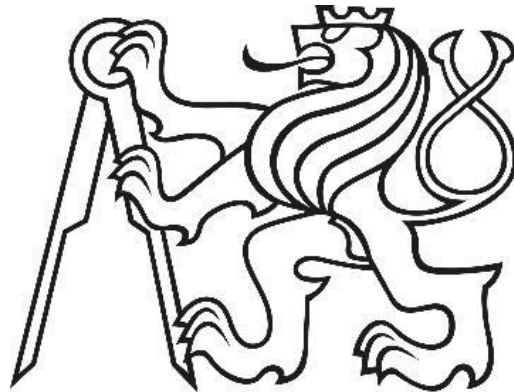


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Metodika zkoušení souřadnicových měřicích strojů

ve vybraném podniku

Testing methodology for coordinate measuring machines in an

engineering company

Autor: Bc. Martin Purkart

Studijní program: Výrobní a materiálové inženýrství

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

Praha 2020



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Purkart** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **459898**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Metodika zkoušení souřadnicových měřicích strojů ve vybraném podniku

Název diplomové práce anglicky:

Testing methodology for coordinate measuring machines in an engineering company

Pokyny pro vypracování:

1. Přejímací a periodické zkoušky CMM strojů s dotykovým snímacím systémem.
2. Technické vybavení společnosti v oblasti kontroly kvality, popis používaných CMM a snímacích systémů.
3. Návrh metodiky zkoušení CMM strojů v podniku.
4. Realizace zkoušek na vybraných CMM a analýza výsledků.

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 druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2020**

Platnost zadání diplomové práce:

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, a že veškerá použitá odborná literatura je uvedena v seznamu, který je součástí této práce.

V Praze dne:

.....

Martin Purkart

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce panu Ing. Liboru Beránkovi, Ph.D. za jeho vedení a čas, který mi během jejího vypracování poskytl. Poděkování patří rovněž mé rodině za pomoc a podporu během studia.

V neposlední řadě také děkuji svým přátelům, a to zejména za psychickou podporu během celého studia.

Abstrakt

Práce se týká problematiky ověření přesnosti měření souřadnicových měřicích strojů s dotykovým snímacím systémem. Popisuje krátce jejich rozdělení, využitelnou sensoriku a poté jejich zkoušení pomocí předpisů v normě ISO 10360. Dále uvádí artefakty využitelné pro kontrolu CMM a popisuje pojmy přesnost, správnost a preciznost měření. V praktické části se jedná o vlastní zkoušení ve vybraném podniku za použití více CMM. Měření provedená v podniku jsou poté porovnána s referenčními hodnotami a vyhodnocena.

Klíčová slova

Souřadnicový měřicí stroj, SMS, sensorika, ověření přesnosti, přijímací a periodické zkoušky, artefakt, ISO 10360

Abstract

This thesis concerns the issue of verifying the accuracy of measurement of coordinate measuring machines with a touch probing system. It briefly describes distribution of CMMs, usable sensors and then their testing using regulations in the ISO 10360 standard. It also lists the artifacts that can be used for CMM control and describes the concepts of measurement accuracy, measurement trueness and measurement precision. The practical part involves testing in a selected company using multiple CMMs. The measurements performed in the company are then compared with the reference values and are evaluated.

Key words

Coordinate measuring machines, CMM, sensors, verifying of accuracy, acceptance and reverification tests, artifact, ISO 10360

Obsah

Přehled použitých zkratk.....	8
Úvod.....	10
1 Přejímací a periodické zkoušky CMM strojů s dotykovým snímacím systémem.....	11
1.1 Souřadnicové měřicí stroje a snímací systémy.....	11
1.2 Zkoušení CMM pro měření lineárních rozměrů.....	12
1.2.1 Požadavky na metrologické charakteristiky.....	13
1.2.2 Přejímací a periodická zkouška.....	14
1.3 Zkoušení CMM pro měření skenování.....	17
1.3.1 Požadavky na metrologické charakteristiky.....	17
1.3.2 Přejímací a periodická zkouška.....	18
1.4 Zkoušení CMM používající snímací systém s jednotlivými a složenými doteky.....	20
1.4.1 Požadavky na metrologické charakteristiky.....	20
1.4.2 Přejímací a periodická zkouška.....	21
1.5 Artefakty využitelné pro kontrolu CMM.....	25
1.5.1 1D artefakty.....	25
1.5.2 2D artefakty.....	27
1.5.3 3D artefakty.....	28
1.6 Přesnost, správnost a preciznost měření.....	29
2 Technické vybavení společnosti v oblasti kontroly kvality, popis používaných CMM a snímacích systémů.....	32
2.1 Portfolio společnosti Hofmeister s.r.o.....	32
2.2 Vybavení společnosti v oblasti kartézských CMM.....	32
2.3 Kontaktní snímací systémy.....	34

2.4	Vybavení společnosti – sensorika	35
3	Návrh metodiky zkoušení CMM strojů v podniku	39
3.1	Postup měření zkušební koule	39
3.2	Postup měření hliníkového ball platu	41
3.3	Postup měření kalibračního kroužku	42
4	Realizace zkoušek na vybraných CMM a analýza výsledků	43
4.1	Měření zkušební koule v podniku	43
4.1.1	Postup a výsledky měření.....	43
4.1.2	Analýza výsledků měřených na zkušební kouli.....	46
4.2	Měření hliníkového ball platu v podniku.....	49
4.2.1	Postup a výsledky měření.....	49
4.2.2	Analýza výsledků měřených na ball platu	50
4.3	Měření kalibračního kroužku v podniku	51
4.3.1	Analýza výsledků měřených na kalibračním kroužku.....	52
	Závěr	54
	Bibliografie.....	56
	Seznam obrázků	59
	Seznam tabulek.....	60
	Seznam příloh.....	61

Přehled použitých zkratk

CMM	Coordinate Measuring Machine –Souřadnicový měřicí stroj
MPE_P	Maximální dovolená chyba snímání
MPE_E	Maximální dovolená chyba stroje
MPE_{Tij}	Maximální dovolená chyba snímání při skenování
MPE_t	Nejdelší dovolená doba zkoušky skenování
Tij	Chyba snímání při skenování
P_{LTM}	Hodnota polohy složeného doteku, pevný složený dotekový snímací systém
P_{LTN}	Hodnota polohy složeného doteku, pevný složený systém sondy
P_{FTE}	Chyba tvaru složeného doteku, kloubový snímací systém používající empirickou kvalifikaci
P_{FTE, MPE}	Maximální dovolená chyba tvaru složeného doteku, kloubový snímací systém používající empirickou kvalifikaci
P_{STE}	Chyba rozměru složeného doteku, kloubový snímací systém používající empirickou kvalifikaci
P_{STE, MPE}	Maximální dovolená chyba rozměru složeného doteku, kloubový snímací systém používající empirickou kvalifikaci
P_{LTE}	Hodnota polohy složeného doteku, kloubový snímací systém používající empirickou kvalifikaci
P_{LTE, MPL}	Maximální dovolená hodnota polohy složeného doteku, kloubový snímací systém používající empirickou kvalifikaci
P_{FTI}	Chyba tvaru složeného doteku, kloubový snímací systém používající odvozenou kvalifikaci
P_{FTI, MPE}	Maximální dovolená chyba tvaru složeného doteku, kloubový snímací systém používající odvozenou kvalifikaci
P_{STI}	Chyba rozměru složeného doteku, kloubový snímací systém používající odvozenou kvalifikaci
P_{STI, MPE}	Maximální dovolená chyba rozměru složeného doteku, kloubový snímací systém používající odvozenou kvalifikaci
P_{LTi}	Hodnota polohy složeného doteku, kloubový snímací systém používající odvozenou kvalifikaci

$P_{LTI, MPL}$ Maximální dovolená hodnota polohy složeného doteku kloubový snímací systém používající odvozenou kvalifikaci

P_{FTj} Chyba tvaru složeného doteku

$P_{FTj, MPE}$ Největší dovolená chyba tvaru složeného doteku

P_{STj} Chyba rozměru složeného doteku

$P_{STj, MPE}$ Největší dovolená chyba rozměru složeného doteku

P_{LTj} Hodnota polohy snímacího systému

$P_{LTj, MPE}$ Největší dovolená mez polohy snímacího systému

P_{FTU} Chyba tvaru jednotlivého doteku

Úvod

Při kontrole kvality jsou již v dnešní době souřadnicové měřicí stroje používány zcela běžně. Jejich rychlost, přesnost a univerzálnost měření z nich dělají vhodnou metodu kontroly kvality pro celou řadu výrobků. Stejně tak je ovšem důležité kontrolovat právě technický stav samotných souřadnicových strojů. Touto problematikou se bude zabývat tato diplomová práce.

V úvodu rešerše se budu stručně zabývat rozdělením souřadnicových strojů a snímacích systémů. Poté rozeberu zkoušení CMM podle normy 10 360, přičemž tato kapitola bude obsahovat technické požadavky, teoretické postupy zkoušení a metody vyhodnocování výsledků. Uvedu také rozdělení artefaktů, které se pro kontrolu CMM využívají.

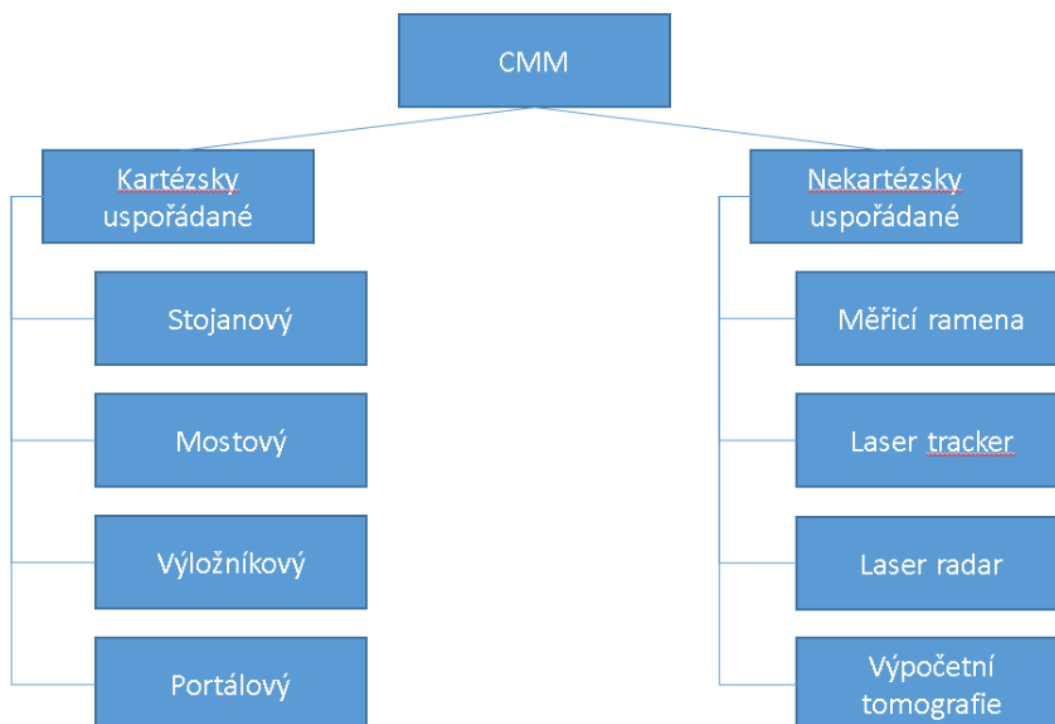
V praktické části své diplomové práce pak provedu měření ve vybraném podniku. Na třech různých artefaktech provedu měření, podle kterých budu následně vyhodnocovat parametry vypovídající o stavu stroje a sensoriky používané v podniku. Tato měření budu v podniku provádět na dvou různých CMM.

1 Přejímací a periodické zkoušky CMM strojů s dotykovým snímacím systémem

1.1 Souřadnicové měřicí stroje a snímací systémy

Souřadnicové měřicí stroje

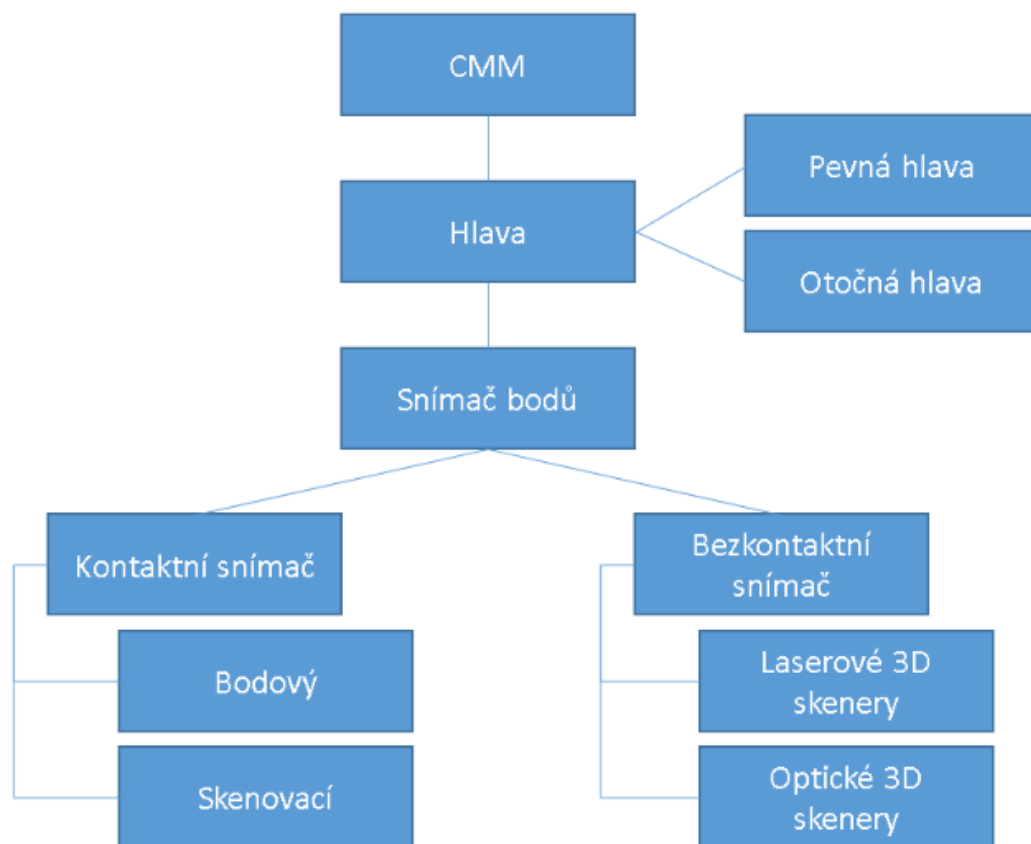
Souřadnicové měřicí stroje (Coordinate Measuring Machines, CMM) jsou dnes součástí většiny metrologických laboratoří. Princip měření je založen na stanovení základního bodu v prostoru, který je zároveň počátkem souřadného systému. Od tohoto bodu se všechny změřené body určují pomocí souřadnic. Primárním využitím CMM byla kontrola dílů, které se skládají ze základních matematických elementů. V dnešní době ale vyráběné součásti obsahují nejen tyto základní elementy, ale i obecné tvarové plochy. S nástupem softwarů umožňující parametrické CAD modelování za pomoci výpočetní techniky vzrostl počet součástí obsahujících volné tvary, a tím pádem se zvyšují i nároky na měřicí systémy. [1]



Obr. (1) Dělení CMM [2]

Snímací systémy

Snímací systémy pro CMM jsou nedílnou součástí celého měřicího systému a tvoří spojení mezi strojem a obrobkem. Pro využití potenciálu souřadnicového měřicího systému je důležitá správná volba, konfigurace, kvalifikace, a využití snímacího systému. Po uživatelích CMM se vyžaduje naprosté pochopení vlastností a rozdílů mezi snímacími systémy, aby mohly být pro dané měřicí aplikace vybrány a použity odpovídající systémy nákladově efektivním způsobem. [3]



Obr. (2) Dělení snímacích systémů CMM [2]

1.2 Zkoušení CMM pro měření lineárních rozměrů

Při zkoušení CMM podle ISO 10360-2 se dostáváme ke dvěma různým technickým cílům, a to jsou:

- chyba snímání
- chyba indikace při měření rozměru.

Důležitější z těchto dvou je zkouška indikace při měření rozměru. Výsledek měření této zkoušky má totiž přímou návaznost na jednotku délky (metr) a poskytuje tudíž informaci, jak bude CMM provádět podobná měření vzhledem k této jednotce. [4]

Při ověřování technického stavu CMM rozlišujeme zkoušky:

Přejímací zkouška- umožňuje zjistit, zda technický stav CMM, který se používá pro měření lineárních rozměrů, odpovídá specifikaci výrobce.

Periodická zkouška- umožňuje opakovaně ověřovat technický stav CMM, používaného pro měření lineárních rozměrů. [4]

1.2.1 Požadavky na metrologické charakteristiky

Požadavky na metrologické charakteristiky jsou vždy stanovené:

- výrobcem v případě přejímacích zkoušek,
- uživatelé v případě periodických zkoušek. [4]

1) Chyba snímání, P

Chyba snímání, P, nesmí přesáhnout maximální dovolenou chybu snímání MPE_P . P i MPE_P se vyjadřují v mikrometrech. Hodnota MPE_P se užije pro jakoukoliv polohu hmotného etalonu rozměru v měřicím objemu CMM a pro jakýkoliv směr snímání. [4]

2) Chyba indikace při měření rozměru, E

Chyba indikace, se kterou může být pomocí CMM určen rozměr hmotného etalonu rozměru. Měření se provede mezi dvěma protilehlými body na dvou rovnoběžných rovinách ve směru normály k jedné z nich, kdy snímané body jsou přístupné z protějších směrů. E nesmí přesáhnout maximální dovolenou chybu, MPE_E . E i MPE_E se vyjadřují v mikrometrech.

3) Podmínky prostředí

Meze, které je nutné respektovat, například teplotní podmínky, vlhkost vzduchu a vibrace v místě, kde je CMM umístěno. Podmínky uvnitř předepsaných mezí stanovuje uživatel.

4) Snímací systém

Specifikujeme meze konfigurace snímacího systému. Je třeba uvažovat snímací dotek a jeho prodloužení, orientaci, hmotnost snímacího systému apod. Tuto konfiguraci snímacího systému uvnitř specifikovaných mezí stanovuje uživatel. Úchylka tvaru hrotu snímacího doteku bude ovlivňovat výsledky měření a musí se uvážit při prokazování shody nebo neshody se specifikací.

5) Provozní podmínky

Při zkoušení musí CMM používat postupy uvedené v provozní příručce výrobce. Nezbytné specifické oblasti, na které je třeba se zaměřit, jsou například:

- Spuštění stroje a jeho zahřátí
- Konfigurace systému snímacích doteků
- Proces čištění (zejména snímací hrot a referenční koule)
- Kvalifikace snímacího systému

1.2.2 Přejímací a periodická zkouška

Z dříve uvedených informací už víme, že přejímací zkoušky se provádějí podle specifikací a postupů výrobce, kdežto periodické zkoušky podle specifikací a postupů uživatele.

a) Chyba snímání

K prokázání chyby snímání je třeba zjistit rozsah vzdáleností měřených bodů od středu Gaussovy přiřazené koule. V závislosti na tomto rozsahu poté rozhodneme, zda je CMM schopen měřit v mezích maximální dovolené chyby snímání, MPE_p .

Pro tuto zkoušku se nesmí použít referenční koule, která je dodávaná k CMM pro účely kvalifikace snímacího systému. Zkušební koule musí mít jmenovitý průměr nejméně 10mm a nejvíce 50mm. Tvar této koule musí být kalibrován, neboť ovlivňuje výsledek a bere se v úvahu při prokazování shody nebo neshody se specifikací a proto musí být tato koule umístěna jinde, než referenční koule pro kvalifikaci snímacího systému. [4]

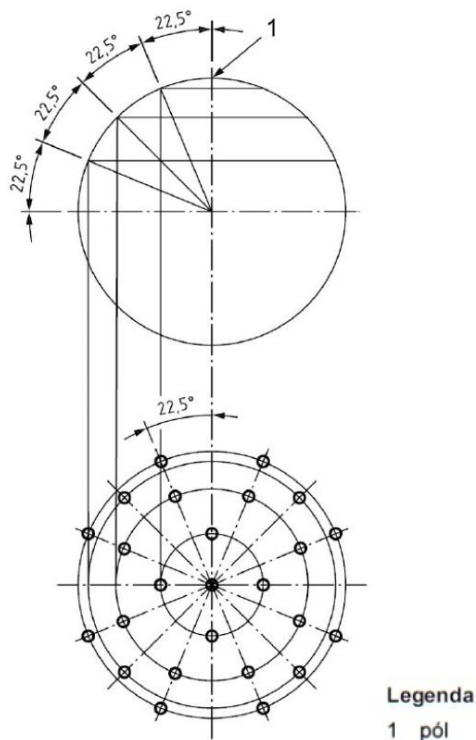
Postup:

Uživatel může zvolit meze pro orientaci snímacího doteku a poloh upnutí zkušební koule. Doporučuje se, aby orientace snímacího doteku a poloh upnutí zkušební koule nebyla rovnoběžně s žádnou z os CMM. Snímací systém se nastaví a kvalifikuje v souladu s obvyklým postupem výrobce a poté se zkušební koule nastaví do polohy podle zmíněných kritérií. [4]

Následně se změří a zaznamená 25 bodů přibližně rovnoměrně rozložených alespoň na polokouli zkušební koule (záleží na uživateli). Doporučuje se následující rozložení bodů (vždy rovnoměrně rozložených):

- Jeden bod na pólu zkušební koule
- Čtyři body $22,5^\circ$ pod pólem
- Osm bodů 45° pod pólem a pootočených o $22,5^\circ$ vzhledem k předchozí skupině
- Čtyři body $67,5^\circ$ pod pólem a pootočené o $22,5^\circ$ vzhledem k předchozí skupině
- Osm bodů 90° pod pólem a pootočené o $22,5^\circ$ vzhledem k předchozí skupině [4]

Grafické rozložení bodů viz. Obr. (3):



Obr. (3) – Cílové body dotyku [4]

Výsledek zkoušky

Ze všech 25 měření spočítáme Gaussovu přiřazenou kouli. Pro každé z 25 měření se vypočítá radiální vzdálenost, R . Chybu snímání P poté vypočítáme jako $R_{\max} - R_{\min}$. [4]

b) Hodnocení rozměru

Při hodnocení této metody hodnotíme, jestli je CMM schopen měření v mezích stanovené maximální dovolené chyby indikace CMM při měření rozměru, MPE_E . Hodnocení se provádí porovnáním kalibrovaných hodnot s indikovanými hodnotami, které jsou naměřeny podle následujících pravidel:

- hodnoty musí mít 5 různých rozměrů
- tyto hodnoty musí být měřeny v 7 různých místech nebo orientacích měření v měřícím objemu CMM
- každý rozměr se musí měřit opakovaně třikrát

Celkově se tedy při tomto hodnocení dostáváme na součin 105 měření. Jako měřicí zařízení použijeme hmotný etalon rozměru (doporučuje se buď stupňová měrka nebo řady koncových měrek) s nejdelším rozměrem alespoň 66% nejdelší prostorové uhlopříčky měřícího objemu CMM, a nejkratším rozměrem hmotného etalonu menším než 30mm. Délka každého etalonu musí být kalibrována a nejistota této kalibrace se musí brát v úvahu při prokazování shody CMM se specifikací. [4]

Postup:

Uživatel zvolí sedm různých poloh a orientací pro pět zkuškových rozměrů v mezích specifikace. Je třeba mít na paměti, že výběr poloh a orientací může významně ovlivnit výsledek zkoušky. Snímací systém se poté nastaví a kvalifikuje podle postupu výrobce. Následně se každý z pěti etalonů změří třikrát v některé ze sedmi různých poloh a orientací, a to za následujících podmínek:

- Měření je pouze dvousměrné (vnější či vnitřní)
- Měří se pouze jeden bod na každém konci hmotného etalonu pro každé měření rozměru [4]

Výsledek zkoušky

Pro každé ze 105 měření se vypočítá chyba indikace při měření rozměru, E , a to jako rozdíl mezi indikovanou hodnotou a pravou hodnotou jednotlivých hmotných etalonů rozměru. [4]

1.3 Zkoušení CMM pro měření skenováním

Podle normy ISO 10360-4 se stanovují přijímací a periodické zkoušky pro ověření způsobilosti a technického stavu CMM. Přijímací a periodická zkouška popsaná v této části normy je použitelná pouze pro souřadnicové měřicí stroje používané v režimu skenování při použití libovolného dotykového snímacího systému. [5]

1.3.1 Požadavky na metrologické charakteristiky

1) Chyba indikace

Chyby snímání při skenování T_{ij} nesmí překročit dovolené chyby $MPE_{T_{ij}}$ dané výrobcem v případě přijímacích zkoušek a uživatelem v případě zkoušek periodických. Tyto chyby a jejich maximální hodnota jsou vyjádřeny v mikrometrech.

2) Doba zkoušky skenování

Doba zkoušky skenování τ nesmí překročit maximální dovolenou hodnotu MPE_{τ} danou výrobcem v případě přijímacích zkoušek a uživatelem v případě zkoušek periodických.

3) Enviromentální podmínky

Stejně jako u ISO 10360-2 je i zde třeba respektovat teplotní podmínky, vlhkost vzduchu a vibrace v místě, kde je CMM umístěno. Podmínky uvnitř předepsaných mezí opět stanovuje uživatel.

4) Systém snímacích doteků

Pro zkoušku CMM používaných pro skenování, použijeme dotek s poloměrem zaoblení špičky 3 mm.

5) Provozní podmínky

Specifické oblasti v provozní příručce, které je třeba respektovat, jsou například:

- Spuštění stroje/cykly zahřívání
- Konfigurace systému snímání doteků
- Postup čištění špičky snímacího doteku a referenční koule
- Kvalifikace systému snímací hlavy [5]

1.3.2 Přejímací a periodická zkouška

Následující zkoušky lze použít pro operace:

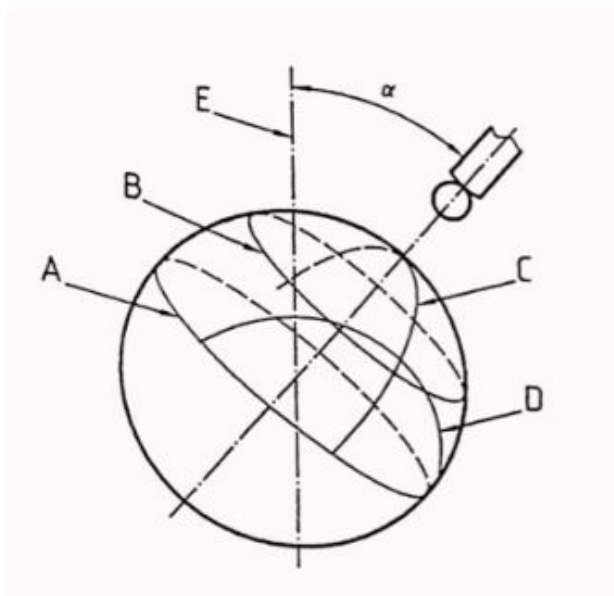
- Skenování na předem stanovené dráze pro sejmání velké hustoty bodů (HP)
 - Skenování na předem stanovené dráze pro sejmání malé hustoty bodů (LP)
 - Skenování na předem nestanovené dráze pro sejmání velké hustoty bodů (HN)
 - Skenování na předem nestanovené dráze pro sejmání malé hustoty bodů (LN) [5]
- I. Skenování při velké hustotě bodů je významné zejména při měření různých úchylek tvarů.
 - II. Skenování při malé hustotě se využívá spíše pro optimalizaci rychlosti, když se požadují informace o charakteristikách sdruženého prvku. [5]

Cílem metody je zjistit, jestli je CMM schopen měřit při stanovené maximální dovolené chybě snímání při skenování MPE_{Tij} , určením rozsahu hodnot rádiusu zkušební koule a v maximální dovolené době zkoušky MPE_t . Zkušební koule se měří ve čtyřech rovinách a následně je zjištěn její střed a poloměr. Absolutní rozdíl mezi minimální a maximální hodnotou poloměru je definován jako chyba snímání při skenování Tij . [5]

Pro zkoušku se jako zkušební artefakt používá ocelová koule o jmenovitém průměru 25 mm, drsností povrchu s R_a do $0,05\mu\text{m}$ a tvrdostí nejméně HV 800. Tato zkušební koule se musí odlišovat od koule použité pro kvalifikaci systému a také musí být umístěna v jiné pozici. [5]

Postup:

Měření probíhá ve čtyřech rovinách zkušební koule tak, jak můžeme vidět na Ob. (4), kde rovina A je na rovníku. Rovina B je rovnoběžná s rovinou A a jsou od sebe vzdálené 8mm. Roviny B, C a D jsou navzájem kolmé. Rovina C prochází pólem zkušební koule. Rovina D je vzdálena od pólu 8 mm. Úhel α značí úhel sklonu stopky snímacího doteku od osy pinoly, který definuje pól a rovník zkušební koule a doporučuje se volit hodnotu přibližně 45°. [5]



Obr. (4) Skenovací roviny na zkušební kouli [5]

Tab. (1) - Doporučené vzdálenosti mezi skenovanými body [5]

Rozměry v milimetrech		
	Vzdálenost mezi po sobě jdoucími skenovanými body	Doporučená největší vzdálenost od cílové roviny skenování
Pro HP a HN	0,1	0,2
Pro LP a LN	1	0,2

Výsledek zkoušky:

Výsledek měření při snímání v režimu skenování je ověřen, jestliže:

- Chyba snímání při skenování T_{ij} není větší než maximální dovolená chyba snímání skenováním $MPE_{T_{ij}}$.
- Maximální absolutní rozdíl mezi libovolným poloměrem zkušební koule a její polovinou certifikovaného průměru není větší než $MPE_{T_{ij}}$.
- Doba zkoušky skenování τ není větší než maximální dovolená hodnota MPE_{τ} . [5]

1.4 Zkoušení CMM používající snímací systém s jednotlivými a složenými doteky

Přejímací a periodické zkoušky obsažené v části normy ISO 10360-5 jsou použitelné pro CMM, které používají dotykové sondy s nebo bez složených doteků nebo složené kloubové sondy, které měří obrobek. Tuto normu lze aplikovat na:

- Snímací systémy s jednotlivým dotekem
- Složené doteky spojené se sondou CMM
- Instalace používající kloubový snímací systém, který může být rekvalifikován
- Instalace používající systém opakovatelné výměny sondy
- Instalace používající systém opakovatelné výměny doteků
- Instalace složené sondy [6]

1.4.1 Požadavky na metrologické charakteristiky

Doteky používané pro provedení zkoušek uvedených v této kapitole musí být odsouhlaseny výrobcem CMM. Musí být vyrobené ze stejného materiálu, mít stejný průměr doteku a jmenovitou délku. Pokud nastane situace, ve které přesná délka doteku nebude k dispozici, je možno použít dotek se jmenovitou délkou až o 6mm nebo o 10% jinou, podle toho, která z nich je větší. [6]

Při provádění zkoušek musí být CMM používán dle postupů uvedených výrobcem. Mezi tyto postupy patří např.:

- Spuštění stroje a jeho cyklus zahřátí
- Konfigurace systému doteku a montáže
- Čistící postupy pro snímací dotek, zkušební kouli a kouli referenční
- Kvalifikace snímacího systému
- Pokud výrobce specifikuje, tak umístění referenční koule dle manuálu [6]

Všechny snímací doteky a zkušební a referenční koule je třeba před kvalifikací snímacího systému řádně očistit od nečistot, které by mohly ovlivnit výsledky měření (např. zbytky maziva). [6]

1.4.2 Přejímací a periodická zkouška

Uspořádání jednotlivého doteku

Tato část je použitelná při uspořádání snímání jednotlivého doteku a CMM používající pevné složené sondy, pevné složené doteky nebo kloubové snímací systémy. Principem této zkoušky je měření koule pomocí 25 bodů jednotlivým dotekem. Následně je přiřazena Gaussova vhodná koule metodou nejmenších čtverců. Tato analýza poskytuje chybu tvaru jednotlivého doteku PFTU. Výsledky těchto zkoušek mohou být značně závislé na použité délce doteku, a proto jen délky, které jsou k tomuto účelu specifikovány výrobcem, jsou způsobilé pro zkoušku. [6]

Na povrchu koule se měří 25 bodů rovnoměrně rozložených, a pokud není specifikováno jinak, doporučuje se rozložení podle Obr. (3). Pro 25 snímaných bodů je vypočtena Gaussova radiální vzdálenost R . Rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou R nám určuje chybu tvaru jednotlivého doteku PFTU. [6]

a) Pevné složené sondy a složené doteky snímacích systémů

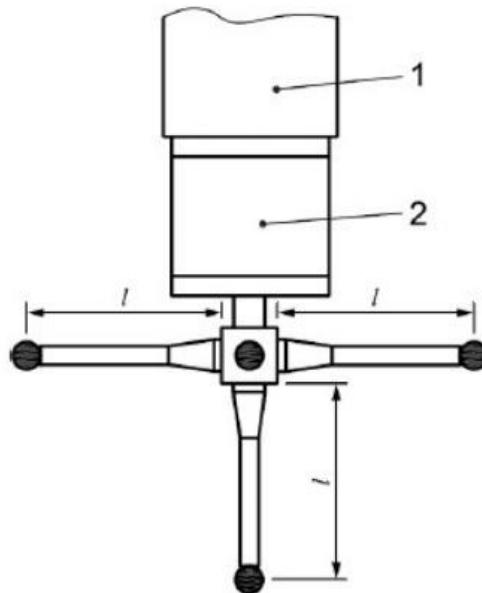
Principem této zkoušky je měření zkušební koule pomocí pěti různých pevných doteků. Každý dotek sejme 25 bodů, což nám ve výsledku dává 125 bodů pro všech pět doteků.

Následně se vypočítají rozsahy souřadnic středů všech pěti koulí. Největší z těchto rozsahů určuje hodnotu polohy P_{LTM} nebo P_{LTN} . Z naměřených 125 bodů je vypočítána Gaussova koule, která slouží k určení tvaru a rozměru chyb. Tato analýza udává chybu rozměru složeného doteku P_{STM} nebo P_{STN} a chybu tvaru složeného doteku P_{FTM} nebo P_{FTN} . [6]

Zkušební koule musí mít jmenovitý průměr od 10 mm do 50 mm a její rozměr a tvar musí být kalibrovaný. [6]

Postup:

Složený systém doteku určený pro zkoušku je uspořádán do tvaru hvězdice složené z jednoho doteku paralelně s osou sondy a čtyř doteků umístěných v rovině kolmé k ose sondy, přičemž každý tento kolmý dotyk je orientovaný s 90° odstupem od sousedního, viz. Obr. (5). Použitá délka doteku musí být specifikována výrobcem a vybrána z následující sady délek: 10 mm, 20 mm, 30 mm, 50 mm, 100 mm, 200 mm a 400 mm. Rozložení snímaných bodů je stejné jako na Obr. (3). [6]



Legenda

1 pinola

2 sonda

l délka pevného složeného doteku snímacího systému

POZNÁMKA Pro jasnost, jsou vidět pouze čtyři z pěti doteků a pouze 3 hřídele.

Obr. (5) – Popis složeného snímacího systému [6]

b) Kloubový snímací systém

Principem této zkoušky je měření tvaru, rozměru a umístění koule v pěti různých úhlových polohách kloubového snímacího systému. V každé poloze je měřeno 25 bodů na povrchu zkušební koule, dohromady tedy opět 125 bodů. Pro každou polohu snímacího systému je vypočtena jedna Gaussova koule. Rozložení snímaných bodů je stejné jako na Obr. (3). [6]

Postup:

CMM s kloubovým snímacím systémem mohou používat buďto empirické nebo odvozené kvalifikace dat pro měření. [6]

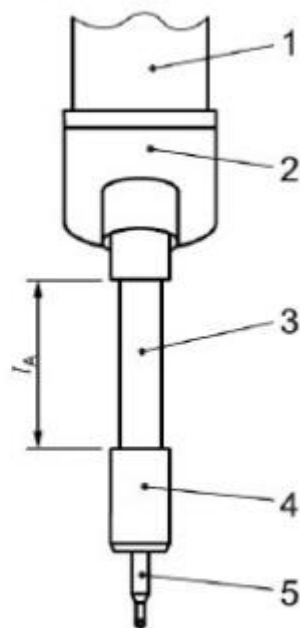
- I. Největší dovolené chyby a meze pro CMM používající empirickou kvalifikaci označujeme: $P_{FTE, MPE}$, $P_{STE, MPE}$ a $P_{LTE, MPL}$. Obdobně tomu je i u hodnot získaných měřením.
- II. Největší dovolené chyby a meze pro CMM používající odvozenou kvalifikaci označujeme: $P_{FTI, MPE}$, $P_{STI, MPE}$ a $P_{LTI, MPL}$. Obdobně tomu je i u hodnot získaných měřením. [6]

Vypočítají se rozsahy souřadnic středů všech pěti koulí, přičemž největší z těchto rozsahů určuje hodnotu polohy snímacího systému P_{LTE} nebo P_{LTI} . Ze všech 125 bodů je vypočítána Gaussova koule, která slouží pro určení úchylky tvaru a rozměru. Tato analýza udává chybu rozměru složeného doteku P_{STE} nebo P_{STI} a chybu tvaru složeného doteku P_{FTE} nebo P_{FTI} . [6]

Zkušební koule musí mít jmenovitý průměr od 10 mm do 50 mm a její rozměr a tvar musí být kalibrován. Použitelné hodnoty délky odsazení sondy l_A jsou následující: 50 mm, 100 mm, 200 mm a 400 mm. [6]

Legenda

- 1 pinola
- 2 držák kloubové sondy
- 3 prodloužení sondy
- 4 sonda
- 5 dotek
- l_A délka odsazení sondy



Obr. (6) – Popis kloubového snímacího systému [6]

Výsledek zkoušky:

Výkon snímání složeným dotekem je ověřen, jestliže:

- Chyba tvaru složeného doteku P_{FTj} není větší než relevantní největší dovolená chyba tvaru složeného doteku $P_{FTj, MPE}$, stanovená výrobcem v případě přijímacích zkoušek a uživatelem v případě zkoušek periodických.
- Chyba rozměru složeného doteku P_{STj} není větší než relevantní největší dovolená chyba rozměru složeného doteku $P_{STj, MPE}$, stanovená výrobcem v případě přijímacích zkoušek a uživatelem v případě zkoušek periodických.
- Hodnota polohy snímacího systému P_{LTj} není větší než relevantní největší dovolená mez polohy snímacího systému $P_{LTj, MPE}$, stanovená výrobcem v případě přijímacích zkoušek a uživatelem v případě zkoušek periodických. [6]

1.5 Artefakty využitelné pro kontrolu CMM

1.5.1 1D artefakty

Koncová měrka

Koncové měrky jsou vyráběné v zásadě ze tří materiálů: z oceli, tvrdokovu a keramiky. Měrky z tvrdokovu i keramiky poskytují dobrou odolnost proti opotřebení. Keramické také disponují odolností proti korozi, díky čemuž jsou často používány v dílenských podmínkách. [10]

Koncové měrky se dělí do čtyř tříd přesnosti:

K –především pro kalibrační laboratoře ke kalibraci a navazování koncových měrek nižších řádů sekundárních etalonů

0 –pro přesné délkové měření, ke kalibraci koncových měrek z oblasti pracovních měřidel, ke kalibraci a k nastavení měřicích přístrojů

1 –ke kalibraci kalibrů a nastavování měřicích přístrojů

2 –pro běžné měření a nastavování míry ve strojírenství [7]



Obr. (7) – Koncová měrka z oceli [8]

Stupňová měrka

Kalibrované stupňové měrky můžeme použít pro měření v obou smyslech snímání metodou od jednotlivého bodu k druhému jednotlivému bodu. Při měření v jednom smyslu snímání musí být všechny měřené plochy měrky měřeny třemi diskrétními body ve stejném místě. Tyto souřadnice bodů se následně zprůměrují. [10]

Pro vyhodnocení vzdálenosti daných ploch se tedy používají již průměrné hodnoty souřadnic. Stupňové měrky se vyrábějí v různých provedeních, např.: jednoduché, čistě vodorovně umístitelné nebo umístitelné pod daným pevným úhlem (často 45°) či úhlově stavitelné. [10]



Obr. (8) – Stupňová měrka [9]

Ball bar

Tento artefakt je složen ze dvou pevně spojených kalibrovaných koulí o známé vzdálenosti. Při měření v obou směrech snímání se kalibrovaná zkušební délka rovná kalibrované vzdálenosti středu koulí plus jedna polovina kalibrovaného průměru každé koule. Měrka je měřena v obou směrech metodou jednotlivého bodu k jednotlivému bodu, tedy stejně jako u koncové měrky. [10]

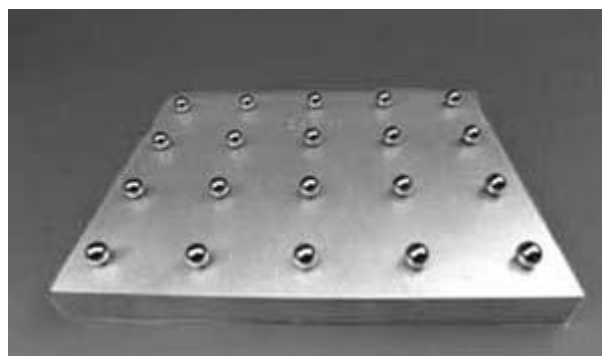


Obr. (9) – Ball bar [17]

1.5.2 2D artefakty

Ball Plate

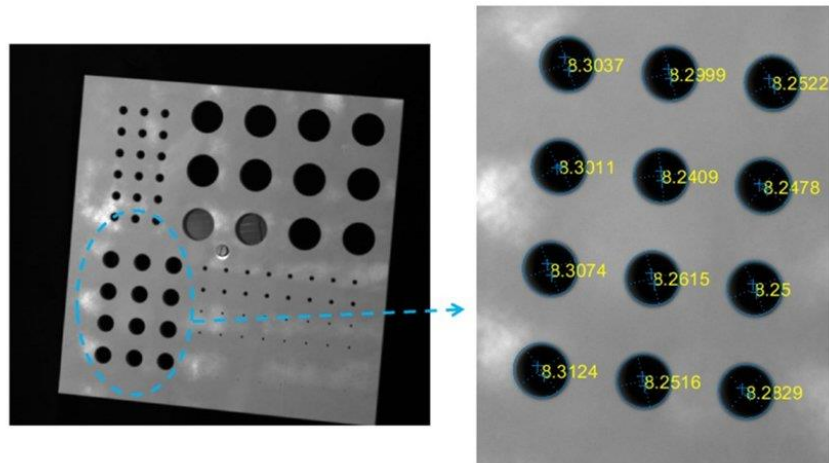
Jedná se o artefakt využívající systém kalibrovaných koulí umístěných na desku. Jsou rozmístěny tak, že vytváří síť koulí s přesně danými rozestupy. Při měření se postupuje tak, že změříme jednotlivé koule, přiřadíme k nim jejich vypočtené středy a vzdálenosti poté porovnááme se známými hodnotami vzdáleností jednotlivých koulí. Můžeme se setkat jak s keramickými, tak i kovovými koulemi, které ovšem mají vyšší hodnotu součinitele tepelné roztažnosti, což může vést ke vzniku vyšší chyby měření. [10]



Obr. (10) – Ball plate [11]

Hole plate

Jedná se o artefakt na podobném principu jako ball plate, ovšem místo koulí se zde nacházejí kalibrované díry. Výhodou oproti ball plate je celková hmotnost, která je díky dírám nižší, a tím je umožněna i snadnější manipulace s artefaktem. [10]

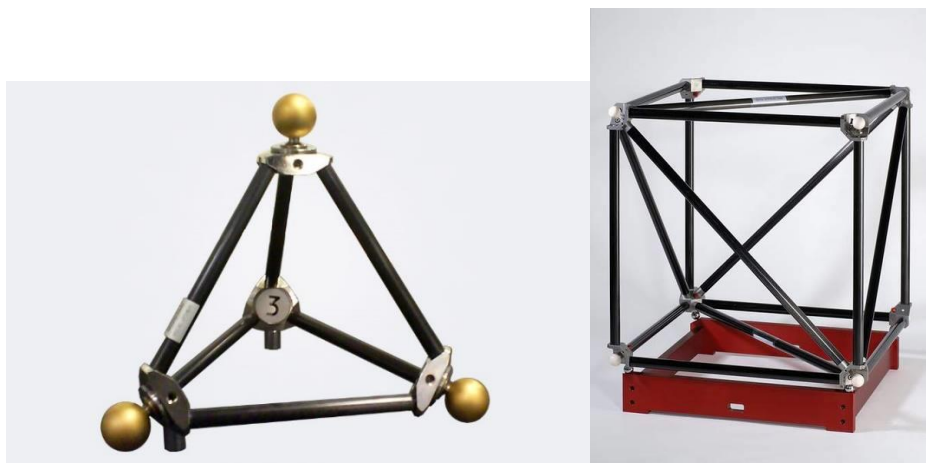


Obr. (11) – Hole plate [12]

1.5.3 3D artefakty

Ball Tetrahedron a Cube

Jedná se o seskupení čtyř kalibrovaných koulí (Tetrahedron) nebo osmi kalibrovaných koulí (Cube) spojených pevnou konstrukcí. Pro Tetrahedron existují i varianty pro bezkontaktní měření, kde jsou kalibrované koule opatřeny povrchovou úpravou. [10]



Obr. (12) - Ball Tetrahedron (vlevo) a Ball Cube (vpravo) [13] [14]

Univerzální 3D Artefakty – Zeiss CMM-Check

S tímto artefaktem je možno měřit a následně pomocí softwaru vyhodnocovat následující funkce: [10]

- Dotykový snímací systém sondy
- Kondici skenovacího systému sondy
- CMM jako stroj pro měření tvaru obsahující charakteristiky filtru
- Chyby lineárního měření



Obr. (13) – Zeiss CMM Check [15]

1.6 Přesnost, správnost a preciznost měření

Přesnost

Přesnost měření (measurement accuracy) vyjadřuje těsnost shody mezi naměřenou hodnotou veličiny a pravou hodnotou měřené veličiny. Zahrnuje jak systematickou chybu, tak i náhodné chyby. Jedná se tedy o termín nadřazený pojmům "pravdivost" a "preciznost", které v sobě zahrnuje. Promítá se do celkové chyby výsledku. Pojem "přesnost měření" není veličinou a není dán číselnou hodnotou veličiny. Měření je prohlášeno za přesnější, když nabízí menší chybu měření. Za předpokladu, že výsledky použité metody vykazují nulovou nebo zanedbatelnou systematickou chybu (vychýlení), přesnost odpovídá preciznosti. [24]

Správnost (pravdivost)

Správnost (measurement trueness) vyjadřuje těsnost shody mezi aritmetickým průměrem nekonečného počtu opakovaných naměřených hodnot a referenční hodnotou veličiny. Pravdivost měření není veličinou, a tudíž sama nemůže být vyjádřena číselně. Míra pravdivosti se obvykle vyjadřuje pomocí vychýlení výsledků – viz. též výtěžnost. Pravdivost měření se vztahuje k systematické chybě, nevztahuje se k náhodné chybě. [24]

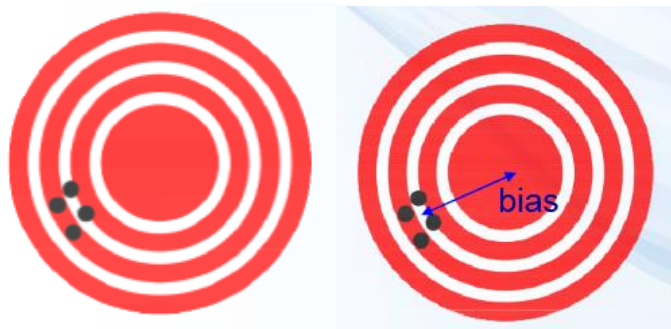


Obr. (14) – Vysoká správnost měření [25]

Preciznost

Preciznost měření (Measurement precision) vyjadřuje těsnost shody mezi naměřenými hodnotami veličiny získanými opakovanými měřeními na stejném vzorku nebo na podobných vzorcích za specifikovaných podmínek. Čím menší jsou náhodné vlivy, které způsobují rozptýlení výsledků, tím větší je preciznost, ale preciznost sama nemá žádnou numerickou hodnotu. Preciznost závisí pouze na distribuci náhodných chyb a nemá žádný vztah k pravé či referenční hodnotě. Na Obr (15) je zobrazena vysoká preciznost, ale malá pravdivost měření.

Preciznost je obvykle vyjádřena jako rozptyl, standardní odchylka nebo variační koeficient řady opakovaných měření a může být definována ve třech úrovních: opakovatelnost (repeatability), mezilehlá preciznost (intermediate precision) a reprodukovatelnost (reproducibility). [24]



Obr. (15) – Vysoká preciznost měření [25]

2 Technické vybavení společnosti v oblasti kontroly kvality, popis používaných CMM a snímacích systémů

2.1 Portfolio společnosti Hofmeister s.r.o

Hofmeister s.r.o se od roku 1990 věnuje přesnému strojírenství, a to v oblastech automobilového, leteckého i elektrotechnického průmyslu. Firma se zaměřuje především na prodej nástrojů, náradí a měřidel pro kovoobrábění. Poskytuje však i technické poradenství, ošetření a servis nástrojů. Disponuje technologiemi jako je pětiosé obrábění, laserové mikroobrábění, omílání a pískování nebo laserové popisování. [16]

V neposlední řadě se také firma věnuje metrologii, a to nejen při měření dílů, které sama vyrábí, ale věnuje se také zakázkovému měření. K těmto účelům má firma ve své metrologické laboratoři k dispozici optický 3D scanner, pětiosý kamerový měřicí stroj, digitální programovatelný optický komparátor, měřicí mikroskop a profiloměr. K tomuto vybavení má firma k dispozici také dva souřadnicové měřicí stroje, AMS – M8.10.7 CNC a IMS – IMPACT II CNC.

2.2 Vybavení společnosti v oblasti kartézských CMM

Stacionární CMM můžeme označit jako zařízení, která obsahují tři kartézské ortogonální osy. Tyto CMM disponují snímačem, kterým je možné zaznamenávat souřadnice bodů z povrchu měřeného objektu. Každý bod je určen prostorovou souřadnicí X, Y, Z. K tomuto účelu jsou CMM vybaveny velmi přesným odečítáním vzdáleností ve všech osách, které je plně kontrolované počítačem. [2]

Nejrozšířenějším typem stacionárních CMM je typ mostový. Tyto stroje používá i firma Hofmeister s.r.o. Základní konstrukce je tvořena masivní kamennou deskou (žula, granit), na níž je přichycena mostová konstrukce stroje zajišťující pohyb stroje v jedné ose. Konstrukce mostu má dvě části: pohonnou a opěrnou. Po mostové konstrukci pojíždí portál, který zajišťuje pohyb ve druhé ose. Portálem prostupuje pinola, která obstarává pohyb po ose Z. Výhoda této konstrukce je dosahovaná přesnost

a opakovatelnost stroje. Z toho důvodu jsou mostové stroje určeny pro přesné měření v laboratorních podmínkách. [2]

IMS – IMPACT II CNC

Tab. (2) – Technické specifikace CMM IMS [18]

WORK ENVELOPE AND AXES	
Max Part Size	1,520.000 mm X 995.000 mm X 644.000 mm
Table Size (inches)	1520.000 mm X 995.000 mm
X Axis Travels	750.000 mm
Y Axis Travels	750.000 mm
Z Axis Travels	550.000 mm
Maximum Rapid Rate	1500

ACCURACY	
B89 Volumetric Accuracy	0.00875 mm
Resolution	0.000500 mm
Temperature Range	10-40 °C

WEIGHTS AND MEASURES	
Machine Length	1,520.00 mm
Machine Width	1,446.00 mm
Machine Height	2,415.00 mm
Machine Weight	1,100 Kg



Obr. (16) - IMS IMPACT II CNC [19]

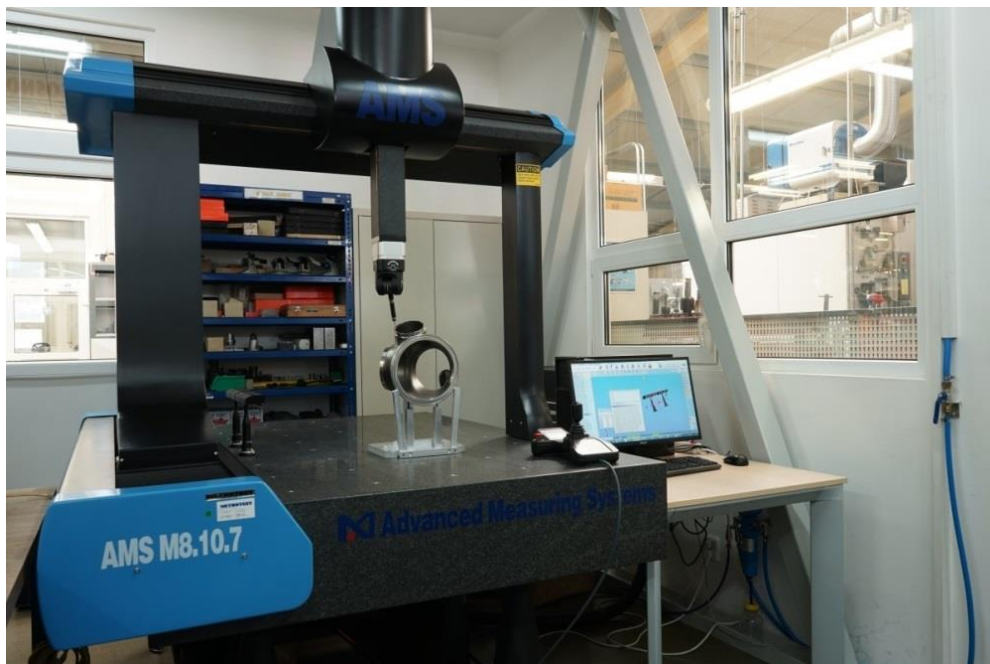
AMS – M8.10.7 CNC

Tab. (3) - Technické specifikace CMM AMS [20]

MODEL	STROKES			MEASURING ACCURACY	
	X	Y	Z	S	
	mm	mm	mm	MPEE(μm)	MPEP(μm)
AMS-M8107	800	1000	700	2.5+3.3L/1000	2.5

OVERALL SIZE			Machine Weight	Part Weight
Lx	Ly	Lz		
mm	mm	mm	Kg	Kg
1550	2050	3000	2100	1000

Environment Specifications	
Power Voltage: 110 - 220 V	Temperature Range: 18-22°C
Air Pressure: 0.7 – 1 Mpa	Hourly Temperature Cycle: 1°C/h
Filter Accuracy: 0.3 μm	Thermal Gradient: 1°C/m
Air Supply: 0.12 – 0.45 m ³ /min	Relative Humidity: 55%-65%



Obr. (17) - AMS M8.10.7 CNC [19]

2.3 Kontaktní snímací systémy

Kontaktní snímací systémy jsou založeny na fyzickém dotyku mezi snímací sondou a měřeným objektem, přičemž nejčastějším snímacím prvkem pro vytvoření

mechanické interakce s obrobkem je kulička (nejčastěji z rubínového materiálu). Špička kuličky musí vykazovat velmi vysokou tuhost, odolnost proti opotřebení a hladký povrch, což zaručuje právě zmíněný rubín. [3]

a) Bodové snímací systémy

Bodové snímací systémy jsou využívány především při měření běžných geometrických prvků, u kterých není třeba vyhodnocovat odchylku tvaru. Jedná se o sekvenční měření bodů, které se nacházejí na povrchu součásti. Provádí se pozvednutím sondy mezi dvěma měřeními a dotknutím se znovu v dalším snímaném bodě. Během dotknutí s povrchem obrobku je vyvolán spínací signál. Výsledkem měření jsou u těchto systémů samostatné body, z nichž je později možné generovat objekty (přímka, kružnice, koule aj.) Jejich předností jsou nižší cena, hmotnost a velikost. Nevýhoda spočívá v jejich nižší měřicí rychlosti, protože je třeba se po každému sejmutém bodu vzdálit. [3]

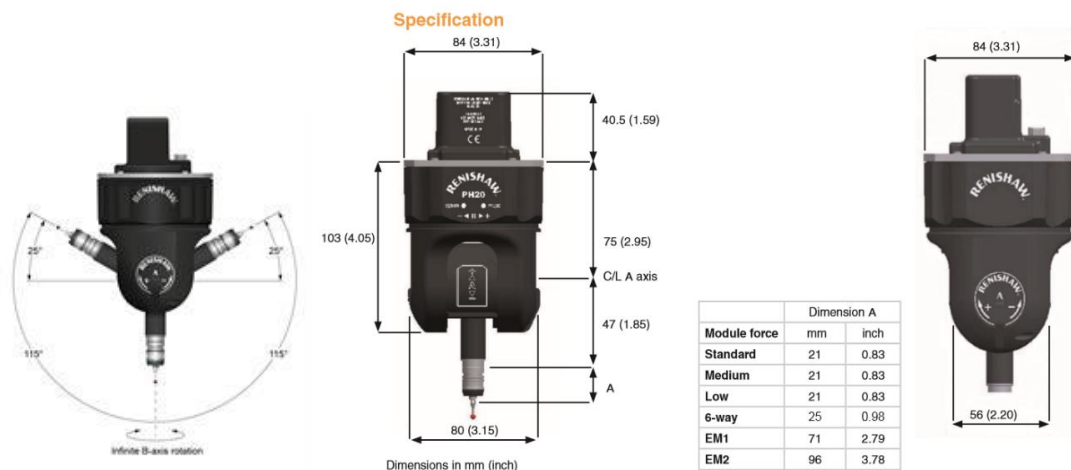
b) Skenovací (měřicí) snímací systémy

Tato metoda snímání nám umožňuje skenování po nastaveném kroku. Měřicí snímací systémy byly vyvinuty kvůli požadavkům na rychlejší snímání bodů a lepší opakovatelnost měření, což zároveň poskytuje i vyšší přesnost měření. Díky své rychlosti a všestrannosti se v dnešní době jedná o nejpoužívanější snímací systém. [3]

2.4 Vybavení společnosti – sensorika

Renishaw – PH20 a PH10T PLUS

PH20 disponuje pětiosým dotekovým měřením. Doteky hlavy snímají měřené body rychleji s lepší přesností a opakovatelností a pětiosý pohyb eliminuje dobu potřebnou k polohování hlavy. Kontinuální polohování zaručuje lepší přístup k měřeným prvkům při minimalizaci výměn doteků. Současný pohyb v 5 osách umožňuje měření větších součástí na CMM díky minimalizaci prostoru kolem součásti potřebného pro otáčení hlavy. Mechanická ložiska fungují bez požadavku na přívod stlačeného vzduchu a odvozená kalibrace určuje orientaci hlavy a polohu sondy v jedné operaci, což umožňuje následné měření v jakémkoli úhlu hlavy. [21]



Obr. (18) – Úhlové měřicí možnosti a rozměry PH20 [21]

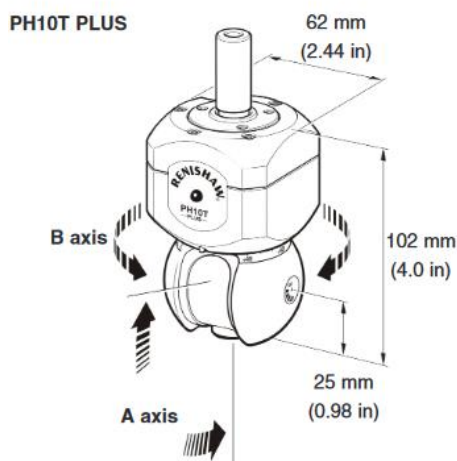
Tab. (4) - Technická specifikace PH20 [21]

Weight (excluding module and cables)	810 g (28.6 oz)		
Temperature range	15 °C to 35 °C (59 °F to 95 °F)		
Operating Storage	-25 °C to 70 °C (-13 °F to 158 °F)		
Maximum movement speed	3 revs/s (1281 mm/s with standard module & 10 mm stylus)		
Maximum head touch speed	50 mm/s		
Rotation angles	-115° to 115°		
A axis	∞		
B axis	∞		
Angular resolution	0.4 μRadians		
Bearings	Mechanical		
Change rack system	MCR20 NI and MCR20		
Joystick	Multifunction MCU <i>lite</i> -2		
ISO 10360-5 (2001) typical performance std force module with 12 x 4 mm stylus on a CMM with ISO 10360-2 (2002) specification of 0.48+ L/1000* * specified with a TP7	Size	CMM TOUCH	HEAD TOUCH
	Form	0.0006 mm (0.00002 in)	0.0002 mm (0.00001 in)
	Location	0.0026 mm (0.00010 in)	0.0024 mm (0.00009 in)
		0.0013 mm (0.00005 in)	0.0009 mm (0.00003 in)

PH10T PLUS je motorizovaná indexovací hlava, která umožňuje nasměrovat sondu do kterékoli ze 720 pozic v krocích po 7,5°. Hlava je kompatibilní s řadou kontaktních i bezkontaktních snímacích senzorů a dotkových spouštěcích sond, což umožňuje určit velikost a formu elementů i v kritických místech. [23]

Tab. (5) - Technická specifikace PH10T PLUS [23]

Head type	PH10MQ PLUS	PH10M PLUS	PH10T PLUS
Weight	730 g (25.7 oz)	645 g (22.07 oz)	
CMM mounting	Direct to quill	Shank	
Probe mounting	Renishaw autojoint (multiwired) M8 threaded probes can be used with PH10MQ/M PLUS via PAA probe adaptor		M8 thread
Head controller	PHC10-3 PLUS, UCC T3 PLUS or UCC S3		
Repeatability of position	0.4 µm (0.00002 in) specified at a distance of 100 mm (3.94 in) from the A-axis centre of rotation		
Cycle time: 7.5° move 90° move	2.5 seconds 3.5 seconds		
Total angular movement: A axis B axis	0° to 105° in 7.5 steps 0° to ±180° in 7.5 steps		
Total number of positions	720		
Maximum drive output torque	0.45 Nm		
Maximum extension bar	300 mm (11.8 in) using PAA3 probe adaptor		300 mm (11.8 in) using PEL4 extension
Temperature range Operating Storage	10 °C to 40 °C (50 °F to 104 °F) -10 °C to 70 °C (14 °F to 158 °F)		
Joystick options	HCU1 or MCUlite-2, MCU5 or MCU W		
Warranty	2 years		



Obr. (19) – Rozměry PH10T PLUS [23]

TP20

TP20 je kompaktní spínací dotyková sonda s výměnou modulů, což umožňuje použití řady konfigurací doteků a prodlužovacích nástavců pro přístup k prvkům složitých součástí. [22]

TP20 je kinematická spínací dotyková sonda s pětisměrovým nebo šestisměrovým spínáním. Dvoudílná konstrukce sestává ze samostatného tělesa sondy a oddělitelných modulů. Moduly jsou k tělu sondy připojeny magneticky. Tím vzniká možnost manuální nebo automatické výměny konfigurací doteků bez nutnosti recalibrace hrotů doteků, čímž vzniká úspora času během kontrolních činností. [22]

Tab. (6) - Technická specifikace TP20 [22]

Směry snímání	Všechny moduly kromě 6W 6W	$\pm X, \pm Y, +Z$ $\pm X, \pm Y, \pm Z$
Vhodný interface		PI 7-3, PI 200-3, řízení UCC
Pre-travel variation	LF SF / EM1 / EM2 MF EF 6W	$\pm 0,60 \mu\text{m}$ ($\pm 0,000023$ palce) $\pm 0,80 \mu\text{m}$ ($\pm 0,000032$ palce) $\pm 1,00 \mu\text{m}$ ($\pm 0,000039$ palce) $\pm 2,00 \mu\text{m}$ ($\pm 0,000079$ palce) $\pm 1,50 \mu\text{m}$ ($\pm 0,000058$ palce)
Opakovatelnost v jednom směru	LF / SF / EM1 / EM2 MF EF 6W	$\pm 0,35 \mu\text{m}$ ($\pm 0,000014$ palce) $\pm 0,50 \mu\text{m}$ ($\pm 0,000020$ palce) $\pm 0,65 \mu\text{m}$ ($\pm 0,000026$ palce) $\pm 1,00 \mu\text{m}$ ($\pm 0,0000395$ palce)
Opakovatelnost výměny doteků	MCR20 Manuální	$\pm 0,50 \mu\text{m}$ ($\pm 0,000020$ palce) $\pm 1,00 \mu\text{m}$
Upevnění doteků		M2
Způsob upevnění		Závit M8

3 Návrh metodiky zkoušení CMM strojů v podniku

Měření v podniku jsme se rozhodli provádět na třech různých artefaktech:

- Koule z nitridu křemíku
- Hliníkový ball plate
- Kalibrační kroužek

Všechny tyto artefakty byly v podniku měřeny na obou dostupných CMM strojích, novějším stroji AMS a starším stroji IMS. Všechny hodnoty v následně uvedených tabulkách jsou v jednotkách mm, pokud není v tabulce definováno jinak.

3.1 Postup měření zkušební koule

Tento artefakt jsem se nejdřív rozhodl přeměřit ve škole na stroji Zeiss UPMC 850, abych pro něj stanovil referenční hodnotu.

Tab. (7) - Naměřené hodnoty zkušební koule, rozměry v [mm]

číslo měření	Průměr koule	Odchylka tvaru
1	25,40728	0,00073
2	25,40732	0,00077
3	25,40731	0,0008
4	25,40729	0,00076
5	25,40726	0,00065
6	25,4073	0,00075
7	25,40732	0,00073
8	25,40733	0,00079
9	25,40729	0,00077
10	25,4073	0,00081
průměr	25,4073	0,000756

V Tab. (7) jsou uvedeny výsledky měření na školním stroji Zeiss UPMC 850. Měření bylo provedeno pomocí spínací metody, kdy jsem na horní polokouli naměřil 25 rovnoměrně rozložených bodů podle Obr. (3). Všechny hodnoty jsou uvedeny v mm, pokud není v tabulce definováno jinak. Průměrná hodnota průměru koule, kterou budu v dalších výpočtech používat jako referenční, je tedy 25,4073mm a odchylka tvaru této koule je

0,756 μ m. Před měřením je třeba nechat kouli přizpůsobit se teplotě v laboratoři a řádně ji očistit.



Obr. (20) – Zkušební koule

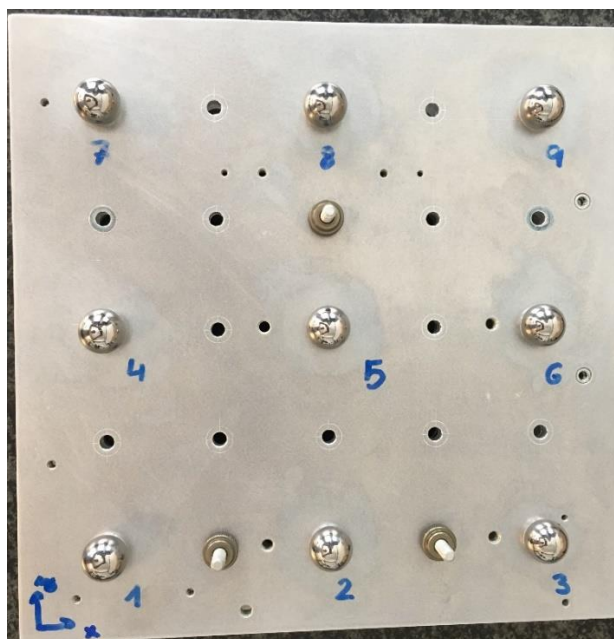
Tuto kouli budu v podniku měřit třemi různými způsoby. První z nich bude autentický jako při měření ve školní laboratoři, tedy 10x25 bodů rozložených podle Obrázku (3).

Druhý způsob je měření koule pomocí 125 bodů v pěti různých natočeních snímače. Na každou polohu snímacího systému tedy připadá 25 bodů, přičemž měřené polohy jsou shora a poté z každé strany na rovníku koule po 90°. Tento způsob měření budu opakovat třikrát.

Třetí způsob měření koule spočívá v naměření koule z pěti různých směrů, přičemž v každém směru měříme 25 bodů. Z každého směru snímání vyhodnotíme pomocí softwaru jednu kouli z 25 bodů (polohy snímače jsou shora a poté z každé strany na rovníku koule po 90°). Tento způsob měření budu také opakovat třikrát.

3.2 Postup měření hliníkového ball platu

Hliníkový ball plate, který jsem využil pro toto měření, má na sobě umístěných celkem devět koulí. Těchto 9 koulí je na ball platu rozloženo do čtverce 3x3. Označení jednotlivých koulí a orientace os viz. Obr. (21). Průměr jednotlivých koulí je 20mm a přibližná vzdálenost mezi koulemi v osách X a Y je 100mm.



Obr. (21) – Zkušební ball plate

Reálné vzdálenosti mezi koulemi jsem opět přeměřil v měřicí laboratoři ČVUT na stroji Zeiss UPMC 850, přičemž Kouli 1 jsem vždy použil jako výchozí bod a poté měřil vzdálenost ke každé další kouli na ball platu. Naměřené referenční vzdálenosti jsou uvedeny v Tabulce (8).

Tab. (8) – Měření ball platu na stroji Zeiss, rozměry v [mm]

vzdálenosti	průměr	rozpětí měřených hodn.	výběrová směrodatná odch.
1_2	99,95056	0,00012	4,34741E-05
1_3	200,01765	0,00029	9,2352E-05
1_4	100,03997	0,00032	0,00010
1_5	141,69237	0,00029	0,00010
1_6	223,53855	0,0004	0,00013
1_7	200,20513	0,00051	0,00016
1_8	223,73913	0,00044	0,00016
1_9	282,97335	0,00055	0,00019

Ball plate je ke granitové desce CMM uchycen pomocí přípravku sestaveného z modulární stavebnice AluFix. Abych dosáhl co nejpřesnějšího měření, bude ball plate i při měření v podniku zafixován totožným přípravkem.

3.3 Postup měření kalibračního kroužku

Kalibrační kroužek o jmenovitém průměru 100,025mm a odchylce tvaru 1,3 μ m, jejíž hodnotu jsem zjistil pomocí měření kruhovitosti na stroji Zeiss UPMC 850, jsem se rozhodl měřit ve třech různých polohách. V první z nich bude kroužek měřen v rovině XY, poté v rovině YZ a nakonec v rovině XZ. V každé z těchto poloh jsem desetkrát měřil průměr kroužku a odchylku jeho tvaru.



Obr. (22) – Zkušební kalibrační kroužek

4 Realizace zkoušek na vybraných CMM a analýza výsledků

V této kapitole budu popisovat měření ve vybraném podniku. Všechny mnou zvolené artefakty budou měřeny na dvou souřadnicových strojích, AMS a IMS. Ke každému artefaktu budou uvedeny průměrné naměřené hodnoty a jejich rozdíl s referenčními hodnotami (rozdíl=referenční hodnota ze školní laboratoře–naměřená hodnota z podniku), případně společně s rozpětím měřených hodnot, výběrovými směrodatnými odchylkami a rozpětími chyby při měření rozměru. Stroje jsou kalibrovány empiricky, proto budeme využívat i parametry uvažující tento způsob kalibrace.

Chyby měření budeme u stroje AMS porovnávat s maximální dovolenou chybou snímání MPE_P a maximální dovolenou chybou stroje MPE_E . Parametr MPE_P má neměnnou hodnotu $2,5\mu\text{m}$ u parametru MPE_E budu vycházet ze vzorce $MPE_E=2,5+3,3L/1000$, kde L je právě měřená vzdálenost v mm. U staršího stroje IMS budeme k porovnání využívat parametr Volumetric Accuracy, který bude mít neměnnou hodnotu $8,75\mu\text{m}$.

4.1 Měření zkušební koule v podniku

4.1.1 Postup a výsledky měření

Kouli jsme ke granitové desce na obou strojích připevnili šroubem. Poté jsem podle plánu uvedeného v kapitole 3.1 měřil kouli nejprve shora, a to sejmutím 25 bodů, které byly rozloženy podle Obr. (3). Toto měření jsem opakoval desetkrát a následně vyhodnotil průměry, rozpětí a výběrové směrodatné odchylky.

Tab. (9) – Měření koule: 10x25 bodů na stroji AMS, rozměry v [mm]

	průměr	rozdíl od ref.	rozpětí měř. hod.	výběr. směr. odch.
Průměr koule	25,40637	0,00093	0,0013	0,00036
Odchylka tvaru (μm)	0,00316	-0,0024	0,0018	0,00056

Tab. (10) – Měření koule: 10x25 bodů na stroji IMS, rozměry v [mm]

	průměr	rozdíl od ref.	Rozpětí. měř. Hod.	Výběr. Směr. Odch.
Průměr koule	25,4076	-0,0003	0,0007	0,00025
Odchylka tvaru (μm)	0,00422	-0,00346	0,0012	0,00036

Následně byla koule nasnímána z pěti stran. Z každé strany bylo nasnímáno 25 bodů. Celkem tedy byla jedna koule vyhodnocena z naměřených 125 bodů. Toto měření jsem opakoval třikrát.

Tab. (11) – Měření koule: 3x125 bodů na stroji AMS, rozměry v [mm]

	průměr	rozdíl od ref.	rozpětí měř. Hod.
Průměr koule	25,4075	-0,0002	0,0002
Odchylka tvaru	0,0103	-0,00954	0

Tab. (12) – Měření koule: 3x125 bodů na stroji IMS, rozměry v [mm]

	průměr	rozdíl od ref.	rozpětí měř. Hod.
Průměr koule	25,4082	-0,0009	0
Odchylka tvaru	0,00947	-0,00871	0,0009

Jako poslední jsem si připravil měření koule v pěti natočeních snímače, přičemž v každém natočení byla vyhodnocena právě jedna koule. Kromě průměru a odchylek tvaru jednotlivých koulí jsem v tomto měření zadefinoval i vzájemné vzdálenosti středů těchto koulí. Koule byly definovány z 25 bodů a měření jsem provedl opět třikrát. Pro přehlednost jsem koule pojmenoval následujícím způsobem:

- D – koule měřená snímačem shora
- L – koule měřená se snímačem ve směru -X
- M - koule měřená se snímačem ve směru -Y
- PR - koule měřená se snímačem ve směru +X
- PL- koule měřená se snímačem ve směru +Y

Tab. (13) – Měření koule: 3x25 bodů v pěti natočeních na stroji AMS, rozměry v [mm]

	průměr	rozdíl od ref.
Průměr koule D	25,40767	-0,00037
Průměr koule L	25,40917	-0,00187
Průměr koule M	25,4087	-0,0014
Průměr koule PR	25,40737	-6,66667E-05
Průměr koule PL	25,408	-0,0007
Odchylka tvaru D	0,0038	-0,00304
Odchylka tvaru L	0,00313	-0,00238
Odchylka tvaru M	0,0065	-0,00574
Odchylka tvaru PR	0,00583	-0,00508
Odchylka tvaru PL	0,00566	-0,00491
Vzdálenost D-L	0,00467	-
Vzdálenost D-M	0,0041	-
Vzdálenost D-PR	0,00413	-
Vzdálenost D-PL	0,0036	-
Vzdálenost L-PL	0,00627	-
Vzdálenost L-M	0,00477	-
Vzdálenost L-PR	0,00753	-
Vzdálenost M-PR	0,00563	-
Vzdálenost M-PL	0,0023	-
Vzdálenost PR-PL	0,0049	-

Největší průměrná vzájemná vzdálenost středů na stroji AMS je 0,007533mm, a to mezi středy koulí měřených v polohách snímače L a PR.

Tab. (14) – Měření koule: 3x25 bodů v pěti natočeních na stroji IMS, rozměry v [mm]

	průměr	rozdíl od ref.
Průměr koule D	25,40773	-0,00043
Průměr koule L	25,40696	-0,00033
Průměr koule M	25,4092	-0,0019
Průměr koule PR	25,40913	-0,00183
Průměr koule PL	25,40873	-0,00143
Odchylka tvaru D	0,00433	-0,00358
Odchylka tvaru L	0,00503	-0,00428
Odchylka tvaru M	0,0042	-0,00344
Odchylka tvaru PR	0,00377	-0,00301
Odchylka tvaru PL	0,00307	-0,00231
Vzdálenost D-L	0,00567	-
Vzdálenost D-M	0,00157	-
Vzdálenost D-PR	0,0065	-
Vzdálenost D-PL	0,0043	-
Vzdálenost L-PL	0,0025	-
Vzdálenost L-M	0,0065	-
Vzdálenost L-PR	0,0042	-
Vzdálenost M-PR	0,00653	-
Vzdálenost M-PL	0,00543	-
Vzdálenost PR-PL	0,0048	-

Největší průměrná vzájemná vzdálenost středů na stroji AMS je 0,006533mm, a to mezi středy koulí M a PR.

4.1.2 Analýza výsledků měřených na zkušební kouli

Při měření koule shora pomocí 25 bodů jsem vyhodnotil chybu tvaru jednotlivého doteku P_{FTU} , která je definována obdobně jako parametr MPE_P , jde pouze o rozdíl v označení v normě novější a starší. Tuto hodnotu jsem poté porovnal s hodnotou maximální chyby MPE_P pro stroj AMS, a následně s hodnotou Volumetric Accuracy pro stroj IMS. Chybu P_{FTU} jsem vypočítal jako rozdíl naměřené průměrné odchylky tvaru v podniku a naměřené referenční odchylky na stroji Zeiss.

Tab. (19) – Analýza měření koule: 10x25 bodů na stroji AMS, rozměry v [μ m]

Chyba tvaru	MPE_P	P_{FTU}
	2,5	2,4

Tab. (20) – Analýza měření koule: 10x25 bodů na stroji IMS, rozměry v [μm]

Chyba tvaru	Vol. Accuracy	P_{FTU}
	8,75	3,46

Pro obě tyto varianty nám vyšel rozdíl v toleranci maximální chyby.

U měření koule pomocí 125 bodů jsem vyhodnotil chyby P_{STE} a P_{FTE} . Tyto hodnoty jsem dále porovnal s hodnotami maximálních chyb MPE_E a MPE_P pro stroj IMS, a následně s hodnotou Volumetric Accuracy pro stroj IMS. Hodnotu P_{STE} jsem vyhodnotil jako rozdíl průměrné naměřené délky v podniku a referenční naměřené délky a hodnotu P_{FTE} jsem vyhodnotil jako rozdíl průměrné naměřené odchytky tvaru v podniku a referenční naměřené odchytky tvaru. Po dosazení dostáváme následující hodnoty:

Tab. (21) – Analýza měření koule: 3x125 bodů na stroji AMS, rozměry v [μm]

Chyba rozměru	MPE_E	P_{STE}
	2,584	0,2
Chyba tvaru	MPE_P	P_{FTE}
	2,5	9,54

Tab. (22) – Analýza měření koule: 3x125 bodů na stroji IMS, rozměry v [μm]

Chyba rozměru	Vol. Accuracy	P_{STE}
	8,75	0,9
Chyba tvaru	Vol. Accuracy	P_{FTE}
	8,75	8,71

U měření koule 125 body nám vyšel značný rozdíl chyby tvaru. Tato skutečnost je dána pravděpodobně tím, že chyby tvaru se sčítají ze všech směrů, a proto tedy dochází ke značnému vychýlení. V případě stroje AMS se dostáváme až na hodnotu rozdílu 7,04 μm . U stroje IMS jsme sice chybou P_{FTE} hodnotu Volumetric Accuracy nepřekročili, je však třeba zvážit, že tento parametr je značně vyšší než parametr MPE_P , a nerozlišuje svou velikost pro chybu tvaru a rozměru. Při přísnějších podmínkách by tedy nejspíše byla chyba tvaru P_{FTE} i u stroje IMS považována za nevyhovující.

Při měření koule v pěti různých polohách snímače 25 body jsem vyhodnotil parametr P_{FTE} pro každé měření, a to jako rozdíl průměrné naměřené odchylky tvaru v podniku a referenční naměřené odchylky tvaru. Tento parametr jsem poté pro každou definovanou kouli porovnal s hodnotou maximální chyby MPE_P pro stroj AMS, a následně s hodnotou Volumetric Accuracy pro stroj IMS. Nakonec jsem pro toto měření vyhodnotil chybu polohy snímání P_{LTE} .

Tab. (23) – Analýza měření koule: 3x25 bodů v pěti natočeních na stroji AMS, rozměry v [μm]

Chyba tvaru	MPE_P	P_{FTE}
Odchylka tvaru D	2,5	3,04
Odchylka tvaru L	2,5	2,38
Odchylka tvaru M	2,5	5,74
Odchylka tvaru PR	2,5	5,08
Odchylka tvaru PL	2,5	4,91

Tab. (24) – Analýza měření koule: 3x25 bodů v pěti natočeních na stroji IMS, rozměry v [μm]

Chyba tvaru	Vol. Accuracy	P_{FTE}
Odchylka tvaru D	8,75	3,58
Odchylka tvaru L	8,75	4,28
Odchylka tvaru M	8,75	3,44
Odchylka tvaru PR	8,75	3,01
Odchylka tvaru PL	8,75	2,31

Odchylka tvaru nám u stroje AMS vyšla jako nevyhovující pro 4/5 měření. U stroje IMS jsme se dostali v odchylkách tvaru na mírně lepší výsledky, a i vlivem vyšší benevolentnosti parametru Volumetric Accuracy nám měření vyšla jako vyhovující.

Chyba P_{LTE} , kterou jsem vypočítal jako největší průměrnou vzájemnou vzdálenost středů, nám vyšla u stroje AMS rovna $7,53\mu\text{m}$ a u stroje IMS rovna $6,53\mu\text{m}$. Pro tento parametr nemáme žádnou referenční hodnotu k porovnání, nabízí se snad pouze chyba rozměru MPE_E , kterou bychom u stroje AMS překročili, a pro IMS hodnota Volumetric Accuracy, u které by bylo měření vyhovující.

4.2 Měření hliníkového ball platu v podniku

4.2.1 Postup a výsledky měření

Ball plate jsme ke granitové desce na obou strojích připevnili za použití přípravku Alufix stejným způsobem, jako při měření ve školní laboratoři. Provedli jsme vyrovnání součásti a poté zaměřili každou kouli pomocí pěti bodů. V softwaru jsme poté vyhodnotili vzdálenosti koulí 2-9 ke kouli 1. Toto měření jsem provedl desetkrát a následně vyhodnotil průměry a jejich rozdíl s referencí, rozpětí a výběrové směrodatné odchylky.

Tab. (15) – Měření ball platu na stroji AMS, rozměry v [mm]

vzdálenosti	průměr	rozpětí měř. hod.	výběr. směr. odch.	rozdíl od ref.
1_2	99,9489	0,0017	0,0006	0,00166
1_3	200,013	0,0043	0,00135	0,00465
1_4	100,04084	0,0021	0,00065	-0,00087
1_5	141,68963	0,0024	0,00078	0,00274
1_6	223,53421	0,0049	0,00143	0,00433
1_7	200,20727	0,0024	0,00076	-0,00214
1_8	223,73854	0,0037	0,00101	0,00059
1_9	282,97121	0,0041	0,00128	0,00214

Rozpětí chyby při měření rozměru je při měření na stroji AMS 0,006792mm.

Tab. (16) – Měření ball platu na stroji IMS, rozměry v [mm]

vzdálenosti	průměr	rozpětí měř. hod.	výběr. směr. odch.	rozdíl od ref.
1_2	99,95153	0,004	0,00115	-0,00097
1_3	200,02019	0,0024	0,00074	-0,00253
1_4	100,04189	0,0018	0,00064	-0,00192
1_5	141,69358	0,0023	0,00074	-0,00121
1_6	223,54096	0,0035	0,00108	-0,00241
1_7	200,20513	0,0029	0,00081	0
1_8	223,73881	0,0036	0,00112	0,00032
1_9	282,9743	0,0029	0,00099	-0,00095

Rozpětí chyby při měření rozměru je při měření na stroji AMS 0,002855mm.

4.2.2 Analýza výsledků měřených na ball platu

Pro měření ball platu na stroji AMS jsem vypočítal parametr MPE_{E_0} podle vzorce: $MPE_E = 2,5 + 3,3L/1000$, kde L je právě měřená vzdálenost. U stroje IMS opět použijeme parametr Volumetric Accuracy. Tyto parametry budeme srovnávat s chybou při měření délky E_0 , kterou jsou vyhodnotil jako rozdíl průměrné naměřené délky v podniku a referenční délky naměřené na stroji Zeiss. Po dosazení jsem dostal tyto hodnoty:

Tab. (25) – Analýza měření ball platu na stroji AMS, rozměry v [μm]

Vzdálenosti	MPE_{E_0}	E_0
1_2	2,83	1,66
1_3	3,16	4,65
1_4	2,83	0,87
1_5	2,968	2,74
1_6	3,238	4,34
1_7	3,161	2,14
1_8	3,238	0,59
1_9	3,434	2,14

Tab. (26) – Analýza měření ball platu na stroji IMS, rozměry v [μm]

Vzdálenosti	Vol. Accuracy	E_0
1_2	8,75	0,97
1_3	8,75	2,54
1_4	8,75	1,92
1_5	8,75	1,21
1_6	8,75	2,41
1_7	8,75	0
1_8	8,75	0,32
1_9	8,75	0,95

Jak vidíme v tabulce, pro stroj AMS u dvou hodnot přesahuje chyba při měření délky hodnotu maximální chyby při měření délky MPE_{E_0} . Pro stroj IMS hodnota E_0 nikde nepřesáhla hodnotu Volumetric Accuracy, je tomu tak ale hlavně proto, že Volumetric Accuracy je jako kritérium mnohem volnější než parametr MPE_E .

Za zmínku zde stojí rozptyl naměřených hodnot, a tedy i preciznost měření. Rozptyl je totiž například u stroje AMS až o řád vyšší, než je tomu u stroje Zeiss, což ukazuje na výrazně nižší preciznost měření u stroje AMS. Tento výsledek může vyplývat

ze skutečnosti, že ball plate na stroji Zeiss byl měřen pevnou měřicí hlavou, kdežto u strojů v podniku se jednalo o hlavy otočné, u kterých se stále teoreticky předpokládá nižší přesnost měření.

Je však třeba také uvést, že parametr MPE_E je definován ze vzdálenosti dvou bodů. Při měření na ball platu vycházíme ze vzdáleností středů koulí, které jsou generované pomocí několika bodů nasnímaných na povrchu koule, a proto je třeba brát výsledky měření s jistou rezervou, protože toto měření neodpovídá přesné definici měření parametru MPE_E .

4.3 Měření kalibračního kroužku v podniku

Kalibrační kroužek jsme na granitové desce upevnili pomocí magnetu. Poté jsem ve třech různých polohách provedl vyrovnání součásti a následně změřil průměr kroužku a odchylku jeho tvaru. Toto měření jsem pro každou polohu opakoval desetkrát.

Tab. (17) – Měření kalibračního kroužku na stroji AMS, rozměry v [mm]

Kroužek v rovině XY	průměr	rozdíl od ref.	rozpětí měřených hodnot
Průměr kroužku	100,0018	0,00074	0,0012
Odchylka tvaru	0,00394	-0,00264	0,0029
Kroužek v rovině YZ	průměr	rozdíl od ref.	rozpětí měřených hodnot
Průměr kroužku	100,0014	0,00111	0,0021
Odchylka tvaru	0,00725	-0,00595	0,0097
Kroužek v rovině XZ	průměr	rozdíl od ref.	rozpětí měřených hodnot
Průměr kroužku	100,0026	-8E-05	0,0006
Odchylka tvaru	0,00399	-0,00269	0,0022

Tab. (18) – Měření kalibračního kroužku na stroji IMS, rozměry v [mm]

Kroužek v rovině XY	Průměr	rozdíl od ref.	rozpětí měřených hodnot
Průměr kroužku	100,0043	-0,00177	0,001
Odchylka tvaru	0,006,37	-0,00507	0,0013
Kroužek v rovině YZ	průměr	rozdíl od ref.	rozpětí měřených hodnot
Průměr kroužku	100,001	0,00155	0,0014
Odchylka tvaru	0,00516	-0,00386	0,0026
Kroužek v rovině XZ	průměr	rozdíl od ref.	rozpětí měřených hodnot
Průměr kroužku	100,0016	0,00087	0,0006
Odchylka tvaru	0,00338	-0,00208	0,0013

4.3.1 Analýza výsledků měření na kalibračním kroužku

Při měření kalibračního kroužku o průměru 100mm vychází u stroje AMS hodnota $MPE_{E0}=2,83\mu\text{m}$, pro stroj IMS využijeme neměnnou hodnotu Volumetric Accuracy. Tyto hodnoty budeme porovnávat s chybou při měření délky kalibračního kroužku E_0 , kterou jsem vypočítal jako rozdíl naměřené průměrné odchylky délky v podniku a naměřené referenční délky na stroji Zeiss. Chybu E_F jsem opět vyhodnotil jako rozdíl průměrné naměřené odchylky tvaru v podniku a referenční naměřené odchylky tvaru. Po dosažení dostáváme následující hodnoty:

Tab. (27) – Analýza měření kalibračního kroužku na stroji AMS, rozměry v [μm]

Chyba rozměru	MPE_{E0}	E_0
Rovina XY	2,83	0,74
Rovina YZ	2,83	1,11
Rovina XZ	2,83	0,08
Chyba tvaru	MPE_p	E_F
Rovina XY	2,5	2,64
Rovina YZ	2,5	5,95
Rovina XZ	2,5	2,69

Tab. (28) – Analýza měření kalibračního kroužku na stroji IMS, rozměry v [μm]

Chyba rozměru	Vol. Accuracy	E_0
Rovina XY	8,75	1,77
Rovina YZ	8,75	1,55
Rovina XZ	8,75	0,87
Chyba tvaru	Vol. Accuracy	E_F
Rovina XY	8,75	5,07
Rovina YZ	8,75	3,86
Rovina XZ	8,75	2,08

Při vyhodnocení chyby tvaru u stroje AMS nám všechny hodnoty vyšly jako nevyhovující, přičemž ale dvě z nich překročili hodnotu maximální chyby pouze o 0,1 a 0,2 μm . Všechny ostatní chyby se nacházejí v mezích tolerance maximální chyby.

Závěr

V úvodu rešerše jsem krátce rozebral rozdělení souřadnicových strojů a snímacích systémů. V další části jsem se věnoval zkoušení CMM podle normy 10 360. Uvedl jsem požadavky na měření, postupy pro tato měření a jakým způsobem se technický stav CMM vyhodnocuje. Velký význam v tomto vyhodnocování mají přijímací a periodické zkoušky, na jejichž základě je deklarován technický stav stroje, a to u přijímacích zkoušek při nákupu stroje, a u periodických zkoušek během používání v závislosti na systému managementu kvality.

Také jsem uvedl rozdělení a konkrétní příklady měřicích artefaktů a popsal význam pojmů přesnost, správnost a preciznost měření.

V praktické části své diplomové práce jsem provedl měření na třech různých artefaktech ve vybraném podniku a ve školní laboratoři. Za použití naměřených hodnot v podniku a školní laboratoři jsem vyhodnotil chyby měření a porovnal je s maximálními dovolenými chybami.

Na stroji AMS jsem u některých měření zaznamenal překročení maximální dovolené chyby, a to zejména při vyhodnocování odchylky tvaru. Tato skutečnost může být dána faktem, že volně otočné pětiosé snímací systémy dnes ještě stále nedosahují takové přesnosti, jako snímací systémy tříosé. Metrologická laboratoř by měla s touto skutečností na paměti při vyhodnocování měření, a to zejména při měření součástí se složitými tvarovými plochami.

U stroje IMS jsme naměřenými chybami hodnotu maximální chyby v podobě parametru Volumetric Accuracy nepřekročili, je však třeba uvést, že tento parametr maximální dovolené chyby je značně vyšší než hodnoty MPE_E a MPE_P u stroje AMS. Hodnoty chyb vycházely u obou stroků přibližně srovnatelně. Hodnoty, které se lišily výrazněji, vycházely lépe spíše pro stroj IMS. Tento fakt může být ovlivněn tím, že snímací hlava na stroji IMS je nastavitelná v intervalech po $7,5^\circ$, čímž je její kalibrace nastavená pro menší množství poloh, ve kterých je ale stroj schopen měřit přesněji. Zkoušení dopadlo srovnatelně i navzdory faktu, že stroj AMS je o generaci novější, než stroj IMS.

Uvážíme-li aplikace, ke kterým se stroje v podniku používají (tolerance nejčastěji v jednotkách setin mm), tak zejména při měření tvaru je třeba mít na paměti možnou chybu stroje, která může mít při měření tolerancí v podniku značný vliv.

Bibliografie

- [1] FLACK, David. 2014. Measurement Good Practice Guide No. 43, CMM probing, ISSN 1368-6550 [online] Dostupné z https://www.npl.co.uk/special-pages/guides/gpg43_cmm
- [2] KOPTIŠ, Michal. Využití snímacího systému laserscanneru pro aplikace reverzního inženýrství. Praha, 2016. Diplomová práce. Fakulta strojní ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Libor Beránek, Ph.D.
- [3] EDITED BY ROBERT J. HOCKEN & PAULO H. PEREIRA. Coordinate measuring machines and systems. 2nd ed. Boca Raton, Fla: CRC Press, 2012. ISBN 9781420017533
- [4] 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: ÚNMZ, 2010.
- [5] ISO 10360-4. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) -Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) -Část 4: Souřadnicové měřicí strojepoužívané v režimu skenování. Praha: ÚNMZ, 2001
- [6] ISO 10360-5. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) -Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) -Část 5: Souřadnicové měřicí stroje používající snímací systém s jednotlivým a složeným snímacím dotekem. Praha: ÚNMZ, 2011.
- [7] Měřidla a měřicí přístroje - prodej, kalibrace, servis, výroba | UNIMETRA [online]. Copyright ©4 [cit. 04.08.2020]. Dostupné z: http://www.unimetra.cz/soubory_materialy/84_1.pdf
- [8] Mitutoyo - Jednotlivá koncová měrka z oceli [online]. Dostupné z: [https://shop.mitutoyo.cz/web/mitutoyo/cs_CZ/mitutoyo/01.07.13/Jednotliv%C3%A1%20koncov%C3%A1%20m%C4%9Brka%20z%20oceli%20%200%2C54%20mm/\\$catalogue/mitutoyoData/PR/611895-031/index.xhtml?jsessionId=345D6AC2CBB16B7148C96F0677889B4A](https://shop.mitutoyo.cz/web/mitutoyo/cs_CZ/mitutoyo/01.07.13/Jednotliv%C3%A1%20koncov%C3%A1%20m%C4%9Brka%20z%20oceli%20%200%2C54%20mm/$catalogue/mitutoyoData/PR/611895-031/index.xhtml?jsessionId=345D6AC2CBB16B7148C96F0677889B4A)
- [9] Dr.-Ing. H.-H. Plath. Kontrola přesnosti mobilních optických a taktilních CMM. Studijní materiál. [online]. Dostupné z: http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2601_Plath_iti_GmbH_CZ.pdf
- [10] VOSTROVSKÝ, Jakub. Návrh artefaktu pro ověření přesnosti souřadnicových měřicích strojů. Praha, 2017. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Petr Mikeš, Ph.D.
- [11] Bal-tec. BALL PLATE [online]. Copyright © 2020 [cit. 04.08.2020]. Dostupné z: https://www.precisionballs.com/catalog/product_info.php?cPath=22&products_id=3

[12] WU, Y... et al., 2017. Accurate characterisation of hole geometries by fringe projection profilometry. Proc.SPIE10332, Videometrics, Rangemaging, and Applications XIV, 1033204 (June 26, 2017); doi:10.1117/12.2270210. [online]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/reader/189694628>

[13] Verification artifacts for CMMs . Innovalia Metrology - Innovalia Metrology Operated by AfterSales S.A. [online]. Dostupné z: <http://innovalia-metrology.pt/metrology-products/cmm-verification/verification-artifacts/>

[14] Koba – Fabrik für Präzisions-Messzeuge - Ball Cube KOBA-Q3. Koba – Fabrik für Präzisions-Messzeuge - Home [online]. Copyright © 2005 [cit. 04.08.2020]. Dostupné z: <https://www.koba.de/en/products/artifacts-for-3-coordinate-measuring-machines/ball-cube-koba-q3.html>

[15] CMM-Check | Carl Zeiss 3D Automation . Taster und Messmaschinenzubehör von Carl Zeiss 3D Automation [online]. Dostupné z: https://world.probes.zeiss.com/en/Machine-Accessories/Calibration-Artifacts/CMM-Check/category-383/product-ARTIKEL_2882.html?force_sid=ms49bjt34pnfo0l6qlk7ef7612

[16] HOFMEISTER s.r.o. [online]. Dostupné z: <https://hofmeister.cz/onas/kdo-jsme/>

[17] Bal-tec - Length Standard Ball Bar Used to Calibrate Machinery. Baltec - Home [online]. Dostupné z: https://www.precisionballs.com/Length_Standard_Ball_Bar_Used_to_Calibrate_Machinery.php

[18] IMS IMPACT II CNC (Manual) Bench Type Coordinate Measuring Machine Techspex . The New Machine Tools Model Specification Database. Cutting Tools, Workholding | Techspex [online]. Dostupné z: [https://www.techspex.com/cmm/ims\(2737\)/151](https://www.techspex.com/cmm/ims(2737)/151)

[19] HOFMEISTER s.r.o. – Kontrola [online]. Dostupné z: <https://hofmeister.cz/sluzby/kontrola/>

[20] Advanced Measuring Systems. Advanced Measuring Systems [online]. Copyright © AMS [cit. 04.08.2020]. Dostupné z: <http://www.ams-cmm.com/AMS-CMM-S.html>

[21] PH20. Renishaw. [online]. Copyright © [cit. 04.08.2020]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/cmmsupport/knowledgebase/en/ph20--22122> [22] <https://www.renishaw.cz/cs/spinaci-dotekove-sondy--6652>

[23] PH10T PLUS motorised indexing probe head. Renishaw. [online]. Copyright © [cit. 04.08.2020]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/cmmsupport/knowledgebase/en/22149.aspx>

[24] Vladimír Kocourek. VÝKLAD POJMŮ V MANAGEMENTU KVALITY V ANALYTICKÝCH LABORATORÍCH. Studijní materiál. Dostupné z:
https://web.vscht.cz/~kocourev/files/SlovQA_03.pdf

[25] Ing. Branislav Vrana, PhD. Správná laboratorní praxe v chemické laboratoři. Studijní materiál. Dostupné z:
<https://is.muni.cz/el/1431/jaro2011/C3705/um/23953648/>

Seznam obrázků

Obr. (1) – Dělení CMM [2]

Obr. (2) – Dělení snímacích systémů CMM [2]

Obr. (3) – Cílové body dotyku [4]

Obr. (4) – Skenovací roviny na zkušební kouli [5]

Obr. (5) – Popis složeného snímacího systému [6]

Obr. (6) – Popis kloubového snímacího systému [6]

Obr. (7) – Koncová měrka z oceli [8]

Obr. (8) – Stupňová měrka [9]

Obr. (9) – Ball bar [17]

Obr. (10) – Ball plate [11]

Obr. (11) – Hole plate [12]

Obr. (12) – Ball Tetrahedron (vlevo) a Ball Cube (vpravo) [13] [14]

Obr. (13) – Zeiss CMM Check [15]

Obr. (14) – Vysoká správnost měření [25]

Obr. (15) – Vysoká preciznost měření [25]

Obr. (16) – IMS IMPACT II CNC [19]

Obr. (17) – AMS M8.10.7 CNC [19]

Obr. (18) – Úhlové měřicí možnosti a rozměry PH20 [21]

Obr. (19) – Rozměry PH10T PLUS [23]

Obr. (20) – Zkušební koule

Obr. (21) – Zkušební ball plate

Obr. (22) – Zkušební kalibrační kroužek

Seznam tabulek

Tab. (1) - Doporučené vzdálenosti mezi skenovanými body:[5]

Tab. (2) – Technické specifikace CMM IMS [18]

Tab. (3) - Technické specifikace CMM AMS [20]

Tab. (4) - Technická specifikace PH20 [21]

Tab. (5) - Technická specifikace PH10T PLUS [23]

Tab. (6) - Technická specifikace TP20 [22]

Tab. (7) - Naměřené hodnoty zkušební koule

Tab. (8) – Měření ball platu na stroji Zeiss,

Tab. (9) – Měření koule: 10x25 bodů na stroji AMS

Tab. (10) – Měření koule: 10x25 bodů na stroji IMS

Tab. (11) – Měření koule: 3x125 bodů na stroji AMS

Tab. (12) – Měření koule: 3x125 bodů na stroji IMS

Tab. (13) – Měření koule: 3x25 bodů v pěti natočeních na stroji AMS

Tab. (14) – Měření koule: 3x25 bodů v pěti natočeních na stroji IMS

Tab. (15) – Měření ball platu na stroji AMS

Tab. (16) – Měření ball platu na stroji IMS

Tab. (17) – Měření kalibračního kroužku na stroji AMS

Tab. (18) – Měření kalibračního kroužku na stroji IMS

Tab. (19) – Analýza měření koule: 10x25 bodů na stroji AMS

Tab. (20) – Analýza měření koule: 10x25 bodů na stroji IMS

Tab. (21) – Analýza měření koule: 3x125 bodů na stroji AMS

Tab. (22) – Analýza měření koule: 3x125 bodů na stroji IMS

Tab. (23) – Analýza měření koule: 3x25 bodů v pěti natočeních na stroji AMS

Tab. (24) – Analýza měření koule: 3x25 bodů v pěti natočeních na stroji IMS

Tab. (25) – Analýza měření ball platu na stroji AMS

Tab. (26) – Analýza měření ball platu na stroji IMS

Tab. (27) – Analýza měření kalibračního kroužku na stroji AMS

Tab. (28) – Analýza měření kalibračního kroužku na stroji IMS

Seznam příloh

Příloha (1) – Naměřené hodnoty