

**České vysoké učení technické v Praze**

**Fakulta strojní**

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



**Bakalářská práce**

Jindřich Schreiber

**Vývoj metodiky a zkušebního artefaktu pro realizaci periodických  
zkoušek CMM**

Developement of Methodology and test artifact for periodic CMM  
testing

Praha 2019

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

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Schreiber** Jméno: **Jindřich** Osobní číslo: **458432**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**  
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Vývoj metodiky a zkušebního artefaktu pro realizaci periodických zkoušek CMM**

Název bakalářské práce anglicky:

**Development of methodology and test artifact for periodic CMM testing**

Pokyny pro vypracování:

1. Periodické zkoušky souřadnicové měřicí techniky
2. Zkušební tělesa využívaná v oblasti CMM
3. Návrh a výroba zkušebního tělesa
4. Návrh metodiky zkoušky - postup měření a vyhodnocení

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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


Datum zadání bakalářské práce: **02.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **19.07.2019**

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



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



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



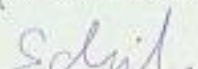
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis otkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

10.4.2019

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů.

V Praze dne: .....

.....

Jindřich Schreiber

**Poděkování:**

Děkuji panu Ing. Liboru Beránkovi, Ph.D., vedoucímu mé práce, a panu Ing. Vladimíru Šulcovi za odbornou pomoc, věnovaný čas, a za mnoho užitečných rad udělených během tvorby této práce.

## **Abstrakt**

Tato práce se zaměřuje na kontrolu měření a přesnosti souřadnicových měřicích strojů. Náplní práce je popis systému norem ISO 10360 a artefaktů používaných k testování a kalibraci těchto strojů pomocí těchto norem. Hlavním předmětem práce je návrh a vyhodnocení zkoušky stroje, která je postavená pouze na kontrole, nikoli kalibraci či specifikaci problému. To je docíleno měřením stejného rozměru ve třech pootočení podle os stroje. Pokud bude stroj indikovat neakceptovatelné rozpětí tohoto rozměru v těchto pootočení, je třeba ho postoupit na kalibraci. Jsou stanoveny podmínky, při kterých se bude zkouška provádět. Byl také navržen ball plate, artefakt, vhodný pro tuto zkoušku i se systémem upínání a pootočení. Dále byl navrhnout, vytvořen a demonstrován software vytvořený v programu MS Excel. Tím je navržena komplexní, ale jednoduchá periodická zkouška.

## **Klíčová slova**

Souřadnicový měřicí stroj, Periodická zkouška, ball-plate, kontrola přesnosti, CMM, ISO 10360.

## **Abstract**

This thesis focuses on verification of measurement on coordinate measuring machines. Part of the work is description of the ISO 10360 standard system and the artifacts used to test and calibrate these machines using these standards. The main subject of the thesis is the design and evaluate the machine's test, which is based only on the verification, not the calibration or specification of the problem. This is achieved by measuring the same dimension at three positions according to the machine axes. If the machine indicates an unacceptable range of this dimension between these three measurements, it should be conceded for calibration. The conditions required for the exam are stated, as well as the artefact used for this exam with its clamping and positioning mechanism. Next part of the thesis focuses on design, development and demonstraion of a software created in MS Excel. All these tools combined create complex but quick periodic exam.

## **Key words**

Coordinate measuring machine, Periodic exam, ball-plate, precision verification, CMM, ISO 10360.

# Obsah

Obsah .....	6
1. Úvod .....	8
2. Souřadnicové měřicí stroje .....	9
3. Přejímací a periodické zkoušky CMM .....	12
3.1 Systém ISO 10 360 .....	12
3.2 ISO 10 360-1 .....	13
3.4 ISO 10 360-2 .....	16
3.4.1 Provozní a environmentální podmínky .....	16
3.4.2 Princip metody .....	16
3.4.3 Chyba měření délky bez odsazení snímacího doteku E0 .....	17
3.4.4 Opakovaný rozsah chyby při měření délky R0 .....	18
3.4.5 Chyba při měření délky pro vzdálenost 150 mm odsazení hrotu snímacího doteku od osy pinoly E150 .....	18
3.5 ISO 10 360-4 .....	19
3.5.1 Postup zkoušky souřadnicových měřicích strojů skenováním .....	20
3.6 ISO 10360-5 .....	21
3.6.1 Uspořádání jednotlivého snímacího doteku .....	22
3.6.2 Pevné složené sondy a složené doteky snímacích systémů .....	24
3.6.3 Kloubový snímací systém .....	24
4. Zkušební artefakty a etalony pro přijímací a periodické zkoušky CMM .....	26
4.1 Parametry a materiál zkušebních artefaktů .....	26
4.2 1D Artefakty .....	28
4.2.1 Koncové měřky .....	28
4.2.2 Ball bar .....	28
4.2.3 Stupňové měřky .....	29
4.3 2D artefakty .....	30
4.3.1 Ball pate .....	30
4.3.2 Hole plate .....	32
4.4 3D Artefakty - rámy .....	33
4.6 CMM-Check společnosti Carl Zeiss AG .....	33
5. Návrh metodiky a provedení periodické zkoušky .....	34
5.1 Návrh zkoušky .....	34
5.2 Návrh systému pro upínání a polohování ball plate a tvorba výkresové dokumentace .....	35
5.3 Provedení zkoušky .....	36

5.3.1 Vytvoření plánu měření pro automatické provedení zkoušky.....	37
5.3.2 Simulace na testovacím modelu .....	40
5.3.3 Provedení zkoušky na ceranovém artefaktu.....	42
5.3.4 Vytvořen softwarového nástroje v programu MS Excel pro analýzu výsledků a vyhodnocení.....	42
6. Závěr.....	47
Odkazy.....	49
Seznam Obrázků.....	52
Seznam Tabulek.....	53
Seznam příloh.....	54

## 1. Úvod

Jedním z nejpodstatnějších aspektů moderní výroby je zvyšování přesnosti. Vyšší přesnost zaručuje především spokojenost zákazníka, ale může výrazně ulehčovat i montáž určitých výrobků a snížit počet oprav. Pro zaručení vysoké přesnosti se za posledních několik desítek let vyvinulo mnoho oborů, strategií i strojů. Jedním z nejvýznamnějších přínosů posledních let je využívání souřadnicových měřicích strojů (anglicky coordinate measuring machine, zkratka CMM).

Hlavní výhodou souřadnicových měřicích strojů je jejich univerzálnost, především schopnost kontroly či měření přesných rozměrů, tvarů a poloh. Pokud uvažujeme i relativně rychlé provedení daných měření, získáváme užitečný nástroj v oblasti podnikové metrologie. Nevýhodou souřadnicových měřicích přístrojů je jejich vysoká cena. Zároveň je kladen důraz na vysokou přesnost. Je potřeba zaručit vhodné a v čase relativně neměnné laboratorní podmínky, jako je tlak, teplota, nebo vlhkost. Stejně velký důraz je pokládán na softwarovou konfiguraci a kalibraci stroje.

Pro zaručení hladkého procesu kalibrace a kontroly funkčnosti souřadnicových měřicích strojů byly navrženy zkoušky, které se odvíjejí od zkušebních artefaktů a jsou popsány v normách ČSN EN ISO 10 360. Tyto zkoušky však požadují kalibrované rozměry, které jsou nejen drahé, ale i náročné na údržbu a kalibraci.

Metoda, kterou se zabývám ve své bakalářské práci, by měla eliminovat potřebu znalosti přesných rozměrů zkuškového artefaktu a specifikování původu chyby přístroje, či jejího řešení. Toho lze dosáhnout pomocí artefaktu s polohovacím systémem, na kterém se změří daný rozměr v několika pootočení. Budeme-li předpokládat, že stroj je v dobrém stavu, měl by být tento rozměr pokaždé stejný, s ohledem na přesnost stroje. Podstatnou informací této zkoušky by byl pouze fakt, že stroj má chybu v měření a je potřeba provést revizi a případně následnou opravu.



## 2. Souřadnicové měřicí stroje

Souřadnicové měřicí stroje se staly nedílnou součástí většiny strojírenských podniků. Jejich přesnost, široké spektrum aplikace a možností měření nabízí využití od výroby nástrojů až po letecký průmysl. Hlavními světovými výrobci jsou firmy Carl Zeiss AG a Hexagon Manufacturing intelligence. Další známé firmy na trhu jsou Mitutoyo Corporation, Nikon Corporation a Wenzel Group. V oblasti doplňkových technologií je významná firma Renishaw. [1]



*Obr. 1: Portálový souřadnicový měřicí stroj firmy Mitutoyo .[33]*

Pro zaručení přesného měření součástí je zapotřebí zaručit i přesnost výroby stroje a správné používání. Konečným výsledkem by měl být dostupný stroj, který je vysoce přesný, rychle měří díly a je relativně necitlivý vůči okolnímu prostředí. V minulosti se tato snaha realizovala především v podobě lepší konstrukce stroje. Nicméně s podmínkou zachování dostupnosti strojů, tedy zachování relativně nízké ceny, se začali v 90. letech minulého století více uplatňovat korekce okolních vlivů pomocí softwarů strojů. Tyto chyby a jejich korekce jsou popsány v normách ISO 10360. [2]

Jak již bylo uvedeno, stůl je vytvořen převážně z granitové desky. Ta může být podložena izolačními podložkami, které vyrovnávají plochu stolu a kompenzují tak vliv hmotnosti konstrukce, která na desce stojí, a během pohybu naklání stůl do vodorovné polohy. Výhodou je také malé tření a vysoká odolnost.

Měří se tzv. snímacím dotekem, která má především tvar koule vyrobené hlavně z rubínu. Ten se vyrábí v mnoha velikostech na měření skoro všech specifických součástí. Další variace mohou být například na měření drsnosti. [9]

Souřadnicové měřicí stroje se vyrábějí v mnoha velikostech i typech aplikace. Využívají všechny typy souřadnicových systémů, ale nejčastěji se naměřené hodnoty interpretují v kartézském souřadnicovém systému. [24]

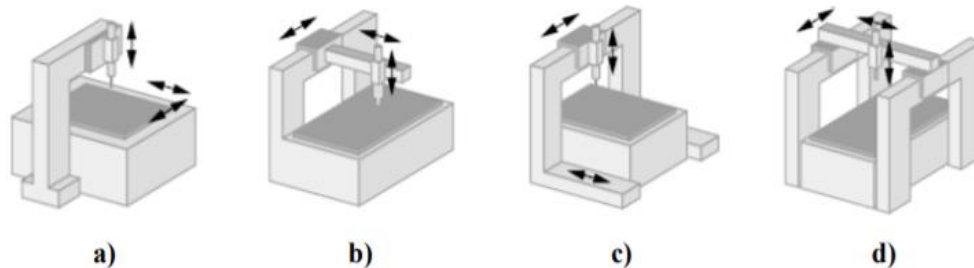
Jedno z členění je podle počtu souřadnic, ve kterých je stroj schopen měřit. Norma ISO 10360 rozděluje CMM podle jejich rozměrů a způsobů fungování.[3]

#### **Členění podle konstrukce:**

- **Jednosouřadnicové** – měří pouze vzdálenost na jedné přímce.
- **Dvousouřadnicové** – měří součást v jedné rovině. U měření 2D se využívají mikroskopy a profilprojektory.
- **Třísouřadnicové** – měří rozměry a specifikace ve třídimenzionálním prostoru. Jedná se o dosud nejspolehlivější způsob měření geometrických požadavků, jelikož umožňují složité rozměrové měření na jedno upnutí. [3]

#### **Členění podle ISO 10360-1:**

- **Stojanové** – nejpřesnější na malém rozsahu. Pinola se pohybuje vertikálně vůči stolu, který se hýbe horizontálně. Výhodou je tuhá konstrukce.
- **Výložníkové** – vhodné především pro dlouhé úzké předměty. Pinola se opět hýbe vertikálně. Je připevněna na rameno, po kterém se může hýbat horizontálně. Rameno se pak hýbe horizontálně vůči stolu. Je podepřeno jen na jedné straně a má tedy tvar výložníku.
- **Portálové** – jedná se o nejrozšířenější typ CMM. Jejich výhodou je vysoká tuhost celé konstrukce, a tedy i přesnost měření, a univerzálnost. Součásti se vůči sobě pohybují stejně jako u výložníkových s tím rozdílem, že je rameno podepřeno z obou stran a hýbe se i s podporami. Jsou také v provedení s pohyblivým stolem (jako stojanové).
- **Mostové** – nejčastěji využívané v automobilovém a leteckém průmyslu. Vhodné pro dlouhé úzké součásti. Pinola se hýbe vertikálně ve své ose a horizontálně po rameni. Rameno se pak hýbe horizontálně po dvou dlouhých podporách. Měřicí rozsah v ose x může být až 24 m. [11] [3]



Obr. 2: CMM podle ISO 10 360- a) Stojanový b) Výložníkový c) Portálový d) Mostový [3]

Pokud je to zapotřebí, součásti jsou upínány na stůl především pomocí rastru otvorů se závitem, který umožňuje pevné spojení součástí. Další možností je například využití tzv. upínací stavebnice, která nabízí množství prvků pro upnutí součástí mnoha velikostí. Upínací elementy jsou nastavitelné pomocí schodů či zarážek. Jsou připevněny k základně pomocí šroubů a mají zajišťovat pevné ukotvení součásti při současném použití minimální síly. [4]

Pro snímání rozměrů se využívá dotekových i optických systémů. Optická řešení jsou především interferometry a kamery. Pro doteková řešení jsou to především spínací dotekové sondy, někdy motorické hlavice. [5]

### 3. Přejímací a periodické zkoušky CMM

Souřadnicový měřicí stroj, jako každý jiný, časem ztrácí svoji schopnost měřit podle kritérií uvedených při výrobě. Stejně tak se může stát, že i právě přijatý stroj nebude fungovat tak, jak je smluveno. Pro vyřešení tohoto problému se dělají dva typy zkoušek, které jsou nejen definovány, ale i popsány v systému norem ISO 10360.

Dle názvu lze odvodit, že přijímací zkoušky se provádějí při prvním přijetí stroje zákazníkem a periodické potom během doby užívání. Výrobce zaručuje, že při dodržení vhodných podmínek bude stroj fungovat dle specifikací uvedených v normách. Pro tyto zkoušky je potřeba předepsat mnoho parametrů, které musí jak výrobce, tak zákazník dodržet. Pro ty je obecně specifikováno, že jsou stanovovány:

- Výrobce, v případě přijímacích zkoušek
- Uživatelem, v případě periodických zkoušek

Na zkoušky se používají tzv. zkouškové artefakty, které reprezentují kalibrovanou zkušební délku. Daných artefaktů je celá řada, ale jejich výběr se musí shodovat s podmínkami uvedenými také v tomto systému norem (viz dále). [8]

#### 3.1 Systém ISO 10 360

Tyto mezinárodně uznávané normy byly vytvořeny především pro normalizaci přijímacích a periodických zkoušek souřadnicových měřicích strojů. Normy popisují určení chyby měření a také udávají, jak by měly tyto zkoušky probíhat v souladu s nimi. Systém je navrhován technickou komisí č. 213 Mezinárodní organizace pro standardizaci (ISO). [10] [26]

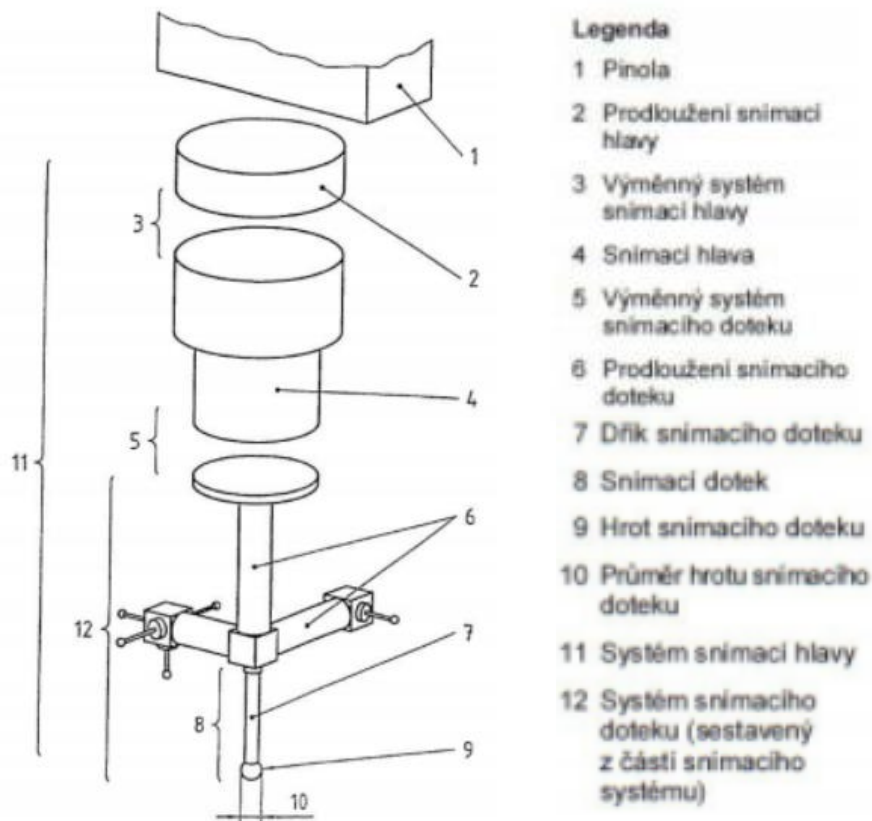
Tento systém norem funguje již od roku 1994 a v současné době sestává z 13 dílčích částí, kde 11 je již v platnosti a další 2 jsou připravovány. Každá část je součástí systému norem GPS (geometrical product specification). [26]

Obsahuje tyto části:

- **Část 1:** Slovník
- **Část 2:** Souřadnicové měřicí stroje používané pro měření lineárních rozměrů
- **Část 3:** Souřadnicové měřicí stroje s osou otočného stolu jako čtvrtou osou
- **Část 4:** Souřadnicové měřicí stroje používané v režimu měření skenováním
- **Část 5:** Souřadnicové měřicí stroje používající snímací systém s jednotlivým a složeným snímacím dotekem
- **Část 6:** Odhad chyb při výpočtu prvků přiřazených metodou nejmenších čtverců
- **Část 7:** Souřadnicové měřicí stroje vybavené video snímacími systémy
- **Část 8:** Souřadnicové měřicí stroje s optickými senzory vzdálenosti
- **Část 9:** Souřadnicové měřicí stroje s několika snímacími systémy
- **Část 10:** Laser trackery pro měření vzdálenosti od bodu k bodu (ve vývoji)
- **Část 11:** Souřadnicové měřicí stroje využívající principy počítačové tomografie (ve vývoji)
- **Část 12:** Měřicí stroje s kloubovými rameny
- **Část 13:** 3D optické souřadnicové měřicí stroje (ve vývoji). [8] [26]

### 3.2 ISO 10 360-1

První část této normy funguje jako slovník. Jsou zde definovány všechny základní pojmy užívané v běžné praxi souřadnicových měřicích strojů, ale především v normách následujících. Například pojmy jako snímací hlava, pinola, snímací systém nebo přejímací a periodické zkoušky. Mnohem podstatnější součástí je definování dovolených hranic pro environmentální a jiné podmínky pro měření daných zkoušek. Přílohou normy je pak detailnější rozdělení CMM podle druhu konstrukce (viz 2.2). [24]



Obr. 3: Systém snímání hlavy. [9]

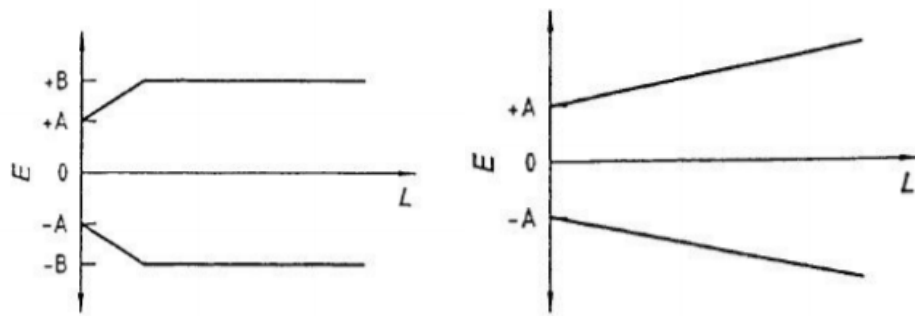
Důležité je si například specifikovat maximální povolenou chybu indikace CMM při měření rozměru E,  $MPE_E$ . Jedná se o maximální hodnotu, kterou může stroj při daných měřeních indikovat. Podle normy se dá počítat několika způsoby:

$$a) MPE_E = \pm \text{minimum} \left( A + \frac{L}{K} \right) a B$$

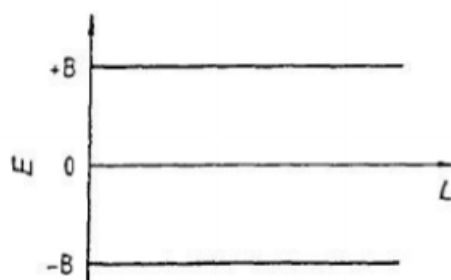
$$b) MPE_E = \pm \left( A + \frac{L}{K} \right)$$

$$c) MPE_E = \pm B$$

A je kladná konstanta v mikrometrech, K je bezrozměrná kladná konstanta a B je největší povolená chyba v mikrometrech. Všechny tyto parametry určuje výrobce. Musí však zaručit, že se v nich stroj bude pohybovat. L je měřená délka. Je zřejmé, že se bude tato hodnota měnit s měřenou kalibrovanou délkou. Tato změna je popsána v následujících grafech: [24]

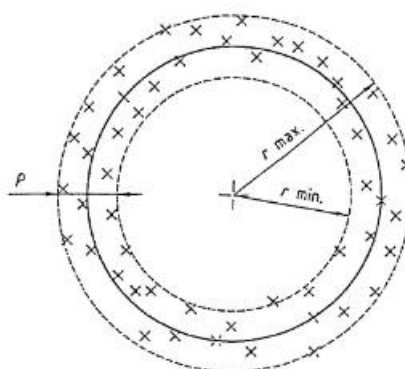


Obr. 4: Graf  $MPE_{E(L)}$ , zleva: varianta a), varianta b) [9]



Obr. 5: Graf  $MPE_{E(L)}$ , varianta c) [9]

Další důležitou specifikací je chyba snímání **P**. Ta určuje chybu indikace pro měření kulového hmotného etalonu rozměru. Měření probíhá v režimu snímání diskretních bodů jedním snímacím dotekem na zkušební kouli. Tato chyba má zde specifikovanou i svojí maximální dovolenou hodnotu  $MPE_P = A$ . Kde A je kladná konstanta vyjádřená v mikrometrech. [24]



Obr. 6: chyba snímání  $P < MPE_P$ . [9]

### 3.4 ISO 10 360-2

Norma popisuje způsob a environmentální podmínky potřebné pro provedení přejímacích a periodických zkoušek pro CMM používající dotekové snímací systémy. Je přímo uvedeno, že není určena pro ne-kartézské CMM a pro stroje používající optické senzory. Norma ovšem nevyklučuje možnost částečné aplikace. [8]

#### 3.4.1 Provozní a environmentální podmínky

Uvnitř normy lze také nalézt postup, podle kterého by měl být CMM provozován, aby vyhovoval zkoušce. Takový by měl být definován v příručce od výrobce. Norma zmiňuje důležité body, které by se v příručce měly vyskytovat:

- a) spuštění stroje/cyklus zahřátí
- b) konfigurace systému snímacích doteků
- c) proces čištění snímacích doteků
- d) kvalifikace snímacího systému
- e) teplotní stabilita snímacího systému před kalibrací
- f) hmotnost systému snímacího doteku a/nebo systému snímací hlavy
- g) umístění, typ a počet senzorů teplot

Ohledně environmentálních podmínek, kterými jsou teplotní podmínky, vlhkost vzduchu a vibrace v místě instalace CMM, je uvedeno, že se určují a mají definované meze podle již zmíněných principů, tedy dle typu zkoušky a dle specifikovaných mezních hodnot podle ISO 10360-1. Uživatel je povinen tyto podmínky zaručit, jinak nelze požadovat dodržení mezních hodnot. [8]

#### 3.4.2 Princip metody

Je zde definováno, že **chyba při měření délky**  $E_L$  a **opakované rozpětí chyby při měření délky**  $R_0$ , nesmějí překročit maximální dovolenou chybu měřené délky  $E_{L,MPL}$  a maximální dovolenou mez opakovaného rozpětí chyby  $R_{0,MPL}$ .



Norma dále specifikuje postup zkoušek pro nulovou vzdálenost osy pinoly od odsazení hrotu snímacího doteku  $E_0$  a s odsazením 150 mm  $E_{150}$ .

Princip metody je postaven na měření pěti kalibrovaných délek, kde každá délka se bude měřit třikrát. Jestliže si body na koncích jednotlivých délek pojmenujeme A a B, potom budeme měřit v pořadí  $A_1B_1$ ,  $A_2B_2$ ,  $A_3B_3$  nebo  $A_1B_1$ ,  $B_2A_2$ ,  $A_3B_3$ . Jiná pořadí nejsou přípustná. Dalším požadavkem je, že každá kalibrovaná délka musí mít jednoznačně stanovené měřicí body. To znamená, že body  $B_1$ ,  $B_2$  a  $B_3$  musí být rozdílné od konečného bodu B. [8][9]

### **3.4.3 Chyba měření délky bez odsazení snímacího doteku $E_0$**

Základem zkoušky je provádět měření s nulovou vzdáleností hrotu snímacího doteku od osy pinoly. Norma v případech speciální aplikace, kdy metoda zkoušky nebo typ artefaktu nedovoluje jinak, povoluje nejmenší prakticky možnou vzdálenost.

Pro zjištění chyby měření délky je zapotřebí mít nejdelší kalibrovanou délku artefaktu minimálně 66 % měřicího objemu stroje. Výrobce navíc musí udat důležité specifikace kalibrované zkušební délky. Jmenovitě její teplotní roztažnost a nejistotu měření způsobenou touto roztažností. Výrobce může tyto specifikace kalibrovat. Může se stát, že specifikuje pro artefakt vhodný k této zkoušce teplotní roztažnost  $\alpha < 2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ . Taková roztažnost není běžná, a proto, pokud není jiný k dispozici, lze použít běžný artefakt, ale provést doplňující tři měření na zkušební délce, která musí být větší než nejmenší z hodnot 0,5 m nebo 50 % měřicího objemu stroje, pro kompenzaci této roztažnosti.

Samotný postup navazuje na princip popsany v předchozí kapitole. Měří se 5 kalibrovaných délek, každá z nich třikrát. Toto měření se opakuje v sedmi různých polohách v celém měřicím objemu, což je celkem 105 měření. Čtyři z těchto poloh jsou definovány v normě, další tři jsou normou pouze doporučeny. [8]

Poloha číslo	Orientace v měřicím objemu	Požadovaný nebo předem zvolený
1	Podél diagonály prostoru z bodu (1,0,0) k bodu (0,1,1)	Požadovaný
2	Podél diagonály prostoru z bodu (1,1,0) k bodu (0,0,1)	Požadovaný
3	Podél diagonály prostoru z bodu (0,1,0) k bodu (1,0,1)	Požadovaný
4	Podél diagonály prostoru z bodu (0,0,0) k bodu (1,1,1)	Požadovaný
5	Rovnoběžně s osou stroje z bodu (0,½,½) k bodu (1,½,½)	Předem zvolený
6	Rovnoběžně s osou stroje z bodu (½,0,½) k bodu (½,1,½)	Předem zvolený
7	Rovnoběžně s osou stroje z bodu (½,½,0) k bodu (½,½,1)	Předem zvolený
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)		

Tab. 1: Orientace v měřicím systému pro provedení zkoušky. [8]

### 3.4.4 Opakovaný rozsah chyby při měření délky R0

Jedná se o rozdíl nejmenší a největší hodnoty, které naměříme při sadě tří měření podle  $E_0$ . Tyto hodnoty nesmějí překročit maximální dovolenou mez opakovaného rozpětí chyby  $R_{0,MPL}$ . Ta je opět specifikována dle typu zkoušky. Obě tyto hodnoty jsou udávány v mikrometrech. [8] [25]

### 3.4.5 Chyba při měření délky pro vzdálenost 150 mm odsazení hrotu snímacího doteku od osy pinoly E150

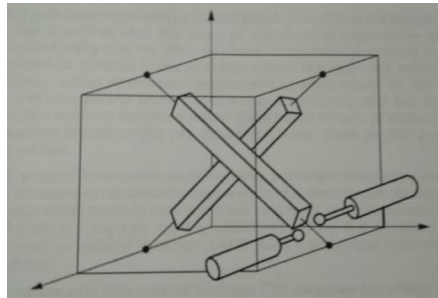
Postup této zkoušky je velmi podobný postupu bez odsazení. S odsazením nám ovšem vzniká několik směrů, ze kterých se dá ke kalibrované zkušební délce přiblížit. Proto se zkouška provádí ve dvou zvolených směrech odsazení. Poloha artefaktu je zde také omezena pouze na diagonální. Norma tak vymezuje 4 orientace v měřicím objemu:

Číslo pozice	Orientace v měřicím objemu
1A (+X)	v YZ-rovině diagonálně z bodu (½, 0, 0) k bodu (½, 1, 1)
1B (-X)	v YZ-rovině diagonálně z bodu (½, 0, 1) k bodu (½, 1, 0)
2A (+Y)	v XZ-rovině diagonálně z bodu (0, ½, 0) k bodu (1, ½, 1)
2B (-Y)	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)	

Tab. 2: Orientace v měřicím objemu. [8]

Číslo pozice specifikují, v jakém smyslu osy směřuje snímací dotek. Kombinací dvou takových pozic pak změříme 5 velmi odlišných kalibrovaných délek, kde největší je opět alespoň 66 % maximální délky měřicího objemu.

Každou délku změříme třikrát, což vytvoří 30 měření. Z těch se poté vyhodnocuje průměrná hodnota a vytvoří se graf podle ISO 10360-1.[8]



*Obr. 7: Příklad dvou ze čtyř možných poloh a dvou ze čtyř možných orientací snímací hlavy pro postup zkoušky. [8]*

### **3.5 ISO 10 360-4**

Stejně jako předchozí zmíněná část normy, i tato část se specifikuje na určitý typ snímání. V tomto případě se jedná o snímání skenováním. Norma předepisuje jak přejímací, tak periodickou zkoušku. Ohledně požadavků je systém podobný jako u předchozích norem, tedy se liší podle typu zkoušky. Takovými požadavky jsou kromě environmentálních podmínek, také chyba indikace, doba zkoušky a provozní podmínky, opět dané výrobcem v příručce. [7]

Pro zkoušku se použije kulový snímací dotek, který má zaoblení špičky 3 mm. Uživatel může zvolit způsob konfigurace systému doteků v daných mezích. Norma upozorňuje na odchylku tvaru špičky snímacího doteku a její ovlivnění zkoušky. Zkouška se provádí na zkušební kouli se specifikovanými vlastnostmi:

- Jmenovitý průměr: 25 mm
- Drsnost  $R_a < 0,05 \mu\text{m}$
- Tvrdost  $> \text{HV}800$

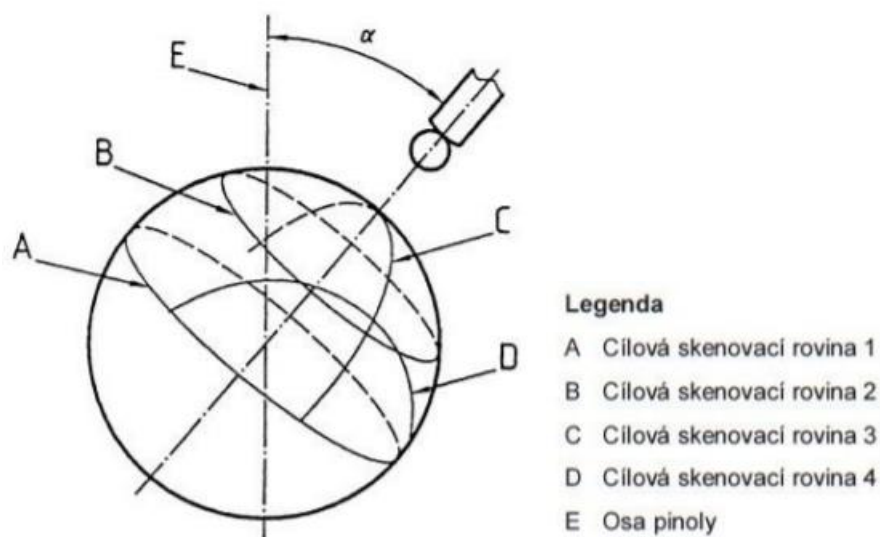
Koule se musí před začátkem zkoušky vyčistit, aby na ní nezůstal zbytkový film ovlivňující měření. Upevnění je vyžadováno tuhé pro minimalizaci chyby způsobené ohybem. [7]

### 3.5.1 Postup zkoušky souřadnicových měřicích strojů skenováním

Principem metody je zjistit, zda CMM pracuje v mezích stanovených pro maximální dovolenou **chybu snímání při skenování  $MPE_{Tij}$** , a **maximální dovolenou dobu zkoušky skenováním MPT**. Chybu zjistíme určením rozsahu hodnot radiální vzdálenosti R na zkušební kouli, dobu zkoušky udáváme v sekundách. Střed a poloměr takové koule se určí skenováním ve čtyřech cílových skenovacích rovinách (obr. 9). Vzdálenost skenovaných bodů je popsána v tabulce 3. [29]

Popisované zkoušky lze použít pro:

- Skenování na předem stanovené dráze pro sejmutí velké hustoty bodů (HP)
- Skenování na předem stanovené dráze pro sejmutí malé hustoty bodů (LP)
- Skenování na předem nestanovené dráze pro sejmutí velké hustoty bodů (HN)
- Skenování na předem nestanovené dráze pro sejmutí malé hustoty bodů (HP)



Obr. 8: čtyři cílové skenovací roviny. [7]

	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

Tab. 3: Vzdálenost mezi skenovanými body. [7]

Další podmínkou je začínat každé ze čtyř skenování se snímacím dotekem v pomocném bodě, tedy v bodě mimo zkušební kouli ve vzdálenosti nejméně 10 mm od ní. Pro vyhodnocení se použije metoda nejmenších čtverců, pro určení středu koule, a následně se určí radiální vzdálenost od tohoto středu pro každý naskenovaný bod. Maximální chyba snímání  $MPE_{Tij}$  je pak rozdíl mezi maximální a minimální naměřenou hodnotou.[7]

### 3.6 ISO 10360-5

Tato norma specifikuje zkoušky ověřující způsobilost měřicích systémů. Zkoušku lze aplikovat na libovolný systém používající dotekové snímání. Požadavkem je však kulový, nebo polokulový snímací dotek a režim snímání diskrétního bodu. Je specifikováno, že se provádí na zkušební kouli, která musí mít chybu tvaru menší než 20 % chyby tvaru snímacího doteku. Norma také definuje novou terminologii s ohledem na trojrozměrné měření a chybu polohy. [10]

Kromě chyby měření rozměru je zapotřebí uvažovat parametry vzniklé měřením ve 3D prostoru. A to konkrétně chybu tvaru a polohy. Tyto chyby lze rozlišit pro jednotlivý a složený snímací systém. Zároveň je v normě specifikována maximální dovolená hodnota této chyby. Její výpočet je stejný jako při výpočtu MPE rozměru (viz ISO 10360-1). Jediný rozdíl je ve vzdálenosti  $L_p$ , tedy v tomto případě se uvažuje 3D vzdálenost mezi středem referenční koule a zkušební koule. [10]

Značka	Význam
$P_{FTE, MPE}$	Největší dovolená chyba tvaru složeného doteku, $P_{FTj, MPE}$
$P_{FTI, MPE}$	
$P_{FTM, MPE}$	
$P_{FTN, MPE}$	
$P_{STE, MPE}$	Největší dovolená chyba rozměru složeného doteku, $P_{STj, MPE}$
$P_{STI, MPE}$	
$P_{STM, MPE}$	
$P_{STN, MPE}$	
$P_{LTE, MPL}$	Největší dovolená mez hodnoty polohy složeného doteku, $P_{LTj, MPL}$
$P_{LTI, MPL}$	
$P_{LTM, MPL}$	
$P_{LTN, MPL}$	
$P_{FTU, MPE}$	Největší dovolená chyba tvaru jednotlivého doteku

Tab.4: Označení největších dovolených chyb. [10]

Označení je systematické, každé písmeno a pozice má své určení:

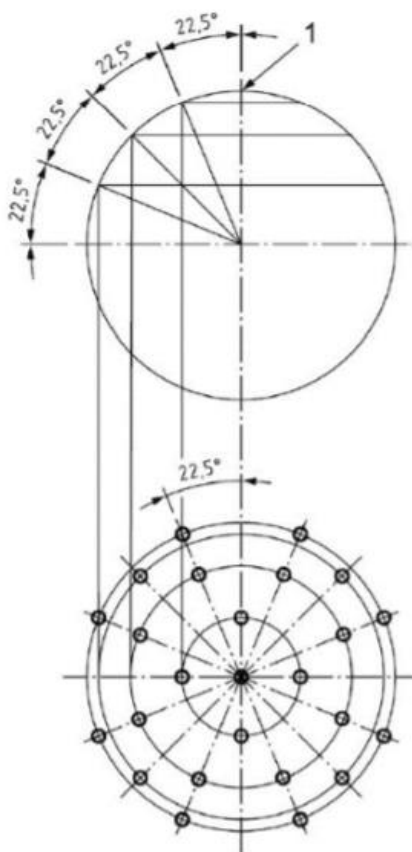
- První pozice: F – tvar (form), S – rozměr (size), L – délka (length).
- Druhá pozice: T – vyhovuje kapitole 1 této části normy. Jiné alternativy mají jiná písmena.
- Třetí pozice:
  - E – kloubový snímací systém používající empirickou kvalifikaci.
  - I – kloubový snímací dotek používající odvozenou kvalifikaci.
  - M – pevný složený dotekový snímací systém.
  - N – pevný složený systém sondy. [10]

### 3.6.1 Uspořádání jednotlivého snímacího doteku

Tato část normy se používá pro uspořádání snímání jednotlivého doteku a CMM používající pevné složené sondy, pevné složené doteky a kloubové snímací systémy. Jedna ze složených sond, nebo jeden ze složených doteků, nebo jedna z kloubových doteků, mohou být použity pro tuto zkoušku. [10]

Principem postupu je měření zkušební koule jednotlivým dotekem snímáním 25 bodů a přiřazením pozorované chyby tvaru ke snímacímu systému. Následně se využívá metody nejmenších čtverců pro porovnání vhodné koule v 25 bodech pro tvar chyb indikace. Tato analýza výnosů poskytne chybu tvaru jednotlivého doteku  $P_{FTU}$ . Rozmístění těchto bodů podle obr. 8 je pouze doporučeno. Podmínkou je přibližně rovnoměrné rozložení přes nejmenší oblast zkušební koule. [10]

Výsledky těchto zkoušek mohou být vysoce závislé na délce doteku  $l_u$ , a proto výrobce specifikuje vzdálenosti a k nim povolenou chybu v případě přijímacích zkoušek. V případě zkoušek periodických jsou tyto meze uvedeny uživatelem. Je stanoveno, že jedno umístění zkušební koule musí být vybráno uživatelem pro zaručení dodržení mezí v celém měřicím objemu. [10]



Obr.9: Rozmístění bodů na testovací kouli. 1- pól koule. [10]

Délka doteku musí být vybrána uživatelem z hodnot 20, 30, 50 a 100 mm. Uživatelem musí být vybrána a zkoušena pouze jedna z délek specifikovaných výrobcem pro systém doteku. Pokud má stroj dvě pinoly, je možnost provést tuto zkoušku dvakrát, pro každou zvlášť. Obě jsou však v operačním režimu simplex. Jedno umístění zkušební koule je vždy zvoleno uživatelem kdekoli v měřicím oběhu. Referenční koule může být po nastavení během zkoušky odstraněna ze stolu za účelem předejití rušení mezi snímacím systémem a koulí. [10]

### 3.6.2 Pevné složené sondy a složené doteky snímacích systémů

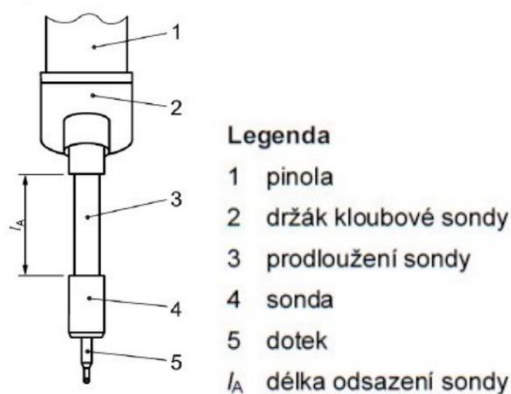
Princip této metody se velice podobá principu metody předchozí. Hlavním rozdílem je užití pevného složeného snímacího doteku, tedy bude při měření použito několika snímacích doteků na jedné pinole. Délky pevného složeného doteku jsou opět vybrány z hodnot 10 mm, 20 mm, 30 mm, 50 mm, 100 mm, ale navíc i 200 mm a 400 mm. U více pinolových strojů musí být 3 doteky umístěny na jedné pinole a další dva na druhé. Všechny jsou v operačním režimu duplex. [10]

Každý dotek musí změřit 25 bodů na zkoušené délce, opět určených uživatelem podle zmíněných kritérií. Maximální počet měřených bodů pro uspořádání typu „hvězda“ je tedy 125. Tato zkouška zohledňuje vliv délky pevného odsazení složené sondy. Ty jsou také specifikovány výrobcem. [10]

Zkušební koule nesmí mít průměr menší než 10 mm, ale ne větší než 50 mm. Rozměr a tvar zkušební koule musí být kalibrovány. V této zkoušce nesmí být použita referenční koule dodaná s CMM za účelem kvalifikace snímacího systému. [10]

### 3.6.3 Kloubový snímací systém

Změřit souřadnice v pěti polohách lze i pomocí otáčecí kloubové hlavy. To ovšem přidává do měření další chyby. Pro tento specifický typ má norma kapitolu, kde upravuje předešlý princip pro pět úhlových poloh kloubového snímacího systému. [10]



Obr. 10: Popis kloubového snímacího systému. [10]



Pro kloubový systém se mohou odvozovat dva druhy kvalifikací dat pro měření, a to empirické a odvozené. Za účelem rozdělení se jejich označování odlišuje písmenem na třetím místě indexu (viz 3.6). Výsledek tohoto měření je vysoce závislý na délce odsazení. Proto se doporučuje zkoušku provádět v několika stanovených odsazeních sondy kloubového snímacího systému. Doporučené délky jsou (v mm): 50, 100, 200 a 400. Délka se měří od středu otáčení kloubového systému. Jedna z těchto hodnot musí být specifikována výrobcem. S jinými délkami zkoušku na daném stroji nelze provést. Na druhou stranu uživatel volí jednu z pozic v celém objemu stroje. [10]

Zkušební koule musí mít průměr menší než 10 mm a nesmí být větší než 50 mm. Navíc musí být kalibrována pro rozměr a tvar. Je doporučeno, aby chyba tvaru zkušební koule nepřesáhla 20 % maximální povolené chyby tvaru  $P_{FTE, MPE}$ . Opět není povoleno zkoušku provádět na kalibrační kouli dodávané se strojem. Je požadováno pevné upevnění zkušební koule. [10]

Postup je dále stejný jako pro měření pevné složené sondy a složeného doteku. Výsledkem je opět 125 bodů, ze kterých metodou nejmenších čtverců odhadneme tvar 5-ti koulí a porovnáme je s jmenovitými hodnotami odchylky tvaru a polohy. [10]

## 4. Zkušební artefakty a etalony pro přijímací a periodické zkoušky CMM

### 4.1 Parametry a materiál zkušebních artefaktů

Zkušební artefakty pro přijímací a periodické zkoušky musí splňovat velké množství požadavků. Takové nároky se samozřejmě odrážejí na pořizovací ceně. Důležitými aspekty jsou nejen vhodná metoda zkoušky, ale také zvolení vhodného materiálu. Ten je hodnocen především podle jeho teplotní roztažnosti a tepelné vodivosti, která v laboratorních podmínkách nejvíce ovlivňuje tvarovou přesnost a stálost. Mnohokrát se společnosti jako například Carl Zeiss AG nebo Renishaw spoléhají na zkušební artefakty z oceli vyrobené přesnou technologií. Modernějším a přesnějším řešením je využití keramiky, granitu nebo Zeroduru. [2] [9]

Artefakty mívají často mnoho různých prvků v několika směrech. Jejich základní rozdělení je podle počtu souřadnic, které testují:

- 1D:** Ball bar, stupňové a koncové měrky
- 2D:** Ball plate, hole plate
- 3D:** Prostorové rámy nebo kalibrační koule [9]

Materiál	$\alpha[10^{-6}K^{-1}]$
Hliník	22
Ocel Nerez Feritická (410)	9,9
Žula	7,9
Zerodur Třídy 0	0±0,2

Tab.5: Koeficient lineární teplotní roztažnosti užívaných materiálů

### **Zerodur**

Materiál od německé firmy SCHOTT AG byl navržen speciálně pro aplikace, kde je zapotřebí velice nízké teplotní roztažnosti. Jedná se o sklokeramiku, přesněji bezpórový oxid křemíku s lithiem a hliníkem. Vyrábí se procesem řízené objemové krystalizace. Výrobce udává, že je materiál také vysoce homogenní. Je zapotřebí zajistit, aby se v materiálu neobjevovaly póry z důvodu křehkosti materiálu. Zerodur je při vlnových délkách  $\lambda=400-2300\text{nm}$  transparentní, což napomáhá kontrole homogenity. Výrobce dále zaručuje stálost geometrie a mechanických vlastností i na velkých částech. [6]

### **Kompozity**

Dalším vhodnými materiály pro výrobu artefaktů jsou kompozity, které nabízejí velkou škálu vlastností. Firma Carl Zeiss AG vyrábí svoje snímací systémy z materiálu, který nazývá ThermoFit. Ten má kromě nízké váhy také velmi nízkou teplotní roztažnost, která je ještě zlepšena způsobem, jakým jsou tyto snímací systémy vyrobeny, tedy navinutím do spirály. [29]

Společnost Kompotech s r. o. nabízí spojení PAN vlákna s kladnou teplotní roztažností a grafitového vlákna se zápornou do kombinace, která vytvoří materiál s téměř nulovou roztažností v daném směru. [24]

### **Invar**

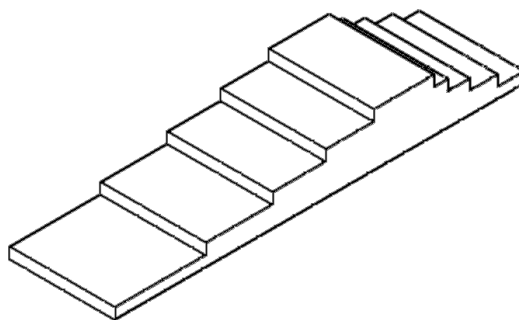
Mezi vhodné materiály patří například i Invar (36% Ni, 74% Fe), který v tomto složení má koeficient teplotní roztažnosti kolem  $1,2 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ . [30]

## 4.2 1D Artefakty

### 4.2.1 Koncové měrky

Koncové a stupňové měrky jsou základem při testování chyby podle normy ISO 10360-2. Měří se na nich standardizované délky v rozdílných pozicích v celém objemu stroje.

Artefakty z koncových měrek se skládají z několika na sobě položených délek, kde každá má přesně definovanou vzdálenost mezi čelními rovnoběžnými plochami. Hlavní výhodou koncových měrek je jednoduchý a roky zavedený postup kalibrace. [9]



*Obr. 11: Příklad artefaktu z koncových měrek*

### 4.2.2 Ball bar

Tyto jednodimenzionální artefakty jsou charakterizovány vysokou přesností. Jsou vyrobeny z prutu z uhlíkových vláken, na kterém je posazeno několik keramických koulí v daných rozestupech. Změny v ISO 10360-2 již navíc umožňují použít tyto artefakty pro ověřovací testy během kalibračních procedur. [11]

Společnost Renishaw také pojmenovala své zařízení pro testování indikace chyby Ball bar, česky byl tento artefakt nazván Kuličkové měřidlo [23], s typovým označením Q-C20W(obr. 11). Jedná se o válec se dvěma kalibrovanými koulemi na koncích, kdy jedna je pevně spojena s pinolou a druhá se snímacím dotekem. Toto spojení umožňuje rotační pohyb ve všech směrech. Snahou je testovat přesnou kruhovou dráhu v případech, kdy simulace vyhovuje,

ale výsledný změřený rádius se liší od naprogramované dráhy. Tento artefakt umožní přesné změření dráhy a tím i přesnosti stroje v tomto typu aplikace. Jedná se o relativně rychlý test pro kalibrační účely. [12] [13]

V současné době tuto technologii nabízí už například i firma ARX Geometres GbR. Jejich variace má vyměnitelné spojovací koule, které se k tělu připojují magnetem. To umožňuje více aplikací například i pro optické snímání, nebo vytvoření vícerozměrových testovacích artefaktů. [22]



Obr. 12: ARX Geometres Single bar [22]



Obr. 13: Q-C20W společnosti Renishaw[12]

### 4.2.3 Stupňové měrky

Mezi jednodimenzionální testovací artefakty patří mnoho výrobků. V principu se jedná o různé variace již zmíněného ball baru. Kromě běžné konstrukce nabízí i variantu, kdy se místo keramických koulí na prutu vyskytují kuželovité otvory, které dovolují sondě určitých rozměrů dosednout. Další variací je možnost vyměnitelných testovacích koulí a jejich přesun na rozsahu prutu, kdy je možné testovat přesný rozměr. [15]

Nejatraktivnějším produktem firmy Kolb & Baumann GmbH & Co. KG (KOBA) by měl být tzv. KOBA-step, tedy stupňová měrka. Jedná se opět o jednodimenzionální artefakt fungující také na principu ball baru. V tomto případě jsou však keramické válečky umístěné mezi dvěma pruty. Tyto kovové pruty mají po stranách otvory tak, aby udrželi válečky v dané poloze, ale zároveň umožnily přístup k nim ze všech možných stran. To dodává na možnostech provedení zkoušky. Další výhodou je spojení s podpurným mechanismem (nahrazujícím trojnožku). Aretace pootočení je zaručena drážkami v půlkruhovém plátku, který má stejnou osu rotace jako prut. Vymění se tak počet nastavitelných úhlů za přesnost. Rozsah úhlů je  $\pm 50^\circ$  s kroky po  $5^\circ$ . [15] [16]



Obr. 14: detail uložení válečků v prutu [15]



Obr. 15: Koba-step společnosti Koba [15]

## 4.3 2D artefakty

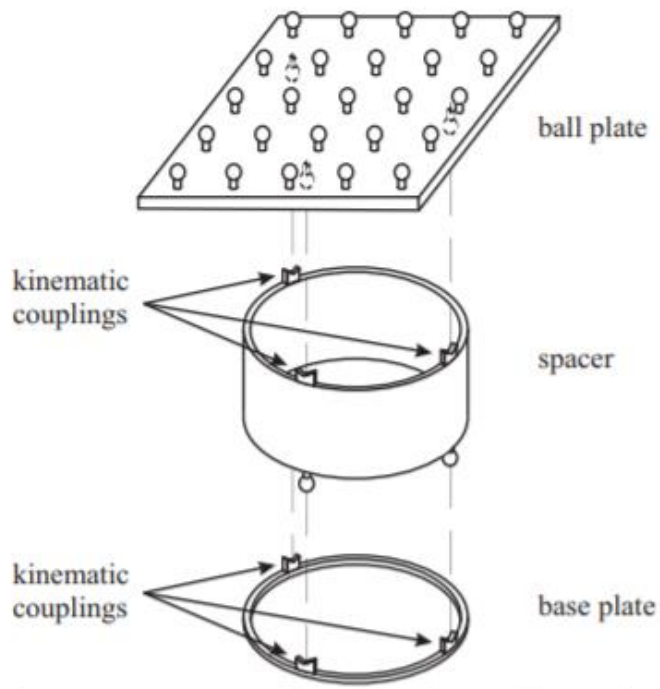
### 4.3.1 Ball pate

Toto je běžně používaný artefakt pro 2D testování, který se vyrábí v několika variacích. Základem je deska, na které jsou upevněny především keramické koule s malou chybou tvaru ve čtvercové síti s kalibrovanými délkami. Materiál desky by měl mít nízkou teplotní roztažnost, nicméně s ohledem na cenu se stále často využívá ocel. To z toho důvodu, že je vhodné umístit měřené koule přímo do desky tak, aby středy koulí byli ve středu výšky desky. Ocel pak nabízí nejjednodušší variantu z pohledu technologií obrábění pro tuto aplikaci. [20] [13]



Obr.16: Ball plate společnosti Retter [34]

Švýcarský institut technologie vynalezl modifikaci, tzv. spacer, která umožňuje měřit v několika výškách. Takovýto artefakt je definován jako pseudo-3D (Obr.17). Na schématu je vidět, že spojení artefaktu je zajištěno kalibrovanými koulemi, které se spojují kinematickými spojkami se spacerem. Stejné spojení je se základní deskou připevněnou ke stolu stroje. [14]



Obr. 17: Ukázka spojení artefaktu se spacerem. [14]

### 4.3.2 Hole plate

Na podobném principu jako ball plate funguje i tento artefakt. Rozdíl spočívá v měření otvorů na rozdíl od koulí. Hole plate lze použít pouze pro měření ve 2D. Kromě zjevného úskalí to však přináší i výhody. Při nalézání středu testovacích objektů je na změření koule matematicky potřeba minimálně čtyř bodů, zatímco pro otvor stačí jen tři. Podle britského standardu BS-7172 je ovšem doporučeno minimálně 5 bodů. [21]



Obr. 18: Příklad hole plate[31]

Tyto komplikace ovlivňují design hole plate a vytváří několik dilemat. Pro zaručení změření více bodů je potřeba zaručit dostatečně velký průměr pro sondu, aby byla schopná tolik bodů snímat. Větší otvory však vyžadují větší artefakty, což se logicky odrazí na ceně a ovlivnění tvaru okolními vlivy, jako například teplotní roztažností. Z technologických důvodů, pro zaručení dostatečné přesnosti otvorů, se často využívá jiných částí zaklíněných do desky, jako například ložiskových pouzder. [21]



Obr. 19: Tzv. Cylinder plate pro  $\mu$ CMM. Zkouška s tímto artefaktem probíhá na stejném principu. [32]



#### 4.4 3D Artefakty - rámy

Třídídimenzionální testovací objekt je krychle či tetronom s upevněnými keramickými, nebo kovovými či kompozitními koulemi s velmi malou chybou tvaru v každém z rohů objektu, které jsou spojeny tyčemi s minimální teplotní roztažností. Běžnou aplikací tohoto zařízení mohou být právě periodické zkoušky a vyhovuje normě ISO 10360-2. Artefakt má nízkou teplotní roztažnost a robustní konstrukci pro zaručení minimální chyby tvaru a polohy. [28]



Obr. 20: Tetronom firmy Ferret. [28]

#### 4.6 CMM-Check společnosti Carl Zeiss AG

Již několik desítek let renovovaná společnost v oblasti metrologie se také rozhodla pro výrobu vlastního testovacího artefaktu, který kombinuje aspekty všech předchozích. Tento artefakt se nazývá CMM-Check a jeho hlavní výhodou je kombinace několika kalibrovaných testovacích objektů na jednom artefaktu. Skládá se z kruhové měrky  $\varnothing$  50 mm, válce  $\varnothing$  50 mm se dvěma obroušenými ploškami pro testování tzv. flick standardu, třech keramických koulí  $\varnothing$  30 mm a dvou prutů pro testování délky 50 mm a 400 mm. Celá konstrukce je vytvořena z vysoce legované oceli a je třeba zaručit přesnou výrobu a vhodné skladování. Artefakt má navíc i zabudovaný úchop pro snadnější přenos. [17] [18]



Obr. 21: CMM-check společnosti Carl Zeiss AG [18]

## 5. Návrh metodiky a provedení periodické zkoušky

Z uvedených informací je zřejmé, že na testování CMM je potřeba etalonů, které musí být pravidelně kalibrovány s ohledem na zajištění přesnosti rozměrů podle metrologické návaznosti. O to více se pak klade důraz na stav artefaktu, který se musí i dlouhodobě udržovat. Japonský metrologický institut, ve své zprávě o kalibraci artefaktu pro 2D měření, specifikuje hned několik akcí, které je zakázáno s artefaktem provádět, nebo naopak, co se provádět musí. Jmenovitě dotek kůže nebo manipulace neautorizovanou osobou jsou akce zakázané. Naopak je potřeba řádně artefakt čistit a uchovávat v bezpečném prostředí se stálou teplotou a vlhkostí vzduchu (20 °C a 50 %). [20]

V tomto extrémním případě se však jedná o mezinárodní vědecký projekt. Přestože podmínky používání artefaktů v běžném provozu nejsou tak náročné, je stále potřeba zaručit vhodné podmínky pro artefakt i pro samotnou zkoušku. Navíc je potřeba s časem kalibrovat i artefakt, jelikož běžná zkouška pro indikaci chyby vyžaduje kalibrované zkušební délky. Všechny tyto úkony se pak projeví na ceně za udržování artefaktu, a to vše jen za účelem zjištění chyby měření. Samotná kalibrace je proces náročný sám o sobě.

### 5.1 Návrh zkoušky

Hlavním zájmem je zjistit, zda stroj měří správně. Chyba měření může mít několik původů, které se dají testovat několika různými způsoby. Z předešlých zkušeností lze odvodit, že častou chybou je kolmost os, která je výrazná především při 2D a 3D měření. Pro takováto měření je vhodným artefaktem ball plate.

Pro navrhovanou zkoušku byl vytvořen ball plate s devíti koulemi umístěnými na čtvercové podložce. Hlavním cílem zkoušky je eliminovat potřebu kalibrace zkušebního artefaktu. Dále je vhodné zaručit zkoušku co nejkratší, aby se ušetřený čas mohl využít na samotné měření součástí. Pokud zaručíme dostatečnou neměnnost geometrických parametrů artefaktu po dobu zkoušky, pak můžeme říct, že jestliže bude změřena ta samá vzdálenost v několika směrech, musí mít stejný

rozměr  $\pm$  tolerance stroje. Pro zjednodušení a lepší odhad původu chyby zvolíme umístění artefaktu tak, aby byly směry měření rovnoběžné s osami stroje.

Na zjištění vzdáleností mezi jednotlivými koulemi, a eventuelně dalších informací ohledně polohy, je možnost využít dva způsoby. Prvním je zjistit tyto vzdálenosti pomocí umístění středů koulí v souřadnicovém systému stroje a následných výpočtů, například v programu MS Excel. Druhý způsob zahrnuje získání těchto geometrických specifikací rovnou ze software Calypso, ve kterém je i zkouška simulována.

Zkouška například začne s artefaktem ve vodorovné poloze, tedy rovnoběžné s rovinou XY stroje. Následně se artefakt pootočí do svislé polohy, tedy rovnoběžné s rovinou XZ, nebo YZ stroje. Poslední pootočení pak bude podél osy Z o 90° do druhé svislé polohy. Při označení koulí 1-9 se bude postupovat od koule 1 do koule 9 ve všech pootočeních artefakt. Výsledkem jsou tři měření. Pokud stroj funguje správně, měli bychom vidět relativně stejné rozměry ve všech třech směrech.

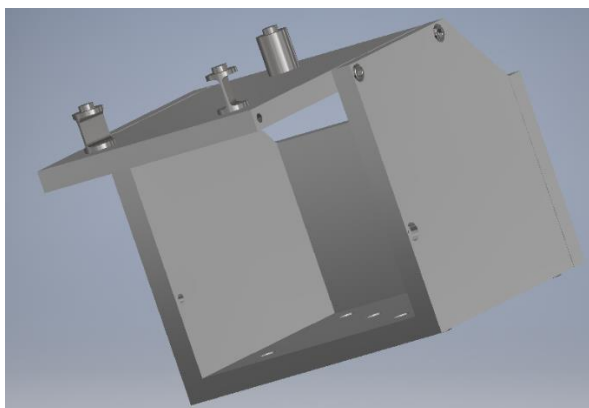
## **5.2 Návrh systému pro upínání a polohování ball plate a tvorba výkresové dokumentace**

V první řadě je třeba navrhnout ball plate. Přestože eliminujeme potřebu kalibrovaných rozměrů, o to více je zapotřebí zaručit minimální změnu rozměrů během zkoušky z okolních podmínek. Nejpodstatnější je teplotní roztažnost, kterou eliminujeme zvolením Ceranu jako materiálu pro desku, na kterou umístíme keramické koule s malou chybou tvaru. Ceran je o něco dostupnější varianta již zmíněného Zeroduru využívána především na desky pro indukční sporáky. Artefakt byl navržen a vyroben na Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Během zkoušky je zapotřebí s artefaktem manipulovat a zaručit dostatečné upevnění v jednotlivých polohách. Za tímto účelem jsem vytvořil dokumentaci pro výrobu k navrženému otočnému stolu, který je schopen se otáčet kolem svislé a jedné z vodorovných os. Stůl by měl být lehký, a proto jako materiál zvolíme hliník. Bude mít čtvercový tvar s otočnou deskou ve výši dostatečné pro překlopení ball plate do svislé polohy. Tloušťka stěn stolu byla zvolena na 14 mm.

Taková by měla zaručit robustní, a přesto relativně lehkou konstrukci. Navíc je umožněna snadná montáž pomocí šroubů M6.

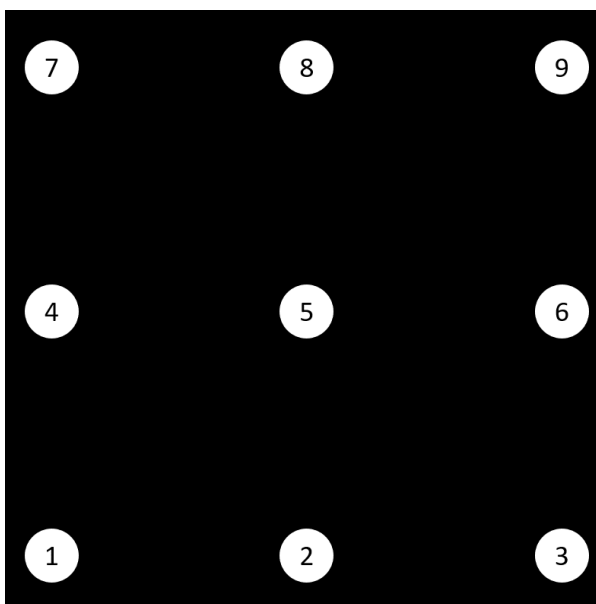
Konečný návrh demonstruje obr. 23. Hlavními vlastnostmi stolu je lehký způsob pootočení artefaktu a současně zaručení pevného upevnění v jednotlivých polohách. Do otočné desky jsou vyfrézovány drážky, do kterých se vloží a přilepí spoje. Na ty bude na závěr upevněn artefakt. Pro pootočení je zapotřebí nejprve uvolnit dva šrouby upevňující artefakt ve vodorovné poloze a následně ho opět upevnit v poloze svislé. Pootočení kolem osy Z je zaručeno pomocí upevnění přímo do desky stroje šroubem s podložkou, který se jen uvolní. Kompletní dokumentaci lze pak vidět v příloze.



*Obr. 22: Model podpůrné konstrukce pro ball plate.*

### **5.3 Provedení zkoušky**

Samotnou zkoušku je potřeba nejprve navrhnut v software Calypso. Z několika důvodů bylo rozhodnuto, že se bude zkouška simulovat na zkušebním tělese z hliníku. Ten má samozřejmě podstatně větší teplotní roztažnost než předpokládaný Ceran. Efekt roztažnosti lze částečně kompenzovat zaznamenáním do programu, který ji uvažuje při snímání. Posledním krokem je vyhodnotit vztah mezi výsledky měření a stavem stroje, tedy zda zkouška indikuje chybu funkce, či nikoli.



Obr. 23: Označení koulí na artefaktu. Pozn.: toto označení platí pro oba artefakty.

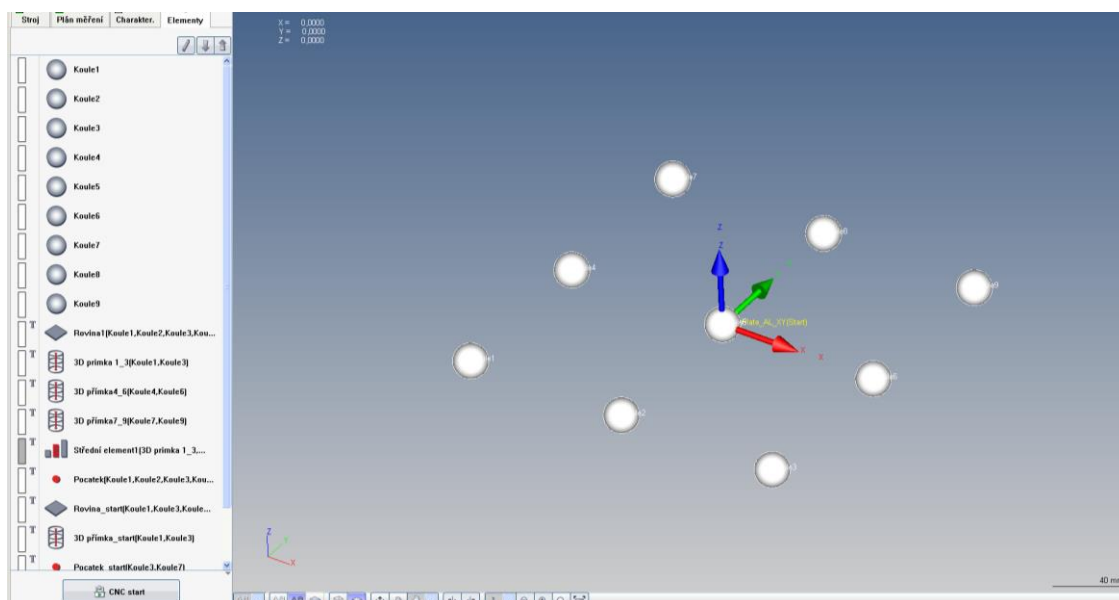
### 5.3.1 Vytvoření plánu měření pro automatické provedení zkoušky

Nejprve je potřeba zkonstruovat geometrii artefaktu. Ten bude měřen ve třech polohách. Rozumným řešením je tedy vykonstruovat pouze čtvercovou síť koulí, kde prostřední koule má střed v počátku souřadného systému programu. Poté se vytvoří 8 dalších koulí stejné velikosti a posunou se v rovině o teoretickou rozteč (tedy o 100 mm) v příslušných osách (viz obr.25). Program nabízí jednoduchou manipulaci s prvky v souřadném systému.

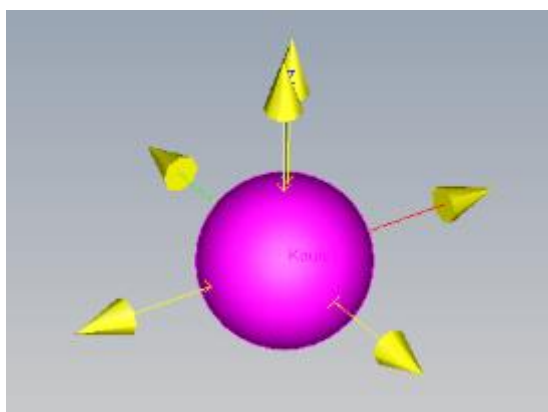
Bod	x	y
1	-100	-100
2	0	-100
3	100	-100
4	-100	0
5	0	0
6	100	0
7	-100	100
8	0	100
9	100	100

Tab. 6: Souřadnice bodů ve zvoleném systému v mm.

Kromě toho je třeba definovat několik geometrických specifikací, které fungují pouze jako teoretické pro určení souřadného systému. Součástí je i tzv. start systém. Díky tomu jsme schopni v programu změnit pouze měřicí dotek a naměřit pár koulí. Tímto dojde k úspoře času na tvoření programů v dalších dvou polohách. Program je tak navíc i jednoduchý a přehledný.

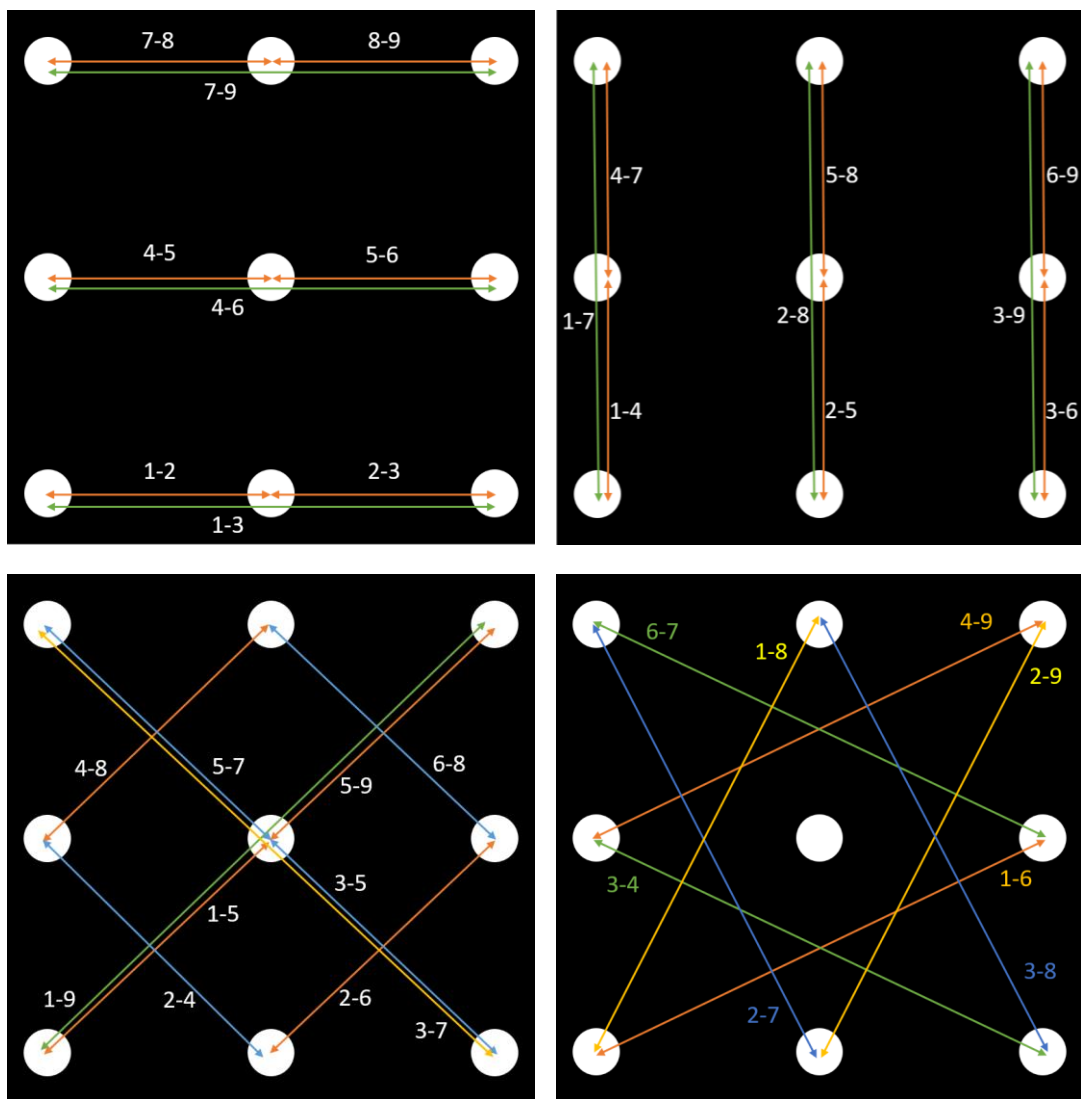


Obr. 24: Rozmístění elementů v programu.



Obr.25: Snímané body na elementu.

V dalším kroku musíme programu určit, jaké specifikace se budou vyhodnocovat. Tyto jsem rozdělil na obr. 26 podle směrů. Rozměry se se vyhodnocují jako vzdálenost středů koulí. Proto je potřeba označit body, na kterých se bude hrot dotýkat, abychom měli dostatečně definovaný tvar koulí (viz obr.25). Posledním krokem je určení bezpečnostního čtverce, který při přesunu snímacího systému zakazuje procházet touto oblastí.



Obr. 26: Vyhodnocované charakteristiky. Zleva odshora: a) horizontální b) vertiální c) diagonální d) křivé

Horizontální	Vertikální	Diagonální	Křivé
1-2	1-4	2-6	1-8
2-3	4-7	1-5	2-9
4-5	2-5	5-9	3-4
5-6	5-8	4-8	6-7
7-8	3-6	2-4	2-7
8-9	6-9	3-5	3-8
1-3	1-7	5-7	1-6
4-6	2-8	6-8	4-9
7-9	3-9	1-9	
		3-7	

Tab. 7: Seznam vyhodnocovaných charakteristik

Takto máme připravený program na měření. Před spuštěním ovšem musíme manuálně změřit kouli číslo 1, 3 a 7, právě pro definování polohy artefaktu v prostoru stroje. V poslední fázi se ještě volí dovolené odchylky jednotlivých specifikací, které chceme vyhodnotit. V našem případě je tato informace irelevantní. Při výběru typu souboru s výsledky volíme nejen PDF, ale i tzv. merge soubor, který se dá následně přesunout do programu MS Excel. Ten je schopný využít informace tohoto souboru a zobrazí nám výsledek naší zkoušky.

### 5.3.2 Simulace na testovacím modelu

Před samotným měřením je ještě potřeba připravit stroj. Začátkem přípravy je kvalifikace snímacího systému. Tato kvalifikace se provádí na jiném snímači, než který budeme používat pro měření artefaktu. Provádí se pomocí speciálního artefaktu;

#### **Kalibrační koule:**

Většina výrobců CMM dodává ke svým strojům artefakt pro kalibraci. Taková se provádí na začátku jakéhokoliv měření a slouží ke korekci snímacích systémů. Postup kalibrace pomocí kalibrační koule je podobný principu popsanému v normě ISO 10360-5. Je vyrobena především z keramiky a přidělová se k upínacímu systému závitem. Ke kalibračním koulím se také dodává certifikát. [27]



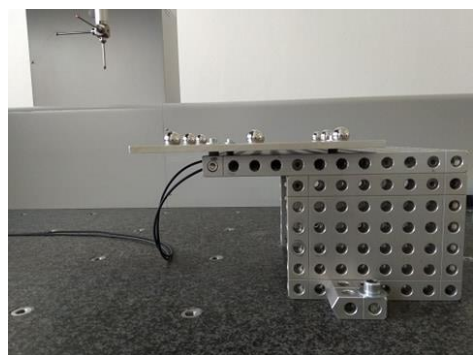
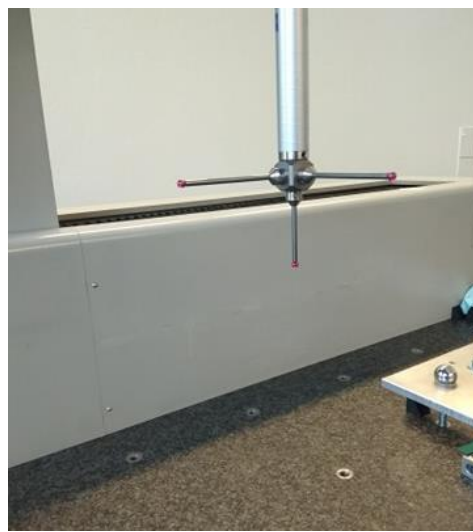
*Obr. 27: Kalibrační koule firmy Zeiss na kovové desce*



Po tomto kroku následuje výměna snímače za zkuškový snímač. Ten je tvořen prodloužením 100 mm z již zmíněného ThermoFitu a třemi doteky s průměrem 5 mm a s prodloužením v rovině XY 65 mm a v ose Z 43 mm.

Po výměně snímacího doteku stačí jen upnout testovací model. V programu se nastaví dotek podle orientace artefaktu (nejprve se provedlo měření ve vodorovné poloze, poté ve dvou svislých). Následně, jak jsem již nadnesl, se nasnímají body podle obr. 26 na koulích číslo 1, 3 a 7 pro určení polohy artefaktu v měřicím objemu stroje. Program po spuštění provede měření šesti bodů na všech devíti koulích a vyhodnotí charakteristiky, které mu byly zadány.

Snímací systém je sestaven z hvězdy s doteky ve třech směrech. Od snímací hlavy je napojeno prodloužení 100 mm, na kterém už jsou připojeny konkrétní doteky. Průměr rubínového hrotu je 5 mm. Prodloužení doteků je 65 mm u vodorovných a 43 mm u svislého.



Obr.28: Snímací systém použitý pro obě zkoušky a zkušební těleso.

### 5.3.3 Provedení zkoušky na ceranovém artefaktu

Po provedení zkoušky na testovacím, a zároveň i na porovnávacím artefaktu nám nezbyvá než provést zkoušku samotnou na vyrobeném modelu. Kromě již zmíněných výhod navíc model nevyžaduje umístění teplotních senzorů. Ty běžně vyrovnávají teplotní roztažnost materiálu, který se nastaví v programu. Vzhledem k tomu, že náš materiál má prakticky nulovou roztažnost, není třeba tohoto kroku.

V přechozích kapitolách jsem zmínil, že celá podpurná konstrukce je dohromady držena šrouby M6. Ke stolu je tato konstrukce upevněna jedním šroubem M10 s podložkou, který se vloží do otvoru 12,5 mm v základně (viz příloha). Na upevněném artefaktu se po obvyklé kalibraci snímacího systému opět provede měření za účelem určení polohy artefaktu v prostoru stroje. Zbytek zkoušky probíhá stejně jako u testovacího artefaktu. Vzhledem k dispozicím byly zkouška a vyhodnocení provedeny pouze na hliníkovém artefaktu podpíraném konstrukcí z AluFixu. Přestože je takováto varianta více než dostačující pro zkoušku, v ideálním případě by se měla zkouška provádět na ceranovém artefaktu.

Doba jednoho měření činila přibližně 4 min 30 s. K určení polohy je třeba kolem 2 min 30 s. Změna polohy a upevnění, změna snímacího doteku v programu a kontrola před každým spuštěním je odhadována zhruba na 2 - 4 minuty. Čas potřebný na provedení celé zkoušky pak můžeme přibližně určit na 35 min.

### 5.3.4 Vytvoření softwarového nástroje v programu MS Excel pro analýzu výsledků a vyhodnocení

Pro nejlepší interpretaci dat se bude exportovat soubor z měření ve formátu .txt, a to pro každé jednotlivé měření. Program nabízí možnost „merge souboru“, která nám sice umožní mít všechny informace v jediném dokumentu, ale pro náš účel není toto až tak podstatné. Soubory se pak dají jednoduše vložit do tabulkového editoru. Já zvolil program MS Excel.

Pro zjednodušení přijetí dat jsem uvažoval možnost použití funkcí macro v programu MS Excel. Ty umožňují automatizovat jisté operace pomocí nahrávání a následného převedení procesů do programovacího jazyka, které se dají následně aplikovat na tlačítko. Pomocí této funkce jsem nastavil import dat z textového

souboru do tabulky. Konkrétně jsem pro tato data vytvořil vlastní list, na který se budu odkazovat na listu výpočetním. Macro automatizuje aktualizaci listu. Dalším krokem macra je změna desetinné tečky za desetinou čárku, aby mohla má verze MS Excelu vyhodnocovat tato čísla a provádět s nimi matematické operace. To přináší další nevýhodu maker, která vlivem amerického původu nevnímají naši čárku jako desetinou, ale oddělovací tisíc, a proto se při provádění tohoto kroku vytvoří naopak číslo o  $10^7$  větší. Tento fakt lze jednoduše kompenzovat vydělením tohoto čísla zpět na správnou hodnotu v dalším listu, na němž se provádějí výpočty.

Řešení umožňuje rychlou aktualizaci a vyhodnocení dat, bez potřeby manuálního vkládání ani výpočtu odchylky. Podmínkou užití macra je umístění souborů .txt na disku C:\ počítače, který obsluhuje stroj. Toto je nevýhodou maker, která umožňují automatizaci pouze na přesně danou adresu a název souborů (v deklarovaném případě XY, XZ a YZ). Vyhodnocení proběhne pomocí určení maximálního rozpětí hodnot tří směrů pro každou vzdálenost a porovnání s povolenou hodnotou. Další možností je vytvoření průměrné hodnoty a uvažování odchylky od této hodnoty s použitím kritéria  $M = A+L/K$ . Následně se na vyhodnocení splnění kritérií použije funkce když:

$$=KDYŽ(Rozpětí < Tolerance; 1; 0)$$

Jinak řečeno, pokud rozpětí bude větší než stanovená tolerance, daná buňka uvede hodnotu 0. Pokud menší, tedy v pořádku, objeví se hodnota 1.

Maximální povolená odchylka			
1. P	1,2 μm	Průměrné rozpětí	0,448291667 μm
2. A	0,8 μm	Maximální rozpětí	1,0273 μm
K	300	Medián	0,1493 μm
		Průměrná odchylka	0,170165432 μm
		Maximální odchylka	0,5458 μm

	XY	XZ	YZ
1.	1		
2.	1	1	1

1- vyhovuje zadání 0-nevyhovuje zadání

**Aktualizace**

Umístění souborů s daty:  
**C:\PZB\Data**  
Pojmenování souborů:  
**XY, XZ, YZ**

Obr.29: Vzhled vyhodnocovacího programu.

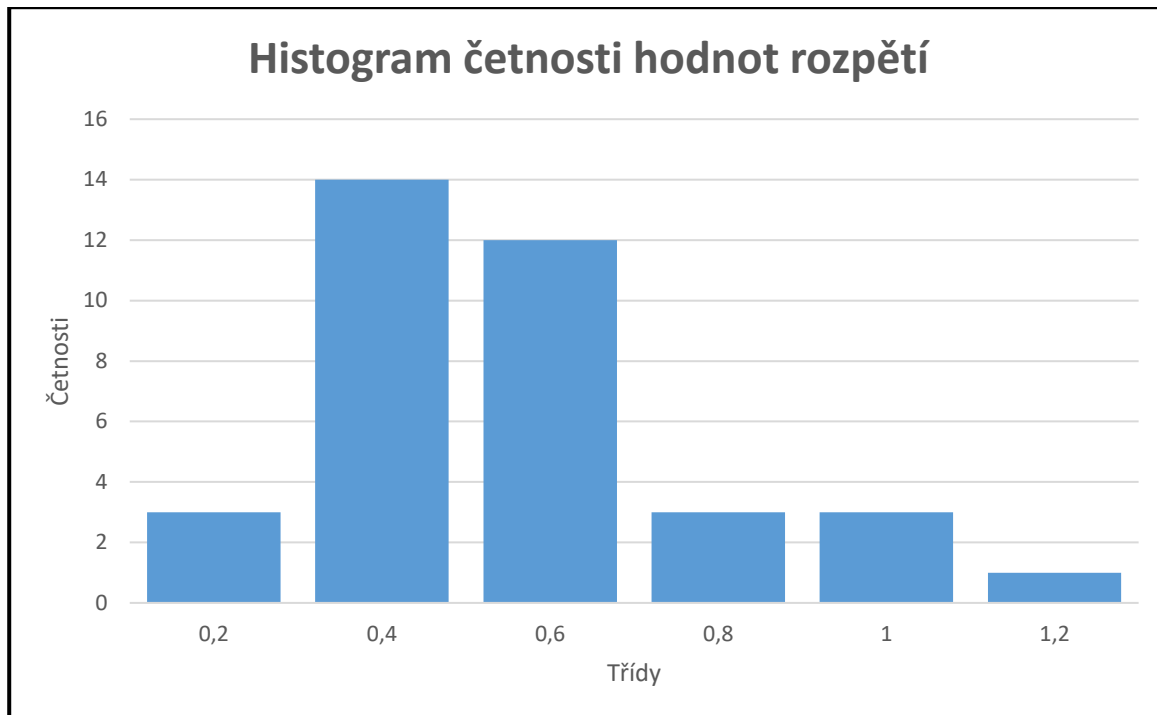
Konečný program lze vidět na obr. 29. Kromě určení dodržení tolerance pomocí maximálního rozsahu je možnost hodnotit výsledky i podle již zmíněného kritéria s průměrnou hodnotou. Program nabízí i několik statistických údajů. Pro přesnější informace o hodnotách se lze podívat na list „Výpočty“, kde jsou všechny informace umístěny v tabulkách. Vyhodnocení pro tuto bakalářskou práci zahrnuje jak informace o naměřených rozměrech, tak i o dodržení tolerance podle obou kritérií. Dalšími prvky programu je histogram naměřených hodnot a bodový návod k použití programu.

## Vyhodnocení Testovacího objektu

Pozice	Jmen. hodnota rozměru [mm]	Průměrná hodnota rozměru [mm]	Odchylky [μm]			Maximální rozpětí pozice [μm]	Test
			xyΔ	xzΔ	yzΔ		
1-2	100,000	<b>99,957</b>	0,025	0,053	0,078	0,132	<b>1</b>
2-3	100,000	<b>100,068</b>	0,166	0,001	0,167	0,333	<b>1</b>
4-5	100,000	<b>100,134</b>	0,100	0,039	0,140	0,240	<b>1</b>
5-6	100,000	<b>99,787</b>	0,026	0,039	0,065	0,104	<b>1</b>
7-8	100,000	<b>99,925</b>	0,194	0,034	0,228	0,422	<b>1</b>
8-9	100,000	<b>100,144</b>	0,254	0,058	0,196	0,450	<b>1</b>
1-3	200,000	<b>200,025</b>	0,127	0,086	0,213	0,340	<b>1</b>
4-6	200,000	<b>199,920</b>	0,126	0,078	0,204	0,331	<b>1</b>
7-9	200,000	<b>200,069</b>	0,448	0,023	0,425	0,872	<b>1</b>
1-4	100,000	<b>100,033</b>	0,025	0,021	0,004	0,045	<b>1</b>
4-7	100,000	<b>100,159</b>	0,228	0,160	0,068	0,387	<b>1</b>
2-5	100,000	<b>100,203</b>	0,293	0,193	0,100	0,487	<b>1</b>
5-8	100,000	<b>99,885</b>	0,140	0,107	0,032	0,247	<b>1</b>
3-6	100,000	<b>99,925</b>	0,037	0,105	0,141	0,246	<b>1</b>
6-9	100,000	<b>100,007</b>	0,292	0,292	0,000	0,585	<b>1</b>
1-7	200,000	<b>200,192</b>	0,253	0,181	0,072	0,434	<b>1</b>
2-8	200,000	<b>200,088</b>	0,435	0,301	0,134	0,736	<b>1</b>
3-9	200,000	<b>199,932</b>	0,329	0,188	0,141	0,517	<b>1</b>
2-6	141,422	<b>141,374</b>	0,132	0,347	0,215	0,562	<b>1</b>
1-5	141,422	<b>141,687</b>	0,057	0,290	0,347	0,638	<b>1</b>
5-9	141,422	<b>141,278</b>	0,196	0,200	0,004	0,397	<b>1</b>
4-8	141,422	<b>141,497</b>	0,154	0,171	0,017	0,324	<b>1</b>
1-9	282,847	<b>282,964</b>	0,140	0,491	0,351	0,842	<b>1</b>
2-4	141,422	<b>141,387</b>	0,239	0,051	0,290	0,529	<b>1</b>
3-5	141,422	<b>141,457</b>	0,035	0,257	0,222	0,479	<b>1</b>
5-7	141,422	<b>141,418</b>	0,102	0,070	0,172	0,275	<b>1</b>
6-8	141,422	<b>141,440</b>	0,088	0,069	0,158	0,246	<b>1</b>
3-7	282,847	<b>282,875</b>	0,136	0,186	0,051	0,322	<b>1</b>
2-9	223,607	<b>223,675</b>	0,481	0,546	0,064	1,027	<b>1</b>
1-8	223,607	<b>223,726</b>	0,181	0,332	0,151	0,512	<b>1</b>
1-6	223,607	<b>223,539</b>	0,078	0,372	0,450	0,822	<b>1</b>
4-9	223,607	<b>223,739</b>	0,000	0,178	0,178	0,356	<b>1</b>
3-4	223,607	<b>223,607</b>	0,121	0,263	0,142	0,405	<b>1</b>
6-7	223,607	<b>223,539</b>	0,281	0,073	0,354	0,635	<b>1</b>
2-7	223,607	<b>223,685</b>	0,366	0,152	0,213	0,579	<b>1</b>
3-8	223,607	<b>223,651</b>	0,013	0,134	0,148	0,282	<b>1</b>

Tab.8: Vyhodnocení testovacího objektu. Uvedené výsledky jsou pro toleranci rozpětí

1,2μm. 1 značí dodržení tolerance, 0 značí její porušení.



Třídy	Četnosti
0,2	3
0,4	14
0,6	12
0,8	3
1	3
1,2	1

Tab.9: Třídy a četnosti histogramu hodnot rozpětí

## 6. Závěr

Hlavním úkolem práce bylo navrhnout metodiku a vyhodnocování periodické zkoušky na souřadnicových měřicích strojích.

Provedl jsem rozbor systému norem ISO 10360 a vysvětlil základní principy fungování testování strojů podle těchto norem. Zároveň jsem byl schopen definovat jednotlivé prvky systému, se kterými je potřeba během zkoušky pracovat, a popsat základní principy testování strojů podle těchto norem. Zkouška byla navržena tak, aby co nejvíce eliminovala potřebu přesnosti rozměru a byla rychle proveditelná. V obou ohledech zkouška vyhověla, jelikož má jasnou vypovídací hodnotu i při absenci ceranového artefaktu a trvá v intervalu 25 až 35 minut, s ohledem na rychlost obsluhy. Doba měření jednoho pootočení byla změřena na 4,5 minuty.

Dále jsem popsal artefakty využívané pro testování a kalibraci těchto strojů. Byl zvolen ball plate kvůli dobré definici rozměrů a schopnosti změřit několik směrů bez potřeby pootočení. Hlavním kritériem artefaktu měla být malá teplotní roztažnost, nicméně se zkouška jeví funkční i se softwarovou kompenzací roztažnosti na hliníkovém artefaktu. Pro artefakt byl navržen lehký, ale pevný systém pro upínání a polohování, k jehož výrobě jsem vytvořil dokumentaci. Při kompenzaci teplotní roztažnosti hliníku bylo dosaženo cíle, kterým byla absence potřeby přesných rozměrů artefaktu při provedení této periodické zkoušky.

Zkouška vyhodnocuje několik navržených rozměrů pro testování nejen pohybu v jednotlivých osách, ale i kombinací těchto os. Při měření ve třech daných polohách jsme pak schopni interpretovat všechny pohyby stroje, s výjimkou pohybu ve všech třech směrech zároveň. Výsledkem je komplexní zkouška, která slouží nejen jako rychlý test přesnosti, ale může fungovat i jako nástroj při případné alokaci problému.

Posledním úkolem bylo vytvoření vyhodnocovacího programu. Díky němu je zkouška relativně rychle a jednoduše proveditelná, neboť nabízí schopnost rychlého uložení a aktualizace naměřených dat. Artefakt lze navíc testovat podle několika

kritérií, v několika rozměrech a na základě mnoha informací. Program umožňuje nejen rychlou kontrolu, ale i přehledný rozpis všech vyhodnocených parametrů.

Díky navrženému postupu a vyhodnocení jsme dosáhli kvalitní periodické zkoušky, která eliminuje potřebu kalibrace artefaktu. S pomocí vytvořeného programu lze zkoušku navíc provést rychle a jednoduše interpretovat vyhodnocené informace.



## Odkazy

- [1] TILLET, Tony. A Brief History Of CMM Technology. *Status Metrology* [online]. 2018 [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: <https://blog.status-cmm.co.uk/blog/a-brief-history-of-cmm-technology>
- [2] Moderní koncepce konstrukce SMS. *Hexagon Manufacturing Intelligence* [online]. [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/solutions/technical-resources/metrology-101/whitepaper-modern-cmm-design-concepts>
- [3] ČEPOVÁ, Lenka a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch: studijní opora*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2514-4.
- [4] RENISHAW. Upínací stavebnice pro CMM. [online]. [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/cmm-fixtures--20851>
- [5] RENISHAW. 3osé systémy. [online]. [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/3ose-systemy--10368>
- [6] ZERODUR transparent glass-ceramic from SCHOTT. *Präzision glas & optik* [online]. [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: <https://www.pgo-online.com/intl/zerodur.html>
- [7] ČSN EN ISO 10 360-4. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) : Část 4: Souřadnicové měřicí stroje používané v režimu měření skenováním. Praha: Český normalizační ústav, 2001.
- [8] ISO 10360-2 Geometrické požadavky na výrobky: Přejímací a periodické zkoušky CMM. srpen 2010. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví - Souřadnicové měřicí stroje používané pro měření lineárních rozměrů.
- [9] MÜLLER, Marek. *Vliv produktivity kontroly na CMM na způsobilost procesu měření*. Praha, 2015. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta Strojní. Vedoucí práce Ing. Libor Beránek, Ph.D.
- [10] ISO 10360-5 Geometrické požadavky na výrobky: Přejímací a periodické zkoušky CMM. květen 2011. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví - Souřadnicové měřicí stroje používající snímací systém s jednotlivým a složeným snímacím dotekem.
- [11] ISO 10360-1. Geometrické požadavky na výrobky: Přejímací a periodické zkoušky CMM. září 2001. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví - slovník.
- [12] RENISHAW. *QC20-W ballbar system* [online]. [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/en/qc20-w-ballbar-system--11075>
- [13] VOSTROVSKÝ, Jakub. *Návrh artefaktu pro ověření přesnosti souřadnicových měřicích strojů*. Praha, 2017. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta Strojní. Vedoucí práce Ing. Petr Mikeš.
- [14] LIEBRICH, Thomas, Bernhard BRINGMANN a W KNAPP. Calibration of a 3D-ball plate. *Precision Engineering* [online]. 2010 [cit. 2019-03-12]. DOI: 10.3929/ethz-a-006071026.

- [15] Artifacts for 3-Coordinate Measuring Machines EN. *Koba.de* [online]. [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: <https://www.koba.de/en/26-products-en/artifacts-for-3-coordinate-measuring-machines-en.html>
- [16] PAUL W., Marino. KOBA-step Gage Bar Reference Master from Paul W. Marino Gages, Inc. *Manufacturing News*[online]. 1.3.2012 [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: <http://www.mfgnewsweb.com/archives/4/36207/Quality-Control-Measurement-mar12/KOBA-step-Gage-Bar-Reference-Master-from-Paul-W.-Marino-Gages-Inc.aspx>
- [17] VERMA, M.R., E. CHATZIVAGIANNIS, D. JONES a P.G. MAROPOULOS. Comparison of the Measurement Performance of High Precision Multi-axis Metal Cutting Machine Tools. *Procedia CIRP* [online]. 2014, **25**, 138-145 [cit. 2019-03-12]. DOI: 10.1016/j.procir.2014.10.022. ISSN 22128271. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827114010531>
- [18] ZEISS CMM-Check. *Zeiss.com* [online]. [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: [https://mx.probes.zeiss.com/en/CMM-Check/product-ARTIKEL\\_2882.html](https://mx.probes.zeiss.com/en/CMM-Check/product-ARTIKEL_2882.html)
- [19] GINIOTIS, Vytautas a Anthony HOPE. *Measurement and Monitoring*. Momentum Press, 2014. ISBN 978-1-60650-379-9. Dostupné také z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/cvut/reader.action?docID=1048449&query=artefacts+cmm>
- [20] *Coordinate Measuring Machine (CMM) Two-dimensional (2-D) Artifacts (Ball Plate & Hole Plate)*. National Metrology Institute of Japan (NMIJ, AIST), 2009. Dostupné z: [https://kcdb.bipm.org/AppendixB/appbresults/APMP.L-K6/APMP.L-K6\\_Technical\\_Protocol.pdf](https://kcdb.bipm.org/AppendixB/appbresults/APMP.L-K6/APMP.L-K6_Technical_Protocol.pdf)
- [21] 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*. 2001, **17**(7), 508-515. DOI: 10.1007/s001700170151. ISSN 0268-3768. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s001700170151>
- [22] Tetronom single bar. *ARXgeometres.de* [online]. ARX Geometres [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: <https://arxgeometres.de/en/products/artifacts/tetronom-single-bar/>
- [23] Service Měření kruhovitosti kuličkovým měřidlem. *Georgfischer.com*[online]. GF MACHining Solutions [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: [https://www.georgfischer.com/content/gfac/country\\_CZ/cs/customer-services/machine-support/preventive-services-/circularity-test-with-ball-bar-gauge.html](https://www.georgfischer.com/content/gfac/country_CZ/cs/customer-services/machine-support/preventive-services-/circularity-test-with-ball-bar-gauge.html)
- [24] Vlastnosti kompozitů. *Compotech* [online]. [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <http://www.compotech.com/cs/technologie/vlastnosti-kompozitu/>
- [25] BERÁNEK, Libor. Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů. Prezentováno na: [České učení technické v Praze, Fakulta Strojní]. Dostupné z: [http://gps.fme.vutbr.cz/stah\\_info/gps-10/106\\_beranek.pdf](http://gps.fme.vutbr.cz/stah_info/gps-10/106_beranek.pdf)
- [26] *Standards catalogue ISO/TC213: Dimensional and geometrical product specifications and verification* [online]. [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://www.iso.org/committee/54924/x/catalogue/p/1/u/1/w/0/d/0>

- [27] *Kalibrační koule* [online]. [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: [https://world.probes.zeiss.com/cz/Prislusenstvi-stroje/Kalibracni-koule-a-stojany/Kalibracni-koule%2Ftelesa/Kalibracni-koule/category-314/product-ARTIKEL\\_2833.html](https://world.probes.zeiss.com/cz/Prislusenstvi-stroje/Kalibracni-koule-a-stojany/Kalibracni-koule%2Ftelesa/Kalibracni-koule/category-314/product-ARTIKEL_2833.html)
- [28] *Tetronom - the 3D verification artifact for CMMs* [online]. [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <http://www.ferret.com.au/c/metronom-pacific/tetronom-the-3d-verification-artifact-for-cmms-n688457#rJV8tqVlKLTATdzm.99>
- [29] *Accelerating Your Measurement Process: ThermoFit® from ZEISS* [online]. [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology/products/accessories/stylus-systems/thermofit-extensions.html>
- [30] *Invar* [online]. 2016 [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Invar>
- [31] Artefacts & Standards. *Eumetron GmbH* [online]. [cit. 2019-07-18]. Dostupné z: <https://www.eumetron.de/en-gb/artefacts-and-standards>
- [32] KRUGER, O., F. VON DER WALT a P. GREEFF. *Ball and Hole plate development for evaluation of  $\mu$ CMM*[online]. , 5 [cit. 2019-07-18]. Dostupné z: [http://www.macroscale.org/proceedings/2011/27\\_2011\\_Kruger\\_O.pdf](http://www.macroscale.org/proceedings/2011/27_2011_Kruger_O.pdf)
- [33] CNC CMM, CRYSTA-Apex S 7106 Standard Accuracy, 700 x 1000 x 600 mm. *Mitutoyo Česko s.r.o.*[online]. [cit. 2019-07-18]. Dostupné z: [https://shop.mitutoyo.cz/web/mitutoyo/en\\_CZ/mitutoyo/CRYSTA-APEX%20S900%20Series/CNC%20CMM%2C%20CRYSTA-Apex%20S%207106/\\$catalogue/mitutoyoData/PR/191-254-10/index.xhtml?jsessionid=73724AFE3A420977A6C3DF327A3EC498](https://shop.mitutoyo.cz/web/mitutoyo/en_CZ/mitutoyo/CRYSTA-APEX%20S900%20Series/CNC%20CMM%2C%20CRYSTA-Apex%20S%207106/$catalogue/mitutoyoData/PR/191-254-10/index.xhtml?jsessionid=73724AFE3A420977A6C3DF327A3EC498)
- [34] Ball plate. *Retter Automation + Messtechnik GmbH* [online]. [cit. 2019-07-18]. Dostupné z: <https://www.retter.de/en/kugelplatte.html>

## Seznam obrázků

Obrázek 1:	Portálový souřadnicový měřicí stroj firmy Mitutoyo	9
Obrázek 2:	CMM podle ISO 10360 [3]	11
Obrázek 3:	System snímání hlavy [9]	14
Obrázek 4:	Graf $MPE_{E(L)}$ . Varianty a) a b) [9]	15
Obrázek 5:	Graf $MPE_{E(L)}$ . Varianta c) [9]	15
Obrázek 6:	Chyba snímání $P < MPE_p$ [9]	15
Obrázek 7:	Příklad dvou ze čtyř možných poloh a dvou ze čtyř možných orientací snímání hlavy pro postup zkoušky. [8]	19
Obrázek 8:	Čtyři cílové skenovací roviny [7]	20
Obrázek 9:	Rozmístění bodů na testovací kouli [10]	23
Obrázek 10:	Popis kloubového snímáního systému [10]	24
Obrázek 11:	Příklad artefaktu z koncových měřek	28
Obrázek 12:	ARX Geometress Single bar [22]	29
Obrázek 13:	Q-C20W společnosti Renishaw [12]	29
Obrázek 14:	Detail uložení válečků v prutu [15]	30
Obrázek 15:	Koba step společnosti Koba [15]	30
Obrázek 16:	Ballplate společnosti Retter [34]	31
Obrázek 17:	Ukázka spojení artefaktu se spacerem [14]	31
Obrázek 18:	Příklad hole plate [31]	32
Obrázek 19:	Tzv. Cylinder plate pro mikroCMM [32]	32
Obrázek 20:	Tetronom firmy Ferret [28]	33
Obrázek 21:	CMM-Check společnosti Zeiss [18]	33
Obrázek 22:	Model podpůrné konstrukce pro Ball-plate	36
Obrázek 23:	Označení koulí na artefaktu	37
Obrázek 24:	Rozmístění elementů v programu	38
Obrázek 25:	Snímané body na elementu	38
Obrázek 26:	Vyhodnocované charakteristiky	39
Obrázek 27:	Kalibrační koule firmy Zeiss na kovové desce	40
Obrázek 28:	Snímání systém použitý pro obě zkoušky a zkušební těleso	41
Obrázek 29:	Vzhled vyhodnocovacího programu	43

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Orientace v měřicím systému pro provedení zkoušky [8]	18
Tabulka 2: Orientace v měřicím objemu [8]	18
Tabulka 3: Vzdálenost mezi skenovanými body [7]	21
Tabulka 4: Označení největších dovolených chyb [10]	22
Tabulka 5: Koeficienty lineární teplotní roztažnosti užívaných materiálů	26
Tabulka 6: Souřadnice bodů ve zvoleném systému v mm	37
Tabulka 7: Seznam vyhodnocovaných charakteristik	39
Tabulka 8: Vyhodnocení testovacího objektu	45
Tabulka 9: Třídy a četnosti histogramu hodnot rozpětí	46

## **Seznam příloh**

Příloha 1: Dokumentace k výrobě podpůrné konstrukce

Příloha 2: Program MS Excel pro vyhodnocování