature size on an accuracy of size and form measurement. *Manufacturing Technology* [online]. 2020, 20(4), 538-544 [cit. 2021-01-09]. ISSN 12132489. Dostupné z: doi:10.21062/mft.2020.074
- [20] *Measurement Good Practice Guide No. 41: CMM measuring strategies*. Hampton Road: National Physical Laboratory, 2001, . ISSN 1368-6550.
- [21] *Analýza systémů měření (MSA): příručka*. 3. vyd. Praha: Česká společnost pro jakost, 2003. ISBN 80-020-1562-2.
- [22] STANT, L.T., P.H. AAEN a N.M. RIDLER. Comparing methods for evaluating measurement uncertainty given in the JCGM 'Evaluation of Measurement Data' documents. *Measurement* [online]. 2016, 94, 847-851 [cit. 2020-10-09]. ISSN 02632241. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2016.08.015
- [23] DE BIÈVRE, Paul. The 2012 International Vocabulary of Metrology: "VIM". *Accreditation and Quality Assurance* [online]. 2012, 17(2), 231-232 [cit. 2020-10-09]. ISSN 0949-1775. Dostupné z: doi:10.1007/s00769-012-0885-3
- [24] Terminologie z oblasti metrologie. In: ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. *Sborník technické*



- harmonizace* [online]. 2. vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010 [cit. 2020-10-09]. Dostupné z: <https://www.unmz.cz/metrologie/metrologicky-system/terminologie-v-metrologii/>
- [25] SPOLEČNÝ VÝBOR PRO NÁVODY V METROLOGII. *Vyhodnocování naměřených dat – role nejistoty měření při posuzování shody: Évaluation des données de mesure*. JCGM, 2014. Dostupné také z: https://www.cmi.cz/sites/all/files/public/download/JCGM106-2012-11-October_CZ_vfin2_0.pdf
- [26] URBAN, Jan. *Nasazení CMM technologií v rámci kontroly kvality v malém a středním podniku*. Praha, 2015. Diplomová práce. ČVUT Praha. Vedoucí práce Libor Beránek.
- [27] LUDVÍK, Vladimír. Nejistoty měření, přesnost měření, správnost měření a otázky spojené se vzájemnou porovnatelností výsledku měření a s prohlášením o shodě s technickými specifikacemi. In: *Sborník technické harmonizace*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005.
- [28] CZICHOS, Horst, T. SAITO a L. SMITH, ed. *Springer handbook of metrology and testing*. 2nd ed. Berlin: Springer, 2011. ISBN 9783642166402.
- [29] BICH, Walter, Maurice COX, René DYBKAER et al. Revision of the ' Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement '. *Metrologia* [online]. 2012, **49**(6), 702-705 [cit. 2020-10-15]. ISSN 0026-1394. Dostupné z: [doi:10.1088/0026-1394/49/6/702](https://doi.org/10.1088/0026-1394/49/6/702)
- [30] Normal distribution. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020 [cit. 2020-10-15]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Normal_distribution#Cumulative_distribution_function



- [31] Measurement System Analysis (MSA). *QMindset: the quality management portal* [online]. qM, 2020 [cit. 2020-11-30]. Dostupné z: <http://www.qmindset.com/index.php?page=msa>
- [32] ČSN EN ISO 12181-2: *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Kruhovitost - Část 2: Operátory specifikace*. Český normalizační institut, 2005.



9 Seznam příloh

č.	Popis	Typ přílohy
1	Konfigurace snímačů	soubor PDF
2	Naměřená data původním plánem	soubory XLS
3	Naměřená data optimalizovaným plánem	soubory XLS



10 Seznam obrázků

Obrázek 1 – Kartézsky uspořádané měřicí stroje [2].....	8
Obrázek 2 – Nekartézsky uspořádané měřicí stroje [2].....	10
Obrázek 3 – Vektor v kartézských a polárních souřadnicích [4].....	10
Obrázek 4 – Základní rozdělení snímačů [2].....	11
Obrázek 5 – Elektrická (vlevo) a tenzometrická (vpravo) spínací sonda [5] .	12
Obrázek 6 – Paralelogram	12
Obrázek 7 – Požadavky na dotek; zleva: efektivní délka, dotek dříkem, ohyb doteku, rozměry doteku pro měření v těsných prostorech [6].....	14
Obrázek 8 – Měření vnitřní drážky diskovým dotykem [7].....	14
Obrázek 9 – Maximální vyložení pro snímací hlavu SM25 [7].....	15
Obrázek 10 – Škrábance na povrchu rubínové kuličky [7].....	19
Obrázek 11 – Nános hliníku na rubínové kuličce [7].....	19
Obrázek 12 – Nános nečistot na rubínové kuličce po 350 m měření [7]	20
Obrázek 13 – Znázornění korekční mapy [9]	23
Obrázek 14 – Schéma zkoušek chyb indikace zkušební délky [8].....	24
Obrázek 15 – Schéma zkoušek chyb indikace tvaru doteků [8].....	25
Obrázek 16 – Korekce poloměru kuličky [13].....	26
Obrázek 17 – Mechanická filtrace kuličkou na drsném povrchu [7].....	27
Obrázek 18 – Snímání kvalifikační koule referenčním snímačem [12]	28
Obrázek 19 – Schéma způsobu určení geometrické základny [2].....	29
Obrázek 20 – Rozdíl mezi souřadným systémem stroje a součásti [8]	30
Obrázek 21 – Konstruovaná kružnice ze středů děr [8]	31
Obrázek 22 – Průsečík os dvou válců motoru [8].....	31
Obrázek 23 – Ustálený proces (nahore) a neustálený proces se speciálními příčinami variability [14].....	33
Obrázek 24 – Příklad řízeného procesu (UCL a LCL: horní a dolní regulační mez) [15].....	33
Obrázek 25 – Zařazení MES [16].....	34



Obrázek 26 – Parametry ovlivňující výsledky měření na CMM [2]	35
Obrázek 27 – Zdroje variability systému měření [2].....	36
Obrázek 28 – Informační hodnota zleva: skutečný povrch, naměřené body, body s nejistotou, aproximovaný element [17]	37
Obrázek 29 – Kulička doteku následující kruhovou dráhu v rovině xy [18] ..	38
Obrázek 30 – Grafické znázornění naměřených dat v závislosti na průměru a rychlosti skenování [19]	38
Obrázek 31 – Měření válcové díry v jednom řezu (vlevo) a snímání ve vícero řezech (vpravo) [20]	39
Obrázek 32 – Rozmístění bodů na kuželu [20]	40
Obrázek 33 – Rozhodování v blízkosti toleranční meze [25].....	42
Obrázek 34 – Pásma shody (zeleně), neshody (červeně) a nejednoznačného určení (oranžově) [26]	43
Obrázek 35 – Řetězec metrologické návaznosti.....	44
Obrázek 36 – Grafické znázornění četnosti a rozptylu hodnot při opakovaném měření teploty (normální rozdělení) [29]	46
Obrázek 37 – Grafické znázornění termínů na příkladu střelby na terč [27]	49
Obrázek 38 – Stálost měřidla [31]	50
Obrázek 39 – Perfektní linearita (zeleně), konstantní vychýlení a zvětšující se vychýlení [31]	50
Obrázek 40 – Znázornění vychýlení měření [31]	57
Obrázek 41 – Studie linearity – grafická analýza [21].....	58
Obrázek 42 – CAD model dílu	61
Obrázek 43 – Měření na CMM Carl Zeiss Prismo se skenovacím systémem Vast Gold	61
Obrázek 44 – Snímač 108.....	62
Obrázek 45 – Snímač 109	62
Obrázek 46 – Snímač 110	63
Obrázek 47 – Umístění elementu na součásti (charakteristika 111)	67
Obrázek 48 – Vizualizace vyhodnocení naměřených dat na modelu	68



Obrázek 49 – Nastavení filtrování hodnot na kružnici 3B04.....	68
Obrázek 50 – Vyhodnocování elementu Kružnice 3B04 (počet vyhodnocovaných bodů 252).....	69
Obrázek 51 – Nastavení snímání kružnice 3B04 (počet snímaných bodů 305)	70
Obrázek 52 – Souřadný systém SS_saldon.....	72
Obrázek 53 – Válec 2B05 zaměřovaný v SS_saldon vynucující nadbytečnou výměnu konfigurace snímačů.....	72
Obrázek 54 – Vyhodnocování kružnice 3B04.....	76
Obrázek 55 – Vizualizace naměřených bodů.....	77
Obrázek 56 – Vizualizace naměřených bodů.....	77
Obrázek 57 – Nastavení skenování roviny 11F11 (délka kroku 0,5, počet skenovaných bodů 509).....	78
Obrázek 58 – Vyhodnocování roviny 11F11 (počet vyhodnocovaných bodů 476).....	78
Obrázek 59 – Nastavení filtrace na rovině A.....	79
Obrázek 60 – Vizualizace naměřených bodů na rovině A.....	80
Obrázek 61 – Pozice prvku na součásti.....	81
Obrázek 62 – Možnost zapnutí funkce samostředění.....	82
Obrázek 63 – Nastavení snímání bodů (délka kroku 0,5, 32 snímaných bodů)	82
Obrázek 64 – Nastavení vyhodnocení (počet vyhodnocovaných bodů 5) ...	83