České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Periodické zkoušení souřadnicových měřicích strojů

Diplomová práce

Autor: Bc. Marek Vaclík

Vedoucí práce: Ing. Libor Beránek, Ph.D.

Studijní program: Výrobní inženýrství

Praha 2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vaclík** Jméno: **Marek** Osobní číslo: **482623**

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:

Periodické zkoušení souřadnicových měřicích strojů

Název diplomové práce anglicky:

Reverification testing of coordinate measuring machines

Pokyny pro vypracování:

Přejímací a periodické zkoušky CMM s dotykovým snímacím systémem.
Rešerše existujících zkušebních těles a artefaktů pro rychlé periodické zkoušky.
Návrh a realizace zkušebního tělesa pro rychlé periodické zkoušení CMM.
Vliv metody výpočtu geometrických prvků na způsobilost procesu měření.

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: **31.03.2023** Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2023**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Libor Beránek, Ph.D. podpis vedoucí(ho) práce	Ing. Libor Beránek, Ph.D. podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc. podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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 _____

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně. Veškeré použité informační zdroje, ze kterých jsem čerpal, jsou v práci citovány a uvedeny v kapitole seznam použitých zdrojů. Souhlasím s využitím výsledků této práce podle uvážení a potřeb školitele.

V Praze _____ _____

Marek Vaclík

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Liboru Beránkovi, Ph.D. za účelné připomínky, poskytnuté materiály, cenné rady a vedení při zpracování diplomové práce. Dále bych rád poděkoval mé rodině a snoubence za podporu během studia.

Abstrakt

Souřadnicové měřicí stroje jsou fundamentální součástí každého měrového střediska. Umožňují uživateli získávat velice cenné informace, které pomáhají sledovat a řídit kvalitu výroby. Aby nicméně tyto stroje poskytovaly adekvátní výsledky v delším časovém horizontu, je nutné ověřovat jejich technický stav přesnost. Ke stanovení a sledování těchto vlastností v čase slouží přejímací a periodické zkoušky.

Cílem této diplomové práce je popsání principu přejímacích a periodických zkoušek s důrazem na stroje využívající dotykové snímací systémy, charakterizace zkušebních těles a artefaktů používaných během těchto zkoušek, navržení a následná realizace artefaktu umožňujícího rychlé periodické zkoušení CMM a v neposlední řadě sledování vlivu metody výpočtu geometrických prvků na způsobilost procesu měření.

Klíčová slova

Metrologie, souřadnicový měřicí stroj, CMM, přejímací a periodické zkoušky, 3D tisk, způsobilost procesu měření

Abstract

The coordinate measuring machines are a fundamental part of every measuring center. They allow the user to obtain valuable information that helps to monitor and control the quality of production. However, in order for these machines to provide adequate results in the longer term, it is necessary to verify their technical condition and accuracy. Acceptance and reverification tests are used to determine and then monitor these properties over time.

The aim of this thesis is to describe the principles of the acceptance and reverification testing with an emphasis on CMM used with contact probing systems, characterization of test bodies and artifacts used in these tests, to design and subsequent implementation of an artefact enabling rapid reverification testing of CMM, and, last but not least, monitoring the influence of the method of calculating geometric elements on the capability of measurement process.

Key Words

Metrology, coordinate measuring machines, CMM, acceptance and reverification tests, 3D print, capability of measurement process

Seznam použitých symbolů a zkratek

3D	Three-dimensional space – trojrozměrný prostor
AW	Aluminium Wrought – tvářená slitina hliníku
CAD	Computer Aided Design – počítačem podporovaný návrh
Cg	koeficient způsobilosti procesu měření
Cgk	koeficient způsobilosti procesu měření
CMM	Coordinate Measuring Machine – souřadnicový měřicí stroj
ČSN	Česká technická norma
DIN	Deutsche Industrie-Norm – německá průmyslová norma
EN	Evropská norma
FDM	Fused Deposition Modeling – metoda 3D tisku
GPS	Geometrical Product Specifications – Geometrické požadavky na výrobky
ISO	International Organization for Standardization – Mezinárodní organizace pro normalizace
LSC	Least squares cicrcle – metoda nejmenších čtverců
LSL	Lower specification limit – dolní mez specifikace
MIC	Maximum inscribed circle – metoda největšího vepsaného prvku
MPE	Maximum Permissible Error – největší dovolená chyba
PETG	Polyethylene terephthalate glycol – polyethylentereftalát glykol
STEP	Standard for the Exchange of Product Data – přenosový formát
STL	Stereolithography – stereolitografická síť
UPR	Undulations per revolution – počet vln na otáčku
USL	Upper specification limit – horní met specifikace

Obsah

Úvod 11

1 Přejímací a periodické zkoušky CMM 12

1.1 Obecné podmínky norem ČSN EN ISO 10 360 14

1.2 ČSN EN ISO 10360-1 15

1.3 ČSN EN ISO 10360-2 17

1.3.1 Chyba při měření délky s nulovou vzdáleností osy pinoly od odsazení hrotu snímacího doteku E_0 17

1.3.2 Chyba při měření délky pro vzdálenost 150 mm odsazení hrotu snímacího doteku od osy pinoly E_{150} 18

1.3.3 Vyhodnocení souladu se specifikacemi 20

1.3.4 Průběžná kontrola CMM 20

1.4 ČSN EN ISO 10360-3 20

1.5 ČSN EN ISO 10360-5 22

1.5.1 Test jedním snímacím dotykem se snímáním diskrétních bodů 23

1.5.2 Test jedním snímacím dotykem v režimu skenování 24

1.5.3 Test se složeným snímacím systémem 25

1.5.4 Test s otočným snímacím systémem 26

1.5.5 Test s nastavovacím kroužkem 27

2 Zkušební tělesa a artefakty pro periodické zkoušky 28

2.1 1D artefakty 28

2.1.1 Koncové měrky 28

2.1.2 Stupňové měrky 29

2.1.3 Ball bar 29

2.2 2D artefakty 30

2.2.1 Ball plate 30

2.2.2 Hole plate 31

2.2.3 Nastavovací kroužky 32

2.3 3D artefakty 32

2.3.1 Ball Cube a Ball Tetrahedron ... 32
2.3.2 Účelově zhotovené artefakty ... 32
3 Návrh a realizace zkušebního tělesa pro rychlé periodické zkoušky ... 34
3.1 První návrh ... 34
3.2 Druhý návrh ... 36
3.2.1 Optimalizace návrhu ... 37
3.3 Návrh přírub a základové desky ... 38
3.4 Materiál tělesa artefaktu ... 40
3.5 Výroba artefaktů ... 41
3.5.1 Slicing ... 41
3.5.2 Tisk prototypu ... 43
3.5.3 Tisk těles a přírub ... 44
3.5.4 Výroba základových desek ... 45
4 Měřicí program pro zkušební těleso ... 47
4.1 Definice souřadného systému vyrovnání ... 47
4.2 Elementy a charakteristiky ... 48
4.3 Způsoby snímání, filtrace a metody vyhodnocení ... 49
4.4 Výsledky měření v měřicím programu ... 51
4.5 Doporučená konfigurace snímacího systému ... 51
4.6 Vyhodnocení a úpravy po pilotním testování ... 52
5 Vliv metody výpočtu geometrických prvků na způsobilost procesu měření ... 55
5.1 Způsobilost procesu měření ... 55
5.2 Úpravy měřicího programu ... 57
5.2.1 Původní měřicí program ... 59
5.2.2 Zajištění fungování nastavené filtrace ... 59
5.2.3 Úpravy metod vyhodnocení ... 61
5.3 Vyhodnocení naměřených dat ... 63
5.4 Vyhodnocení způsobilosti procesu měření ... 70
Závěr ... 75

Seznam použitých zdrojů 78
Seznam obrázků 81
Seznam tabulek 82
Seznam grafů 83

Úvod

Souřadnicové měřicí stroje jsou nepostradatelnou součástí měrového střediska každého středního či většího strojírenského podniku. Plní důležitou funkci v rámci řízení výrobních procesů a kontroly kvality vyráběných dílů. K daným účelům nicméně slouží pouze za předpokladu, že jsou ve správném technickém stavu a dosahují deklarované přesnosti měření. Nesplnění těchto požadavků může mít neblahý vliv na celý strojírenský podnik.

Efektivním způsobem, jak ověřovat skutečný stav CMM, je provádění přejímacích, respektive pravidelných periodických zkoušek. Tyto zkoušky pomohou odhalit reálný stav testovaného CMM. Aplikace doporučovaných testů popisovaných v normách ČSN EN ISO 10360 může pomáhat udržovat vyhovující technický stav strojů či případně odhalit, že daný stroj není v pořádku.

V první části této práce se věnuji zmíněné normě ČSN EN ISO 10360 se zaměřením na přejímací a periodické zkoušení CMM s dotykovým snímacím systémem. Postupně rozebírám podmínky a principy jednotlivých zkoušek, které mají za úkol prověřit aktuální stav CMM. Dále se věnuji zkušebním tělesům a artefaktům, které se pro tyto zkoušky využívají. Mohou to být jednoduchá jednoúčelová tělesa i složité účelově zhotovené artefakty prověřující širokou škálu vlastností strojů.

V následující části se zabývám návrhem artefaktu pro rychlé periodické zkoušení CMM. Úkolem tohoto artefaktu je pomocí jednoduché časově nenáročné zkoušky pravidelně testovat souřadnicové měřicí stroje na měrových střediscích zadavatele. Cílem využívání takového artefaktu je ušetření nákladů díky prodloužení intervalů mezi jednotlivými oficiálními periodickými zkouškami od externí společnosti. Navazuji realizací vytvořeného návrhu a tvorbou měřicího programu.

Výrobní i kontrolní procesy ve strojírenském podniku jsou v dnešní době velice komplexní. Velikost vlivů, které mohou zvyšovat variabilitu měření při kontrole kvality, je možné sledovat pomocí způsobilosti procesu měření. V poslední kapitole sleduji a vyhodnocuji, jaký vliv mají úpravy v měřicím programu v čele se změnou metody výpočtu geometrických prvků na výslednou způsobilost procesu měření.

1 Přejímací a periodické zkoušky CMM

Souřadnicové měřicí stroje (CMM) se staly nezbytnou součástí průmyslové metrologie. Jedná se o jedny z nejschopnějších a nejužitečnějších metrologických zařízení. K jejich přednostem se řadí především univerzálnost, která umožňuje kontrolu nepřeberného množství různých tvarově složitých součástí.

Vzhledem k důležitosti úloh souřadnicových měřicích strojů a jejich složité konstrukci je nezbytné tyto stroje ověřovat, sledovat jejich přesnost měření a zajistit správný technický stav v čase. Pro určení a sledování korektního chování CMM se využívají přejímací a periodické zkoušky. Tyto zkoušky umožňují uživateli smysluplně porovnávat schopnosti stroje jednak během pořízení stroje samotného a poté poskytnout způsob, jak zmíněné schopnosti nadále ověřovat během životního cyklu stroje. Možnost prokázání návaznosti na normy a odhad přesnosti měření souřadnicového měřicího stroje jsou nesmírně důležité faktory pro udržení důvěry spolehlivosti během měření. [1, 2]

Zmíněnou problematikou se do detailu zabývá soubor norem ČSN EN ISO 10360. Tyto normy popisují přejímací a periodické zkoušky či průběžné kontroly potřebné ke stanovení, zda daný souřadnicový měřicí stroj stále funguje dle výrobcem uvedených chyb indikace. Ale ani při dodržování těchto norem nelze zcela zaručit, že je možné spolehlivě měřit v kompletním rozsahu stroje. Tato skutečnost je dána faktem, že způsob, jakým se nejistoty na souřadnicových měřicích strojích kombinují, je komplikovaný. Nelze tudíž jednoduše na základě nejistoty měření délky získané z omezeného počtu měření garantovat, že je daná nejistota reprezentativní pro veškeré možné měřicí úlohy, které může daný CMM vykonávat. Testy na základě zmíněných norem tedy nezaručují přesnost pro veškerá měření. Uživatel stroje by si měl být této skutečnosti vědom a navrhnout takové měřicí strategie, které budou korespondovat s měřenými charakteristikami, a tudíž budou poskytovat dostatečnou míru důvěry ve výsledky měření.

Oproti jednoduchým jednoúčelovým měřicím zařízení jsou schopny CMM měřit širokou škálu rozměrových a geometrických charakteristik. Výsledek každé z těchto charakteristik může být ovlivněn výběrem konkrétní konfigurace snímacího systému, počtem a polohou měřených bodů, rychlostí snímání a v neposlední řadě filtrací

naměřených dat. Měření samotné i zvolená strategie měření tudíž definují způsob, kterým jsou chyby vneseny do systému. [2]

Soubor platných norem ČSN EN ISO 10360 je složen ze následujících částí:

ČSN EN ISO 10360-1: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) - Část 1: Slovník. 2001.

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. 2010.

ČSN EN ISO 10360-3: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) - Část 3: Souřadnicové měřicí stroje s osou otočného stolu jako čtvrtou osou. 2001.

ČSN EN ISO 10360-5: Geometrické specifikace produktu (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMS) - Část 5: Souřadnicové měřicí stroje (CMM) používající snímací systém s jedním a složeným snímacím dotekem používající diskrétní bod a/nebo skenovací měřicí režim. 2020.

ČSN EN ISO 10360-6: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) - Část 6: Odhad chyb při výpočtu prvků přiřazených metodou nejmenších čtverců. 2002.

ČSN EN ISO 10360-7: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) - Část 7: Souřadnicové měřicí stroje vybavené zobrazovacími snímacími systémy. 2012.

ČSN EN ISO 10360-8: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích systémů (CMS) - Část 8: Souřadnicové měřicí stroje s optickými snímači vzdálenosti. 2014.

ČSN EN ISO 10360-9: Geometrické specifikace produktu (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích systémů (CMS) - Část 9: Souřadnicové měřicí stroje s vícenásobnými snímacími systémy. 2014.

ČSN EN ISO 10360-10: Geometrické specifikace produktu (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMS) - Část 10: Trakční lasery. 2022.

ČSN EN ISO 10360-11: Geometrické specifikace produktu (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMS) - Část 11: Souřadnicové měřicí stroje používající princip rentgenové počítačové tomografie (CT). 2021

ČSN EN ISO 10360-12: Geometrické specifikace produktu (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMS) - Část 12: Kloubové rameno souřadnicových měřicích strojů. 2017.

ČSN EN ISO 10360-13: Geometrické specifikace produktu (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMS) - Část 13: Optické 3D CMS. 2022.

V následujících kapitolách se budu podrobněji věnovat normám souboru ČSN EN ISO 10360, které se týkají souřadnicových měřicích strojů s dotykovým snímacím systémem.

1.1 Obecné podmínky norem ČSN EN ISO 10 360

V každé z následně rozebíraných norem jsou popsány podmínky a požadavky, které je nutné dodržovat a ověřovat jejich splnění, a to před každým testem odpovídajícím částem normy ČSN EN ISO 10360.

Jak již bylo dříve zmiňováno, obecně se pro ověřování souřadnicových měřicích strojů rozdělují zkoušky na přejímací a periodické, eventuálně na zkoušky průběžné. Přejímací zkoušky jsou prováděné při předávání CMM od výrobce koncovému zákazníkovi/uživateli. Periodické zkoušky pomáhají opakovaně ověřovat stav daného

CMM, zda nadále splňuje dříve stanovenou způsobilost měření. Průběžné zkoušky slouží ke kontrolám stavu stroje mezi oficiálními periodickými zkouškami a mohou napovědět o aktuálním stavu stroje. [4]

První skupinou podmínek, kterou je nutné dodržovat, jsou podmínky environmentální. Jmenovitě se jedná například o teplotu prostředí, vlhkost vzduchu či vibrace v místě instalace CMM. V případě přejímacích zkoušek jsou tyto podmínky definované výrobcem, u zkoušek periodických poté uživatelem stroje. Uživatel je zodpovědný za poskytnutí enviromentálních podmínek pro CMM, které jsou specifikovány výrobcem v datovém listu. Pokud podmínky nesplňují specifikace výrobce, nelze požadovat dodržení mezních hodnot způsobilosti.

Dále jsou definovány provozní podmínky popisující kroky, které je potřeba provést před každým testem definovaným normou. Jedná se především o:

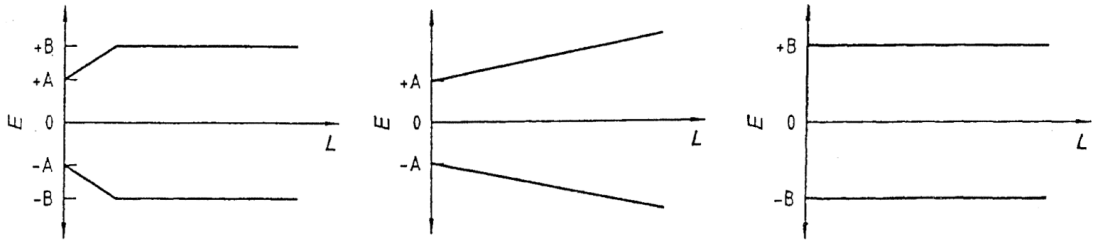
- Spuštění stroje/cyklus zahřátí
- Konfigurace snímacího systému
- Proces čištění snímacích dotyků a referenční koule
- Kvalifikace snímacího systému
- Dodržení teplotní stability snímacího systému před kalibrací
- Rozvržení poloh, typů a počtu teplotních snímačů [4, 5, 6]

1.2 ČSN EN ISO 10360-1

První část normy tvoří slovník, kde jsou popisovány a vysvětlovány pojmy používané napříč celým souborem těchto norem. Jedná se jmenovitě o termíny týkající se souřadnicových měřicích strojů a jejich činností, popisu snímacích hlav a dotyků, zkušebních těles, indikací chyb CMM a v neposlední řadě termíny týkající se elementů a softwaru. Důležitým dílem této části je vymezení termínů týkajících se chyb CMM nebo chyb indikace CMM.

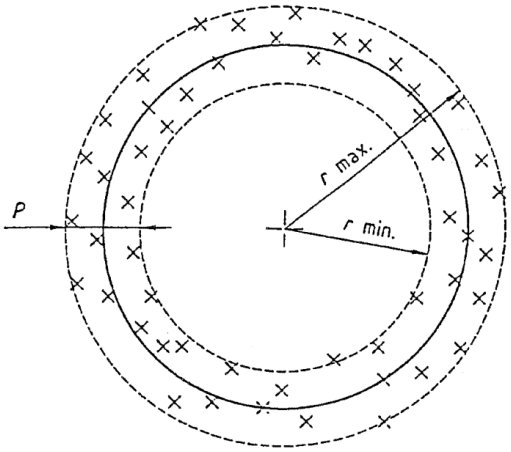
Chyba indikace CMM při měření rozměru, označována E, je chyba indikace, se kterou může být pomocí souřadnicového měřicího stroje určen rozměr hmotného etalonu rozměru. Měření je prováděno mezi dvěma protilehlými body na dvou rovnoběžných rovinách ve směru normály jedné z nich.

Maximální dovolená chyba indikace CMM při měření rozsahu, značena MPE_E, popisuje extrémní hodnotu chyby indikace při měření rozměru E, která je přípustná pro daný CMM. Hodnota MPE_E se může stanovit jedním ze tří vztahů. První možností je využití kombinovaného vztahu $MPE_E = minimum\ \left(A \pm \frac{L}{K}\right) a\ B$, druhý vztah je popsán jako $MPE_E = \pm\left(A \pm \frac{L}{K}\right)$ a třetí vztah následně $MPE_E = \pm B$. A charakterizuje kladnou konstantu v mikrometrech, L je měřený rozměr v milimetrech, K představuje bezrozměrnou konstantu a B je největší dovolená chyba MPE_E v mikrometrech. Konstanty A, K i B jsou poskytnuty výrobcem CMM. Zmíněné výrazy je možné využít pro jakoukoliv polohu a/nebo orientaci hmotného etalonu rozměru v měřicím objemu stroje. [3]



Obr. 1: Diagramy největší dovolené chyby indikace CMM při měření rozměru MPE_E [3, 6]

Další neméně důležitou charakteristikou je chyba snímání P. Jedná se o chybu indikace, se kterou může být pomocí CMM určena řada poloměrů kulového hmotného etalonu rozměru. Měření je prováděno v režimu snímání diskrétních bodů jedním snímacím dotykem na zkušební kouli. Vždy se jedná o kladnou hodnotu. [3]



Obr. 2: Chyba snímání P [3]

Maximální dovolená chyba snímání MPE_P je extrémní hodnotou chyby snímání P, jež je přípustná pro daný CMM. Hodnota maximální dovolené chyby snímání se užije pro jakoukoliv polohu hmotného etalonu rozměru v měřicím objemu stroje a pro jakýkoliv směr snímání. Stanovuje se jako $MPE_P = B$. [3]

V příloze této první části normy jsou popsány jednotlivé typy souřadnicových měřicích strojů. Mezi nejběžnější konstrukce se řadí portálový, mostový, výložníkový či stojanový typ CMM. [3, 7]

1.3 ČSN EN ISO 10360-2

Výhodou zkoušek popisovaných v druhé části normy je skutečnost, že výsledek měření má přímou návaznost na jednotku délky metr. Poskytuje tudíž informace o souřadnicových měřicích strojích při podobných měřeních délek. Zkušební postupy popisované v této části normy mají následující cíle.

Konkrétně se jedná o definování zkoušek chyby indikace kalibrované zkušební délky pomocí snímací hlavy bez jakéhokoliv odsazení hrotu snímacího dotyku či se specifikovaným odsazením snímacího dotyku. Norma taktéž popisuje zkoušku reprodukovatelnosti měření kalibrované zkušební délky. [2, 4]

1.3.1 Chyba při měření délky s nulovou vzdáleností osy pinoly od odsazení hrotu snímacího doteku E_0

Jak je z názvu patrné, zkouška E_0 se musí provádět s nulovou nebo nejmenší prakticky možnou vzdáleností osy pinoly od odsazení hrotu snímacího dotyku. Největší délka zkušebního tělesa pro jednotlivé polohy měření musí být větší nebo rovna 66 % rozsahu měřicí přímky testovaného CMM. Je nutné, aby se každá kalibrovaná zkušební délka značně odlišovala od ostatních. Taktéž musí být testovací délky rovnoměrně rozděleny podél měřicí přímky stroje. Jako příklad rovnoměrně rozložených zkušebních délek lze označit pro rozsah jednoho metru délky 100, 200, 400, 600 a 800 milimetrů.

Pět odlišných kalibrovaných zkušebních délek musí být umístěno v měřicím objemu CMM v sedmi různých polohách lišících se umístěním a orientací. Každá jednotlivá délka musí být měřena třikrát. Celkově je tedy provedeno 105 měření. Čtyři ze sedmi zmíněných poloh jsou diagonálami prostoru. Zbylé tři mohou být specifikovány uživatelem, předem jsou zvoleny polohy rovnoběžné s jednotlivými osami stroje.

Montáž i následná kvalifikace snímacího systému se provádí dle obvyklých postupů. Veškerá kvalifikační měření je nutné provádět na referenční kouli dodávané výrobcem. Výrobce má jasně specifikovat snímací systém v datovém listu, aby jej bylo možné využít pro zkoušku E_0. Pokud snímací systém není výrobcem specifikován, může uživatel využít snímací systém z komponent dotyků dodávaných s CMM.

V případě, že je pro zkoušky využívaný etalon vyrobený z materiálu o nízké tepelné roztažnosti ($\alpha < 2 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$), musí být následně provedeno dodatečné měření kalibrované zkušební délky na etalonu z materiálu s běžným koeficientem α. Zkušební délka tohoto artefaktu musí být větší než menší ze dvou hodnot 0,5 metru nebo 50 % nejdelšího měřeného rozsahu CMM. Měření se provádí uprostřed měřicího objemu CMM, rovnoběžně s jednou osou daného stroje a musí být třikrát opakováno.

Vyhodnocení naměřených dat ze zkoušky

Po provedených 105, potažmo ve zvláštním případě 108 měření, se vypočítá chyba při měření délky E_0 jako rozdíl mezi indikovanou hodnotou a kalibrovanou hodnotou každé zkušební délky. Kalibrovaná hodnota je považována za pravou hodnotu délky. Veškeré chyby měření délky se následně vynesou do jednoho z diagramů na obrázku č. 1 odpovídající hodnotě $E_{0,MPE}$.

Opakované rozpětí chyby při měření délky R_0

Pro každou sadu tří opakovaných měření z výše popsané zkoušky se stanoví opakované rozpětí R_0 jako rozpětí třech opakovaných měření délek. Výsledky se vynesou do diagramu a nesmí překročit maximální dovolenou mez opakovaného rozpětí chyby $R_{0,MPL}$. Hodnoty E_0 i R_0 se udávají v mikrometrech. [4]

1.3.2 Chyba při měření délky pro vzdálenost 150 mm odsazení hrotu snímacího doteku od osy pinoly E_{150}

Tato zkouška se provádí s předem stanoveným odsazením hrotu snímacího dotyku od osy pinoly rovným 150 (± 15) milimetrům. Kalibrované zkušební délky se určují shodně jako u zkoušky s nulovým odsazením E_0. Taktéž montáž a kalibrace snímacího systému je prováděna stejným způsobem. Pokud není etalon představující kalibrovanou zkušební délku z materiálu s běžným koeficientem roztažnosti, je nutné výsledky označit hvězdičkou a vysvětlující poznámkou, která stanovuje koeficient teplotní roztažnosti materiálu použitého pro danou zkoušku. Orientace odsazení hrotu snímacího dotyku je

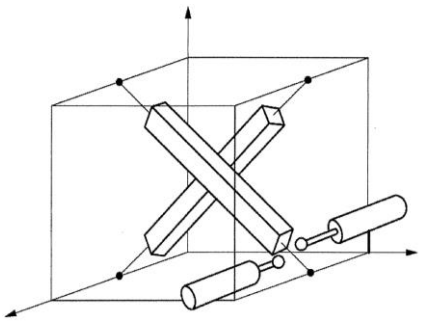
kolmá na měřicí přímku určenou kalibrovanou zkoušenou délkou, a míří směrem jedné z os CMM.

Pro každé měření je umožněno uživateli specifikovat směr vzdálenosti středu snímací koule k ose pinoly tak, že snímací dotyk může směřovat buď v pozitivním nebo negativním smyslu osy. Tedy ve směru +X nebo -X pro polohy 1A či 1B, potažmo +Y nebo -Y pro polohy 2A či 2B. Vysvětlení právě zmíněných poloh určujících orientaci v měřicím objemu CMM je možné si prohlédnout v tabulce č. 1. [4]

Tab. 1: Orientace kalibrované zkušební délky v měřicím objemu CMM [4]

Číslo pozice	Orientace v měřicím objemu
1A	v YZ-rovině diagonálně z bodu (½, 0, 0) k bodu (½, 1, 1)
1B	v YZ-rovině diagonálně z bodu (½, 0, 1) k bodu (½, 1, 0)
2A	v XZ-rovině diagonálně z bodu (0, ½, 0) k bodu (1, ½, 1)
2B	v XZ-rovině diagonálně z bodu (0, ½, 1) k bodu (1, ½, 0)
POZNÁMKA Pro specifikace uvedené v této tabulce se zobrazují protilehlé rohy měřicího objemu s (0, 0, 0) a (1, 1, 1) v souřadnicích (X, Y, Z).	

Celkově je tedy možné využít osm odlišných kombinací ze kterých může uživatel vybrat dvě libovolné kombinace pro polohy zkoušení a orientací snímacího dotyku. Pro každou zvolenou dvojici polohy a orientace je nutné měřit pět různých kalibrovaných délek třikrát. Pro dvě zvolené kombinace musí být provedeno tedy celkem 30 měření. [4]



Obr. 3: Příklad dvou možných poloh kalibrované zkušební délky a dvou možných orientací snímací hlavy pro zkoušku E_{150} [4]

Vyhodnocení naměřených dat ze zkoušky

Pro veškerá tato měření se vypočítá chyba při měření délky E_{150} jako rozdíl mezi indikovanou a kalibrovanou hodnotou každé zkoušené délky. Všechny chyby při měření délky E_{150} se zaznamenají do jednoho z diagramů na obrázku č. 1.

1.3.3 Vyhodnocení souladu se specifikacemi

Způsobilost na základě přejímacích zkoušek popisovaných v této části normy ČSN EN ISO 10360 je ověřena, pokud jsou chyby při měření délky E_0 umístěny v rozpětí maximální dovolené chyby při měření délky $E_{0,MPE}$, opakované rozpětí chyby při měření délky R_0 se nachází v rozpětí maximálních dovolených mezí opakovaného rozpětí $R_{0,MPL}$ a chyby měření délky E_{150} jsou umístěny v rozpětí maximální dovolené chyby při měření délky $E_{150,MPE}$.

V případě periodických zkoušek je způsobilost CMM využívaných pro měření lineárních rozměrů periodicky ověřena, pokud E_0, E_{150}a R_0 odpovídají zkouškám výše popsaným a nejsou zároveň větší než korespondující maximální chyby $E_{0,MPE}$, $E_{150,MPE}$ a maximální dovolená mez $R_{0,MPL}$. [4]

1.3.4 Průběžná kontrola CMM

Je doporučováno, aby byl CMM kontrolován i mezi jednotlivými periodickými zkouškami. Mělo by se tak dít minimálně po každé významnější události, která by mohla ovlivnit způsobilost CMM. Pro průběžnou kontrolu je možné využít i jiné artefakty než kalibrované zkušební délky. V závislosti na charakteru měření, pro nějž se daný CMM využívá, se mohou využívat následující běžně používané artefakty. Jedná se například o ball plate, hole plate, ball bar, hole bar, účelově zhotovený zkušební artefakt reprezentující typické geometrické prvky či artefakt kruhový, například v podobě nastavovacího kroužku. [4, 16]

Charakteristik naposledy zmíněného artefaktu využívám při návrhu artefaktu popsaném v kapitole č. 3. Výše zmíněné artefakty jsou podrobněji popsány v druhé kapitole.

1.4 ČSN EN ISO 10360-3

Třetí část normy se zabývá přejímacími a periodickými zkouškami souřadnicových měřicích strojů doplněných o čtvrtou osu v podobě otočného stolu, který orientuje díl v měřicím objemu stroje. [2, 5]

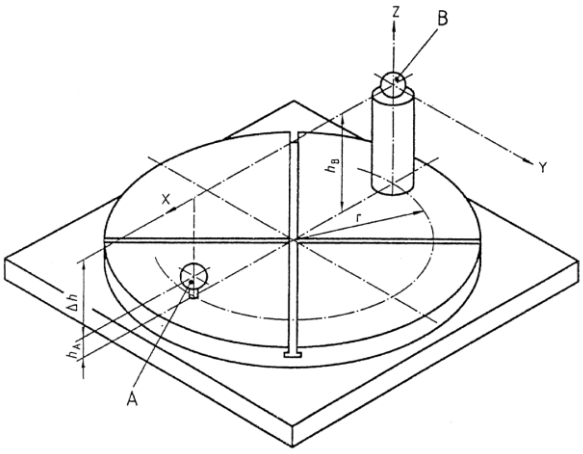
Princip metody hodnocení spočívá ve zjištění, jestli CMM umožňuje měření ve stanovených maximálních dovolených chybách indikace označovaných jako MPE_{FR}, MPE_{FT} a MPE_{FA}. Tyto chyby korespondují se třemi směry, kterými je určen střed

zkušební koule, jmenovitě radiální, tangenciální a axiální směr. Tento střed je stanoven na základě série měření v rozdílných úhlových polohách otočného stolu.

Chyby indikace FR, FT a FA jsou vypočítávány pro každou zkušební kouli odděleně jako rozpětí mezi maximálním a minimálním měřením v každém ze tří směrů.

K měření se využívají dvě zkušební koule, označované jako A a B, o průměru minimálně 10 a maximálně 30 milimetrů. Je nutné, aby měly kalibrovaný tvar podpořený certifikátem. Průměry není nicméně nutné kalibrovat, protože k určení chyb čtvrté osy dostačuje stanovení středů těchto koulí. Taktéž je nutné zajistit dostatečnou tuhost upnutí zkušebních koulí.

Samotný postup zkoušky začíná upnutím zkušební koule A na otočném stole co nejblíže k povrchu otočného stolu ve vzdálenosti r určené tabulkovou hodnotou. Koule B je umístěna diametrálně naproti zkušební kouli A, přibližně ve stejné vzdálenosti r od osy rotace otočného stolu. Koule B je umístěna o tabulkový parametr Δh oproti kouli A. Následně se stanoví kartézský souřadnicový systém, kde střed zkušební koule B určuje počátek tohoto systému, primární osa stanovující axiální směr je rovnoběžná s osou otočného stolu a osa sekundární určující radiální směr musí ležet v rovině vytvořené z primární osy a středu zkušební koule A. Polohu zkušebních koulí a zobrazení popsaného souřadného systému je možné si prohlédnout na obrázku č. 4. [5]



Obr. 4: Poloha zkušebních koulí na otočném stole [5]

V momentě, kdy je stanoven souřadnicový měřicí systém měřeného dílu, může zkouška začít změřením počáteční polohy zkušební koule B. Následně se otočný stůl postupně otáčí v sérii sedmi úhlových poloh. V každé této poloze se měří poloha

zkušební koule A a je doporučeno, aby se pomocí těchto sedmi měření dosáhlo otočení minimálně 720° od počáteční polohy. Následně se stůl otáčí v opačném směru a znovu se měří poloha koule A v sedmi polohách. V tuto chvíli je tudíž provedeno měření 14 poloh. Následně se proces opakuje, ale měření se provádí na zkušební kouli B. Celkově je tedy provedeno 28 měření. [5]

Vyhodnocení naměřených dat ze zkoušky

Během každého měření byla určena momentální poloha zkušební koule, definovaná souřadnicemi X_A, Y_A a Z_A pro kouli A, potažmo X_B, Y_B a Z_B pro kouli B. Z těchto souřadnic je možné vypočítat tři chyby přídavné čtvrté osy FR, FT a FA jako variace rozpětí hodnot každé radiální, tangenciální a axiální souřadnice středů daných zkušebních koulí.

Technický stav CMM s přídavnou osou otočného stolu je ověřen, pokud žádná z chyb čtvrté osy není větší něž tři maximální dovolené chyby čtvrté osy stanovené výrobcem. Tato skutečnost platí v případě přejímací i periodické zkoušky. [5]

1.5 ČSN EN ISO 10360-5

Tato pátá část normy se věnuje souřadnicovým měřicím strojům, které využívají snímací systém s jedním nebo složeným snímacím dotykem používající diskrétní body a/nebo skenovací měřicí režim.

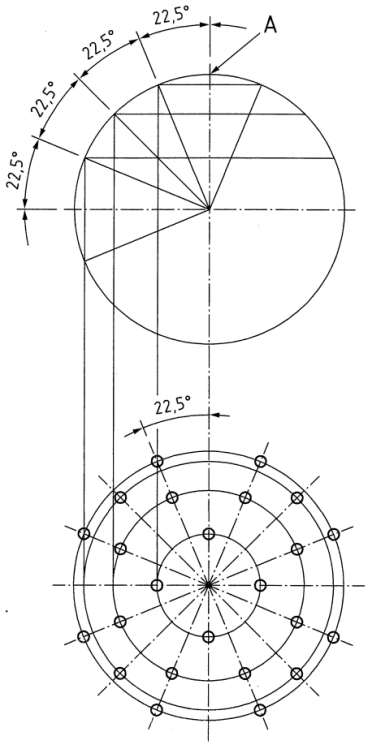
Testovacím tělesem, na kterém probíhá měření, je koule. Měla by být kalibrována pro rozměr i tvar. V případě rozměru se jedná o průměr stanovený metodou nejmenších čtverců, potažmo v případě tvaru o geometrickou toleranci tvaru koule. Ta je zpravidla stanovena minimálně třemi ortogonálními kruhovými drahami či pomocí minimálně 25 bodů rovnoměrně rozložených na povrchu koule. Pro testy CMM s měřením diskrétních bodů se doporučuje užívat kouli o průměru 10 až 51 milimetrů, v případě CMM se skenovacím režimem poté 24,9 až 25,5 milimetrů. Testovací koule by měla být vyrobena z ocele, diamantu, wolfram karbidu, keramiky, karbidu křemíku či oxidu křemičitého. Zároveň by neměla být pro test využívána referenční koule určená pro kvalifikaci snímacích systémů.

Snímací systémy by měly být uznané výrobcem daného CMM. V případě snímacího systému s jedním dotekem by měly být testovány dvě odlišné délky dříků snímačů. Pokud se využívá v testu snímací systém z více snímačů, měla by se využívat jednotná délka dříků. Délky dříků mohou mít výrazný vliv na výsledky zkoušky. V případě

periodických zkoušek se doporučuje využívat snímací konfigurace se snímači o takovém průměru, který odpovídá snímačům konfigurací určených ke kontrole typických dílů měřených na daném CMM. [6]

1.5.1 Test jedním snímacím dotykem se snímáním diskrétních bodů

Princip této zkoušky spočívá v zaměření 25 diskrétních bodů na povrchu testovací koule pomocí snímacího systému s jedním dotykem. Po změření se následně vyhodnocuje rozměr a chyba tvaru testovací koule. Výsledky tohoto testu mohou silně záviset na délce a tuhosti dříku či průměru kuličky dotyku. Je tudíž nutností tyto vlastnosti použitých snímacích konfigurací pečlivě zaznamenávat.



Obr. 5: Schéma rozložení snímaných bodů na zkušební kouli [6]

Jednotlivé body by měly být na kouli rovnoměrně rozloženy po celé polokouli, aby se docílilo uceleného snímku získatelného jedním dotykem. Je doporučeno následující rozmístění měřených bodů:

První samostatný bod je změřen na pólu testovací koule. Následují čtyři body 22,5° pod pólem, dále skupina osmi bodů 45° pod pólem, další čtyři body 67,5° pod pólem a finální osmice bodů 90° pod pólem. Každá následující skupina je zároveň pootočena o 22,5° vzhledem k předchozí skupině bodů. Popsané schéma je zobrazeno na obrázku č. 5. [6]

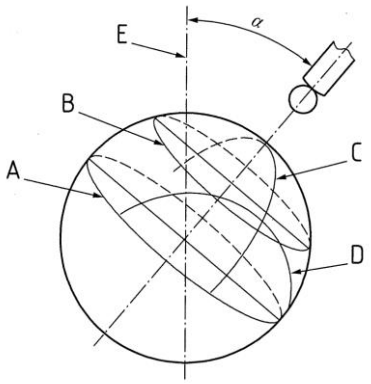
Vyhodnocení naměřených dat ze zkoušky

Ke změřeným bodům se připasuje koule metodou nejmenších čtverců. Tím se získá změřený průměr testovací koule D_{meas}. Tento rozměr musí být kompenzován o průměr dotyku snímacího systému. Výsledná chyba snímání $P_{Size.Sph.1x25:SS.Tact}$ se následně získá jako rozdíl mezi zmíněným D_{meas} a hodnotou kalibrovaného průměru testovací koule D_{cal}. [6]

1.5.2 Test jedním snímacím dotykem v režimu skenování

Tento test spočívá v měření rozměru a tvaru testovací koule s využitím CMM ve skenovacím režimu. Zároveň je zaznamenávána i doba trvání testu. Měl by být použit dotyk o průměru tři milimetry a je doporučeno, aby orientace dotyku nebyla rovnoběžná ani s jednou osou CMM. Díky tomu budou veškeré osy testovány zároveň, čímž budou zahrnuty chyby týkající se všech os.

Po kvalifikaci snímacího systému dle běžné metodiky je možné započít samotný test. Měření se provádí ve čtyřech předem daných rovinách, kde rovina A leží v rovníku testovací koule, rovina B je rovnoběžná s rovinou A a posunutá o osm milimetrů, rovina C prochází pólem a je kolmá na roviny A a B a rovina D je odskočená od osy procházející skrze pól o osm milimetrů a je kolmá na veškeré předchozí roviny. Popsané schéma je zobrazené na obrázku č. 6.



Obr. 6: Schéma čtyř skenovaných rovin [6]

Vzdálenost mezi jednotlivými nasnímanými body by neměla být větší než 0,1 milimetru. Snímací dotyk by měl vždy k testovací kouli přijíždět po normále povrchu koule. Algoritmy a parametry by se neměly lišit od těch, které se využívají pro měření reálných dílů na daném CMM. Jakákoliv softwarová filtrace naměřených dat by měla být předem specifikována výrobcem CMM a nad její rámec nesmí být žádná jiná použita. [6]

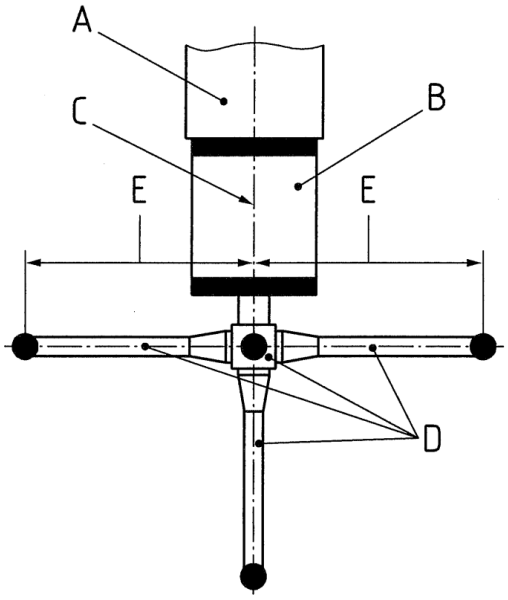
Vyhodnocení naměřených dat ze zkoušky

Vyhodnocení probíhá podobným způsobem jako v případě měření diskrétních bodů jedním dotykem. Ke všem naskenovaným bodům ze čtyř naskenovaných drah se připasuje metodou nejmenších čtverců koule s průměrem D_{meas}. Tento rozměr musí být, stejně jako v předchozím testu, kompenzován o průměr dotyku snímacího systému. Výsledná chyba při režimu skenování $P_{Size.Sph.Scan:k.Tact}$ se získá jako rozdíl mezi naměřeným průměrem D_{meas} a kalibrovanou hodnotou průměru testovací koule D_{cal}. [6]

1.5.3 Test se složeným snímacím systémem

Principem tohoto testu je měření tvaru, rozměru a polohy testovací koule s využitím pěti různých natočení snímacího systému. Každým snímačem je změřeno 25 bodů, z pěti pozic tedy celkově bodů 125.

Typicky se snímací systém sestává z pěti dotyků složených do tzv. „hvězdy“, kde je jeden dotyk rovnoběžný s osou pinoly a ostatní čtyři leží v rovině kolmé na tuto osu. Zároveň jsou pootočeny mezi sebou o 90°.



Obr. 7: Schéma snímacího systému "hvězda" s pěti dotyky [6]

Body by měly být rozprostřené rovnoměrně minimálně na jedné polokouli testovací koule. Jejich rozmístění záleží na uvážení uživatele, ale je doporučeno se držet strategie popsané v kapitole 1.4.1. [6]

Vyhodnocení naměřených dat ze zkoušky

První vyhodnocovanou charakteristikou je chyba polohy. Připasováním koule pomocí metody nejmenších čtverců pro 25 měření v každém z pěti úhlových natočení se určí dohromady pět změřených koulí. Následně se určí poloměr minimální opsané kružnice, která zahrnuje veškeré koule. Tento poloměr je chybou polohy $L_{Dia.5x25:j:Tact}$, kde se písmeno j zamění za označení typu používané snímací konfigurace (zda se jedná o pevný či otočný snímací systém).

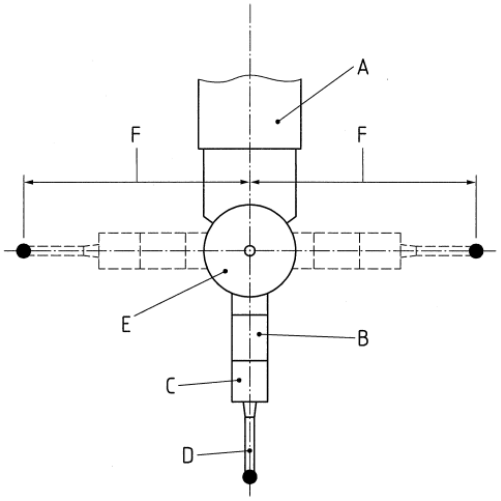
Další charakteristikou je chyba protilehlých snímačů. Jedná se o vzdálenost středů dvou koulí, které jsou měřeny z protilehlých směrů. Měření se provádí dvakrát, vždy v jiných protilehlých směrech. Větší ze dvou stanovených hodnot odpovídá chybě protilehlých snímačů.

Poslední, neméně důležitou, charakteristikou je chyba rozměru se složeným snímacím systémem. Tato chyba určením odpovídá chybám popsaných v kapitolách 1.4.1 a 1.4.2. Připasováním koule vyhodnocené metodou nejmenších čtverců ze všech 125 naměřených bodů se určí průměr D_{meas} kompenzován o průměr snímacího dotyku. Chyba rozměru $P_{Size.Sph.5x25:j:Tact}$ se určí jako rozdíl mezi D_{meas} a kalibrovaným průměrem D_{cal}. [6]

1.5.4 Test s otočným snímacím systémem

Princip tohoto testu je v zásadě velice podobný předchozímu testu se složeným snímacím systémem. Cílem je taktéž změření tvaru, rozměru a polohy testovací koule, ale tentokrát pomocí otočného snímacího systému. Testovací koule je měřena v pěti různých úhlových polohách pomocí jednoho měřicího dotyku. V každé poloze se se měří 25 bodů. Celkově je nasnímáno tedy 125 bodů.

Měřené body by měly být rovnoměrně rozprostřené podobným způsobem jako v předchozím testu. Stejně tak je doporučeno se řídit rozmístěním jednotlivých bodů dle kapitoly 1.4.1. Vyhodnocení naměřených dat ze zkoušky se provádí dle stejných pravidel jako v testu se složeným snímacím systémem. [6]



Obr. 8: Schéma otočného snímacího systému [6]

1.5.5 Test s nastavovacím kroužkem

Jedna ze příloh páté části normy se zabývá využitím nastavovacích kroužků jako zkušebních těles pro přejímací a periodické zkoušky. Popisované testy vyhodnocují rozměry a tvar nastavovacích kroužků. Doporučuje se využívat nízkopásmové filtrace o 50 vlnách na otáčku. Kroužky musí být očištěné a bez jakýchkoliv známek koroze. Taktéž se nedoporučuje působit na kroužky při upínání k loži testovaného stroje velkou silou, aby se neovlivnila působením těchto sil velikost a tvar kroužku. Vzdálenost měřených bodů na kroužkách by neměla být větší než 0,1 milimetru.

Navrhovaný test začíná ustanovením kroužku na loži CMM, kde je osa daného kroužku rovnoběžná s osou pinoly stroje. Snímací systém je kvalifikován dle běžných způsobů. Následně se naskenuje kalibrovaný průměr kroužku a vyhodnotí se změřený průměr D_{meas}. Chyba rozměru $P_{Size.Cir.Scan:k.0:Tact}$ se poté stanoví jako rozdíl mezi změřeným průměrem D_{meas} a kalibrovaným průměrem kroužku D_{cal}. Pokud uživatel požaduje, může být metodika zopakována s jinou orientací nastavovacího kroužku. Postup zkoušky ale zůstává stejný. [6]

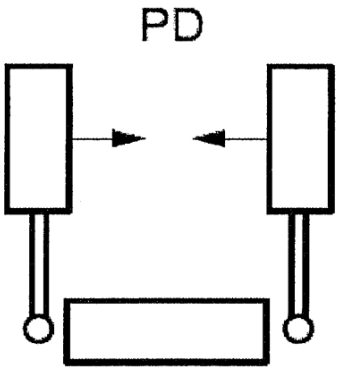
Testy týkající se nastavovacích kroužků popsané v normě potvrzují, že jsou nastavovací kroužky vhodným nástrojem pro periodické zkoušení souřadnicových měřicích strojů. Jedná se o jednoduchý geometrický útvar, který má nicméně potenciál prověřit stav testovaného CMM za poměrně krátký čas. Rozhodl jsem se proto zmíněné vlastnosti využít při návrhu zkušebního artefaktu pro rychlé periodické zkoušky.

2 Zkušební tělesa a artefakty pro periodické zkoušky

2.1 1D artefakty

2.1.1 Koncové měrky

Prvním typem zkušebních těles jsou koncové měrky. Tyto základní artefakty jsou vyráběné z oceli, tvrdokovu či keramiky. Koncové měrky se rozdělují do čtyř tříd přesnosti. Nejpřesnější třídou je třída K. Měrky této třídy jsou určené primárně pro kalibrační laboratoře, kde se využívají ke kalibraci a navazování koncových měrek a etalonů nižších tříd přesnosti. Třída 0 je určená pro přesné měření délek, kalibraci koncových měrek z oblasti pracovnách měřidel a ke kalibraci a nastavení měřicích přístrojů. Koncové měrky třídy 1 slouží nápodobně k nastavování měřicích přístrojů či ke kalibraci kalibrů a měrky třídy 2 poté pro běžné měření a nastavování míry ve strojírenství. [8]



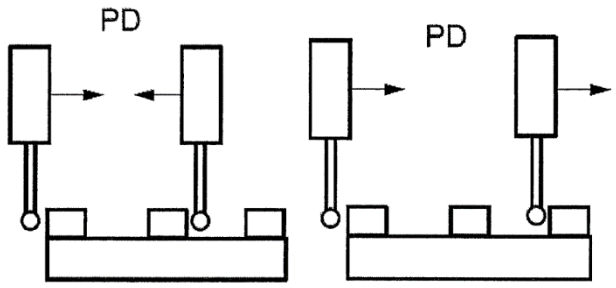
Obr. 9: Schéma snímání bodů na koncové měrce [4]

Obr. 10: Sada koncových měrek [9]

Kalibrovanou zkušební délku je možné vytvořit pomocí kalibrované koncové měrky měřené v obou smyslech metodou od jednotlivého bodu k dalšímu jednotlivému bodu. Každý snímaný bod by měl ležet na jednom předpokládaném kalibrovaném bodu koncové měrky. [4]

2.1.2 Stupňové měrky

Stupňové měrky disponují oproti běžným koncovým měrkám tou výhodou, že je v jednom zkušebním tělese obsaženo více zkušebních délek. Tyto artefakty umožňují měření délek v jednom či obou smyslech. Stupňové měrky umožňují poměrně levnou a efektivní metodu kontroly souřadnicových měřicích strojů. Jsou tudíž velice vhodné pro provádění přejímacích a periodických zkoušek dle normy ČSN EN ISO 10360-2. [4, 10, 11]



Obr. 11: Schémata snímání bodů na stupňových měrkách [4]

Obr. 12: Stupňová úhlově nastavitelná měrka [11]

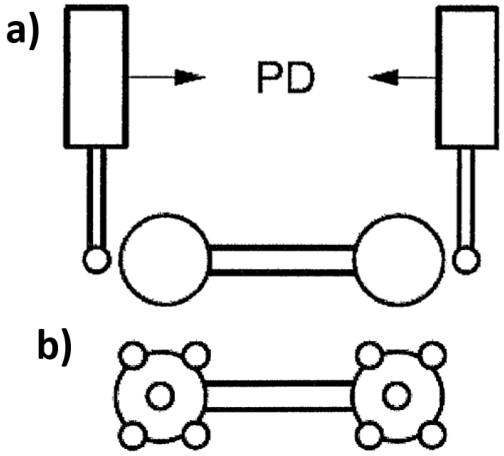
Při měření v jednom smyslu je nutné měřit veškeré plochy měrek ve třech diskrétních bodech na stejném místě dotyku. Délka je následně určena zprůměrováním získaných souřadnic. Pokud se kalibrovaná zkušební délka měří v obou smyslech, je vytvářena metodou měření od jednotlivého bodu k jednotlivému bodu. Stupňové měrky mohou disponovat vodorovnou jednoduchou konstrukcí či konstrukcí složitější, která umožňuje například i úhlové nastavení. [4]

2.1.3 Ball bar

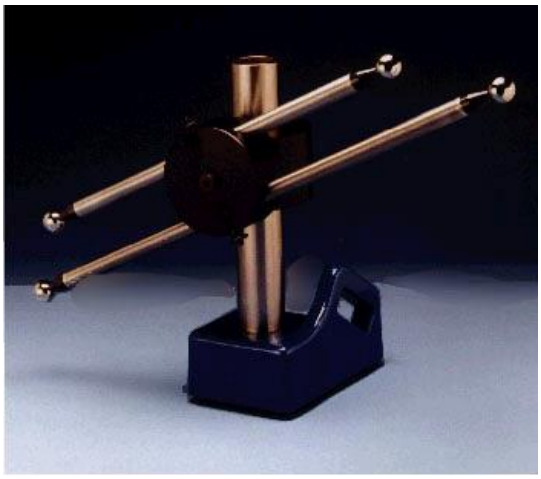
Základní typ tohoto artefaktu se skládá ze dvou přesně vyrobených koulí o stejném průměru, které jsou spojeny pomocí tyče. Vzdálenost mezi středy obou koulí by měla být konstantní a přesná. Existují různé délky či modifikace tohoto konceptu. Ball bar může být například umístěn na rameni s otočným kloubem pro jednodušší manipulaci a nastavování různých poloh v měřicím objemu testovaného CMM. Existují taktéž typy těchto zkušebních těles nazývané multiball bar, které disponují větším počtem koulí. Mohou tak například suplovat vlastnosti stupňových měrek. [4, 12, 13]

Výhody těchto zkušebních těles tkví v nízkých výrobních nákladech a hmotnosti, snadné manipulaci a poměrné vysoké robustnosti. Nevýhodou může být fakt, že tento

artefakt a zkouška na něm založená reflektuje měřicí úlohu, se kterou se v praxi lze setkat pouze zřídka. [2]



Obr. 13: Schémata snímání bodů na ball bar a) oba smysly; b) jeden smysl [4]



Obr. 14: Ball bar na otočném rameni [13]

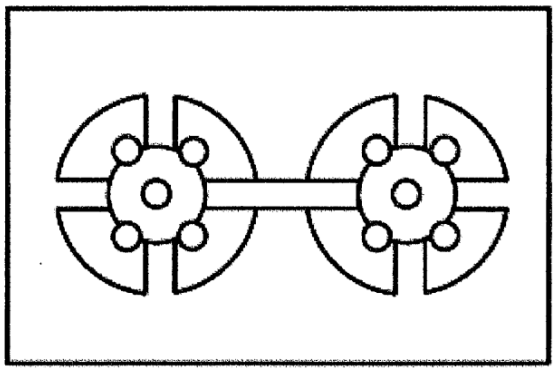
Pokud se měří na tomto typu zkušebního tělesa jedním smyslem, zaměří se na každé kouli pět diskrétních bodů a následně se s těchto měření vypočítá vzdálenost mezi středy měřených koulí metodou nejmenších čtverců. V případě měření v obou smyslech je těleso zaměřeno způsobem od jednotlivého bodu k jednotlivému bodu. Délka odpovídá kalibrované vzdálenosti středu koulí plus jedna polovina kalibrovaného průměru každé koule. [4]

2.2 2D artefakty

2.2.1 Ball plate

Tento artefakt využívá podobného principu jako ball bar. Nicméně rozdíl spočívá v tom, že kalibrované koule o stejném průměru jsou rozmístěny do rastru na základní desce artefaktu. Vytváří tudíž síť s přesně definovanými vzdálenostmi mezi jednotlivými středy koulí. Cílem je porovnání polohy zaměřených středů testovacích koulí s kalibrovanými hodnotami. Využívají se koule ocelové či keramické. [4, 14]

Tento typ artefaktu bývá velice stabilní a robustní. Na druhou stranu jejich nevýhodou je velmi vysoká hmotnost. Zároveň, stejně jako v případě ball bar, je i zde měřicí úkon spojený s tímto artefaktem málo častý v praxi u reálných dílů a je nutné se spoléhat na výpočet středů koulí pomocí softwaru. U některých komerčně nabízených artefaktů ball plate je umožněn přístup ke koulím z obou stran. [2, 14]



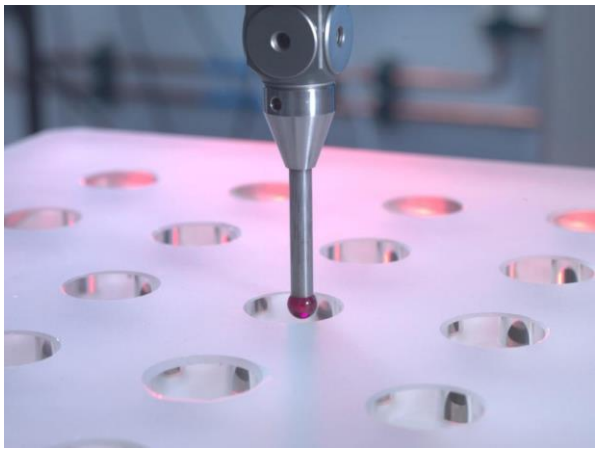
Obr. 15: Schéma snímání bodů na ball plate jedním smyslem [4]

Obr. 16: Ball plate [11]

Doporučená strategie se shoduje s tou, která se využívá u artefaktů typu ball bar. Při měření jedním smyslem se každá koule zaměří pomocí pěti nasnímaných bodů, ze kterých se získají polohy středů jednotlivých koulí. Následně se stanoví zmíněná vzdálenost mezi jednotlivými středy. V případě měření v obou smyslech se vzdálenost mezi dvěma koulemi zjišťuje zaměřením každé koule pouze jedním bodem jako v případě ball bar. [4]

2.2.2 Hole plate

Jedná se o zkušební artefakt podobný systému ball plate, ale oproti využití koulí se zde používají díry s kalibrovaným rozměrem. Výhoda oproti systému ball plate spočívá především v nižší hmotnosti při podobných rozměrech. [2, 15]



Obr. 17: Skleněný artefakt typu Hole plate [2]

2.2.3 Nastavovací kroužky

Nastavovací kroužky mohou být taktéž vhodným zkušebním tělesem pro rychlé periodické zkoušky. Lze pomocí nich hodnotit, jak již bylo rozebíráno v kapitole 1.4.5, chyby rozměru a tvaru na testovaném CMM. Na základě orientace nastavovacího kroužku je možné testovat jednotlivé osy daného stroje. Této skutečnosti budu využívat při návrhu artefaktu v kapitole č. 3. [2, 4, 16]

2.3 3D artefakty

2.3.1 Ball Cube a Ball Tetrahedron

Tyto artefakty jsou založeny na stejném principu jako již zmíněný ball bar. Nicméně oproti tomuto systému se jedná o artefakty umožňující zkoušení CMM ve třech dimenzích. Díky tomu je možné testovaný CMM prověřit ve více vlastnostech. Tyto artefakty taktéž využívají ke zkouškám systém koulí s přesnými rozměry. Koule jsou spojeny do útvarů v podobě jehlanu či krychle pomocí spojovacích prvků vyrobených z oceli či kompozitního materiálu. Některé druhy těchto 3D artefaktů mohou taktéž disponovat rozložitelnou konstrukcí umožňující snadnější převoz. [11, 17]

Obr. 18: Artefakt typu Ball Cube [18]

Obr. 19: Detail vrcholu artefaktu typu Ball Tetrahedron [19]

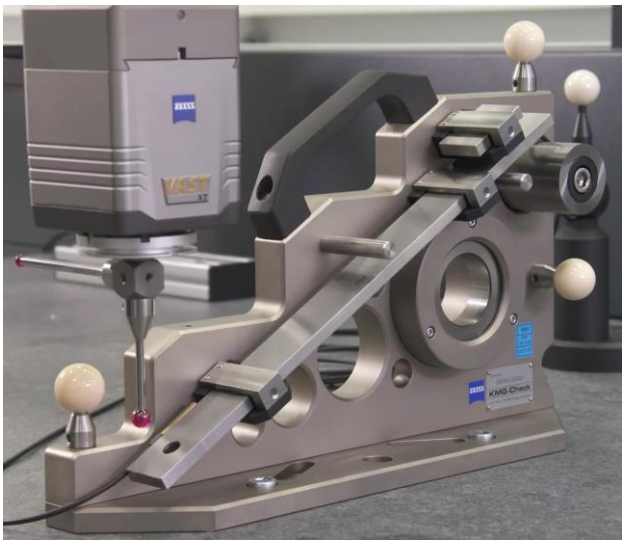
2.3.2 Účelově zhotovené artefakty

Komplexní účelově zhotovené artefakty jsou určeny pro umožnění kontroly velkého množství vlastností souřadnicových měřicích strojů. V tom tkví jejich největší výhoda, umožňují totiž kontrolovat široké množství charakteristik popisovaných v normách ČSN EN ISO 10360. Tyto artefakty jsou tudíž schopny poskytnout ucelenou představu

o stavu testovaného CMM. Nevýhoda těchto artefaktů spočívá především v jejich vysoké pořizovací ceně. [2]

Jedním ze zástupců této skupiny artefaktů jsou například artefakty řady CMM-Check od firmy Zeiss. Ty umožňují zkoušet dotykové snímací systémy a jejich chyby při měření lineárních rozměrů, snímání diskrétních bodů i režimu skenování. Pro tyto účely jsou vybaveny stupňovou měrkou nebo koncovými měrkami různých délek, systémem keramických koulí či například dírami suplujícími vlastnosti nastavovacích kroužků. [2, 20, 21]

Obr. 20: Zeiss CMM-Check 2.0 [20]



Obr. 21: Zeiss CMM-Check [21]

3 Návrh a realizace zkušebního tělesa pro rychlé periodické zkoušky

Periodické zkoušky jsou nedílnou součástí každého metrologického střediska. Je nezbytné sledovat technický stav strojů v čase a pravidelně tento stav ověřovat. Úkolem periodické zkoušky je právě ověřit technický stav CMM. Nicméně periodická zkouška by neměla trvat příliš dlouho dobu, protože by tím zpomalovala samotnou kontrolu dílů kontrolovaných na daném středisku. Periodická zkouška musí být efektivní. Jinými slovy by měla za co nejkratší dobu prověřit stroj v co nejširším pásmu vlastností.

Byl jsem pověřen společností Škoda Auto a.s. jakožto zadavatelem navrhnout artefakt vhodný pro rychlou pravidelnou periodickou zkoušku umožňující průběžnou kontrolu CMM. Periodické zkoušky definované normou ČSN EN ISO 10360 by bylo náročné provádět během každé směny. Lze ale využít rychlé periodické zkoušky na základě interních předpisů, které nejsou časově náročné a lze je tak aplikovat častěji. Tyto rychlé zkoušky pravidelně prováděné na daném artefaktu umožní prodloužit intervaly oficiálních periodických zkoušek. Toto prodloužení intervalu přispěje ke snížení nákladů na provoz měrových středisek. V následující kapitole se návrhu a výrobě takového artefaktu podrobně věnuji.

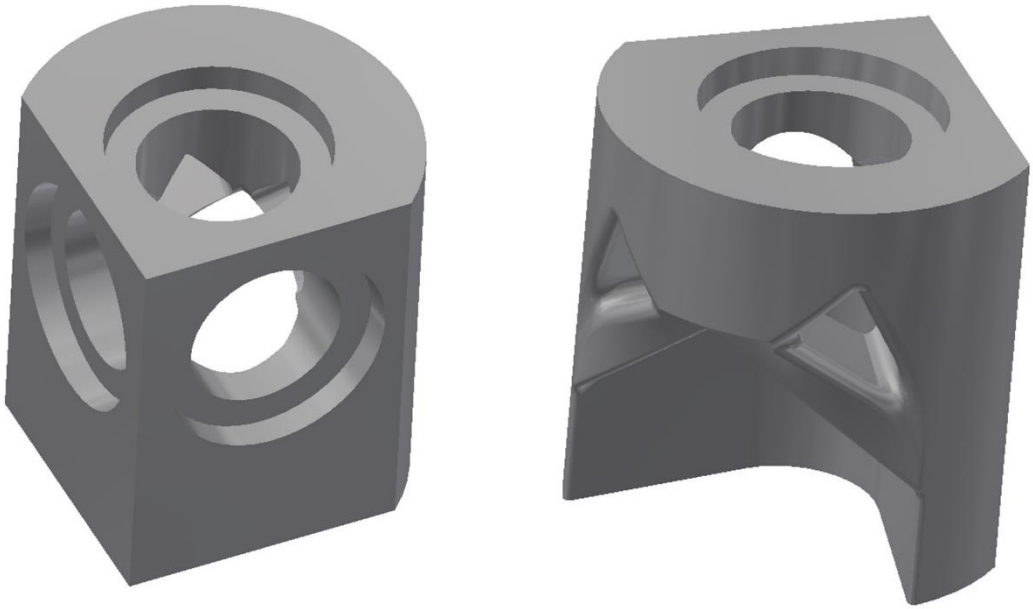
3.1 První návrh

Cíl nespočíval v navržení komplexního složitého artefaktu, nýbrž artefaktu, který za krátký čas prověří široké spektrum vlastností testovaného CMM. Tím vznikla myšlenka podpořená předchozí rešerší, že vhodným základním komponentem, který správně otestuje geometrii souřadnicového měřicího stroje, je nastavovací kroužek.

Rozhodl jsem se tudíž jako testovací část artefaktu využít kroužky od firmy Mahr odpovídající normě DIN 2250 C. Osy jednotlivých kroužků budou kolmé na jednotlivé souřadnicové roviny, konkrétně XY, XZ a YZ. Nosná část artefaktu bude v podobě 3D tištěného tělesa. Využitím 3D tištěných komponentů na artefaktu dojde k úspoře hmotnosti a díky tomu bude manipulace s artefaktem pro obsluhu méně namáhavá.

Obr. 22: Nastavovací kroužek Mahr dle DIN 2250 C [22]

V prvním návrhu jsem zamýšlel, že bude artefakt připevněn ke hliníkové desce a ta bude následně přišroubována pomocí jednoho šroubu k loži CMM. Od toho se odvíjel návrh nosné části, která z jedné strany umožňovala přístup k utahování a povolování zmíněného šroubu.



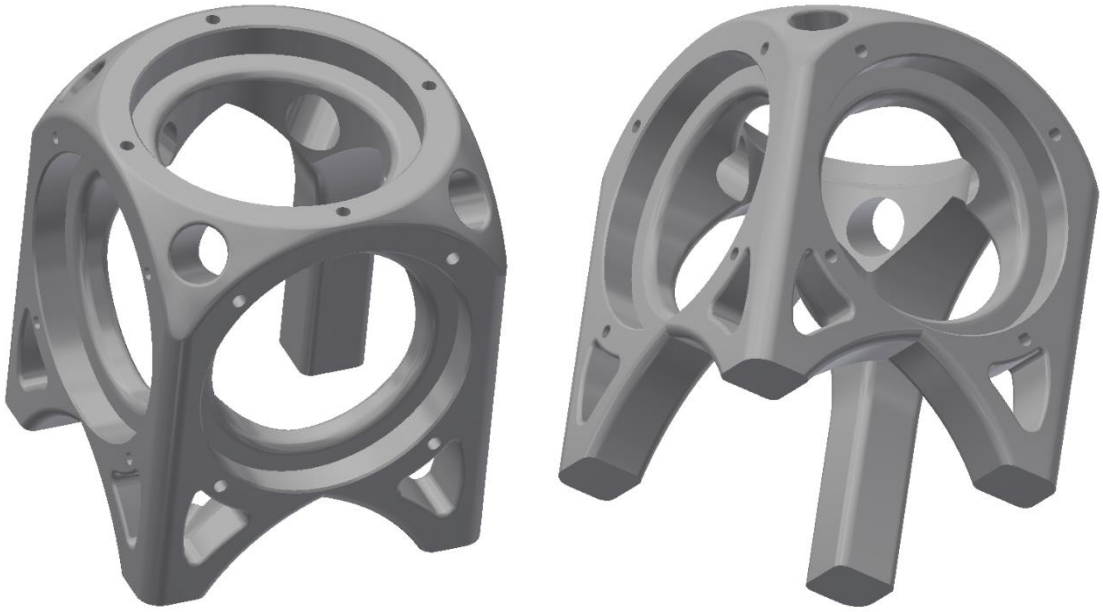
Obr. 23: První návrh tělesa artefaktu

Původně jsem u tohoto návrhu zamýšlel použití nastavovacích kroužků o vnitřním průměru 50 milimetrů. Po domluvě se zadavatelem byly vybrány kroužky o větším průměru rovným 75 milimetrům. Hlavním důvodem změny průměru byla skutečnost, že vybraný větší rozměr více odpovídá kontrolovaným rozměrům na vyráběných dílech v provozu zadavatele.

Vlivem této změny musela být konstrukce tělesa poměrově zvětšena. Návrh se stal masivnějším, na několika místech by byly příliš silné stěny a docházelo by tudíž při tisku ke zbytečnému plýtvání materiálu. Největší negativum konstrukce spočívalo v potenciální nedostatečné stabilitě v místě, kde se namísto nohy nacházelo vybrání pro utahování šroubu. Rozhodl jsem se proto od tohoto nápadu vzhledem ke zmíněným komplikacím upustit a začal jsem navrhovat nový vhodnější model.

3.2 Druhý návrh

Prvním rozdílem oproti původnímu návrhu bylo připevnění sestavy artefaktu k loži stroje pomocí dvou šroubů, které se budou nacházet mimo půdorys samotného artefaktu. Nevýhoda tohoto návrhu spočívala v použití základové desky o větší ploše. Nicméně díky upnutí pomocí dvou šroubů namísto jednoho bude celá sestava artefaktu připevněna na testovaném stroji s větší jistotou a na tištěném těle artefaktu nebude nutné řešit vybrání pro utahování. Díky tomu jsem mohl navrhnout stabilnější konstrukci tělesa se čtyřmi nohami.



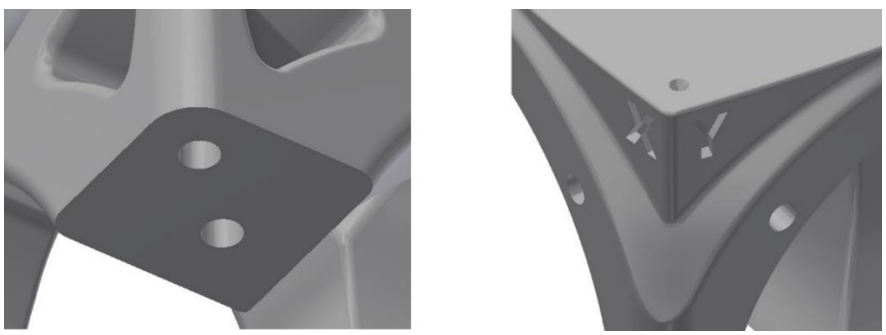
Obr. 24: Druhý návrh tělesa artefaktu

Druhý návrh artefaktu přinesl značnou úsporu materiálu. V místech, kde by byl materiál nevyužit, jsem vytvořil odlehčení v podobě tvarových vybrání. Návrh na obrázku č. 24 již disponoval i dírami pro vložení závitových vložek, do kterých se přišroubují příruby držící nastavovací kroužky na svém místě.

3.2.1 Optimalizace návrhu

Druhý návrh již lépe vyhovoval kladeným požadavkům na artefakt. Návrh jsem nicméně dále zoptimalizoval pro lepší funkčnost. První úpravou bylo rozšíření základen všech nohou, aby bylo možné do každé nohy umístit dvě závitové vložky namísto jedné pro stabilnější pozici na základové desce. Dále jsem upravil zaoblení a tvar děr pro méně problémový tisk. V neposlední řadě jsem na původním místě jednoho odlehčení vytvořil prvek s kuželovým zahloubením. Toto zahloubení bude sloužit jako referenční bod pro začátek měřicího programu v softwaru ZEISS Calypso. Boční strany zmíněného prvku byly využity pro označení písmeny X a Y, které pomáhá určit orientaci upnutí dílu na loži CMM. Po těchto úpravách byl návrh hlavního tělesa připraven na testování a následnou výrobu.

Obr. 25: Optimalizovaný druhý návrh tělesa artefaktu



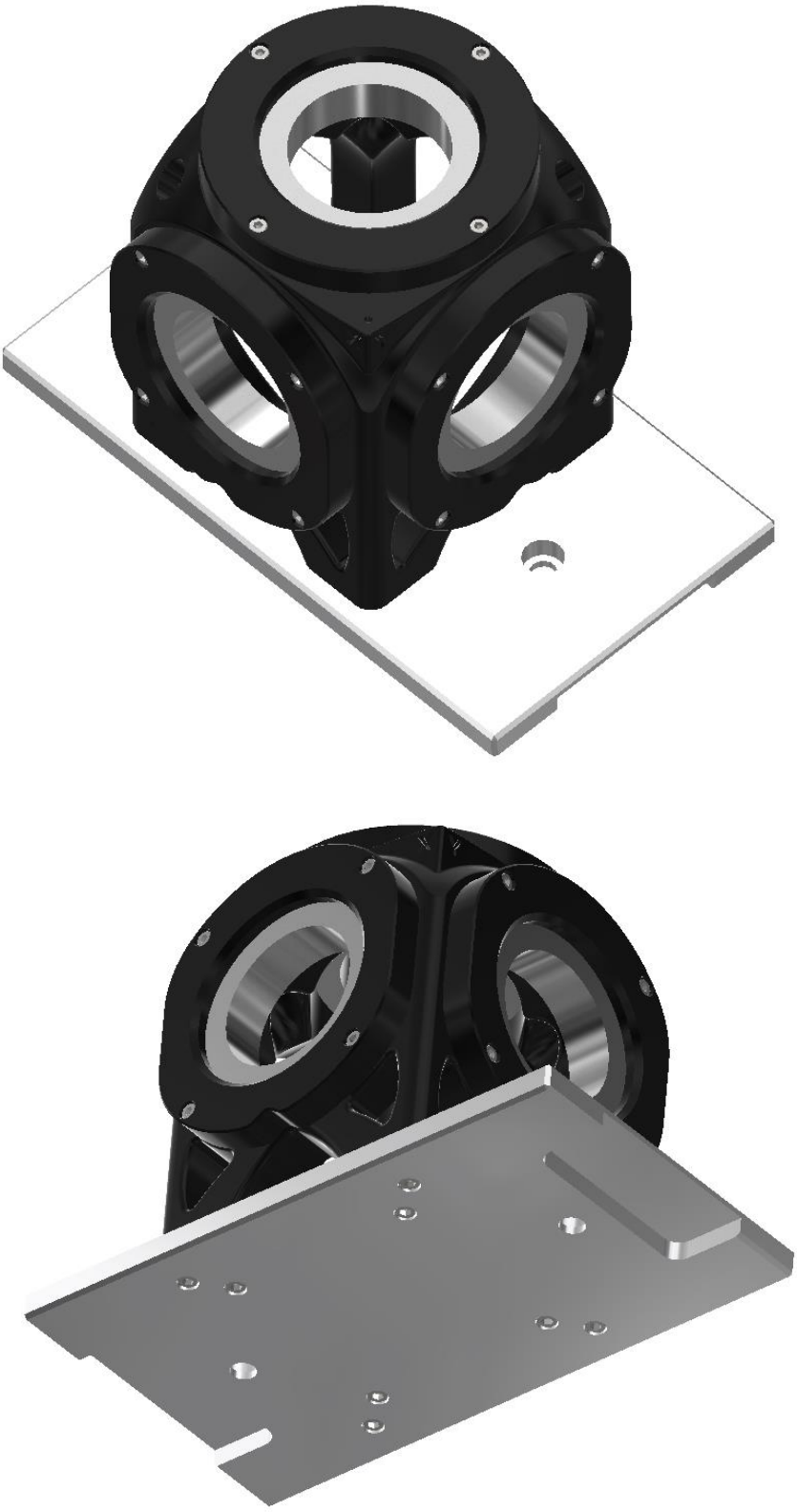
Obr. 26: Detaily optimalizovaného návrhu

3.3 Návrh přírub a základové desky

Každá příruba bude přišroubována pomocí čtyř šroubů do závitových vložek v hlavním těle artefaktu. Hlavním úkolem příruby je pevně držet nastavovací kroužek v těle artefaktu. Budou, podobně jako tělo artefaktu, tištěné na tiskárně technologií FDM. Při návrhu přírub jsem optimalizoval jejich tvar, aby plynule navazovaly na tělo artefaktu. Boční příruby jsou stejné, na bocích zúžené a na spodní straně s výřezem kopírujícím tvar tělesa artefaktu. Horní příruba je symetrická, kruhová. Příruby jsou navržené tak, aby s vloženým kroužkem přímo nedosedaly na tělo artefaktu. Vůle mezi tělesem artefaktu a přírubou činí jeden milimetr.

Obr. 27: Návrhy boční a horní příruby

Úlohou základové desky je upnutí artefaktu na lože testovaného CMM. Artefakt je k ní připevněn pomocí osmi šroubů M6, které jsou zašroubovány do závitových vložek v tělese artefaktu. Pomocí dvou šroubů M12 je deska zajištěna na lože stroje. Rozměry desky jsou 320 x 180 milimetrů. Tloušťka činí 15 milimetrů. Na kratších stranách desky jsem navrhl vybrání, která usnadňují manipulaci s artefaktem. Na obrázku č. 28 je možné si prohlédnout celou finální sestavu artefaktu.



Obr. 28: Finální sestava navrženého artefaktu

3.4 Materiál tělesa artefaktu

Vzhledem ke zvolené metodě výroby v podobě 3D tisku jsem vybíral z materiálů, které se k plastovém 3D tisku metodou FDM běžně používají. Důležitými aspekty byly mechanické vlastnosti materiálu s přihlédnutím na náročnost tisku samotného. Zvolil jsem materiál PETG, který svými vlastnostmi vyhovuje zmíněným požadavkům jako ideální kompromis.

Polyethylentereftalát glykol, zkratkou zmíněný PETG, se řadí mezi nejpoužívanější materiály pro běžný FDM 3D tisk. Jedná se o houževnatý, poměrně teplotně odolný materiál, který disponuje nízkou tepelnou roztažností. Díky tomu dosahuje vysoké adheze na tiskové podložce. Taktéž je charakteristický výbornou adhezí mezi jednotlivým vrstvami. Díky tomu se využívá mimo jiné i pro tisk různých mechanicky namáhaných dílů. Jednou z jeho nevýhod při tisku je možnost výskytu vyšší míry tzv. stringování, tedy tenkých nitek filamentu ulpívajících na tištěném modelu. Tabulka č. 2 shrnuje charakteristické vlastnosti materiálu PETG a vybrané mechanické vlastnosti testované výrobcem na tištěných zkušebních tělískách. [23, 24, 25]

Tab. 2: Vlastnosti materiálu PETG [24]

Doporučené teploty tisku	**Hodnota**	
Teplota trysky (°C)	250 ± 10	
Teplota vyhřívané podložky (°C)	80 ± 10	
Typické vlastnosti materiálu		
Hustota (g/cm^3)	1,27	
Absorpce vlhkosti - 24 hodin (%)	0,07	
Absorpce vlhkosti - 7 dní (%)	0,10	
Mez pevnosti v tahu pro filament	46 ± 1	
Tvrdost – Shore D	74	
Vlastnosti/směr tisku	**Horizontální**	**Vertikální**
Pevnost v tahu (MPa)	47 ± 2	50 ± 1
Modul pružnosti v tahu (GPa)	1,5 ± 0,1	1,6 ± 0,1
Pevnost v ohybu (MPa)	66 ± 2	70 ± 1
Modul pružnosti (GPa)	1,7 ± 0,1	1,6 ± 0,1
Rázová pevnost Charpy (vrub) (kJ/m^2)	6 ± 1	3 ± 1

3.5 Výroba artefaktů

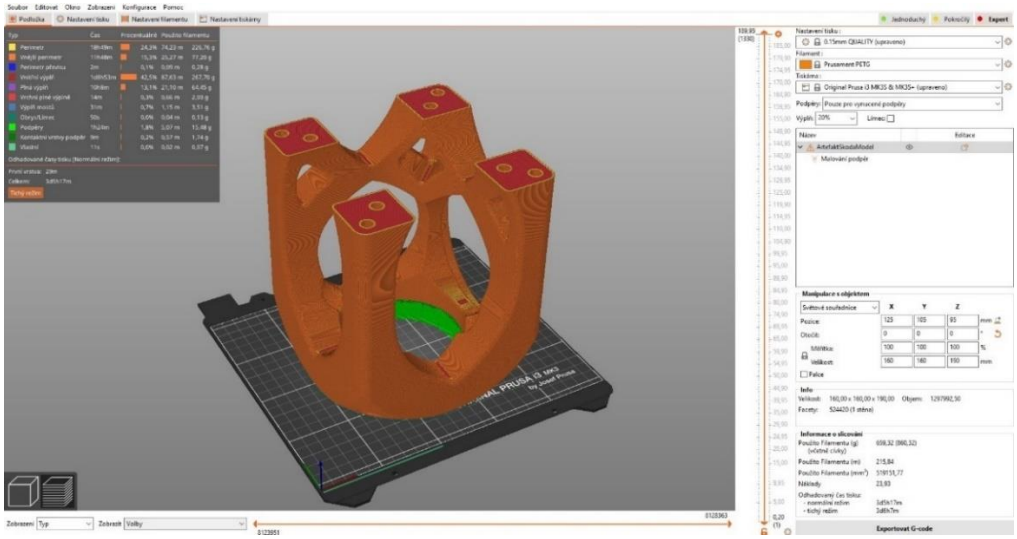
Prvním krokem realizace byla výroba těles artefaktů a přírub následována výrobou základových desek pro upnutí artefaktu. Další fází byla montáž jednotlivých artefaktů do finálních celků, tvorba měřicího programu pro periodické zkoušky a v neposlední řadě expedice vyhotovených artefaktů na měrová střediska zadavatele.

Jak jsem již zmiňoval v předchozích kapitolách, vzhledem k velikosti a charakteru zakázky bylo vhodné zvolit k výrobě navrhovaných dílů technologii 3D tisku, konkrétně metodu FDM. K výrobě jsem využil tiskárny nacházející se na Fakultě strojní ČVUT. Konkrétně se jednalo o tiskárnu Original Prusa I3 MK3S+ doplněnou o tiskárnu Original Prusa Mini. Vzhledem k velikosti tiskového prostoru byla tiskárna MK3S+ využita především pro tisk hlavních těles artefaktu, zatímco menší tiskárna Mini pouze pro výrobu přírub. Obě tiskárny byly tudíž od českého výrobce PRUSA RESEARCH, od kterého byl použit i materiál Prusament PETG.

3.5.1 Slicing

Veškeré návrhy jsem vytvářel v CAD programu Inventor Professional 2022 od společnosti Autodesk. Prvním krokem bylo převedení nativního formátu vytvořených modelů v tomto programu do formátu podporovaného programem PrusaSlicer 2.5.0. Přirozenou volbou se jevil formát STL, který je s 3D tiskem úzce spjat a jedná se o nejčastěji využívaný typ souboru určeného pro 3D tisk.

Nicméně po nahrání STL modelů do prostředí PrusaSliceru jsem si všiml, že modely nebyly vyexportovány v dostatečném rozlišení a nebyly dostatečně precizní. Mou domněnkou bylo, že jsem špatně v CAD softwaru nastavil volby exportu, ale ani po úpravě různých parametrů jsem nedosáhl lepších výsledků. Rozhodl jsem se tudíž vyžít možnosti, kterou nově nabízel právě PrusaSlicer ve své nejnovější verzi 2.5.0, a to možnosti nahrávání modelů ve formátu STEP. CAD program byl schopen exportovat STEP soubor detailněji. Díky tomu již model dosahoval i po exportu původně zamýšlené geometrie.



Obr. 29: Slicing tělesa artefaktu

Základní parametry tisku jsem nastavil převážně podle doporučení ze strany softwaru. Především kvůli skutečnosti, že použitý software je vyvíjen stejnou společností, která vyrábí využité tiskárny i materiál. Díky tomu jsem nemusel vytvářet nastavení parametrů pro danou tiskárnu, protože profily pro zmíněné tiskárny s materiálem byly již vytvořeny a nabízeny přímo v prostředí softwaru.

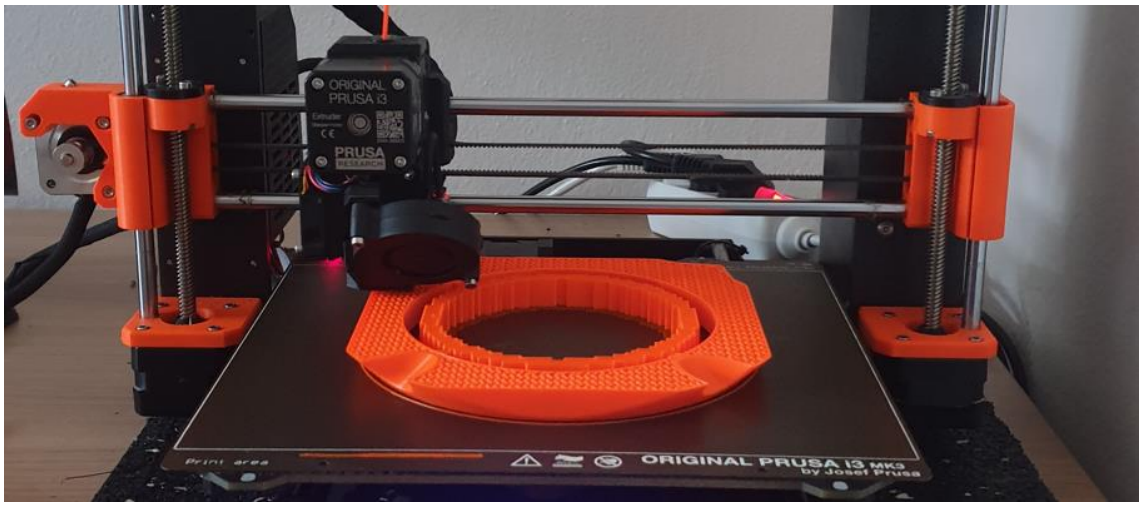
Pro tisk jsem zvolil nastavení 0,15 mm QUALITY. Dané nastavení parametrů tisku, jak je z názvu patrné, využívá výšku vrstvy 0,15 milimetru a preferuje kvalitu výsledného dílu před rychlostí tisku. Nastavení jednotlivých tiskových parametrů je shrnuto v následující tabulce č. 3.

Tab. 3: Tiskové parametry

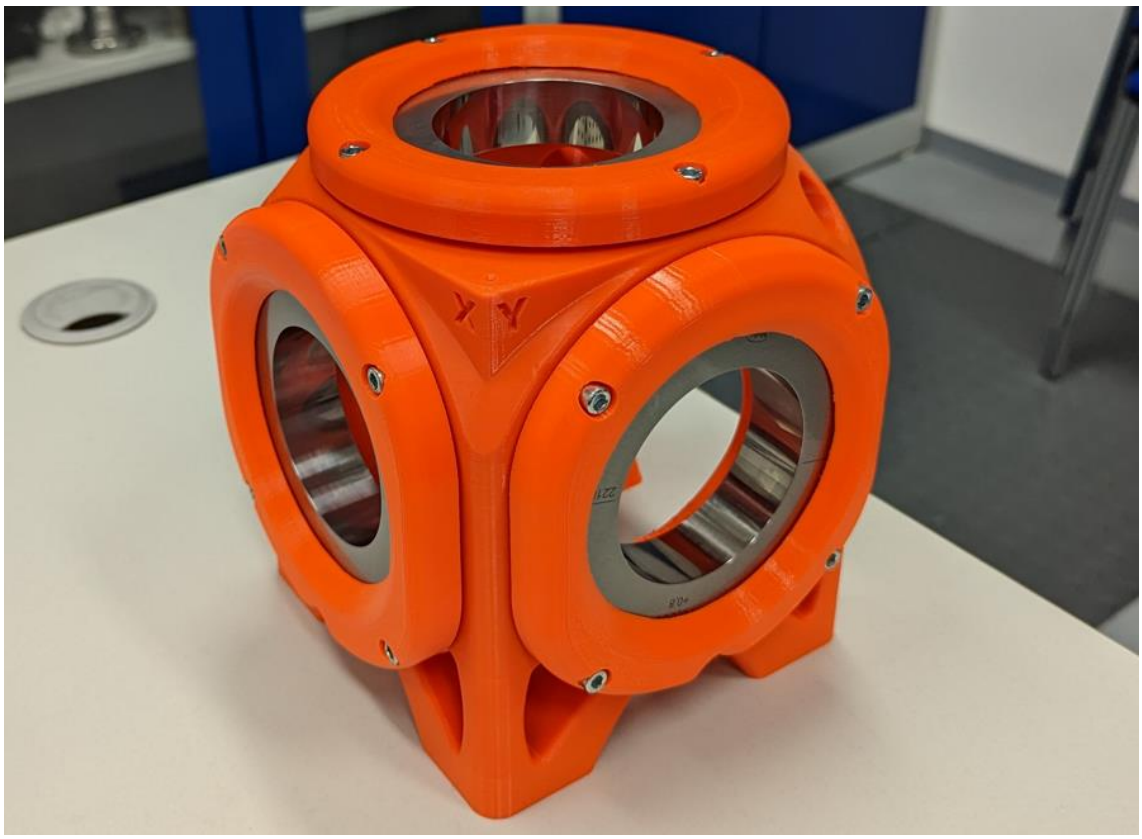
Nastavení	**Hodnota**
Teplota trysky – první/ostatní vrstvy (°C)	240/250
Teplota vyhřívané podložky (°C)	90
Výška vrstvy – první/ostatní vrstvy (mm)	0,2/0,15
Počet perimetrů	4
Počet vrchních/spodních vrstev	8/5
Výplň (%) / typ výplně	20 / Gyroid
Chlazení minimum/maximum (%)	30/60
Rychlost perimetrů vnější/vnitřní (mm/s)	25/45
Rychlost výplně (mm/s)	80
Akcelerace (mm/s^2)	800 ÷ 1000

3.5.2 Tisk prototypu

Již během samotného navrhování artefaktu jsem vytiskl prototyp, jehož účelem bylo zjistit, zda navržený design vyhovuje požadovaným parametrům. Byly kontrolovány rozměry jednotlivých funkčních částí i kvalita tisku. Už prototyp byl tisknut z materiálu PETG značky Prusament, konkrétně oranžové barvy obchodně označované jako Prusa Orange.



Obr. 30: Tisk prototypu

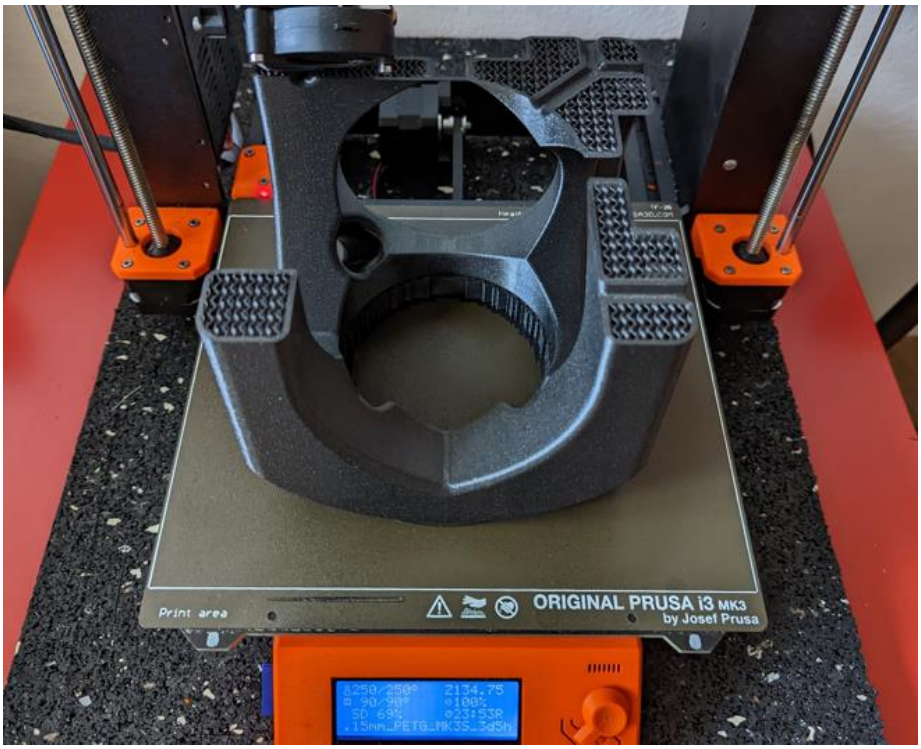


Obr. 31: Vyrobený prototyp artefaktu

Vytisknutý prototyp po funkční stránce vyhovoval, bylo nutné provést pouze několik menších úprav návrhu týkajících se především tolerancí. Kritickým místem z hlediska tisku byl převis při dokončování tisku bočních kapes pro uložení nastavovacích kroužků. Pro lepší vzhled a přesně definovanou geometrii byly tudíž tyto kapsy, společně s kapsou horní, dokončeny pomocí obrábění. Tím byly odstraněny nepřesnosti při tisku převisů a nebylo díky tomu nutné tisknout větší množství podpěr. Rozhodl jsem se tudíž využít podobného dokončování i na finální verzi artefaktu. Po kontrole funkčnosti a konečných úpravách návrhu bylo možné začít s výrobou těles a přírub artefaktů.

3.5.3 Tisk těles a přírub

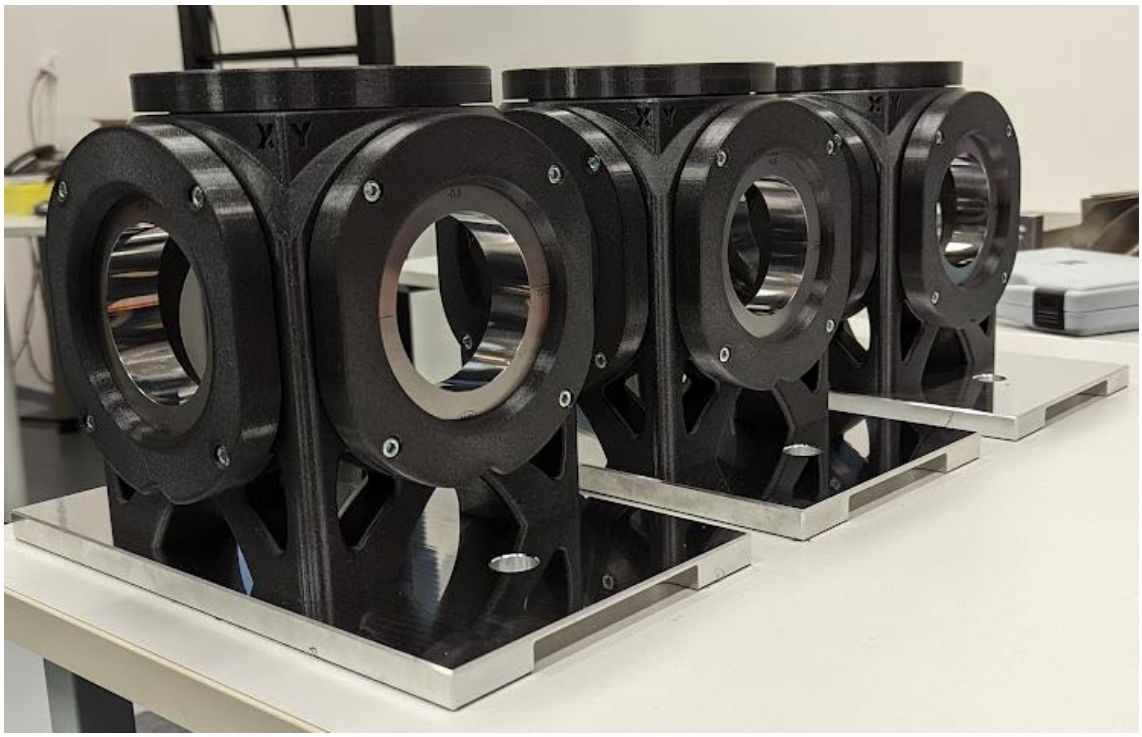
Finální tělesa i příruby byly tisknuty z PETG filamentu od stejného výrobce, ale v černé barvě, pojmenované Galaxy Black. Celkově bylo nutné vyrobit dle požadavků zadavatele tři artefakty čili tři tělesa, tři horní příruby a šest přírub bočních. Nejvíce časově náročný byl tisk hlavních těles. Jedno těleso bylo tisknuto 77 hodin a 17 minut, jedna příruba poté hodin osm. Po zkušenostech z tisku prototypu byla tiskárna přemístěna dále od dveří, aby případný průvan vyvolaný dveřmi neovlivnil kvalitu tisku. Teplota v místnosti dosahovala 18 až 22 °C.



Obr. 32: Tisk finálního tělesa artefaktu

Po úspěšném vytisknutí veškerých dílů jsem pomocí pájky umístil do hlavních těles závitové vložky. Na místech určených pro závitové vložky byly již připravené díry. Do děr jsem následně vsunul jednotlivé nahřáté vložky. Ty byly nahřívané na dostatečně vysokou teplotu, aby plast v okolí díry změkl. Díky tomu bylo možné vložku přesně umístit na zamýšlenou pozici. Po následném vychladnutí vložky i okolního materiálu již vložka pevně díky svému drážkování držela v tělese artefaktu. Následně byla hlavní tělesa dokončena obrobením kapes pro uložení nastavovacích kroužků stejným způsobem jako v případě prototypu.

Po obrobení jsem umístil jednotlivé nastavovací kroužky do připravených kapes a zajistil jsem jejich pozici vytisknutými přírubami. Každá příruba byla jištěna čtyřmi šrouby M5x20, které jsem zašrouboval do zmíněných závitových vložek.



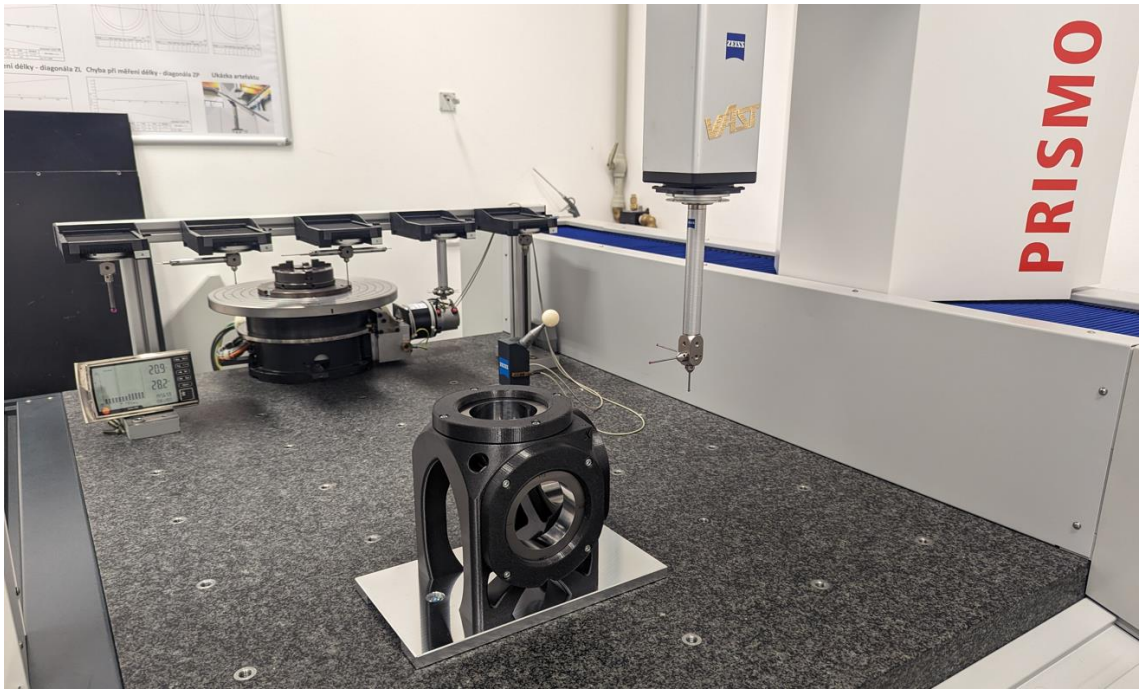
Obr. 33: Vyrobené finální artefakty

3.5.4 Výroba základových desek

Polotovary pro základové desky o rozměrech 320 x 180 x 15 milimetrů z hliníkové slitiny EN AW-7075 dodala společnost Primapol. [26]

Následovalo obrobení desek, jmenovitě frézování kapes pro manipulaci, vyvrtání děr pro šrouby určené k připevnění artefaktu k desce, potažmo celé sestavy artefaktu na lože testovaného CMM a zkosení hran desky.

Po obrobení desek jsem již mohl dokončit složení celé sestavy artefaktu. Tělesa jsem přišrouboval pomocí osmi šroubů M6x20 k základovým deskám. Pro každý artefakt byl připraven ochranný kufr s pěnovou výplní, do které jsem vyřízl negativní tvar pro uložení artefaktu. V každém kufru zároveň zůstal dostatek prostoru pro případné uložení snímací konfigurace určené k provedení periodické zkoušky. Tím byly artefakty fyzicky připravené a mohl jsem tvořit měřicí program pro reálné využití vyrobených artefaktů pro periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů.



Obr. 34: Hotový artefakt na loži CMM

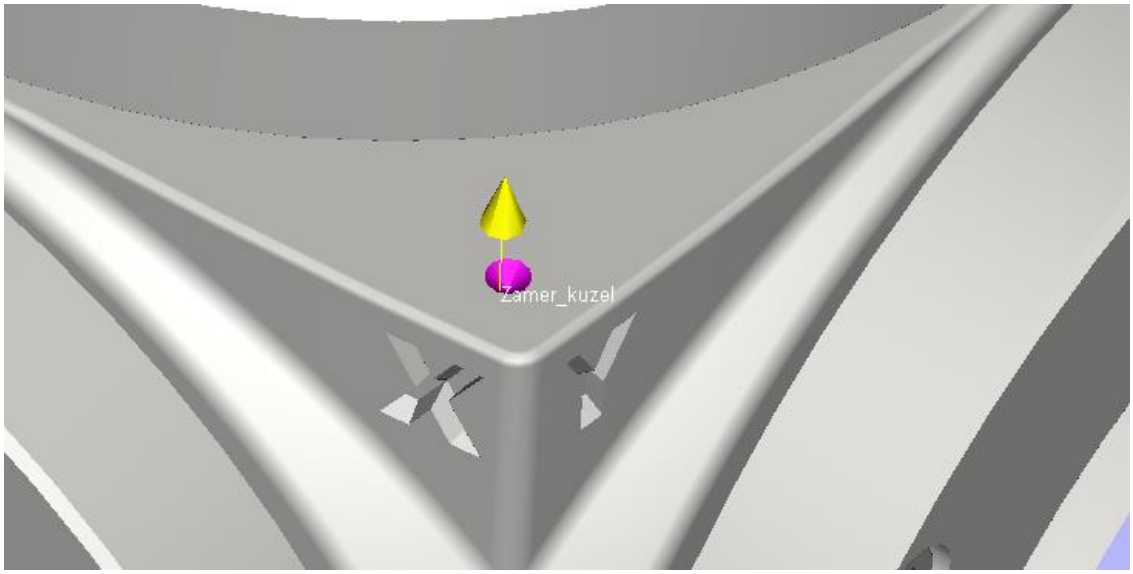
Obr. 35: Hotový artefakt uložen v ochranném kufru

4 Měřicí program pro zkušební těleso

Od měřicího programu bylo požadováno, aby byl jednoduchý, přehledný, a poskytl vypovídající informace o stavu testovaného souřadnicového měřicího stroje za přiměřený čas. Bylo tudíž nutné vytvořit program měření, který bude těmto požadavkům vyhovovat a nebude operátorům CMM komplikovat práci.

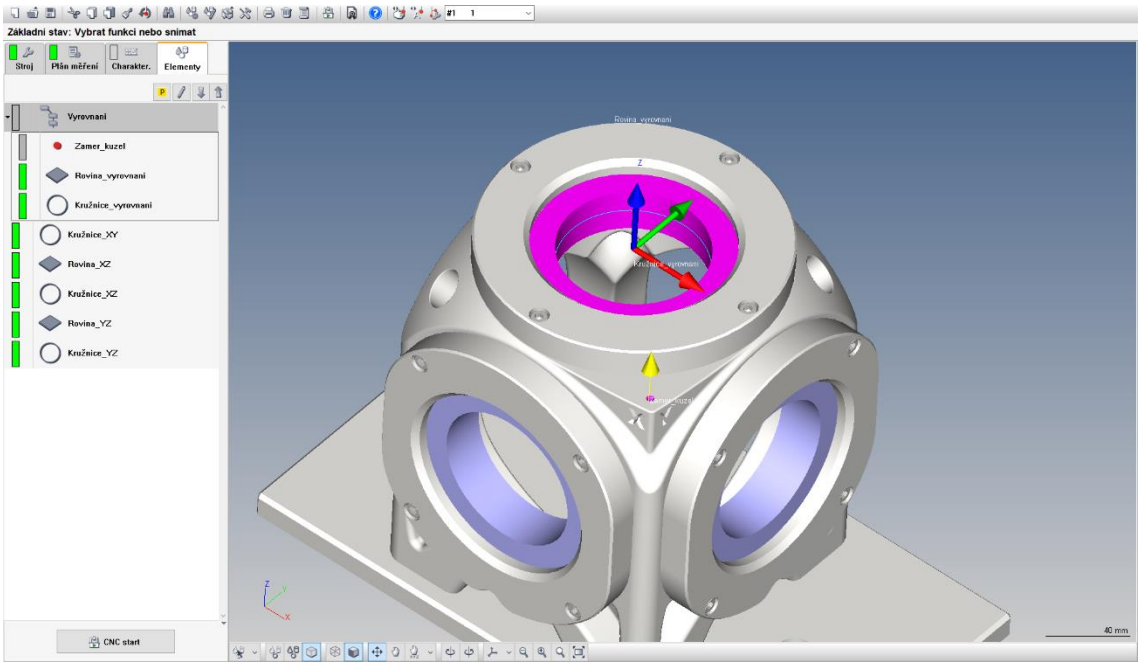
4.1 Definice souřadného systému vyrovnání

Těchto cílů jsem chtěl docílit i během startu měřicího programu, aby nemusela obsluha zdlouhavě ručně určovat vyrovnání součásti na CMM. Využil jsem tudíž prvku v podobě kuželové díry na tištěném tělese artefaktu. Tento prvek slouží jako referenční bod pro začátek měřicího programu. Jakmile operátor najede manuálně ke zmíněnému prvku a zaměří na něm bod dotykem -Z, automaticky se spustí samotný měřicí program.



Obr. 36: Referenční bod pro začátek měřicího programu

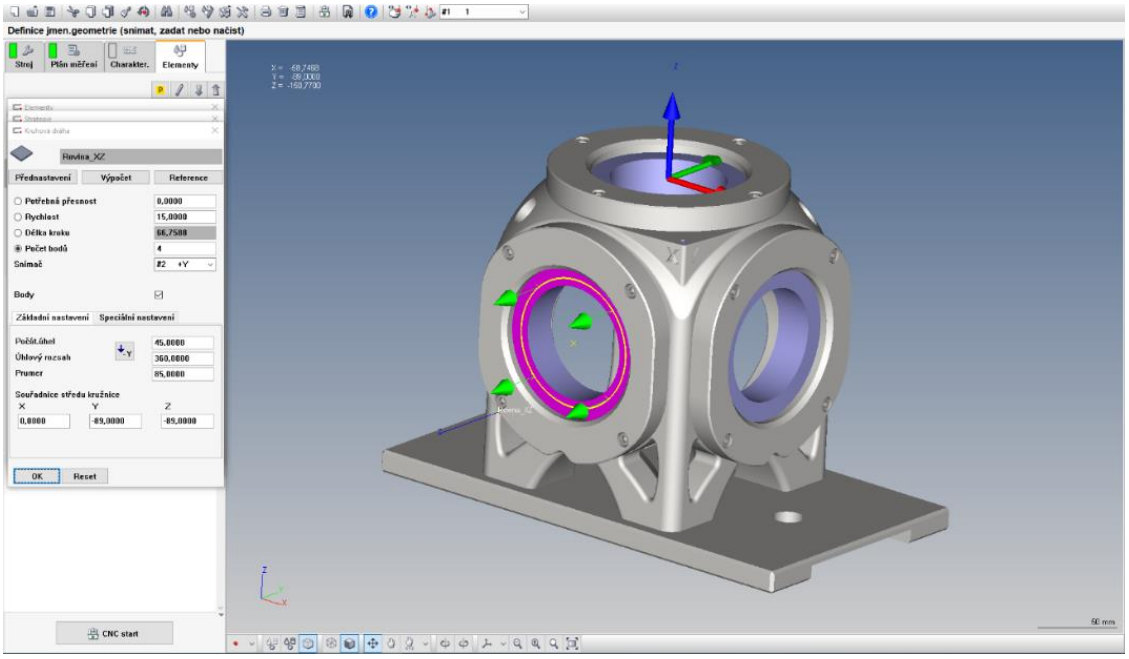
Nejprve se zaměří elementy, pomocí kterých se stanovuje lokální souřadný systém určující vyrovnání artefaktu na CMM. K vyrovnání jsem určil elementy definované na nastavovacím kroužku, jehož osa je rovnoběžná s osou Z souřadnicového měřicího stroje. Konkrétně se jedná o elementy Rovina_vyrovnani, která je definována jako rovina na horním čele nastavovacího kroužku a Kružnice_vyrovnani, která je realizována na vnitřním průměru kroužku o nominální hodnotě 75 milimetrů.



Obr. 37: Elementy určující lokální souřadný systém pro vyrovnání

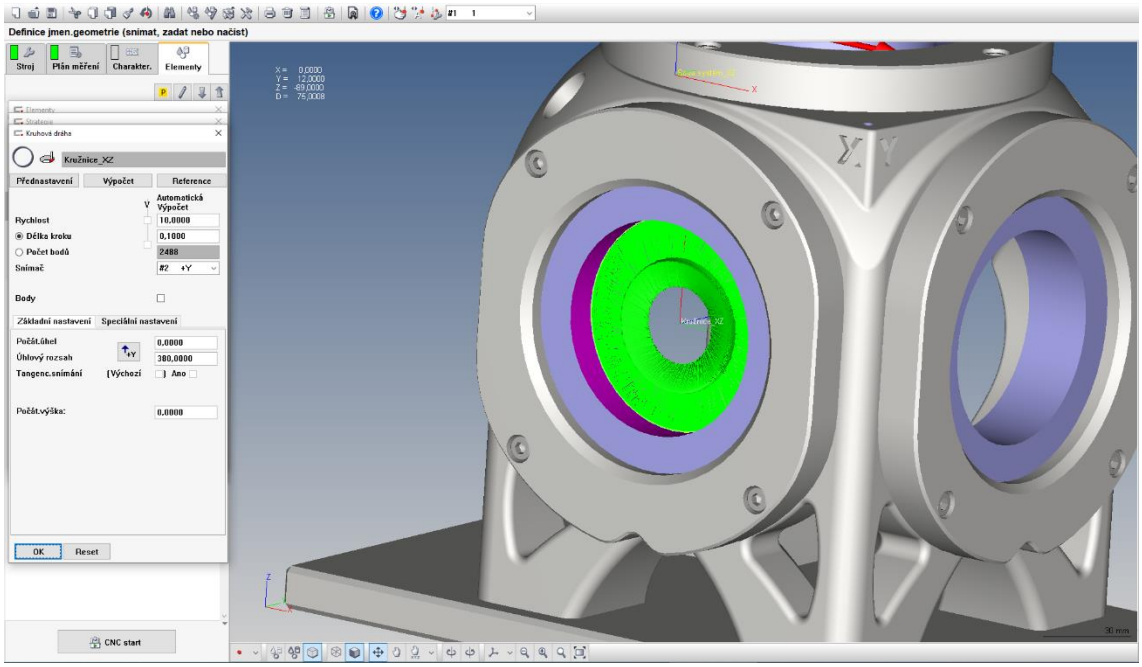
4.2 Elementy a charakteristiky

Další měřené elementy do značné míry korespondují s již zmíněnými. Pro každý kroužek se tudíž nejprve zaměří rovina a následně vnitřní průměr kroužku. Nejprve je měřena rovina, pomocí které je následně definován lokální souřadnicový systém odpovídající skutečné poloze daného kroužku. Vždy je tudíž nutné pustit celý program a nikoli pouze doměřovat jednotlivé prvky ručně.



Obr. 38: Strategie zaměření roviny

Po nasnímání roviny je zaměřena kružnice v polovině tloušťky daného nastavovacího kroužku. Z naměřených elementů se pro každý nastavovací kroužek vyhodnocují charakteristiky v podobě průměrů reprezentujících rozměr a kruhovitosti reprezentující geometrický tvar.



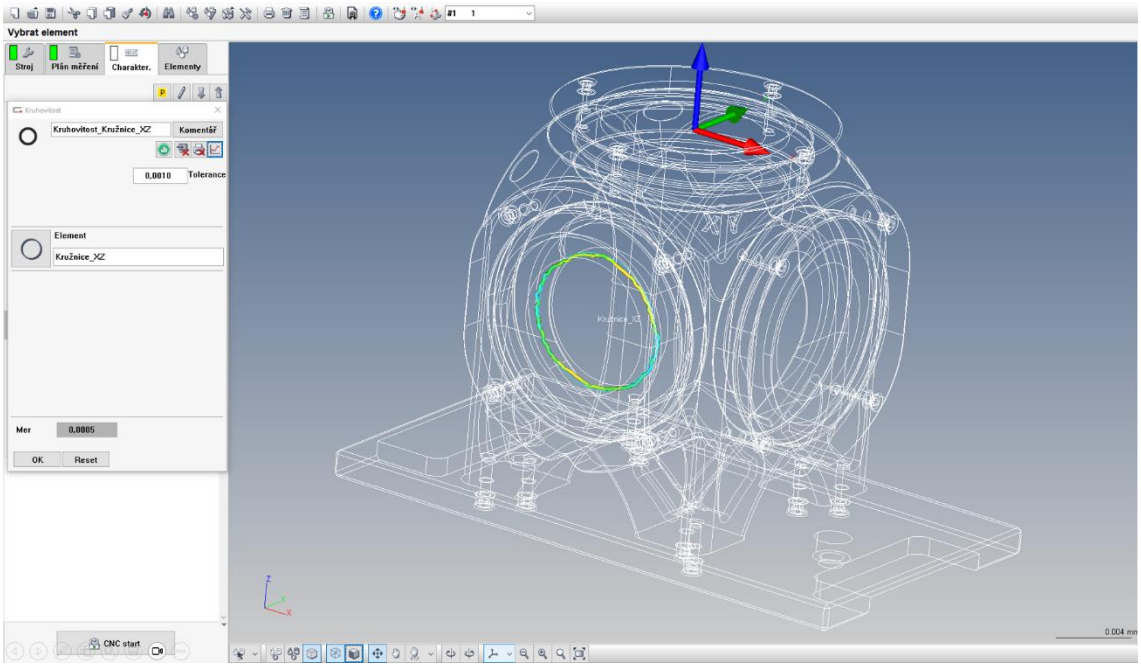
Obr. 39: Strategie měření vnitřního průměru nastavovacího kroužku

4.3 Způsoby snímání, filtrace a metody vyhodnocení

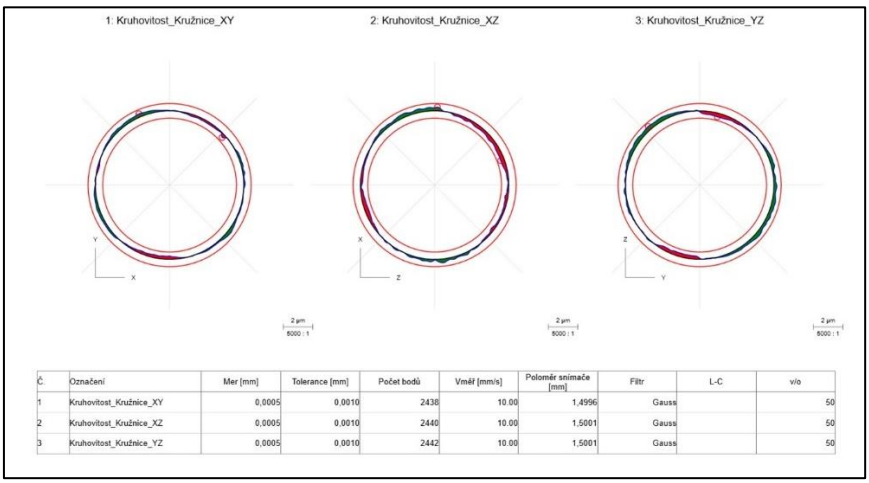
Veškeré roviny jsou snímány pomocí kruhové dráhy o čtyřech bodech se středem procházejícím osou kroužku, kdy jsou jednotlivé body od sebe pootočeny o 90 stupňů. Rychlost při měření rovin se rovná 15 mm/s. Každá ze tří kružnic XY, YZ a XZ je měřena kruhovou dráhou s rychlostí měření 10 mm/s, délkou kroku 0,1 milimetru a úhlovým rozsahem 380 stupňů. Délka kroku a úhlový rozsah odpovídá 2488 nasnímaným bodům. Pro měřené elementy jsem nedefinoval žádnou filtraci a metodu vyhodnocení jsem zvolil Element-Gauss.

Filtrace jsem následně definoval pro vyhodnocované charakteristiky. Na každém kroužku je vyhodnocovaný průměr a chyba tvaru v podobě kruhovitosti. Pro veškeré průměry i kruhovitosti jsem stanovil filtraci UPR 50 v podobě Nízkopásmového Gauss 50 filtru. Aby daná filtrace fungovala, je nutné nasnímat minimálně 350 bodů, což nastavení snímání měřených elementů dostatečně splňuje. Zároveň byla nastavena i eliminace odlehlých hodnot s faktorem odlehlých hodnot rovným třem. [27]

Pro vyhodnocované průměry jsem definoval pro porovnání dvě metody vyhodnocení. Průměr každého kroužku je tudíž separátně vyhodnocován metodou nejmenších čtverců (LSC) a metodou maximální vepsané kružnice (MIC). V případě kruhovitostí jsem specifikoval metodu vyhodnocení Element-minimum, která se pro geometrické tolerance tvaru v praxi využívá. Pro horní i dolní toleranci rozměru a toleranci kruhovitosti bylo doporučeno uživateli volit jednu polovinu MPE testovaného CMM. V neposlední řadě je do měřicího programu vložen grafický element, díky kterému je možné porovnat výsledné kruhovitosti jednotlivých kroužků.



Obr. 40: Grafické zobrazení změřené kruhovitosti



Č.	Označení	Mer [mm]	Tolerance [mm]	Počet bodů	Vměř [mm/s]	Poloměr snímače [mm]	Filtr	L-C	v/o
1	Kruhovitost_Kružnice_XY	0,0005	0,0010	2438	10.00	1,4996	Gauss		50
2	Kruhovitost_Kružnice_XZ	0,0005	0,0010	2440	10.00	1,5001	Gauss		50
3	Kruhovitost_Kružnice_YZ	0,0005	0,0010	2442	10.00	1,5001	Gauss		50

Obr. 41: Grafický element pro porovnání kruhovitostí

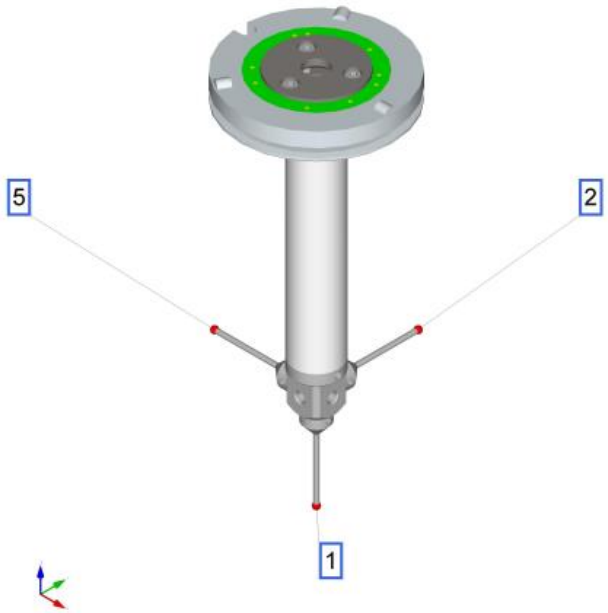
4.4 Výsledky měření v měřicím programu

Zmíněné tolerance jsou nastaveny tak, aby zobrazovaly aktuální chování testovaného CMM. Pokud vycházejí výsledky měření v tolerančních mezích, lze předpokládat, že daný souřadnicový měřicí stroj je způsobilý k měření reálných dílů ve výrobě. Nicméně pokud některá ze zkoumaných charakteristik výrazně převyšuje nastavené tolerance, lze usoudit, že není vše se strojem v pořádku a problém by se měl aktivně řešit.

4.5 Doporučená konfigurace snímacího systému

Výsledky taktéž ovlivňuje použitá konfigurace snímacího systému a vlastnosti snímačů samotných. Čím větší budou průměry použitých snímačů, tím dochází k větší mechanické filtraci. Taktéž záleží na tloušťce a materiálu dříku snímačů. Doporučuji, aby se pro zkoušku CMM pomocí navrženého artefaktu využívaly snímače s vlastnostmi, které co nejvěrněji odpovídají nejčastěji používaným snímačům pro měření reálných dílů na daném měrovém středisku. Pro měrová střediska zadavatele se jedná o průměr dotyku tři milimetry.

Je nutné, aby se použitá konfigurace snímacího systému sestávala ze snímačů v polohách 1 (-Z), 2 (+Y) a 5 (-X). Příklad doporučené snímací konfigurace je možné si prohlédnout na obrázku č. 42.



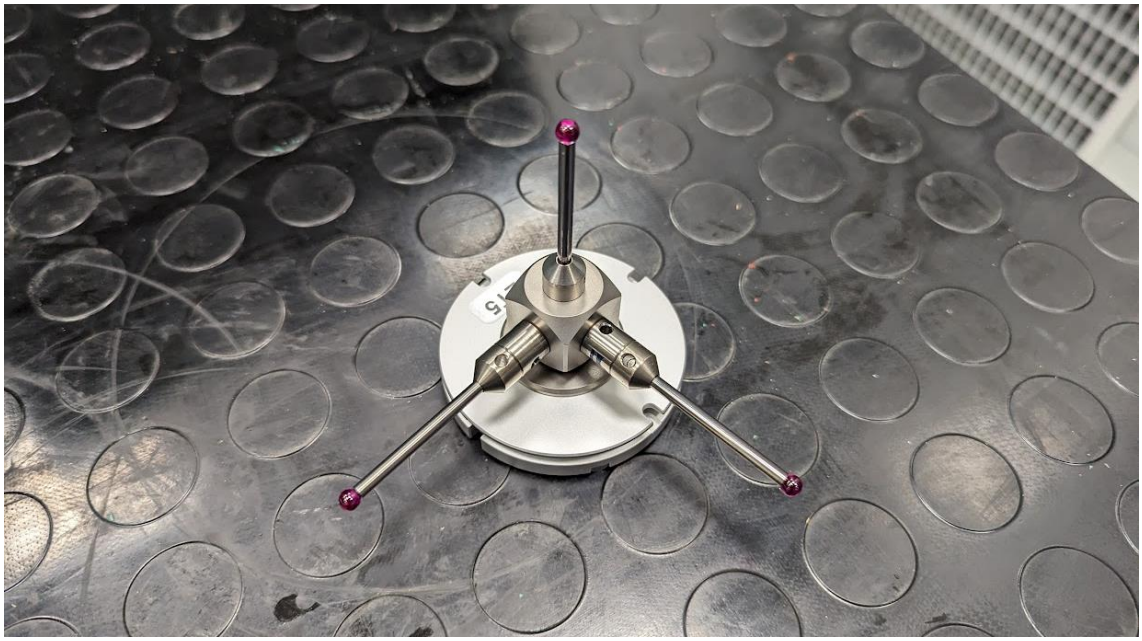
Obr. 42: Doporučená konfigurace snímacího systému

4.6 Vyhodnocení a úpravy po pilotním testování

Po realizaci byly artefakty převezeny do měrových středisek zadavatele, kde byly podrobeny pilotnímu testování. Uživatel si může upravit či přepracovat doporučené parametry a podmínky týkající se periodického zkoušení s daným artefaktem.

Pilotní testování spočívalo v porovnání naměřených výsledků při změnách jednotlivých parametrů měření. V původním programu jsem doporučil rychlost 10 mm/s. V testování byly používány dvě rychlosti, konkrétně 5 a 20 mm/s. Norma ČSN EN ISO 10360 využití různých rychlostí povoluje. Stroje se mohou při různých rychlostech chovat odlišně a použitá rychlost skenování má tedy vliv na výsledná data.

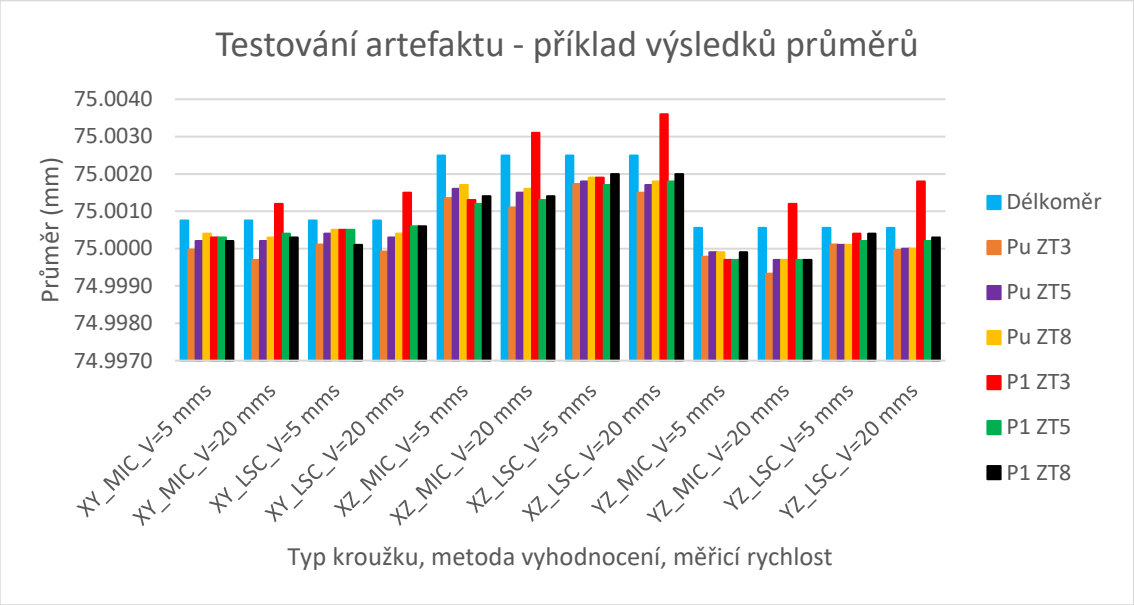
Byly testovány konfigurace snímacích systémů s různými průměry dotyků. Nejpoužívanější průměr dotyku na měrových střediscích zadavatele je roven třem milimetrům. Mimo tento průměr se ještě k testování používaly dotyky s průměry pět a osm milimetrů.



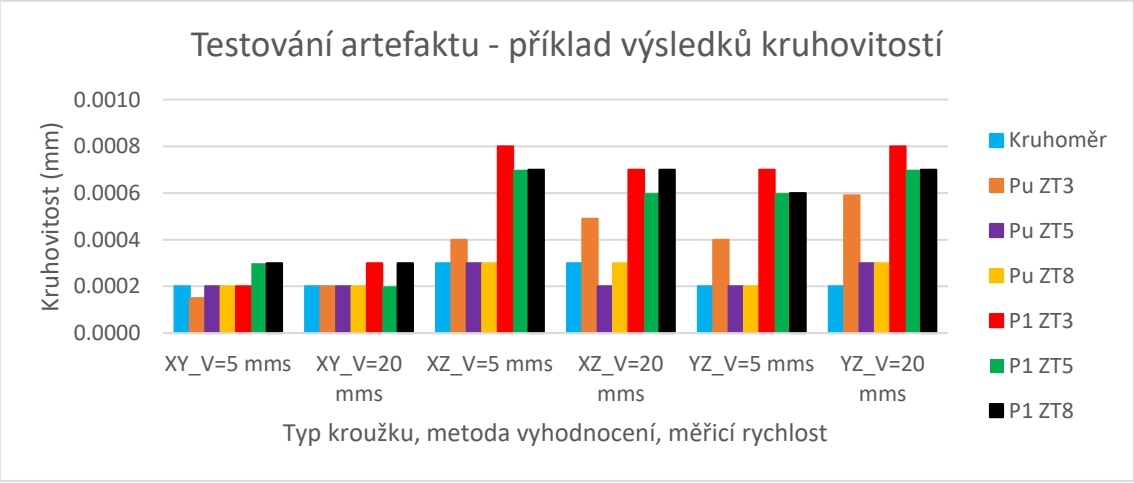
Obr. 43: Snímací systém pro testování s dotyky o průměru 5 milimetrů

Testování probíhalo na měrovém středisku na souřadnicových měřicích strojích značky ZEISS. Jmenovitě se jednalo o čtyři CMM Prismo, jeden CMM Carat a jeden CMM Prismo Ultra. Poslední jmenovaný slouží na měrovém středisku zároveň jako etalon. Jednotlivé nastavovací kroužky byly také změřeny pro referenci na délkoměru a kruhoměru.

Na grafech č. 1 a 2 jsou vyobrazeny příklady výsledků, zde konkrétně pro stroj ZEISS Prismo značený P1 doplněné o výsledky z délkoměru, kruhoměru a etalonového souřadnicového měřicího stroje Prismo Ultra značeného Pu. Ostatní testované CMM poskytovaly obdobné výsledky jako ze stroje P1 v grafech. Použité průměry dotyků pro jednotlivá měření jsou odlišeny označením ZTX, kde je X vždy nahrazeno číslem charakterizujícím hodnotu průměru snímacího dotyku v milimetrech.



Graf 1: Testování artefaktu na měrovém středisku - průměry



Graf 2: Testování artefaktu na měrovém středisku - kruhovitosti

Z grafů je patrné, že nejméně stabilní výsledky podávají snímací dotyky s průměrem tři milimetry. To lze opodstatnit faktem, že se jedná o snímací konfigurace s nejnižší mírou mechanické filtrace a nižší tuhostí způsobenou tenčími dříky. Ačkoliv se jedná

o nejpoužívanější typ dotyků na daných měrových střediscích, rozhodl se zadavatel pro využití snímacích dotyků o průměru pět milimetrů. Dotyky o tomto průměru lze považovat za jakýsi kompromis mezi tuhostí a mechanickou filtrací.

Je ovšem potřeba brát v potaz skutečnost, že nejpoužívanější průměr snímací dotyků je roven třem milimetrům. Pilotní testování odkrylo, že měření tímto dotykem disponuje určitými vlastnostmi, které se promítají do měřicích výsledků i na reálných kontrolovaných dílech. Využití snímacích dotyků se zmíněným větším průměrem pro periodickou zkoušku poskytne stabilnější výsledky a bude stále vyhovovat požadavkům popsaným v normě ČSN EN ISO 12181-2. S ohledem na tuto normu by bylo možné využít při měření kroužků s průměrem 75 milimetrů a použitém filtru UPR 50 snímací dotyky o průměru až 10 milimetrů. Takto nastavená periodická zkouška nicméně nebude zcela odpovídat procesu měření, které se na daných měrových střediscích vyskytuje v realitě nejčastěji.

Zadavatel bude využívat dvě rychlosti používané již během pilotního testování, tedy zmíněných 5 a 20 mm/s. Zvolení dvou různých rychlostí pro periodickou zkoušku je podpořeno i dříve rozebíranými normami ČSN EN ISO 10360. Pro horní a dolní toleranci rozměru a zároveň i toleranci kruhovitosti bude volit hodnotu odpovídající mezní dovolené chybě snímání MPE. Metody vyhodnocení bude využívat identické jako v původním měřicím programu pro artefakt, tedy LSC a MIC.

Tab. 4: Porovnání měřicích programů pro artefakt

Parametr	**Původní měřicí program artefaktu**	**Upravený měřicí program artefaktu**
Rychlost snímání (mm/s)	10	5/20
Průměr snímacího dotyku (mm)	Dle nejčastěji používaného dotyku na reálných dílech	5
Šířka tolerančního pole	½ MPE	MPE
Metoda vyhodnocení	LSC a MIC	LSC a MIC

5 Vliv metody výpočtu geometrických prvků na způsobilost procesu měření

Existuje mnoho strategií měření a způsobů výpočtu geometrických prvků, které významným způsobem ovlivňují získané výsledky naměřených dat a způsobilost procesu měření. Je tudíž velice důležité, aby jednotlivé plány měření reflektovaly požadavky z norem a výkresů daných kontrolovaných součástí. V následující kapitole se věnuji popsané problematice s aplikací na reálný díl.

5.1 Způsobilost procesu měření

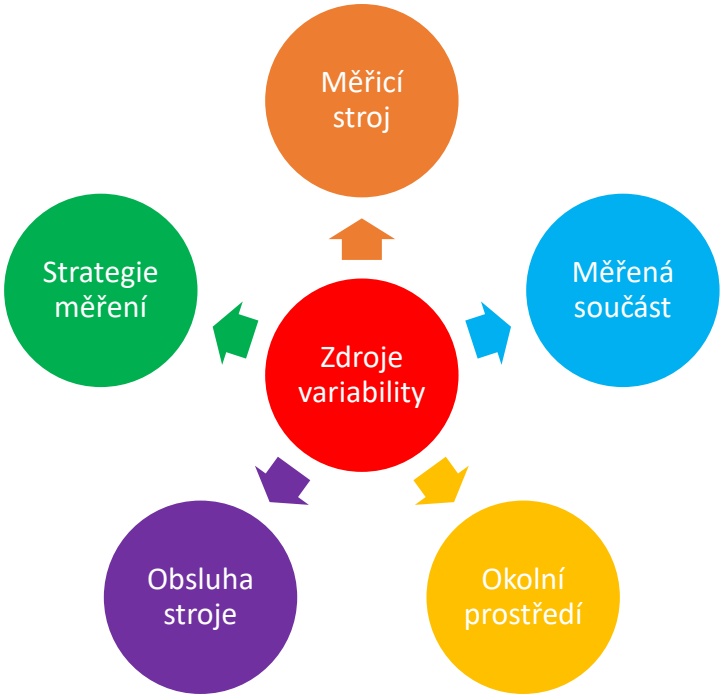
V dnešní době jsou výrobní i kontrolní procesy komplexní do takové míry, že je snahou zjednodušovat jejich hodnocení, zda splňují očekávané vlastnosti či nikoliv. Tím se zabývá mimo jiné problematika způsobilosti procesů měření. Cílem je pomocí několika číselných hodnot stanovit vliv jednotlivých zdrojů variability, které mohou ovlivňovat daný proces. Tato kritéria se využívají v průmyslu v dnešní době již téměř všude a mají významný vliv na dodavatelsko-odběratelský řetězec. Pokud daný subjekt není schopen garantovat a udržovat dostatečnou způsobilost svých procesů, nelze předpokládat, že bude dostávat zakázky od odběratelů.

Každý proces měření je ovlivněn zdroji variability, které mají významný vliv na výsledky měření. Je nutné tyto zdroje a jejich významnost poznat a sledovat, aby se zajistilo, že daný systém poskytuje adekvátní informace o výrobním systému a měřených dílech. Mezi zdroje variability systému měření patří především měřicí stroj, měřená součást, okolní prostředí, obsluha stroje či strategie měření.

V případě měřicího stroje jsou vhodným nástrojem pro zajištění způsobilosti periodické zkoušky, kterými jsem se zabýval v předchozích kapitolách. Je nutné tyto kontroly strojů pravidelně provádět. U měřených součástí mají výrazný vliv například parametry v podobě materiálu a tuhosti dílů, využívání stabilních přípravků umožňujících opakovatelné upnutí či teploty součástí a nečistot na daném díle z předcházejících výrobních operací. Nadále je potřeba zajistit stabilní a vhodné okolní prostředí. Tomu je nápomocné sledování teploty včetně jejího kolísání, hlídání teplotních gradientů a vibrací okolního prostředí či nečistoty v prostředí, které by mohly

ulpívat na měřeném díle. Operátoři obsluhující stroje by měli být řádně proškoleni, být pečliví při vyrovnávání a upínání měřených dílů a správně kvalifikovat snímací systémy.

Posledním, neméně důležitým, zdrojem variability měření je strategie měření. Je nutné vyhodnocovat charakteristiky správnými metodami výpočtů geometrických prvků, v případě skenování měřit dostatečný počet bodů, korektně filtrovat data, eliminovat odlehlé hodnoty a volit vhodné snímací systémy. Vlivem některých těchto proměnných na způsobilost procesu měření se zabývám v následujících kapitolách.



Obr. 44: Zdroje variability měření [29]

Způsobilost procesu měření pomáhá posoudit, zda je měřicí zařízení vhodné k zamýšlenému použití a poskytuje nám adekvátní výsledky měření. Zároveň poskytuje informaci o tom, zda má podnik proces měření pod kontrolou a je možné výsledkům měření důvěřovat.

Ke stanovení způsobilosti se využívají opakovaná měření na jednom referenčním kusu, který slouží jako referenční hodnota. Všechna měření musí být provedena na tomto jednom daném kusu, ale není podmínkou, že musí všechny jeho charakteristiky ležet uvnitř tolerančních polí. Existuje více možností, jak způsobilost procesu měření vyhodnocovat. Jednou z nejpoužívanějších je metodika dle německé firmy BOSCH.

Měření na daném díle se provádí standartně padesátkrát, minimálně by se mělo provést dvacet pětkrát. Z daných měření se získá rozptyl naměřených hodnot jednotlivých charakteristik s určitou variabilitou. Z těchto dat lze následně stanovit koeficient C_g za pomoci rozdílu horní (USL) a dolní toleranční meze (LSL) rovnému toleranci T, a vypočtené směrodatné odchylky s_g ze získaného souboru dat. Podmínkou splnění způsobilosti je, že je výsledný koeficient větší než 1,33. Koeficient C_g posuzuje těsnost shody opakovaných měření neboli preciznost.

Koeficient, který kromě preciznosti posuzuje i těsnost shody aritmetického průměru opakovaných měření a referenční hodnoty, se nazývá C_{gk}. Z popisu vyplývá, že C_{gk} tedy uvažuje i správnost měření, nicméně je nutné pro posuzování tohoto parametru disponovat referenční hodnotou zkoumané charakteristiky. Referenční hodnotu je možné získat pomocí přesnějšího měřicího systému, kterým může být například CMM vyšší přesnosti, než je CMM používaný k vyhodnocení způsobilosti. Pro C_{gk} se kolem referenční hodnoty vymezí pásmo 20 procent šířky tolerančního pole, a to se následně porovnává s aritmetickým průměrem opakovaných měření. Pro splnění podmínky způsobilosti musí být koeficient C_{gk} větší než 1,33. [28, 29]

Tab. 5: Koeficienty Cg a Cgk [28, 29]

Koeficient	Výpočet koeficientu	Podmínka
C_g	$C_g = \frac{0{,}2 \cdot T}{6 \cdot s_g}$	$> 1{,}33$
C_{gk}	$C_{gk} = min\left\{\frac{\bar{x} - (x_r - 0{,}1 \cdot T)}{3 \cdot s_g}; \frac{(x_r - 0{,}1 \cdot T) + \bar{x}}{3 \cdot s_g}\right\}$	$> 1{,}33$

5.2 Úpravy měřicího programu

Nejdříve bylo nutné se seznámit se zkoumaným dílem a odpovídající výkresovou dokumentací. Jednalo se o blok motoru 1.0 TSI EVO po operaci honování vložek válců z výrobního závodu zadavatele. Po prostudování výkresové dokumentace, kde jsem například procházel správnost umístění základen a vyhodnocované geometrické tolerance, jsem mohl začít procházet samotný měřicí program v softwaru Zeiss Calypso.

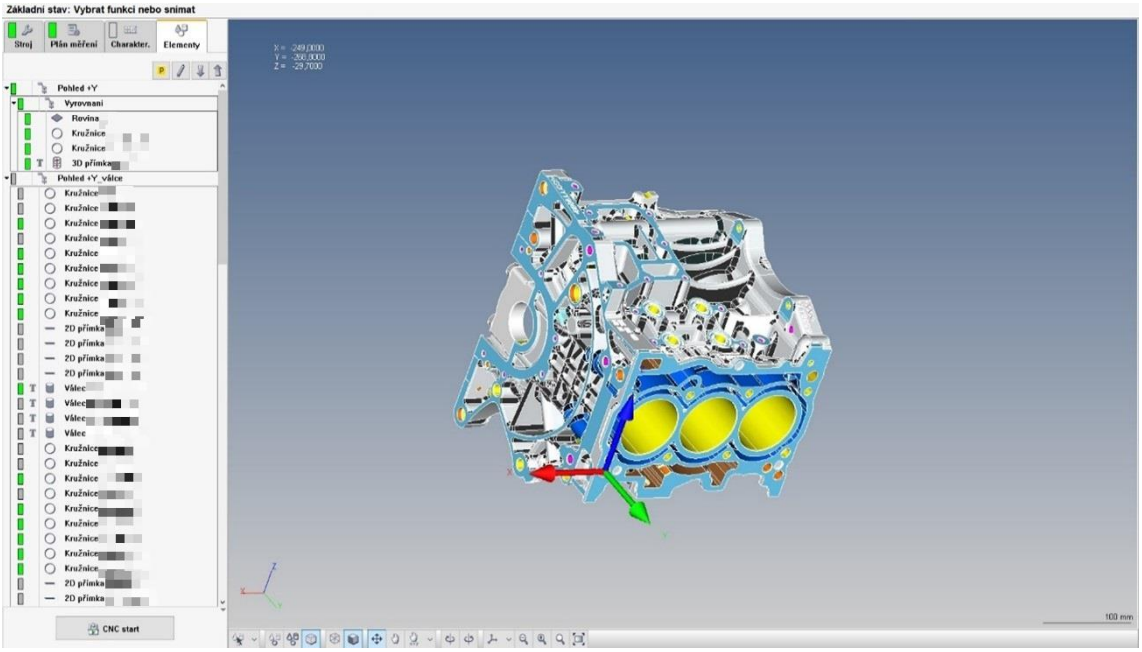
Obr. 45: Měřený díl - blok motoru 1.0 TSI EVO

Vzhledem k časové náročnosti měřicího programu by bylo složité provést 25, natož 50 opakovaných měření, jak doporučuje metodika pro zkoumání způsobilosti procesu měření dle společnosti BOSCH popsaná v kapitole 5.1. Byl tudíž zvolen kompromis mezi velikostí určitého minimálního statistického vzorku a časovou náročností v podobě provedení 10 opakovaných měření pro jednotlivé verze programu. Prvním krokem bylo provedení měření s původní verzí. Následně jsem měřicí program postupně upravoval, aby odpovídal normám ISO GPS.

Obr. 46: Postup úprav měřicího programu

5.2.1 Původní měřicí program

Již z výkresové dokumentace bylo patrné, jaké charakteristiky jsou po operaci honování vložek válců kontrolovány a pohled na měřicí program tyto domněnky potvrdil. Celkově je v programu vyhodnocováno 75 charakteristik. Rozměrové charakteristiky jsou zastoupeny vzdálenostmi jednotlivých prvků na bloku a průměry vložek válců, uloženími pro ložiska a jinými dírami. Ke geometrickým charakteristikám v daném programu patří kolmosti, rovnoběžnosti, rovinnosti či soustřednosti. V této původní verzi byly veškeré zkoumané charakteristiky vyhodnocovány metodou nejmenších čtverců.



Obr. 47: Původní měřicí program

5.2.2 Zajištění fungování nastavené filtrace

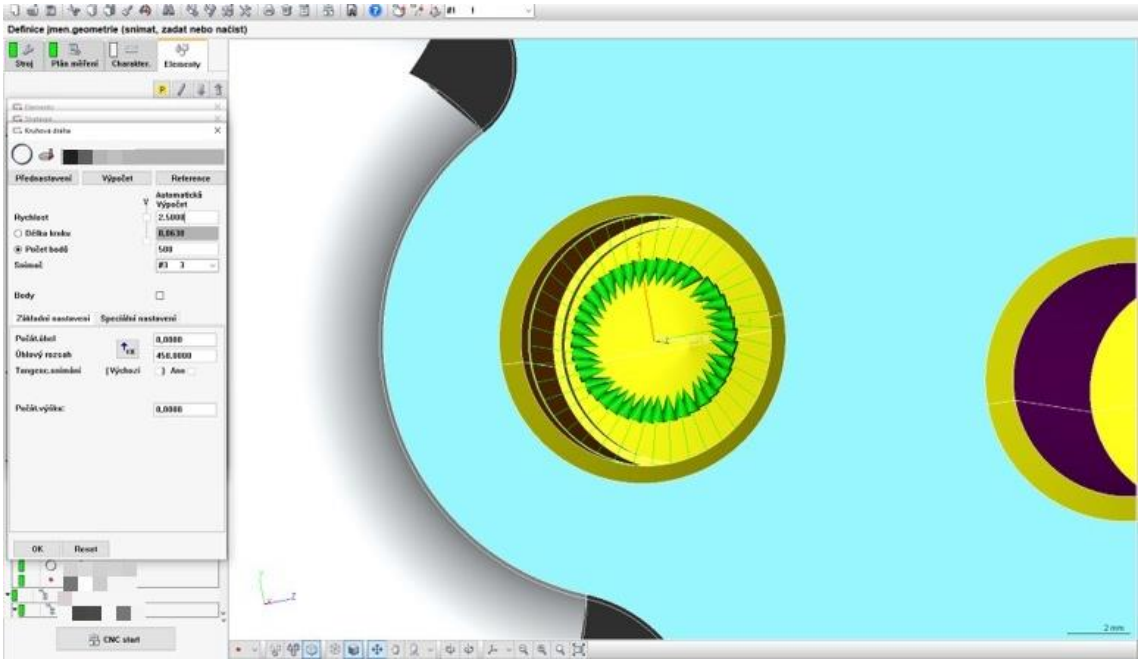
Prvním krokem bylo upravení počtů bodů tam, kde jejich počet neodpovídal nastavené filtraci. Postupně jsem procházel definované počty snímaných bodů i jejich reálného počtu z předchozích měření, abych zjistil, zda vše vyhovuje hodnotám definovaným v normách. Počet bodů u veškerých snímaných rovin vyhovoval minimálnímu počtu bodů pro použité filtrace. V případě vložek válců, kde byl nastaven filtr UPR 150, také vše vyhovovalo.

Nicméně v případě jiných vnitřních průměrů děr již mnohdy počet nasnímaných bodů nebyl dostatečný. Ačkoliv byla filtrace v programu navolená, ve skutečnosti tak nebyla funkční. Jmenovitě se jednalo díry K, L, M, N, O a P. U těchto děr jsem musel

počet nasnímaných bodů navýšit, aby odpovídal normě ČSN EN ISO 12181-2 a zvolenému filtru UPR 50.

Tab. 6: Změny počtu nasnímaných bodů pro funkčnost filtrace

Označení	Původní počet bodů	Nový počet bodů
Kružnice K	315	600
Kružnice L	315	600
Kružnice M	158	500
Kružnice N	158	500
Kružnice O	50	500
Kružnice P	50	500

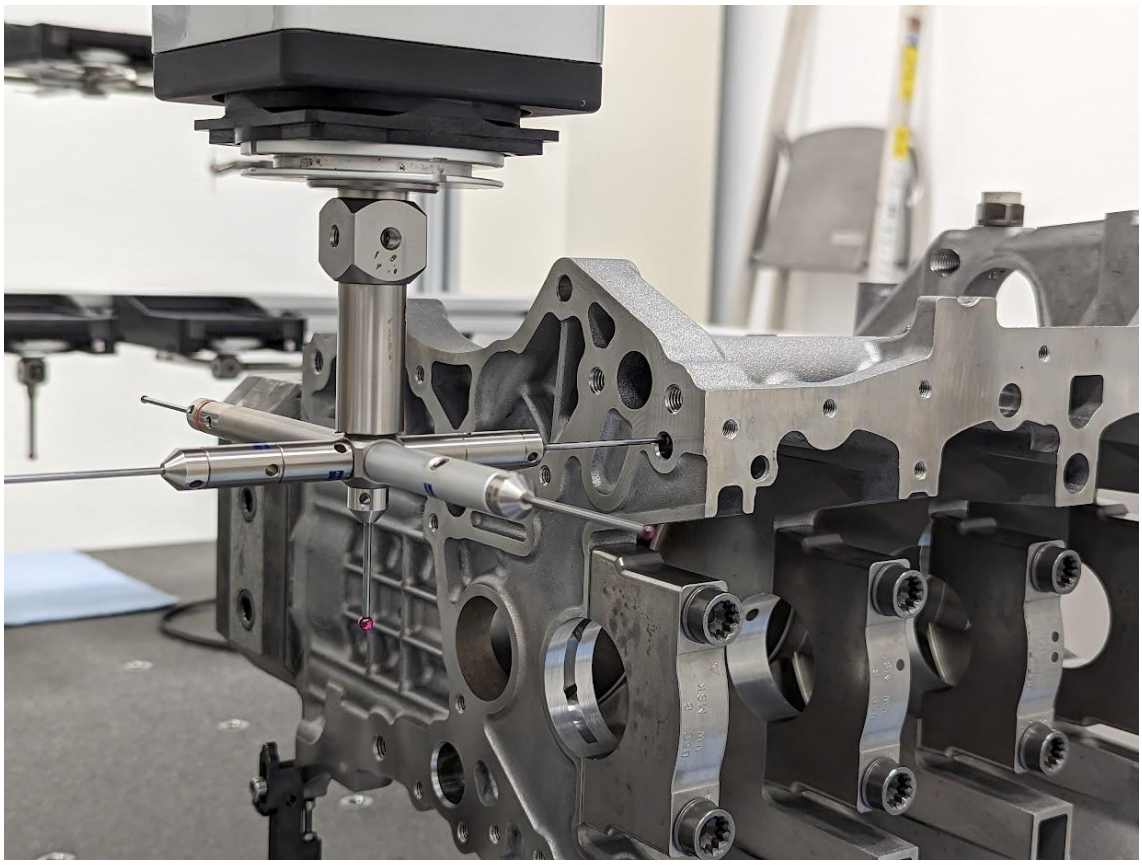


Obr. 48: Nedostatečný počet nasnímaných bodů pro funkční filtraci

Nové počty bodů jsem zvolil takové, aby s dostatečnou rezervou splnily podmínku pro fungování filtru UPR 50, tedy aby se minimální počet nasnímaných bodů rovnal 350. Úprava počtu nasnímaných bodů nemá žádný vliv na čas měření daných prvků. Celkový čas měření se tím pádem nikterak neprodlouží. Po kontrole, zda po úpravě počet bodů odpovídá požadavkům v normách, bylo provedeno dalších 10 opakovaných měření s upravenou verzí měřicího programu. U prvků a charakteristik, kde již v původní verzi měřicího programu počet nasnímaných bodů vyhovoval, jsem v této fázi úprav žádné změny neprováděl.

5.2.3 Úpravy metod vyhodnocení

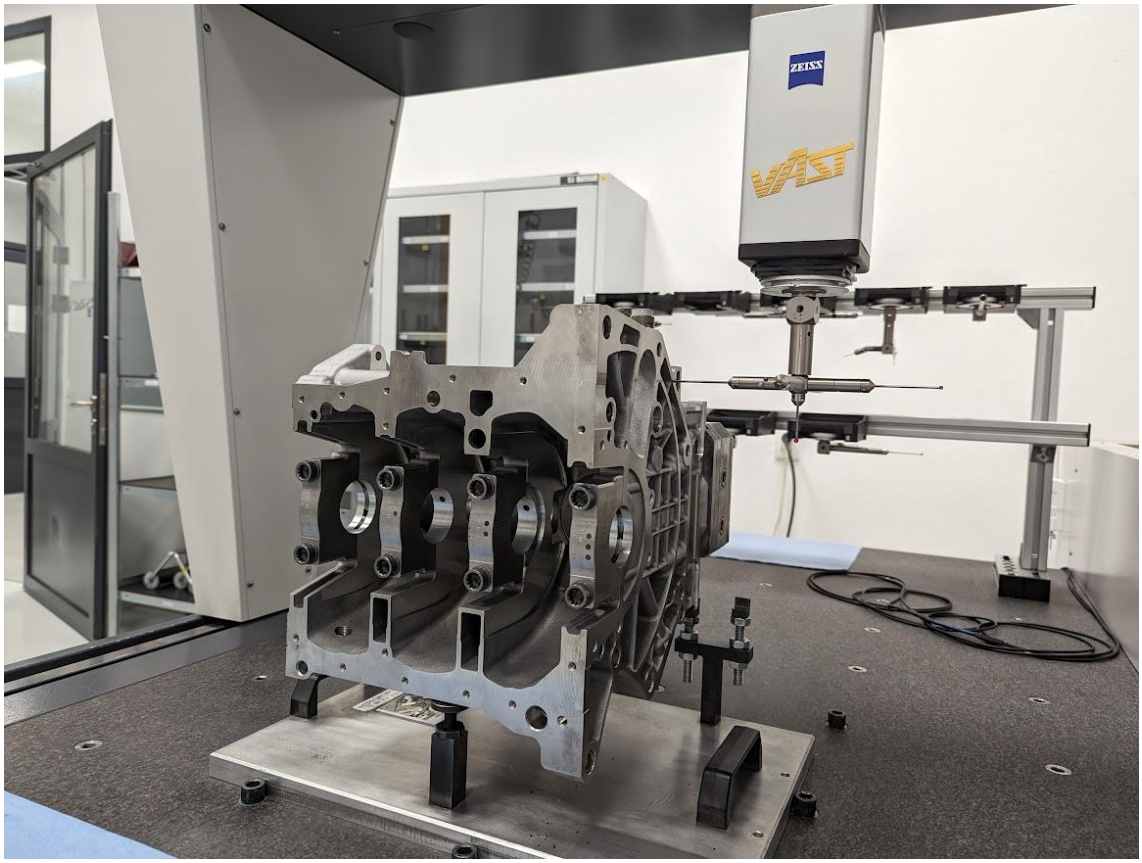
Typ metody vyhodnocení jednotlivých prvků a charakteristik může mít značný vliv na získané výsledky měření, ale i na způsobilost procesu měření. Jak jsem již zmiňoval, původní měřicí program vyhodnocuje veškeré prvky metodou nejmenších čtverců. Jedná se o výpočtovou metodu, která se v průmyslu historicky využívala nejvíce a je do dnešního dne nejvíce rozšířená. Její hlavní výhodou, oproti jiným metodám vyhodnocení, je fakt, že je velice stabilní. Proto se jedná o vhodnou metodu pro řízení a regulaci procesů ve výrobě. Její podstata výpočtu ale mnohdy způsobuje skrytí reálných geometrií daného prvku či charakteristiky na měřeném dílu. Proto není tato metoda zcela vhodná pro kontrolu funkčnosti dílu.



Obr. 49: Měření bloku motoru 1.0 TSI EVO

Existují doporučení, jaké metody výpočtu geometrických prvků používat pro funkční kontrolu dílů. Jedná se například o normy týkající se geometrických tolerancí či základen. Těmito normami jsem se řídil při úpravě metod vyhodnocení geometrických prvků na zkoumaném díle. Upravoval jsem metody vyhodnocení u jednotlivých prvků (elementů), kdy jejich metody výpočtu následně ovlivnily i vyhodnocení charakteristik.

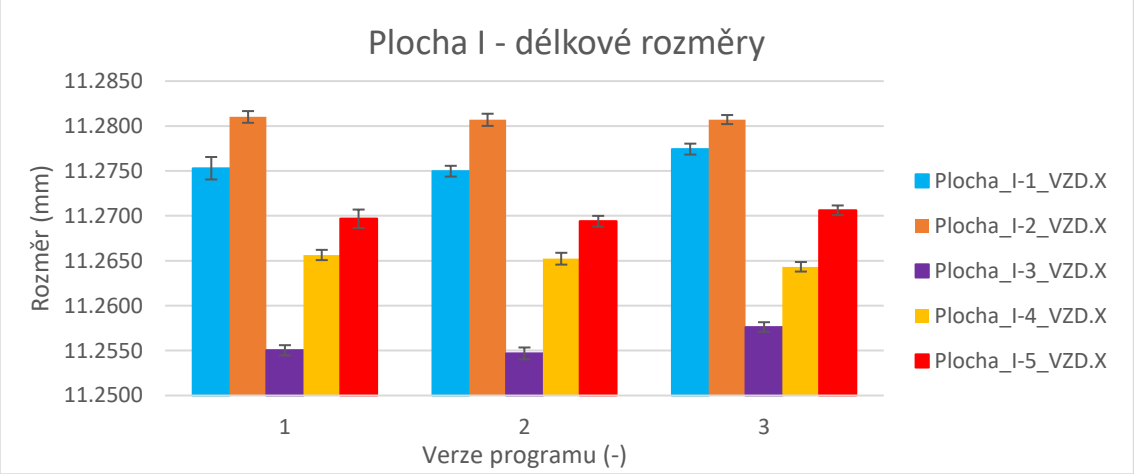
Vzhledem k charakteristice měřených prvků na dílu se nejvíce jednalo o změny vyhodnocení kružnic v dírách. S ohledem na charakter těchto prvků jsem zvolil metodu vyhodnocení v podobě metody nazvané Element-vepsaný, která zaštiťuje metodu v podobě maximální vepsané kružnice. Vyhodnocení rovin jsem dle jejich charakteru nastavil jako Element-vnější tangenciální zastupující vyhodnocené jako vnější tečné roviny. V případě následných charakteristik jsem se také řídil doporučenými metodami vyhodnocení. V případě geometrických tolerancí tvaru jsem zvolil, pokud to tak již nebylo v původním programu, vyhodnocení metodou minimální zóny. U většiny ostatních charakteristik, jakými byly například průměry, jsem si řídil mnou dříve nastavenou metodou vyhodnocení u elementů. Po následné kontrole zmíněných úprav bylo provedeno 10 finálních opakovaných měření na testovacím dílu bloku motoru. Následně jsem mohl zpracovat a vyhodnotit naměřená data ze všech třech skupin měření.



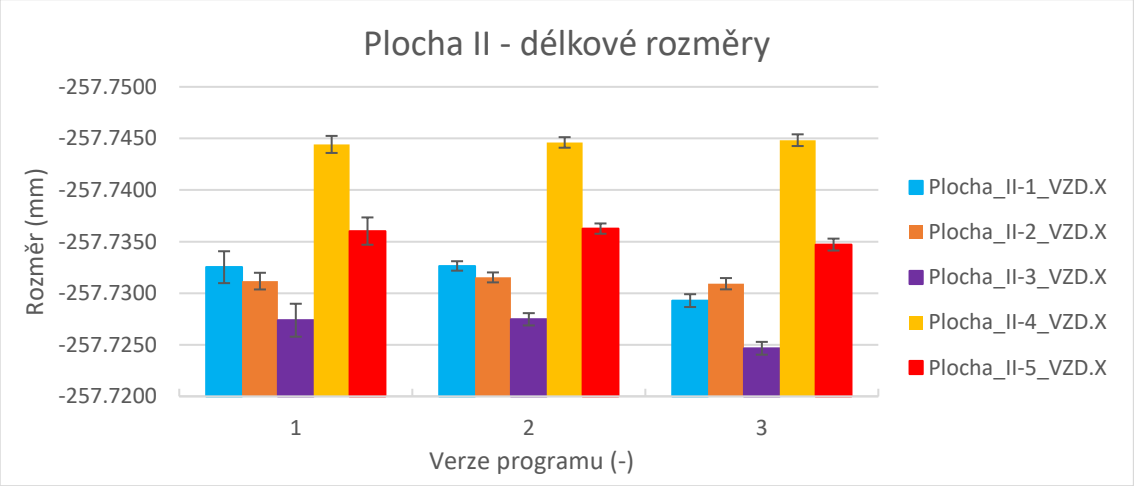
Obr. 50: Měření bloku motoru 1.0 TSI EVO

5.3 Vyhodnocení naměřených dat

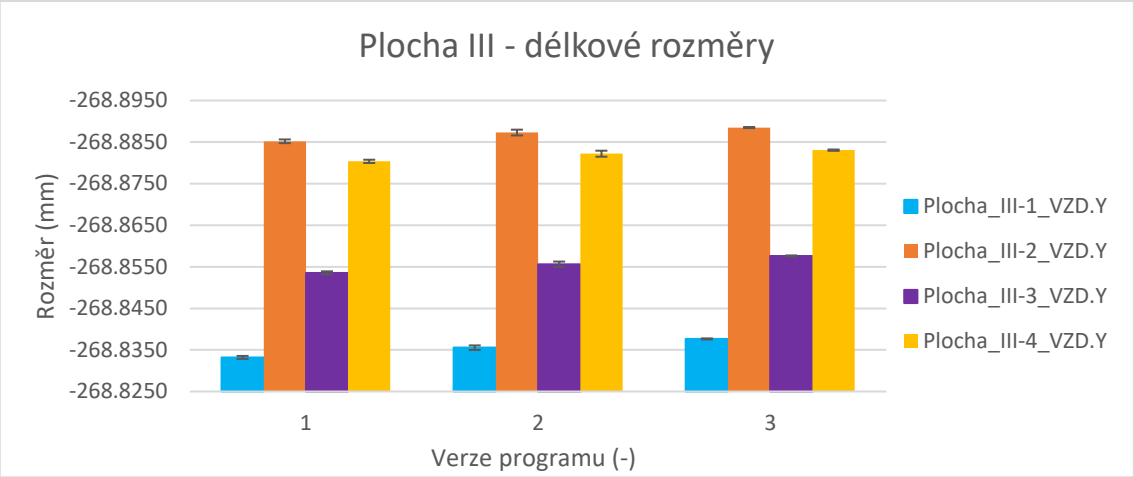
S každou verzí měřicího programu bylo provedeno 10 opakovaných měření na stejném dílu. Z těchto měření jsem následně vypočítal pro jednotlivé charakteristiky hodnotu aritmetického průměru a směrodatné odchylky. Poté jsem změny těchto statistických veličin vynesl do grafů. Každý jednotlivý graf zobrazuje výsledky týkající určité skupiny charakteristik, které jsou si podobné. Například jsou v jednom grafu délkové rozměry související s jednou konkrétní rovinou (v měřicím programu označenou jako Plocha), na které bylo prováděné měření. Ve veškerých nadcházejících grafech jsou na ose X tři body reprezentující konkrétní verze měřicích programů, pomocí kterých byly výsledky změřeny. Číslo jedna označuje původní verzi programu, číslo dva verzi s upraveným počtem snímaných bodů u některých prvků a číslo tři zaštiťuje výsledky z programu se změněnými metodami vyhodnocení.



Graf 3: Délkové rozměry - Plocha I



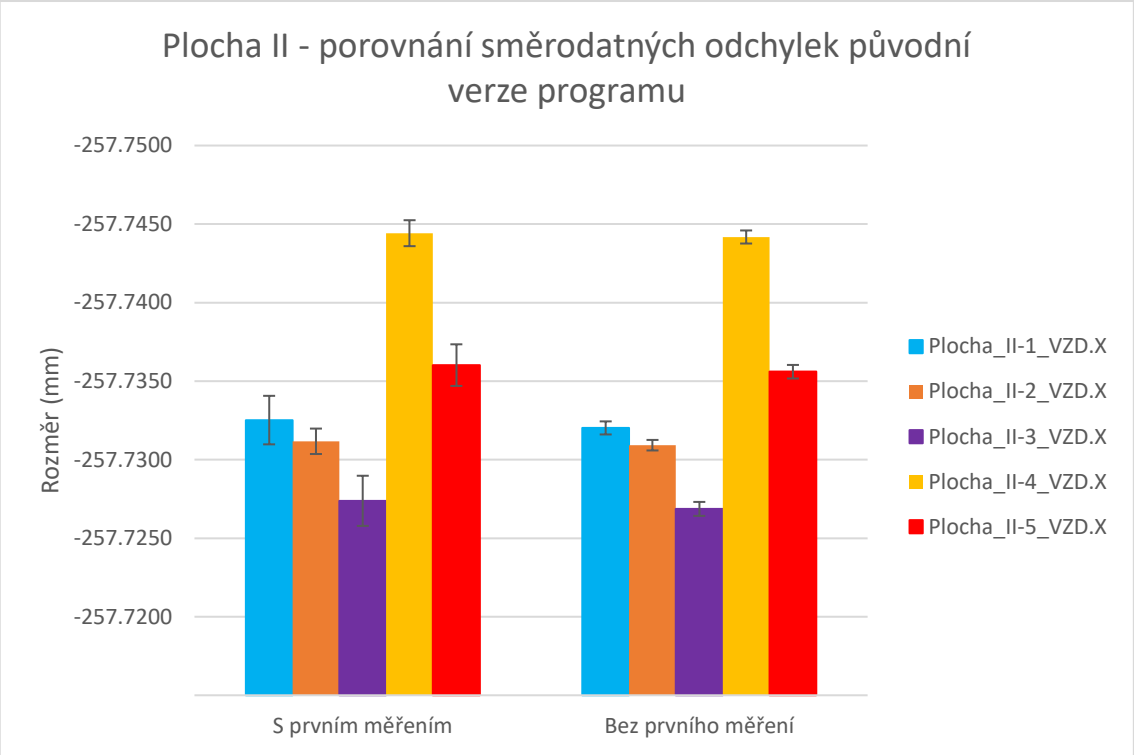
Graf 4: Délkové rozměry - Plocha II



Graf 5: Délkové rozměry - Plocha III

První skupinou výsledků jsou charakteristiky délkových rozměrů týkající se měřených rovin. Celkově se jedná o tři roviny Plocha I, Plocha II a Plocha III. Veškeré délkové rozměry byly ovlivněny až změnou metod vyhodnocení. A grafy Plocha I a Plocha II tuto skutečnost potvrzují, kdy se rozměry jednotlivých délkových charakteristik výrazněji mění až ve třetí fázi. U Plochy III se rozměry mění již při druhé fázi. Z naměřených dat pro tuto plochu vyplynulo, že se po pěti měřeních ve druhé fázi veškeré rozměry zvětšily v průměru o jeden až dva mikrometry. Tato skutečnost pravděpodobně způsobena nuceným přerušením po pěti opakovaných měření, kdy musel být zkušební díl odstraněn z přípravku kvůli nutnosti měření dílů z výroby. Poté byl díl znovu upnut do přípravku a provedena zbývajících pětice měření. Tím byly ovlivněny výsledky týkající se Plochy III i v případě způsobilosti.

Z grafů č. 3 a 4 lze taktéž vyčíst, že směrodatné odchylky zobrazené v podobě chybových úseček jsou zpravidla největší u měření s původním programem. Tento fakt jsem mimo jiné konzultoval s operátorem provádějícím daná měření. Operátor to odůvodnil tím, že stroj nebyl pravděpodobně v předchozí směně používán a tím mohlo být ovlivněno první prováděné měření po nečinnosti stroje. První měření mohlo být dle mého názoru ovlivněno i nečistotou na měřeném díle či snímacím dotyku. Naměřená data prozrazují, že první měření s původním programem mnohdy vykazuje odlišné výsledky o pět až šest mikrometrů. V následujícím grafu č. 6 je možné si prohlédnout porovnání měření s první verzí programu pro délkové rozměry Plochy II. První pětice zobrazuje data pro všech 10 opakovaných měření, druhá pětice nebere v potaz první opakované měření, v kterém se hodnoty oproti zbytku více odlišovaly.

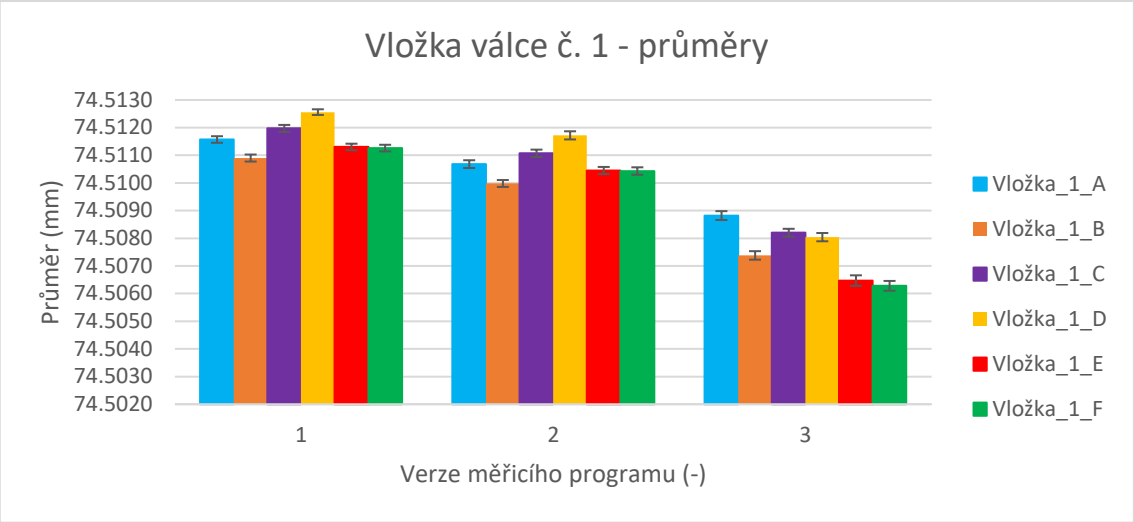


Graf 6: Porovnání směrodatných odchylek - Plocha II

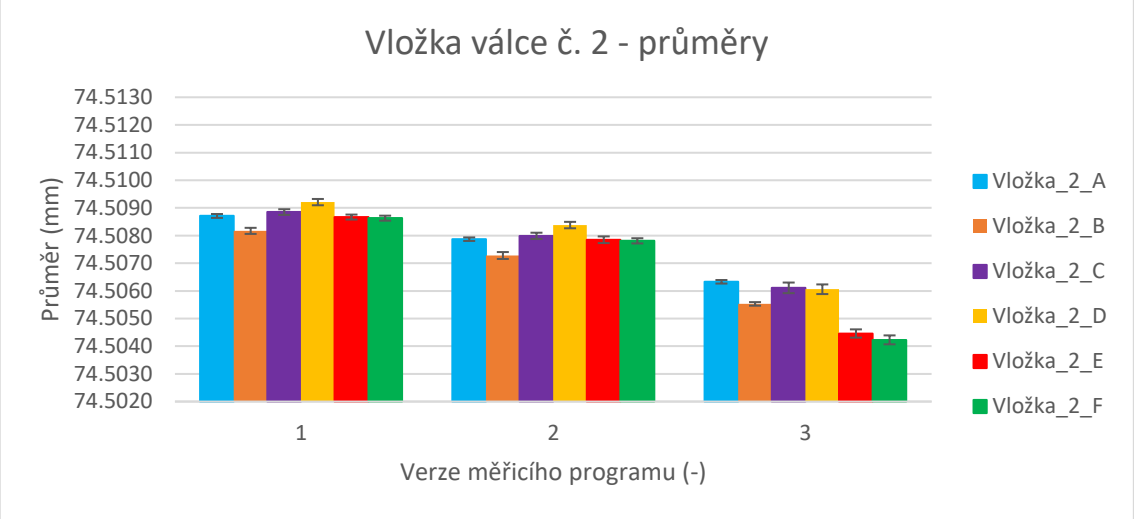
Z grafu vyplývá, že první měření prováděné s původním měřicím programem ovlivňuje do značné míry velikost směrodatné odchylky, která je zobrazena v podobě chybových úseček. Pokud by se do vyhodnocení nezahrnuly výsledky z tohoto prvního měření, průměrná směrodatná odchylka z pěti rozměrových charakteristik týkajících se Plochy II by klesla na třetinovou úroveň, konkrétně z 0,0012 na 0,0004 milimetru. V dalším vyhodnocování naměřených dat a způsobilosti jsem se nicméně rozhodl využívat všech 10 opakovaných měření z původního programu, aby byl zachován ucelený pohled na zjištěné výsledky a možné zdroje variability měření.

Další skupinou zkoumaných charakteristik rozměru byly průměry vložek válců. Stejně jako v předchozím případě nebyly tyto charakteristiky ovlivněny změnou počtů nasnímaných bodů. Jedná se u průměry měřené ve vybraných hloubkách v každé vložce. Jednotlivé hloubky jsou uznačeny jako A, B, C, D, E a F.

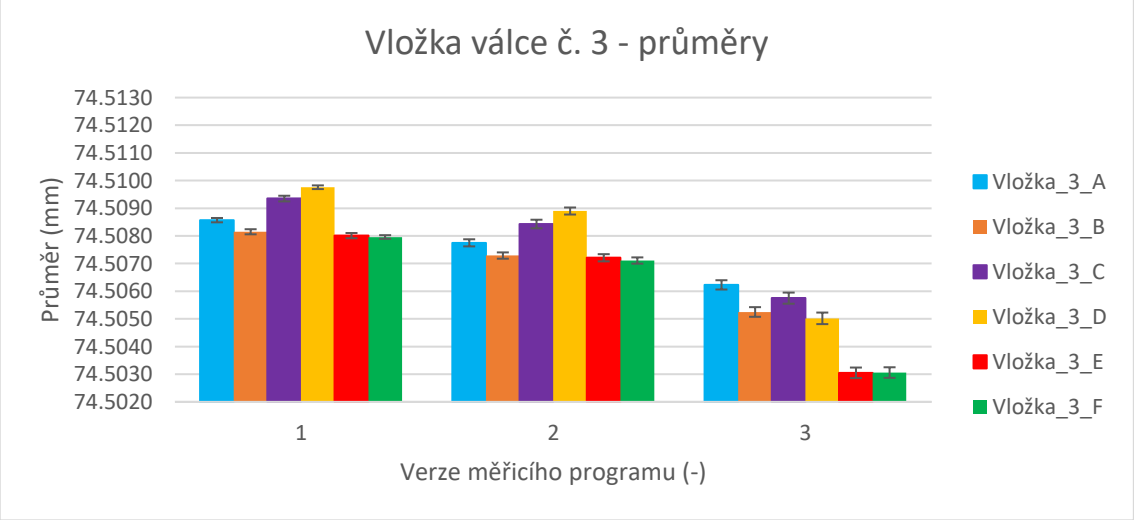
U všech třech grafů charakterizuje stejná barva vždy jednu danou konkrétní hloubku, je tak možné sledovat chování změn hodnot průměrů v konkrétní hloubce pro každou vložku válce.



Graf 7: Průměry ve vložce válce č. 1



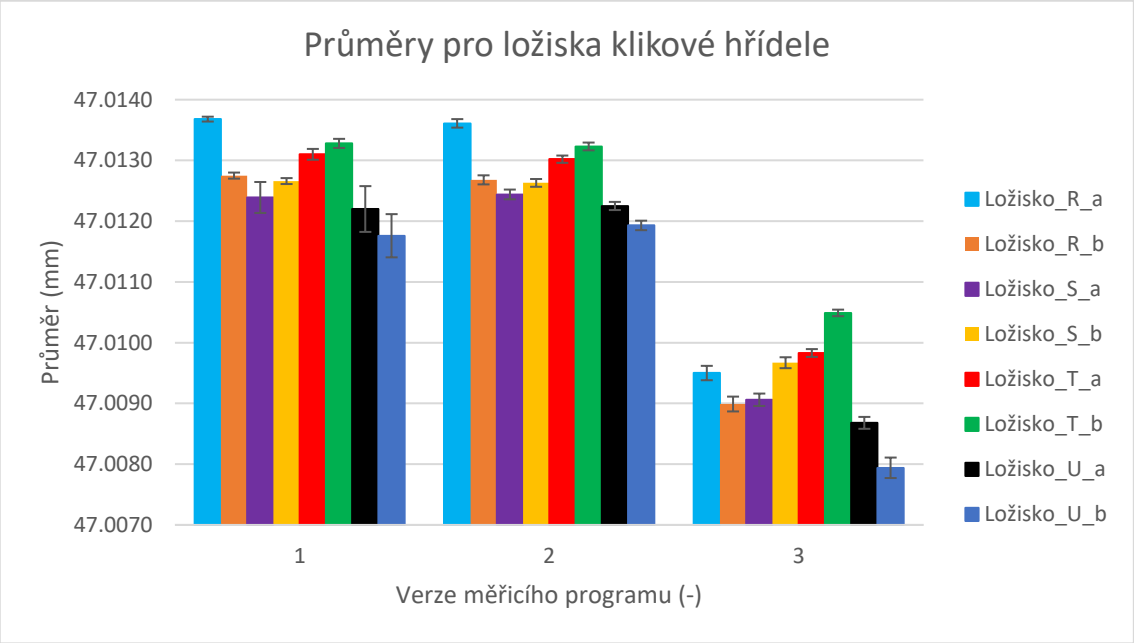
Graf 8: Průměry ve vložce válce č. 2



Graf 9: Průměry ve vložce válce č. 3

Ačkoliv nebyla první a druhá skupina měření nijak pozměněna, je z grafů č. 7, 8 a 9 patrné, že se hodnoty průměrů zmenšily až o jeden mikrometr. Vzhledem k faktu, že se tak stalo u všech tří vložek, tuto skutečnost mohlo ovlivnit například upevnění dílu do měřicího přípravku. Šířka tolerančního pásma těchto charakteristik je nicméně rovna 20 mikrometrům. Tato změna mezi měřeními tudíž nemá velký vliv na výsledky. Po změně metod vyhodnocení se hodnoty dle předpokladu dále snížily, a to o dva až čtyři mikrometry. Lze si také povšimnout při porovnání jednotlivých grafů mezi sebou, že průměry měřené ve stejných hloubkách u různých vložek vykazovaly obdobné chování. Jmenovitě například dvojice průměrů měřených v největších hloubkách E a F měly ve všech případech nejnižší konečné hodnoty po veškerých úpravách v měřicím programu. Naopak průměry ve hloubce D měly u všech vložek při měření původním programem a po úpravách počtu snímaných bodů nejvyšší střední hodnotu průměru. Nejméně byla změnou metody vyhodnocení ovlivněna hodnota v počáteční měřené hloubce devět milimetrů.

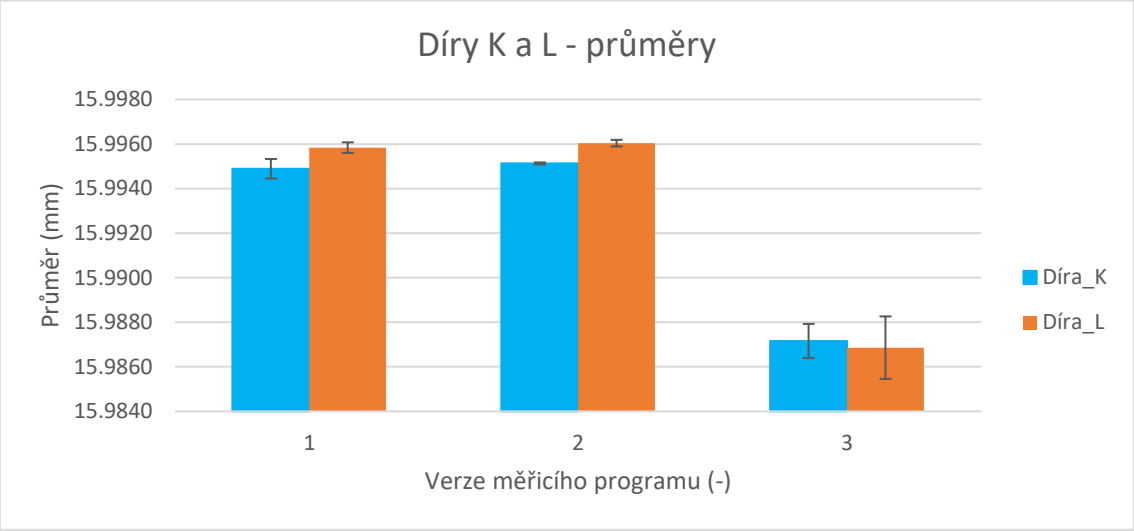
Zkoumání změn rozměrových charakteristik průměru se věnuji i v následujícím příkladu. Jedná se o vyhodnocení hodnoty průměrů uložení pro ložiska klikové hřídele. Jsou to čtyři místa uložení, v každém místě jsou měřeny dva průměry označované písmeny a a b. Celkově je tedy měřeno osm průměrů, jejichž vývoj jsem shrnul v následujícím grafu č. 10.



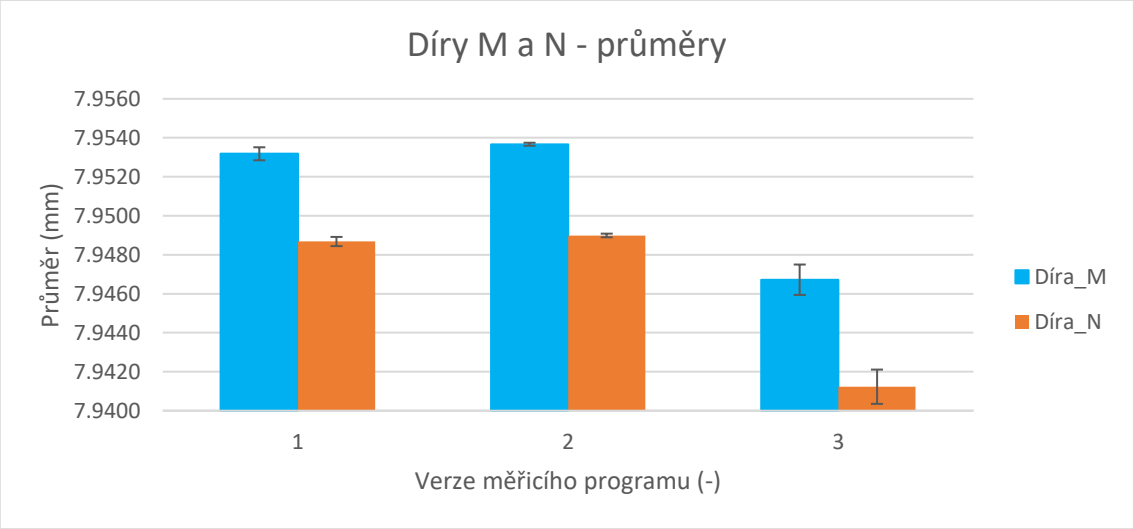
Graf 10: Průměry pro ložiska klikové hřídele

Naměřená data se chovají dle předběžných očekávání. U první a druhé sady měření jsou změny ve výsledných hodnotách zanedbatelné. Výraznější změny lze pozorovat po změně metody vyhodnocení z LSC na MIC, kdy se naměřené hodnoty průměrů snížily o dva až čtyři mikrometry.

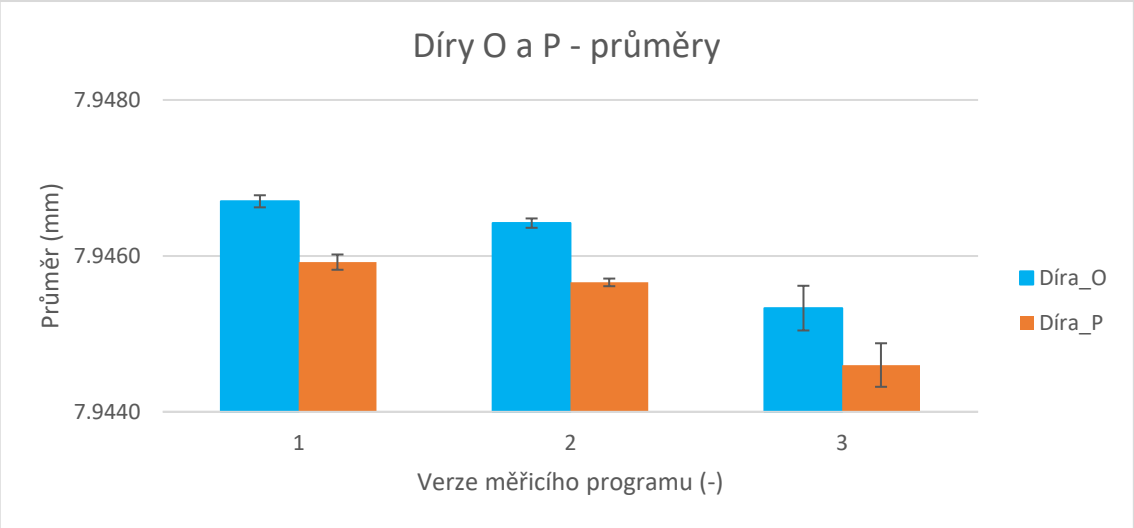
V neposlední řadě jsem se věnoval charakteristikám v podobě vnitřních průměrů děr, u kterých přecházelo změnám metod vyhodnocení navýšení počtu snímaných bodů. Původní počet snímaných bodů na těchto geometrických prvcích nebyl dostatečný vzhledem ke zvolenému typu filtrace. Jednalo se o díry charakterizované kružnicemi popisovanými v tabulce č. 6.



Graf 11: Průměry děr K a L



Graf 12: Průměry děr M a N



Graf 13: Průměry děr O a P

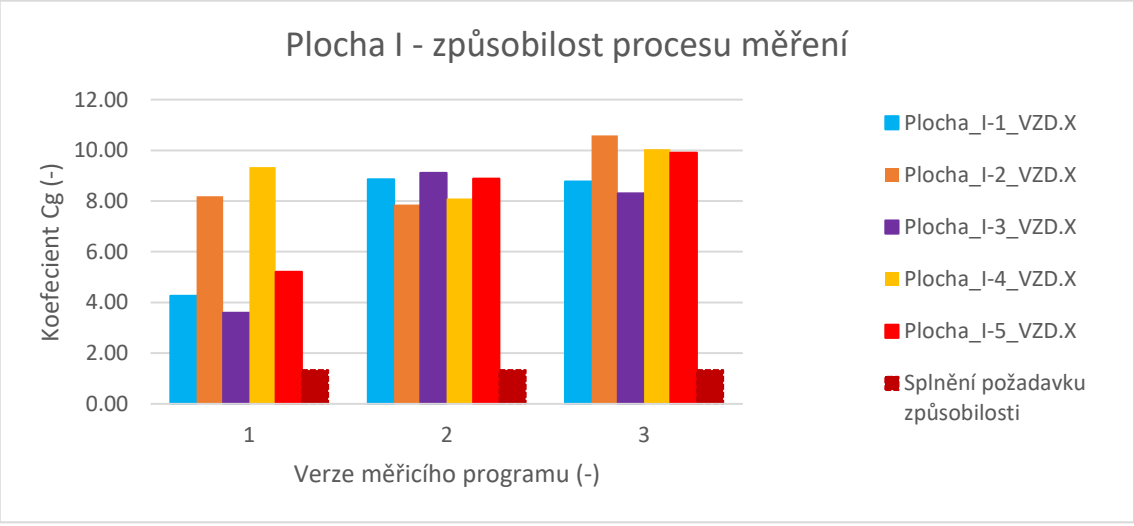
Průběh vývoje měřených dat v závislosti na fázi měřicího programu je velice podobný jako v předchozích případech měření průměrů. Ačkoliv se změnil počet měřených bodů mezi první a druhou verzí, tak vlivem stabilní metody vyhodnocení v podobě LSC byly změny středních hodnot průměrů zanedbatelné. Vlivem funkční filtrace po změně počtu měřených bodů se lehce snížila směrodatná odchylka, následně se však zvýšila kvůli změně metody vyhodnocení. Tyto změny velikosti směrodatné odchylky měly vliv na výsledný koeficient způsobilosti C_g. Po změně metody vyhodnocení se nejvýrazněji změnily hodnoty průměrů u děr M a N. Snížily se až o osm mikrometrů.

Celkově z naměřených dat vyplývá, že při změně metody vyhodnocení se změní i výsledné hodnoty zkoumaných charakteristik. Tato změna zjištěných rozměrů může vytvořit problém, pokud jsou výsledky navázány v systému například na regulaci procesů. V takovém případě se jedná o významnou změnu, protože se aplikací změn metod vyhodnocení přeruší vazba na v minulosti změřená data. Zadavatel tedy stojí před rozhodnutím, zda se ve prospěch užívání metod vyhodnocení definovaných dle stávajících norem vzdát návaznosti na historickou databázi dříve naměřených dat.

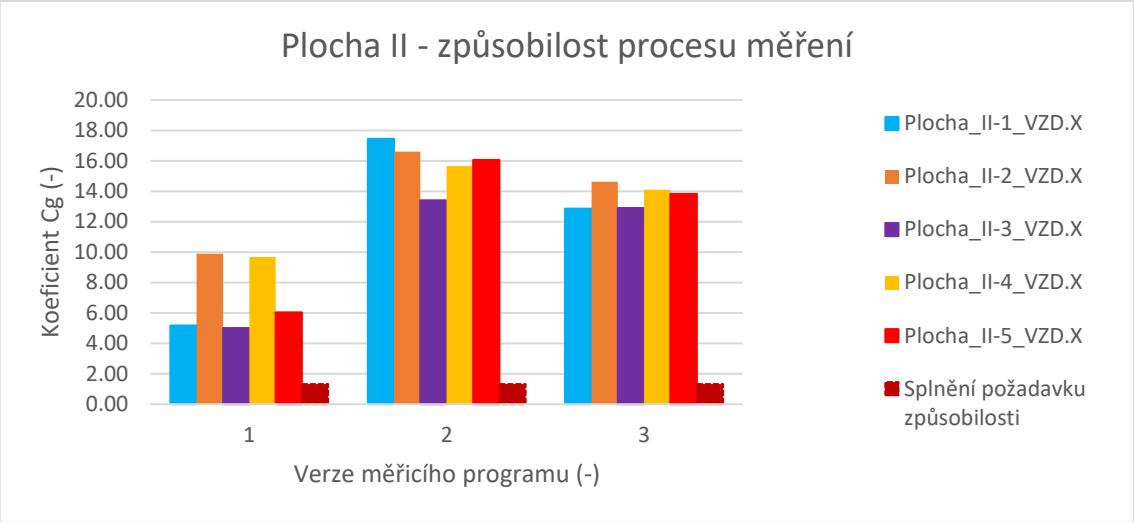
5.4 Vyhodnocení způsobilosti procesu měření

Po analýze naměřených dat a zhodnocení účinků změn na výsledně hodnoty těchto dat jsem mohl vyhodnotit způsobilost procesů měření pro jednotlivé rozměrové charakteristiky. Následující grafy jsem koncipoval obdobným způsobem jako v případě vyhodnocení naměřených dat. Na ose X jsou jednotlivé verze úprav měřicího programu. Původní verze je označena číslem jedna, verze s upraveným počtem bodů číslem dva a finální verze se změněnými metodami vyhodnocení číslem tři. V každém je taktéž vyznačena hranice splnění podmínky velikosti koeficientu C_g dle metodiky společnosti BOSCH rovna 1,33. Touto metodikou jsem vypočítal veškeré koeficienty. Koeficient C_{gk} nebylo možné z důvodu absence referenčních hodnot vypočítat.

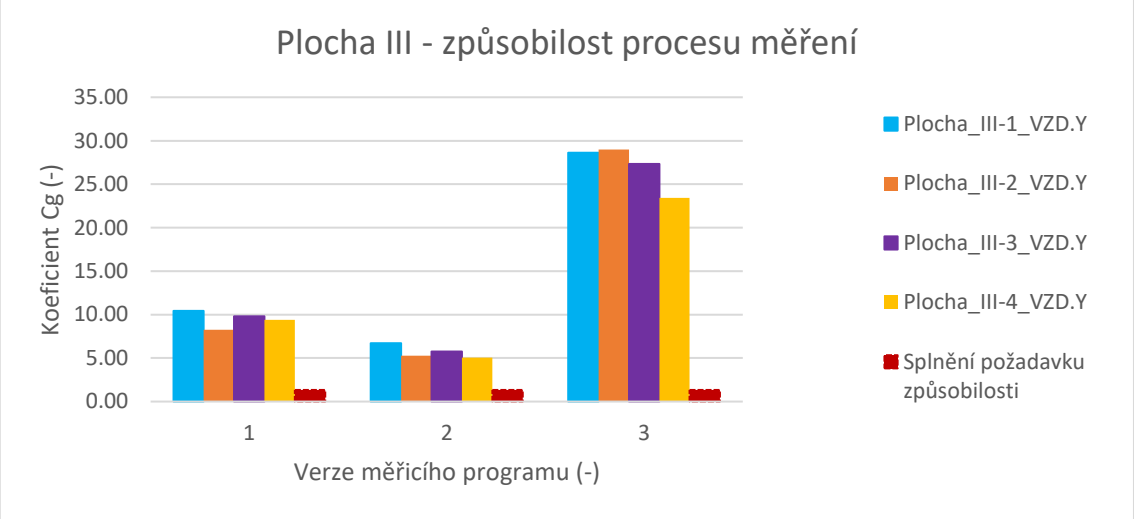
Veškeré charakteristiky týkající se měřených rovin splnily podmínku způsobilosti procesu měření. Nicméně ačkoliv se teoreticky hodnoty způsobilosti mezi první a druhou verzí měřicího plánu neměly měnit, ve skutečnosti se měnily. V některých případech i o více něž 10 bodů. Variabilitu výsledků, která ovlivnila způsobilosti, mohly měnit různé zdroje popsané v kapitole 5.1. Jmenovitě se mohlo jednat o nečistoty na snímacích dotykách či na samotném měřeném díle, dále například vyrovnání a upevnění měřeného dílu na loži CMM. V případě roviny Plocha III byly nejnižší koeficienty způsobilosti v prostřední, druhé verzi měřicího programu. Důvodem je dříve zmíněná změna změřených rozměrů o jeden až dva mikrometry po pátém měření. Kdyby bylo provedeno více něž 10 opakovaných měření, ideálně doporučovaných 25 či 50, tento náhlý skok ve výsledcích by neměl tak významný vliv na snížení koeficientu způsobilost C_g.



Graf 14: Způsobilost procesu měření - Plocha I



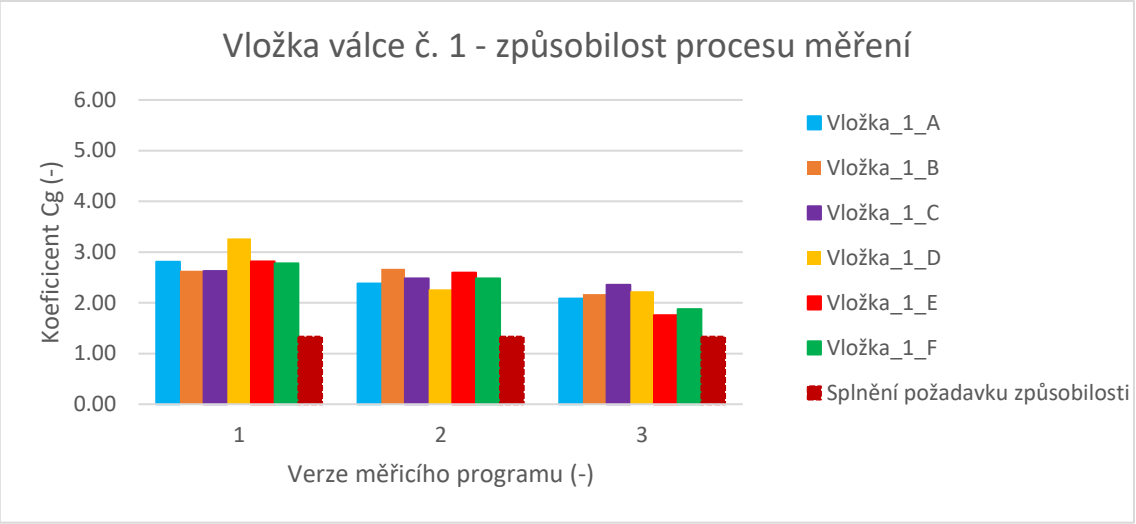
Graf 15: Způsobilost procesu měření - Plocha II



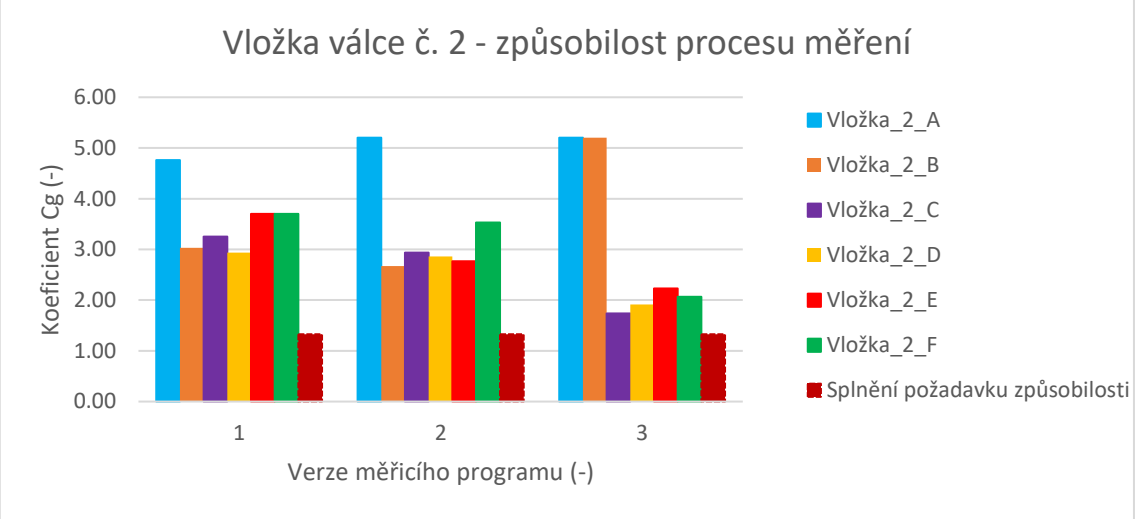
Graf 16: Způsobilost procesu měření - Plocha III

V případě charakteristik rozměrů v podobě průměrů vložek válců byla způsobilost procesu měření také splněna ve všech případech. Mimo dva průměry u druhé vložky válce, konkrétně průměry ve hloubce A a B, vykazovaly veškeré charakteristiky podobné chování v podobě mírného poklesu způsobilosti procesu měření po změně metodiky vyhodnocení.

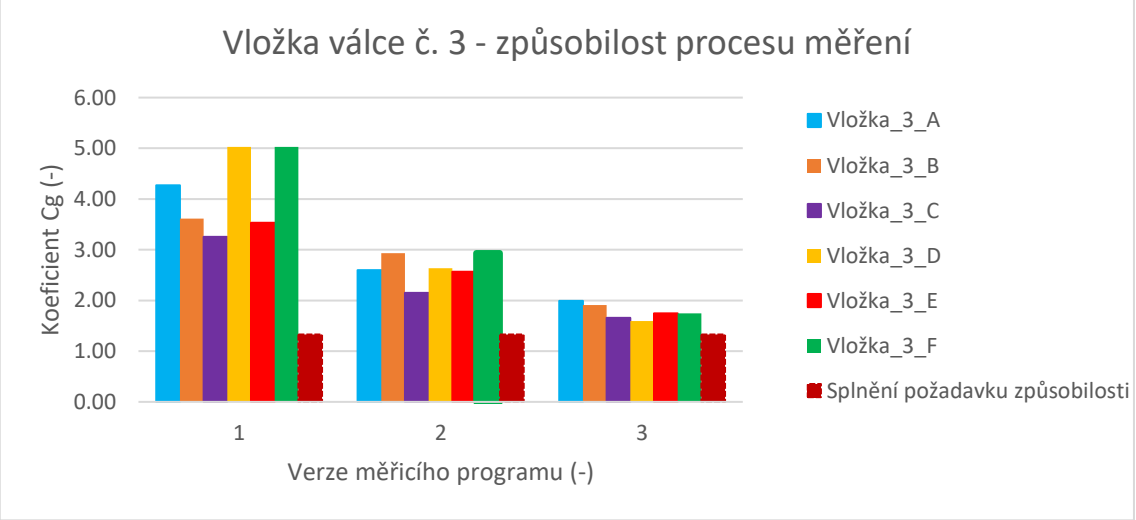
I když by měla být teoreticky způsobilost první a druhé verze měřicího programu podobná, ne-li identická, v několika případech týkajících se třetí vložky tomu tak není. Zde se mezi prvními dvěma verzemi snížila způsobilost až o dva body.



Graf 17: Způsobilost procesu měření první vložky válce

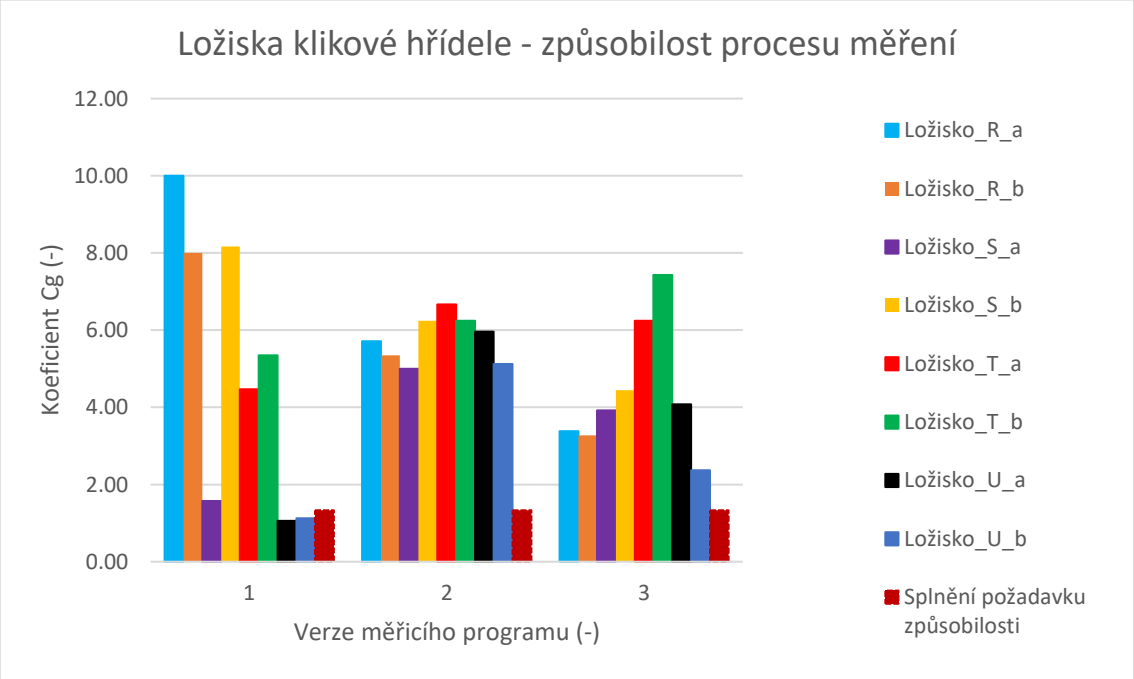


Graf 18: Způsobilost procesu měření druhé vložky válce



Graf 19: Způsobilost procesu měření třetí vložky válce

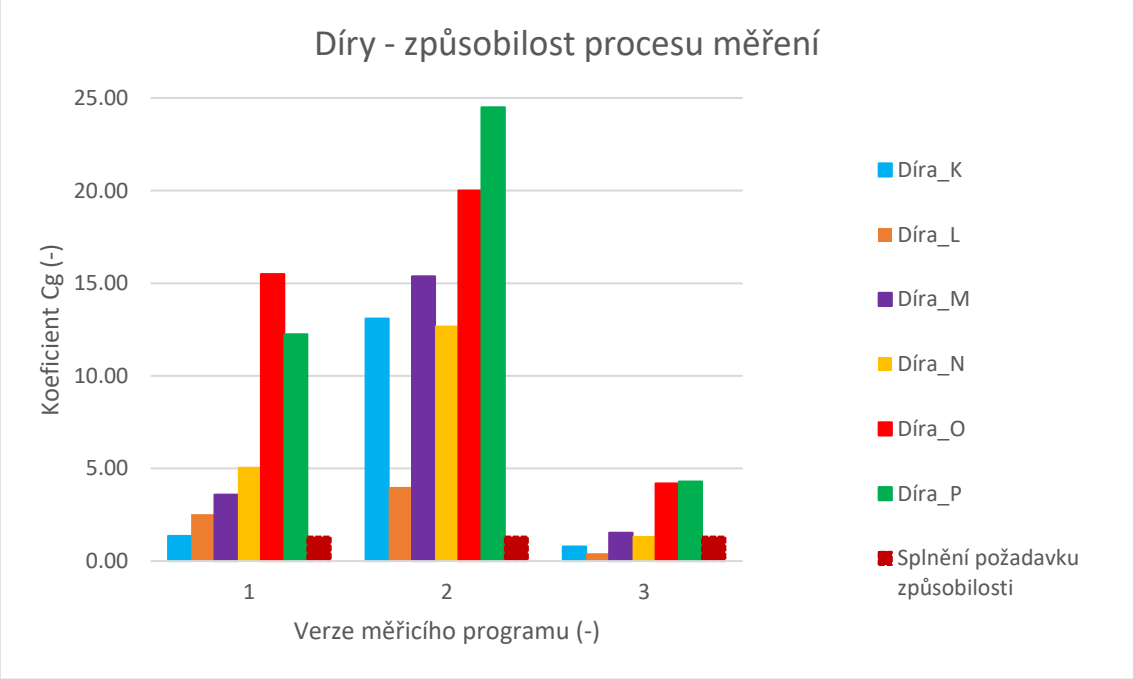
Měření průměrů uložení pro ložiska klikové hřídele bylo negativně ovlivněno podobným způsobem jako charakteristiky délkových rozměrů u měření rovin. Konkrétně se jednalo o výsledky z prvního měření původním programem. Tato skutečnost přispěla k tomu, že byly výsledky z původního měřicího programu doprovázeny větší směrodatnou odchylkou, která výrazně ovlivňuje výslednou způsobilost procesu měření. V případě charakteristik týkajících se uložení ložiska U tento fakt zapříčinil, že proces měření původním programem nebyl způsobilý. Následná skupina měření provedená druhou verzí měřicího programu, kde se v případech těchto popisovaných charakteristik nic neměnilo, potvrzuje, že v případě 10 opakovaných měření může i jedno nevyhovující výrazně ovlivnit výslednou způsobilost. Oproti původnímu programu totiž, ačkoliv se neměnilo jejich nastavení, veškeré charakteristiky splňují způsobilost s minimální hodnotou koeficientu Cg rovnou pěti. Následná změna metody vyhodnocení dle očekávání ve většině případů způsobilost snížila, avšak stále na vyhovující úroveň vyšší než dva.



Graf 20: Způsobilost procesu měření uložení ložisek klikové hřídele

Způsobilost procesu měření týkající se děr se změnila již mezi první a druhou verzí měřicího programu, a to z důvodu zvýšeného počtu měřených bodů. Díky této optimalizaci bylo nasnímáno dostatečné množství bodů pro správné fungování zvolené filtrace. To mělo za následek zvýšení způsobilosti měření u všech zkoumaných

charakteristik. Dle očekávání mělo následně změnění metody vyhodnocení opačný efekt v podobě snížení způsobilosti. V případě děr K a L se proces měření stal při použití třetí verze programu nezpůsobilým. Průměry u ostatních čtyř děr byly i po finální změně způsobilé, ale koeficient Cg dosahoval výrazně nižších hodnot než při přechozím měření s použitím metody LSC. Výhodou sledování vývoje způsobilosti u těchto děr byl fakt, že jednotlivé charakteristiky byly, na rozdíl od ostatních rozebíraných, ovlivněny již první optimalizací měřicího programu. Díky této skutečnosti bylo možné pozorovat, zda reálně naměřená data odpovídají teoretickým předpokladům. První úprava v podobě navýšení počtu bodů, která by měla umožnit funkčnost zvolené filtrace, teoreticky pomáhá navýšit způsobilost procesu měření. Nicméně pokud se změní metoda vyhodnocení z velice stabilní metody nejmenších čtverců například v případě popisovaných děr na metodu maximální vepsané kružnice, způsobilost by se měla snížit. Reálná data a zjištěné způsobilosti popsanou teorii tudíž potvrzují.



Graf 21: Způsobilost procesu měření děr

Závěr

Úvodní část byla věnována přejímacím a periodickým zkouškám. Nejprve jsem popsal důvod využívání těchto zkoušek a následně se zaměřil na ty, které popisují testování CMM s dotykovým snímacím systémem. Poté jsem se zaobíral zkušebními tělesy a artefakty, které se využívají pro zmíněné zkoušky. Může se jednat o jednodušší tělesa, jež zkoušejí vlastnosti testovaného CMM v jednom či více směrech. Pokud je potřeba stroj prověřit v širší škále vlastností, lze využít například účelově zhotovené artefakty. Nevýhodou těchto artefaktů je ale jejich vysoká cena.

V hlavní části této práce jsem se proto zabýval návrhem a realizací zkušebního artefaktu, který za krátkou dobu otestuje, zda daný CMM stále disponuje výrobcem deklarovanými vlastnostmi. Díky rešerši týkající se periodických zkoušek a využívaných artefaktů jsem usoudil, že vhodnými testovacími prvky jsou nastavovací kroužky.

Kolem tohoto rozhodnutí jsem postupně rozvíjel návrh s využitím třech nastavovacích kroužků orientovaných jednotlivými směry souřadnicových os stroje. Pro vytvoření hlavního tělesa artefaktu jsem se rozhodl využít technologii FDM 3D tisku. Vzhledem k dané výrobní technologii jsem návrh postupně optimalizoval, aby nevznikaly při následné realizaci problémy a produkt splňoval vymezené cíle. S využitím daného artefaktu se budou pravidelně periodicky testovat jednotlivé CMM na měrových střediscích zadavatele. Díky tomu bude možné prodloužit interval mezi periodickými zkouškami vykonávanými externí společností. Tato skutečnost povede ke snížení nákladů na provádění zkoušek CMM. Po otestování prototypu a finálních úpravách jsem mohl pokračovat se samotnou realizací.

Nejprve jsem pomocí 3D tiskáren vyrobil tělesa a příruby. Samotný tisk se obešel bez výrazných komplikací. Do zhotovených těles jsem následně vložil nastavovací kroužky a pomocí přírub zajistil jejich polohu. Po připevnění artefaktů k základovým deskám z hliníkové slitiny byly artefakty připravené k používání. K tomu bylo nezbytné vytvořit měřicí program. Ten byl vytvořen s důrazem na jednoduchost, časovou nenáročnost a aby výsledky poskytovaly důležité informace o aktuálním technickém stavu stroje. Vyjmenoval jsem doporučení ohledně vyhodnocování charakteristik a používání artefaktu. Definoval doporučený snímací systém, který byl měl co nejvěrněji reflektovat používané dotyky na reálných dílech měřených na daných měrových

střediscích. Následně byly artefakty podrobeny pilotnímu testování. Na jeho základě si zadavatel upravil některé doporučené parametry. Uživatel musí brát na vědomí, že zvolená konfigurace snímacího systému má výrazný vliv na získané informace z periodické zkoušky.

V poslední kapitole jsem se věnoval vlivu metody výpočtu prvků na způsobilost procesu měření. Zkoumání jsem prováděl na reálném díle v podobě bloku motoru přímo na měrovém středisku zadavatele. Po prostudování výkresové dokumentace a původního měřicího programu jsem postupně program upravoval, aby odpovídal technickým normám. V druhé verzi měřicího programu jsem upravil počet snímaných bodů u jednotlivých prvků, aby tento počet vyhovoval nastavené filtraci a ta byla funkční. Následně jsem v další verzi upravil metody vyhodnocení geometrických prvků. S každou verzí programu bylo provedeno 10 opakovaných měření na stejném CMM. Naměřená data jsem poté vyhodnotil.

V prvním kroku jsem zkoumal vliv jednotlivých úprav na střední hodnotu a směrodatnou odchylku jednotlivých charakteristik a dále jsem sledoval vývoj způsobilosti procesu měření. Úpravy měřicího programu měly na výsledky očekávaný vliv. Navýšení nedostatečného počtu snímaných bodů umožnilo fungování nastavené filtrace. Tím se zvýšila u dotčených charakteristik hodnota způsobilosti. Naopak změna metody výpočtu geometrických prvků způsobilost ve většině případů snížila, v případě dvou průměrů děr dokonce pod úroveň splnění podmínky způsobilosti. Průměrná hodnota koeficientu Cg s původním programem byla rovna 6,8. Po zajištění fungování nastavené filtrace se tato hodnota zvedla na hodnotu 8,0 a po změně metod vyhodnocení průměrná hodnota daného koeficientu činila 7,7. Úpravy měřicího programu tedy z celkového pohledu navýšily způsobilost procesu měření.

Zároveň je ovšem nutné uvědomit si dopad změn metod výpočtu prvků na samotné výsledky rozměrových charakteristik. V průměru se totiž touto úpravou změnily hodnocené rozměry o 3,0 mikrometru. Při aplikaci těchto změn na veškeré měřicí plány by se přerušila vazba na historická data v návazné regulaci procesů. Některé charakteristiky se nechovaly dle predikovaného chování. Důvodem mohly být různé vlivy zvyšující variabilitu například v podobě nečistot či neplánového přerušení mezi opakovanými měřeními.

Navrhnul jsem a následně zrealizoval zkušební artefakt pro rychlé periodické zkoušky, který pomůže na měrových střediscích zadavatele udržovat přehled o technickém stavu jednotlivých CMM a sníží náklady na oficiální periodické zkoušky. Na reálném díle jsem sledoval vliv úprav v měřicím programu v podobě zajištění fungování nastavené filtrace a změn metod vyhodnocení geometrických prvků na výsledky měření. Poté jsem vyhodnotil způsobilosti procesu měření a její reakce na provedené úpravy. Veškeré cíle diplomové práce byly tudíž splněny.

Seznam použitých zdrojů

[1] FLACK, David. *Good Practice Guide No. 41: CMM measurement strategies* [online]. National Physics Laboratory, 2014 [cit. 2023-03-31]. Dostupné z: https://www.npl.co.uk/gpgs/cmm-measurement-strategies

[2] FLACK, David. Good Practice Guide No. 42: CMM Verification [online]. National Physics Laboratory, 2011 [cit. 2023-03-31]. Dostupné z: https://www.npl.co.uk/gpgs/cmm-verification

[3] ČSN EN ISO 10360-1: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) - Část 1: Slovník. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2001.

[4] 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. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

[5] ČSN EN ISO 10360-3: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) - Část 3: Souřadnicové měřicí stroje s osou otočného stolu jako čtvrtou osou. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2001.

[6] ČSN EN ISO 10360-5: Geometrické specifikace produktu (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMS) - Část 5: Souřadnicové měřicí stroje (CMM) používající snímací systém s jedním a složeným snímacím dotekem používající diskrétní bod a/nebo skenovací měřicí režim. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.

[7] HOCKEN, Robert J. a Paulo H. PEREIRA, ed. *Coordinate Measuring Machines and Systems: Second Edition*. 2. Boca Raton: CRC Press, 2012. ISBN 978-1-57444-652-4

[8] Koncové měrky. Unimetra.cz [online]. [cit. 2023-06-20]. Dostupné z: http://www.unimetra.cz/soubory_materialy/84_1.pdf

[9] Sada tvrdokovových koncových měrek M32/1. Somet.cz [online]. [cit. 2023-06-19]. Dostupné z: https://somet.cz/cz/sada-tvrdokovovych-koncovych-merek-m321

[10] Dimensional measurement: Step Gauges. National Physics Laboratory [online]. 2022 [cit. 2023-06-20]. Dostupné z: https://www.npl.co.uk/products-services/dimensional/step-gauges

[11] Standarts for 3-D coordinate metrology. KOBA.de [online]. [cit. 2023-06-20]. Dostupné z: https://koba.de/en/products/standards-for-3-d-coordinate-metrology/

[12] The C.M.M. Evaluation Primer. Bal-Tec [online]. [cit. 2023-06-20]. Dostupné z: https://www.precisionballs.com/all_cmm.php

[13] Length Standard Ball Bar Used to Calibrate Machinery. Bal-Tec [online]. [cit. 2023-06-20]. Dostupné z: https://www.precisionballs.com/Length_Standard_Ball_Bar_Used_to_Calibrate_Machinery.php

[14] LIEBRICH, Thomas, Bernhard BRINGMANN a Wolfgang KNAPP. Calibration of a 3D-ball plate. Precision Engineering [online]. Elsevier Science, 2009, 33(1), 11 [cit. 2023-06-20]. Dostupné z: https://doi.org/10.3929/ethz-a-006071026

[15] LEE, E. S. a M. BURDEKIN. A Hole-Plate Artifact Design for the Volumetric Error Calibration of CMM. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [online]. Springer-Verlag London Limited, 8 [cit. 2023-06-20]. Dostupné z: https://link.springer.com/article/10.1007/s001700170151

[16] Dimensional measurements: CMM verification artefacts. National Physics Laboratory [online]. [cit. 2023-06-20]. Dostupné z: https://www.npl.co.uk/products-services/dimensional/cmm-verification-artefacts

[17] 3D Artefacts. Trapet Precision Engineering [online]. [cit. 2023-06-20]. Dostupné z: https://trapet.de/en/3d%20artefacts.html

[18] Verification artifacts for CMMs - Calibration Cubes. *Plant Automation Technology* [online]. [cit. 2023-06-20]. Dostupné z: https://www.plantautomation-technology.com/products/innovalia-metrology/verification-artifacts-for-cmms-calibration-cubes

[19] Verification artifacts for CMMs - Tetrahedron. *Plant Automation Technology* [online]. [cit. 2023-06-20]. Dostupné z: https://www.plantautomation-technology.com/products/innovalia-metrology/verification-artifacts-for-cmms-tetrahedron-for-contact-systems

[20] Zeiss CMM-Check 2.0. Zeiss Metrology Shop [online]. [cit. 2023-06-20]. Dostupné z: https://shop.metrology.zeiss.com/INTERSHOP/web/WFS/IMT-US-Site/en_US/-/USD/ViewProduct-Start?SKU=626106-9355-510&CategoryName=460400&CatalogID=400000&ExtendedNavigation=true

[21] Reference spheres and calibration artifacts from ZEISS. Zeiss.com [online]. [cit. 2023-06-20]. Dostupné z: https://www.zeiss.com/metrology/products/accessories/machine-accessories/zeiss-reference-spheres-and-calibration-artifacts.html

[22] Nastavovací kroužek 75 mm 355 E MAHR. M&B calibr [online]. [cit. 2023-06-20]. Dostupné z: https://eshop.mbcalibr.cz/mezni-a-nastavovaci-krouzky/nastavovaci-krouzek-75-mm-355-e-mahr/

[23] Prusament PETG Prusa Galaxy Black: O PETG. PRUSA RESEARCH [online]. [cit. 2023-06-24]. Dostupné z: https://www.prusa3d.com/cs/produkt/prusament-petg-prusa-galaxy-black-1kg/#about-petg

[24] Prusament PETG: Technický list. PRUSA RESEARCH [online]. [cit. 2023-06-24]. Dostupné z: https://www.prusa3d.com/cs/produkt/prusament-petg-prusa-galaxy-black-1kg/#downloads

[25] Rozdíly mezi ABS, PLA, PETG. Materialpro3d [online]. [cit. 2023-06-24]. Dostupné z: https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdily-abs-pla-petg/

[26] Hliník: Lehký, trvanlivý a vysoce recyklovatelný. Primapol.cz [online]. [cit. 2023-06-20]. Dostupné z: https://www.primapol.cz/produkty/hlinik/

[27] ČSN EN ISO 12181-2: Geometrické specifikace produktu (GPS) - Kruhovitost - Část 2: Operátory specifikace. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.

[28] Capability of Measurement and Test Processes [online]. Robert Bosch, 2019 [cit. 2023-07-05]. 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

[29] BERÁNEK, Libor a Josef KŘEPELA. Způsobilost měřidel, strojů a procesů [PDF prezentace, studijní opora k předmětu Průmyslová metrologie]. 2022 [cit. 2023-07-05]. Interní dokument.

Seznam obrázků

Obr. 1: Diagramy největší dovolené chyby indikace CMM při měření rozměru MPE_E [3, 6] 16
Obr. 2: Chyba snímání P [3] 16
Obr. 3: Příklad dvou možných poloh kalibrované zkušební délky a dvou možných orientací snímací hlavy pro zkoušku E_{150} [4] 19
Obr. 4: Poloha zkušebních koulí na otočném stole [5] 21
Obr. 5: Schéma rozložení snímaných bodů na zkušební kouli [6] 23
Obr. 6: Schéma čtyř skenovaných rovin [6] 24
Obr. 7: Schéma snímacího systému "hvězda" s pěti dotyky [6] 25
Obr. 8: Schéma otočného snímacího systému [6] 27
Obr. 9: Schéma snímání bodů na koncové měrce [4] 28
Obr. 10: Sada koncových měrek [9] 28
Obr. 11: Schémata snímání bodů na stupňových měrkách [4] 29
Obr. 12: Stupňová úhlově nastavitelná měrka [11] 29
Obr. 13: Schémata snímání bodů na ball bar a) oba smysly; b) jeden smysl [4] ... 30
Obr. 14: Ball bar na otočném rameni [13] 30
Obr. 15: Schéma snímání bodů na ball plate jedním smyslem [4] 31
Obr. 16: Ball plate [11] 31
Obr. 17: Skleněný artefakt typu Hole plate [2] 31
Obr. 18: Artefakt typu Ball Cube [18] 32
Obr. 19: Detail vrcholu artefaktu typu Ball Tetrahedron [19] 32
Obr. 20: Zeiss CMM-Check 2.0 [20] 33
Obr. 21: Zeiss CMM-Check [21] 33
Obr. 22: Nastavovací kroužek Mahr dle DIN 2250 C [22] 35
Obr. 23: První návrh tělesa artefaktu 35
Obr. 24: Druhý návrh tělesa artefaktu 36
Obr. 25: Optimalizovaný druhý návrh tělesa artefaktu 37
Obr. 26: Detaily optimalizovaného návrhu 37
Obr. 27: Návrhy boční a horní příruby 38
Obr. 28: Finální sestava navrženého artefaktu 39

Obr. 29: Slicing tělesa artefaktu 42
Obr. 30: Tisk prototypu 43
Obr. 31: Vyrobený prototyp artefaktu 43
Obr. 32: Tisk finálního tělesa artefaktu 44
Obr. 33: Vyrobené finální artefakty 45
Obr. 34: Hotový artefakt na loži CMM 46
Obr. 35: Hotový artefakt uložen v ochranném kufru 46
Obr. 36: Referenční bod pro začátek měřicího programu 47
Obr. 37: Elementy určující lokální souřadný systém pro vyrovnání 48
Obr. 38: Strategie zaměření roviny 48
Obr. 39: Strategie měření vnitřního průměru nastavovacího kroužku 49
Obr. 40: Grafické zobrazení změřené kruhovitosti 50
Obr. 41: Grafický element pro porovnání kruhovitostí 50
Obr. 42: Doporučená konfigurace snímacího systému 51
Obr. 43: Snímací systém pro testování s dotyky o průměru 5 milimetrů 52
Obr. 44: Zdroje variability měření [29] 56
Obr. 45: Měřený díl - blok motoru 1.0 TSI EVO 58
Obr. 46: Postup úprav měřicího programu 58
Obr. 47: Původní měřicí program 59
Obr. 48: Nedostatečný počet nasnímaných bodů pro funkční filtraci 60
Obr. 49: Měření bloku motoru 1.0 TSI EVO 61
Obr. 50: Měření bloku motoru 1.0 TSI EVO 62

Seznam tabulek

Tab. 1: Orientace kalibrované zkušební délky v měřicím objemu CMM [4] 19
Tab. 2: Vlastnosti materiálu PETG [24] 40
Tab. 3: Tiskové parametry 42
Tab. 4: Porovnání měřicích programů pro artefakt 54
Tab. 5: Koeficienty Cg a Cgk [28, 29] 57
Tab. 6: Změny počtu nasnímaných bodů pro funkčnost filtrace 60

Seznam grafů

Graf 1: Testování artefaktu na měrovém středisku - průměry 53
Graf 2: Testování artefaktu na měrovém středisku - kruhovitosti 53
Graf 3: Délkové rozměry - Plocha I 63
Graf 4: Délkové rozměry - Plocha II 63
Graf 5: Délkové rozměry - Plocha III 64
Graf 6: Porovnání směrodatných odchylek - Plocha II 65
Graf 7: Průměry ve vložce válce č. 1 66
Graf 8: Průměry ve vložce válce č. 2 66
Graf 9: Průměry ve vložce válce č. 3 66
Graf 10: Průměry pro ložiska klikové hřídele 67
Graf 11: Průměry děr K a L 68
Graf 12: Průměry děr M a N 68
Graf 13: Průměry děr O a P 69
Graf 14: Způsobilost procesu měření - Plocha I 70
Graf 15: Způsobilost procesu měření - Plocha II 71
Graf 16: Způsobilost procesu měření - Plocha III 71
Graf 17: Způsobilost procesu měření první vložky válce 72
Graf 18: Způsobilost procesu měření druhé vložky válce 72
Graf 19: Způsobilost procesu měření třetí vložky válce 72
Graf 20: Způsobilost procesu měření uložení ložisek klikové hřídele 73
Graf 21: Způsobilost procesu měření děr 74