

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A
METROLOGIE



Kontrola součástí na souřadnicových měřicích strojích s využitím
otočného stolu

Components inspection using the coordinate measuring machines with a rotary table

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Výrobní a materiálové inženýrství
Vedoucí práce: Ing. Petr Mikeš Ph.D.

Bc. MIROSLAV MIKOLÁŠ

PRAHA 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci na téma kontrola součástí na souřadnicových měřicích strojích s využitím otočného stolu vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady, které jsou uvedené v příloženém seznamu citací.

V Praze dne:.....

Podpis:.....

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce, panu Ing. Petru Mikešovi Ph.D. za věcné připomínky a rady v oblastech strojírenské metrologie a za trpělivost při vypracovávání této diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině za plnou podporu při celém mém studiu.

Anotace

Tato diplomová práce pojednává o otočných stolech využívaných při měření souřadnicovými měřicími stroji a jejich vlivu na přesnost měření.

V úvodní části se tato práce zabývá hlavně otočnými stoly, jejich konstrukcí, využitím a přípravou pro měření. V experimentální části této práce jsou porovnány jednotlivé metody měření součásti bez využití a s využitím otočného stolu a jeho vliv na přesnost měření.

Klíčová slova

Souřadnicové měřicí stroje, otočné stoly, měření, přesnost měření

Abstract

This thesis is dealing with rotary tables used during measuring with coordinate measuring machines and their impact on measuring accuracy.

In the introduction part of the thesis I am mainly focused on the rotary tables including their construction, utilization and preparation for measuring. In the experimental part I am comparing various methods of measuring components with/without the rotary table and his impact on measuring accuracy.

Keywords

Coordinate measuring machines, rotary tables, inspection, measuring accuracy

Obsah

Seznam zkratk	8
Úvod	9
1 Souřadnicové měřicí stroje	10
2 Otočné stoly	11
2.1 Výhody	11
2.2 Nevýhody	13
2.3 Konstrukce otočných stolů	13
2.4 Využití otočných stolů	15
2.4.1 Pasivní využití otočného stolu	15
2.4.2 Aktivní využití otočného stolu	17
2.5 Ověřování přesnosti otočných stolů	22
2.5.1 Princip přejímací a periodické zkoušky	22
3 Příprava otočného stolu	25
3.1 Instalace otočného stolu	25
3.2 Určení polohy otočného stolu	26
3.3 Zaměření osy otočného stolu	26
3.3.1 Jak často je nutné zaměřovat osu otočného stolu	27
3.3.2 Metody pro zaměření osy otočného stolu	28
4 Modelové úlohy představující reálné případy v praxi	34
4.1 Postup měření	40
4.2 Popis měření	42
4.2.1 Měření na kruhoměru	42
4.2.2 Měření na souřadnicovém měřicím stroji Zeiss UPMC 850 CARAT	43
4.2.3 Měření na souřadnicovém měřicím stroji Zeiss PRISMO	47

4.2.4	Porovnání jednotlivých metod	67
4.3	Vliv okolní teploty na zaměření osy OS	69
4.3.1	Metoda měření polohy středů kružnic	69
4.3.2	Metoda měření sousostí	72
5	Závěr	81
	Seznam použité literatury	83
	Seznam obrázků	85
	Seznam tabulek	88
	Seznam rovnic	89

Seznam zkratek

CMM - Souřadnicový měřicí stroj (Coordinate measuring machine)

OS - Otočný stůl

HMS - Hmotností moment setrvačnosti

Z.s.s - Základní souřadný systém

LSCI - Metoda nejmenších čtverců

Úvod

Souřadnicové měřicí stroje jsou dnes jedním z nejvyužívanějších prostředků ke kontrole kvality výrobků a jsou již prakticky nedílnou součástí každé automatizované linky. Dokáží měřit kontrolované rozměry s vysokou přesností. Každý výrobce udává jinou přesnost svých strojů a většinou je udávána pomocí vzorců. Základním údajem v tomto vzorci je měřená délka. Obecně se však udává, že souřadnicové měřicí stroje měří s přesností na mikrometry a vyšší. Pomocí souřadnicových měřicích strojů je možné měřit komplexní geometrii i těch nejsložitějších součástí. Často je k tomu nezbytné využít čtvrtou přídatnou osu, která může být přidána dvěma způsoby. Připojením rotačního stolu nebo otočnou snímací hlavou.

Čtvrtá osa má uplatnění v mnoha případech. Mnohokrát je zapotřebí měřit prvky, ke kterým není s běžnou konfigurací snímačů dostatečná přístupnost nebo takové prvky, které vyžadují k jejich změření velmi složitou konfiguraci snímačů. Příkladem může být šikmé ozubení s malým modulem, otvory pod úhlem nebo vačkové hřídele. Právě čtvrtá osa umožní buď simultánní otáčení v průběhu měření (aktivní využití) nebo natočení součásti o požadovaný úhel a slouží tak jako polohovadlo (pasivní využití). Otočný stůl umožňuje oba způsoby využití, kdežto otočné snímací hlavy slouží pouze jako polohovací zařízení pro snímače a během měření s nimi již není možné otáčet. Obě verze přídatných os zkracují čas měření, zjednodušují konfiguraci snímačů a zvyšují produktivitu měření.

Souřadnicové měřicí stroje měří s velikou přesností, která však může být ovlivněna mnoha faktory. Především se jedná o konstrukci souřadnicového měřicího stroje, teplotu okolí, teplotu měřené součásti, kalibraci a také obsluhu. Tato práce se týká souřadnicových měřicích strojů, speciálně pak těch, které využívají čtvrtou otočnou osu. Jelikož čtvrtá osa je také pohyblivá, může do měření také vnést chybu. Jak velký vliv na přesnost měření bude čtvrtá osa mít, v případě této diplomové práce otočný stůl, je předmětem praktické části práce.

V modelových úlohách představující reálné případy v praxi bude nejdříve na kruhoměru zkontrolována a následně změřena přesně broušená součást. Poté proběhne šest různých měření simulující situace, které mohou nastat v reálném procesu. Všechna měření se z důvodu věrohodnosti a statistického vyhodnocení zopakují desetkrát.

1 Souřadnicové měřicí stroje

Souřadnicové měřicí stroje (CMM) jsou stroje, které dokáží velmi přesně měřit ve 3 osách. Jsou využívány v laboratořích nebo jsou umísťovány přímo do výroby a dosahují přesnosti až $0,1 \mu\text{m}$. Největší vliv na výslednou přesnost měření má jejich konstrukce. CMM jsou řešeny tak, aby byly vyrobeny z teplotně stálých materiálů a konstrukce tak byla co nejtěžší a zároveň pracovní prostor co největší. [1]

Na jedno upnutí součásti je možné měřit ve třech kolmých osách, tedy na pěti stranách součásti. V některých případech se využívá čtvrté přídatné osy, která slouží k zefektivnění měření a zvýšení jeho flexibility.

Přídavná osa může být ve formě otočné snímací hlavy nebo ve formě otočného stolu. Otočná snímací hlava slouží pouze jako přesné polohovadlo pro snímač. OS se umísťuje do pracovního prostoru CMM a upíná se na něj přímo měřená součást. Může tak umožňovat simultánní otáčení součásti v průběhu měření (aktivní využití OS) nebo přesné napolohování součásti o požadovaný úhel (pasivní využití OS). Na obr. 1 je možné vidět CMM s integrovaným OS do základní desky. [2]



Obrázek 1 - CMM Zeiss PRISMO s integrovaným otočným stolem [3]

2 Otočné stoly

Otočné stoly jsou ideálním doplňkem CMM. Slouží jako čtvrtá přídavná rotační osa a výrazně zvyšují flexibilitu měření. Někteří výrobci udávají přesnost otočných stolů až $\pm 0,5''$, což odpovídá přibližně $0,00014^\circ$. [4]. Tento konkrétní výrobce přirovnává udávanou přesnost k trefení golfové jamky na vzdálenost 22 km a vždy na první odpal. Avšak nikde není dáno, za jakých podmínek a při jaké opakovatelnosti této přesnosti lze dosáhnout. Otočné stoly se nejčastěji používají k měření symetrických a prizmatických součástí nebo součástí, které jsou tvořeny velkým množstvím opakujících se prvků měření. [4] [5]

2.1 Výhody

Nejčastěji uváděné výhody použití OS lze rozdělit do tří kategorií. Z hlediska snížení času kontroly, zvýšení efektivity měření a snížení nejistoty měření.

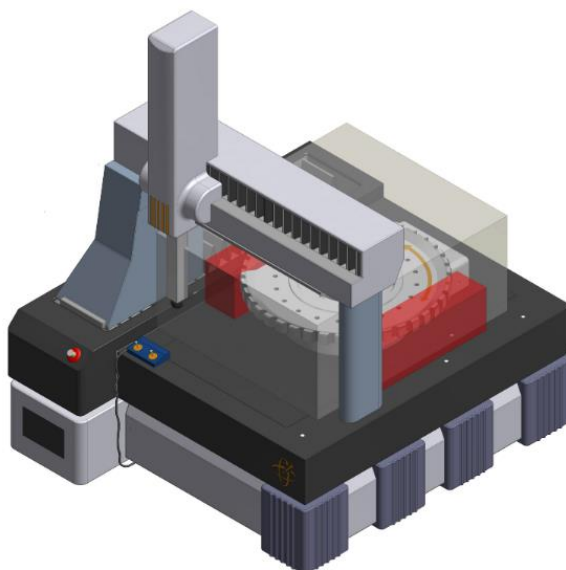
Snížení času kontroly:

Celkového snížení času kontroly lze dosáhnout několika způsoby. Jedná se např. o snížení času kalibrace nebo snížení času konfigurace snímačů, jelikož se měří pouze s jedním, popř. dvěma snímači. Další časovou úsporu lze zaznamenat v razantním zjednodušení postupu měření, jelikož není zapotřebí složitých a dlouhých přejezdů a nájezdů. S otočným stolem stačí jeden snímač, který snímá prvky z jedné strany a součást se vždy pootočí o požadovaný úhel. Zkrátí se také doba vlastního vytváření programu. Jeden z výrobců otočných stolů pro CMM uvádí, že použití otočného stolu při měření může zkrátit dobu kontroly až o 40 %. Takové zkrácení času může vést ke zkrácení měřicího času nebo změřením většího množství dílů během směny. [4] [5] [6] [7]

Zvýšení efektivity měření

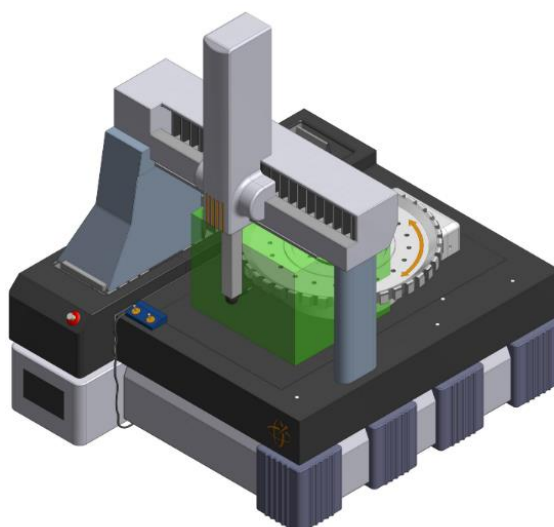
Za zvýšení efektivity měření lze považovat např.: výrazné zvětšení a zlepšení využitelnosti prostoru (rozsahu), ve kterém je schopný CMM měřit. Zároveň zvětšení měřicího prostoru poskytuje i větší flexibilitu z hlediska předmětu měření a vlivem částečné eliminace přejezdů dochází ke zmenšení potřebného měřicího rozsahu. Další výhodou je zlepšení viditelnosti a přehlednosti celého měřicího procesu, jelikož probíhá

pouze na jedné straně. Rozdíly mezi velikostmi jednotlivých rozsahů s použitím a bez použití OS lze vidět na obr. 2 a 3. [4] [5] [6]



Obrázek 2 - Měřicí rozsah CMM bez použití otočného stolu [7]

Na obr. 2 je viditelný vliv rozměrné součásti na měřicí rozsah CMM bez použití otočného stolu. Aby součást mohla být změřena ze všech stran, je obvykle zapotřebí složitá konfigurace snímačů na snímací hlavě. To znamená, že velká část z celkově využitelného a potřebného měřicího rozsahu (na obrázku znázorněného šedým kvádrem) nemůže být využita kvůli případným kolizím snímačů. Červeným kvádrem je znázorněn prostor, který není možné využít. [5] [6]



Obrázek 3 - Měřicí rozsah CMM s použitím otočného stolu [7]

Na obr. 3 je zeleným kvádrem znázorněn využitelný měřicí rozsah při použití rotačního stolu. Díky jednoduché konfiguraci a použití pouze jednoho snímače, je využitelný měřicí rozsah větší. Zároveň se rozsah potřebný pro měření zmenšil, a to především kvůli kratším a lineárnějším pohybům stroje. Zavedení OS je lepší alternativou v případě měření větších součástí vlivem většího měřicího rozsahu. [5] [6]

Snížení nejistoty měření

Výrobci otočných stolů udávají, že použitím OS se sníží i nejistota měření. Důvodem je, že při snížení potřebného měřicího rozsahu se zkracují i pohyby snímače. Obecně platí, že měření na kratší rozsahy vede k přesnějším výsledkům. [6]

2.2 Nevýhody

Jednou z nevýhod OS je jejich pořizovací cena, která se pohybuje přibližně od 50 000 €. Pořizovací cena samotného CMM se pohybuje okolo 250 - 300 000 €. Je potřeba tedy řádně zvážit, zda se koupě rotačního stolu vyplatí.

Další nevýhodou může být vliv OS na přesnost měření. Jelikož OS slouží jako čtvrtá přídavná osa, lze předpokládat, že bude do výsledků měření vnášet chybu, což je předmětem praktické části této práce. Samotní výrobci uvádí, že OS jsou velmi přesné, ale neuvádí, za jakých podmínek. Jedním z hlavních vlivů na přesnost rotačního stolu je správné zaměření jeho osy, což bude předmětem dalších pojednání této diplomové práce.

Důležitá je také konstrukce OS. Pokud rotační stůl nebude zabudovaný do základní desky, povede to ke snížení měřicího rozsahu ve svislé ose Z, což lze považovat za další nevýhodu takového OS.

2.3 Konstrukce otočných stolů

Z hlediska konstrukce lze OS rozdělit na pevná (zabudovaná) a pohyblivá.

U pevného typu konstrukce (viz obr. 4) je OS zabudován do základní desky CMM. Všechny potřebné kabely jsou vedeny vnitřní částí stolu a mechanismus je zabudovaný v granitové desce. Nad granitovou deskou se nachází pouze základová deska OS, na kterou je dále připevněno sklíčidlo nebo samotná měřená součást pomocí upínek.

Hlavní výhodou tohoto typu OS je, že neubírá měřicí rozsah v ose Z. Základovou desku OS, sloužící k upínání, lze demontovat, tudíž při běžném měření OS nezmenšuje měřicí rozsah CMM. Nevýhodou je složitější dostupnost k mechanismu během oprav.

Tato konstrukce OS je vhodná pro časté využívání OS nebo v případě měření vysokých součástí.



Obrázek 4 - Zabudovaná konstrukce otočného stolu [10]

Pohyblivý OS (viz obr. 5) je připevněn horizontálně (popř. vertikálně – pokud to OS umožňuje) k pracovní desce CMM a je elektricky propojen s řízením. Toto řešení je vhodné pro kontrolu velkých součástí nebo v případě, kdy není OS tak často využíván. Jednou z nevýhod je, že zmenšuje měřicí rozsah v ose Z. Dále je také nutné určování polohy OS při každém novém použití. Mezi jeho výhody patří vyšší nosnost, snadná dostupnost k mechanismu a lepší cenová dostupnost. Zároveň je pohyblivý OS vhodný, pokud nechceme pořizovat nový CMM, ale chceme přidat čtvrtou osu a měřit s velkou přesností. [8]



Obrázek 5 - Pohyblivá konstrukce otočného stolu [9]

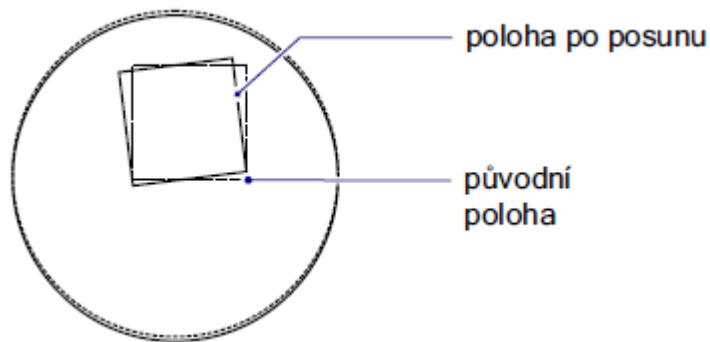
2.4 Využití otočných stolů

2.4.1 Pasivní využití otočného stolu

Otočné stoly se využívají v mnoha případech. Například pokud se jedná o měření součástí s opakujícími se prvky na každé straně, kde stačí měřicí proces opakovat ve smyčce a OS vždy pootočit pouze o požadovaný úhel. Takové využití OS se nazývá pasivní a slouží pouze jako přesné polohovadlo.

Během pasivního využití OS je nutné, aby byla správně zaměřena osa OS a byla zapnuta korekce driftu (posunu) OS.

Vlivem driftu OS může dojít k chybnému měření, a to tím, že se základní souřadný systém neotáčí spolu se souřadným systémem OS (viz obr. 6). Dá se tomu zabránit nastavením OS do pasivního režimu v použitém programu měření, čímž docílíme spolu otáčení obou s.s. Program pak pro vyhodnocení nebude používat jmenovitou polohu otočného stolu, nýbrž přesně změřený, aktuální úhel otočení OS. [7]

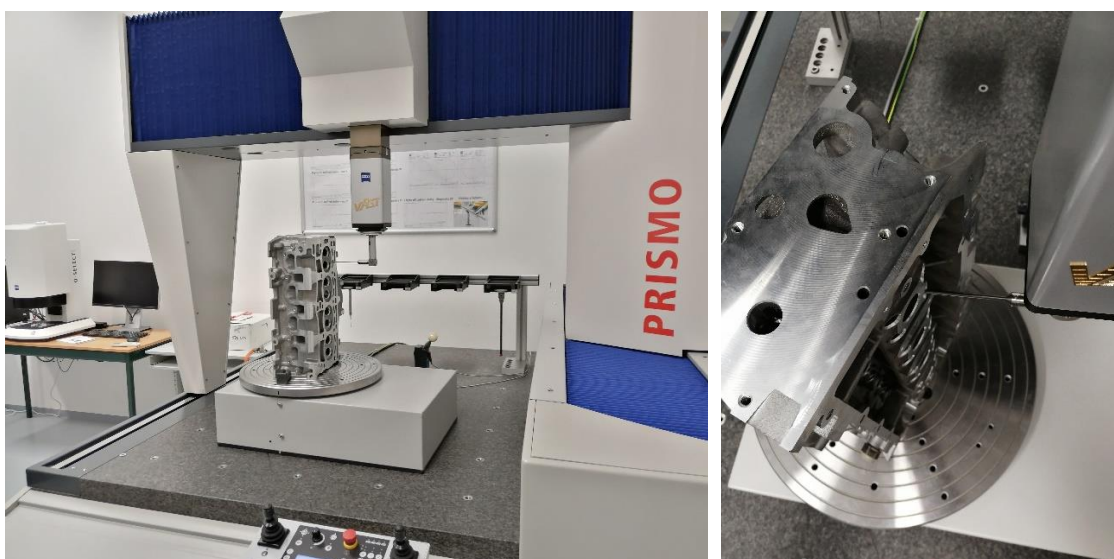


Obrázek 6 - Ukázka chyby měření vlivem driftu OS [7]

Typické využití pasivního režimu otočného stolu

OS se využívají i pro měření nerotačních a nesymetrických součástí. Typickým využitím pasivního režimu OS může být měření hlavy motoru, kde je zpravidla zapotřebí změřit spoustu prvků v různých polohách a různými strategiemi. V případě, že se na měření nepoužije otočný stůl, je zapotřebí velmi složitá konfigurace snímačů. Navíc právě kvůli této konfiguraci nemusí být dostupná všechna potřebná místa a součást by se musela upnout znovu v jiné poloze. Další potíží při měření mohou být otvory pro ventily, jelikož jsou vyrobeny pod úhlem a jejich měření může být tedy obtížné. Měřicí proces bude také obsahovat dlouhé přejezdy, k součásti nebude přístup ze všech stran a nebude ani dobrá viditelnost celého procesu.

Všechny tyto problémy řeší OS, na který lze ve svislé poloze upnout hlavu motoru (viz obr. 7) a nasadit jeden, případně dva snímače na snímací hlavu, čímž odpadne složitá konfigurace snímačů a k součásti tak bude přístup z pěti stran. Bude tak možné změřit jedním snímačem i prvky pod úhlem, jelikož je možné OS pouze pootočit o požadovaný úhel a změřit tak prvek v kolmém směru na snímač. Otáčením OS dojde k odstranění dlouhých přejezdů CMM a měřicí proces bude probíhat pouze na jedné straně, čímž bude docíleno jeho dobré viditelnosti.



Obrázek 7 - Měření hlavy motoru s využitím pasivního režimu otočného stolu

2.4.2 Aktivní využití otočného stolu

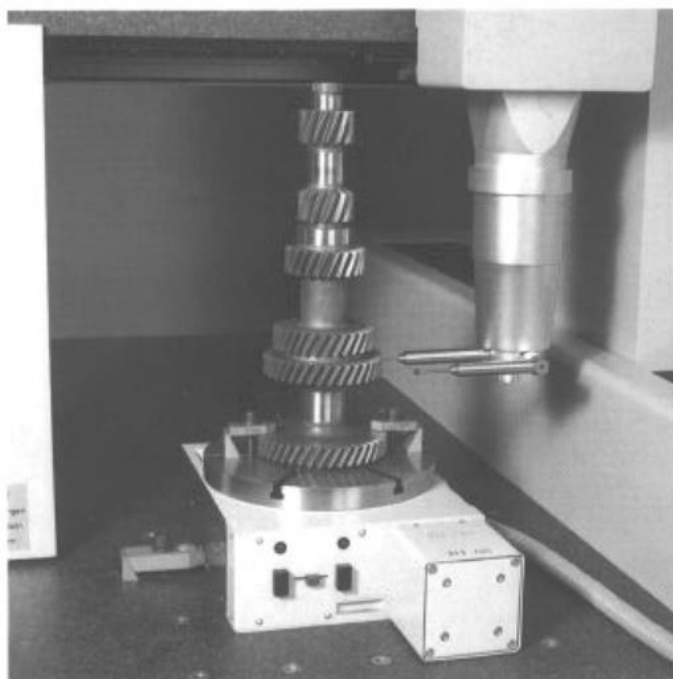
Otočný stůl se využívá především při měření rotačních symetrických i nesymetrických součástí s jednoduchým nebo složitým tvarem. V případě, že se OS v průběhu měření plynule nebo průběžně s měřicím procesem otáčí, jedná se o aktivní využití OS. Typickým aktivním využitím je např.: měření šnekového kola (viz obr. 8).



Obrázek 8 - aktivní využití otočného stolu při měření šnekového kola [8]

Typické využití aktivního režimu otočného stolu

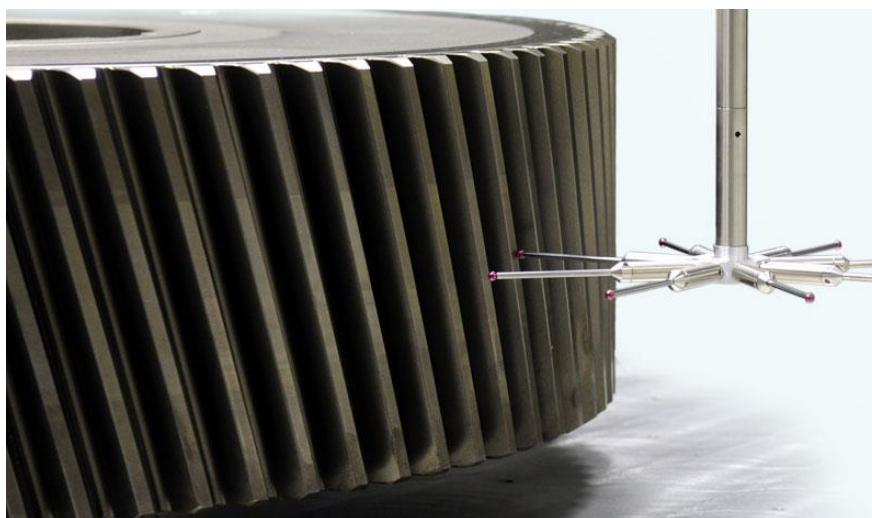
Nejběžnějším využitím OS je měření hřídelů s osazením. Pokud je zapotřebí měřit takovou hřídel, dochází k problému měření všech průměrů jedním snímačem shora. V takovém případě je nutné mít snímače dva. CMM změří průměr nejdříve jedním snímačem z jedné strany v úhlovém rozsahu 180° a poté se přemístí na druhou stranu a doměří zbylých 180° snímačem druhým. Při takovém měření mohou vznikat nepřesnosti a chyby v měření, popřípadě přesazení snímačů vůči sobě. Těmto nepřesnostem se dá zabránit použitím OS s jedním snímačem ve vodorovné poloze, který se umístí k měřenému průměru. Poté už stačí pouze rotovat součást pomocí OS a měřit požadované parametry.



Obrázek 9 - Měření hřídele s ozubenými koly pomocí otočného stolu [10]

Dalším typickým příkladem využití OS může být měření ozubení. Pokud je ozubení přímé a má velký modul, je možné ho změřit jedním snímačem shora. Avšak problematické je měření ozubení s malým modulem, šikmé ozubení nebo široké ozubené kolo, které nelze změřit jedním snímačem shora. Často pro měření takovýchto součástí standartním způsobem je zapotřebí složité konfigurace snímačů (viz obr. 10) a složitý

měřicí proces. Často bývá měření až nemožné. Rotací OS odpadá složitá konfigurace snímačů pro měření šikmého ozubení a zároveň se zjednodušuje měřicí proces.



Obrázek 10 - Složitá konfigurace snímačů při měření šikmého ozubení bez otočného stolu [11]

Dále lze OS aktivně využít při měření geometrie vaček (viz obr. 11). V případě, že vačka není umístěná na hřídeli, je možné její geometrii změřit i bez využití otočného stolu opět jedním snímačem shora. V případě, že jsou vačky již umístěné na hřídeli, je zapotřebí složitější konfigurace snímačů a zároveň jsou nutné dlouhé přejezdy. Využití více snímačů může do měření opět vnášet chyby.

Při využití OS opět dojde ke zjednodušení konfigurace pouze na jeden snímač, čímž dojde k zjednodušení měřicího procesu, zkrácení jeho doby a zároveň k odstranění dlouhých přejezdů.



Obrázek 11 – Měření vačkové hřídele s využitím otočného stolu [12]

Dalším aktivním využitím OS je měření klikových hřídelí (viz obr. 12), kde se měří především geometrie a průměry čepů, na které se nasazují kliky. Čepy jsou excentrické a při běžném měření mohou být špatně přístupné z důvodu složité konfigurace a pokud nejsou změřeny po celém obvodu, těžko tak vyhodnotit jejich geometrii.

Použitím OS dochází k jeho simultánnímu pohybu a zároveň měření pouze jedním snímačem. Použitím OS lze docílit lepší dostupnosti měřené součásti a tím i přesnějších výsledků měření. Velkou výhodou je také úspora času.



Obrázek 12 - Měření klikové hřídele s využitím otočného stolu [10]

Dále lze OS využít pro měření lopatek ventilátorů, oběžných kol (viz obr. 13), kotoučů plynových turbín a mnoha dalších součástí. I v těchto případech dochází k úspoře času měření, k odstranění složité konfigurace snímačů, složitých měřících procesů a zbytečných přejezdů a k usnadnění přístupu k měřené součásti ze všech stran. [13]



Obrázek 13 - Měření oběžného kola s využitím otočného stolu [13]

Pro některé z těchto případů je možné jako alternativu použít otočné snímací hlavy (viz obr. 14). Otočné snímací hlavy umožňují rotační pohyb ve dvou osách a slouží jako polohovadlo pro snímače. Nabízí značnou finanční úsporu, jelikož jejich pořizovací cena je několikanásobně nižší než pořizovací cena OS. Otočná hlava však v mnoha případech neumožňuje dosáhnout tak přesných výsledků jako je dosaženo s OS, a to především při aplikacích, ke kterým je OS přímo určen. Pokud se tedy jedná o příliš přesné měření, není otočná snímací hlava vhodnou volbou. Druhou alternativou může být otočná snímací hlava XTR od firmy Zeiss (viz obr. 15). Má podobné provedení a vlastnosti jako pevná snímací hlava, avšak odlišujícím znakem je integrovaná rotační osa (otočný kloub), která umožňuje otáčení snímače v krocích po 15° okolo osy Z pomocí upínacího talířku. Upínací talířek musí být tedy vždy částečně uvolněn z pinoly, natočen o požadovaný úhel a znovu upnut. Hlava XTR může do jisté míry nahradit OS, avšak není určena pro kontinuální měření. Její značnou nevýhodou je pořizovací cena. [14]



Obrázek 14 - Otočná snímací hlava [15]



Obrázek 15 - Otočná hlava Zeiss Vast XTR Gold [14]

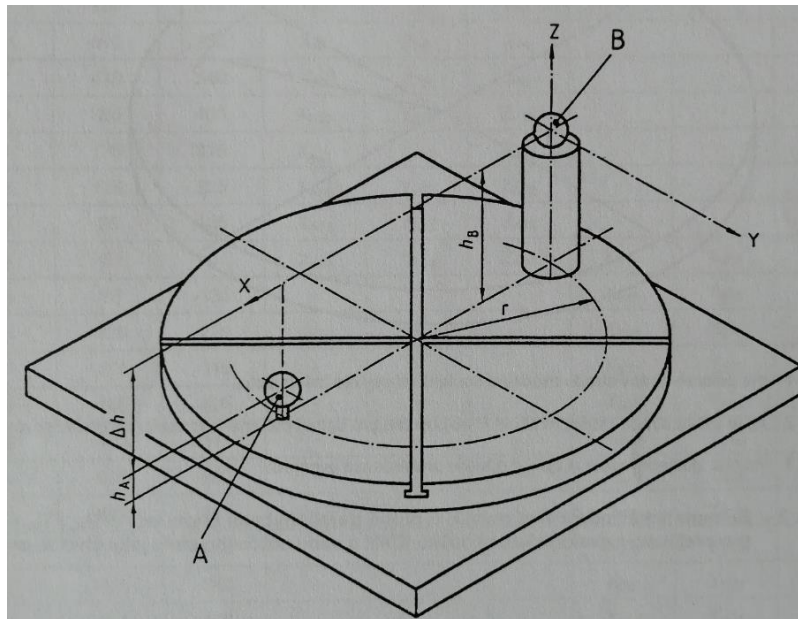
2.5 Ověřování přesnosti otočných stolů

Stejně jako podléhají CMM přijímacím a periodickým zkouškám dle normy ČSN EN ISO 10 360 pro ověření jejich přesnosti, podléhá této normě i OS. Konkrétně třetí částí této normy, tedy ČSN EN ISO 10 360-3: Souřadnicové měřicí stroje s osou otočného stolu jako čtvrtou osou.

Tato část normy stanovuje přijímací zkoušku, podle které se ověřuje, zda technický stav CMM se čtvrtou osou odpovídá specifikaci udávané výrobcem. Rovněž specifikuje periodickou zkoušku, podle které může uživatel přezkušovat technický stav CMM s otočným stolem jakožto čtvrtou osou. [16]

2.5.1 Princip přijímací a periodické zkoušky

Principem zkoušky je upevnění dvou zkušebních koulí na základní desku OS (viz obr. 16).



Obrázek 16 - Polohy zkušebních koulí na otočném stole pro přijímací a periodickou zkoušku [16]

Kouli „A“ je nutné umístit co nejbližší povrchu základní desky OS a do vzdálenosti „r“ stanovené touto normou. Kouli „B“ je nutné umístit diametrálně proti kouli „A“ do stejné vzdálenosti „r“ a do rozdílné výšky „h“ udávané také touto normou. Následně proběhne

stanovení kartézské souřadnicové soustavy tak, aby splňovala následující podmínky:

- Střed zkušební koule B určuje počátek
- Primární osa stanovující axiální směr musí být rovnoběžná s osou OS
- Sekundární osa stanovující radiální směr musí ležet v rovině tvořené osou stanovující axiální směr a středem zkušební koule „A“ [16]

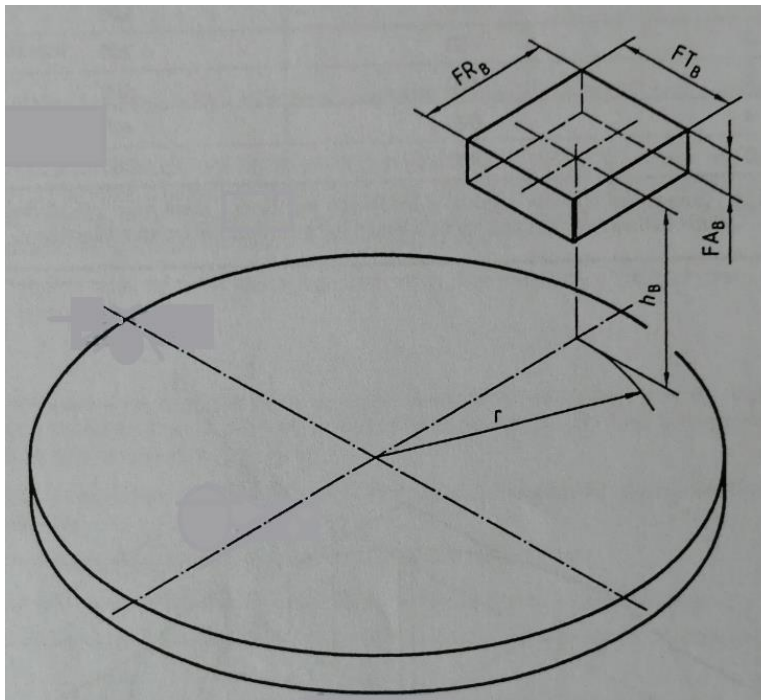
Terciální osa stanoví tangenciální směr a po stanovení s.s. proběhne měření počáteční polohy koule „B“. Následuje měření středů zkušební koule „A“ v sedmi různých polohách OS, avšak s minimálním dosaženým úhlem otočení OS 720° . Poté proběhne měření středů koule „A“ ve stejných sedmi polohách, nicméně při opačném smyslu otáčení OS až do jeho výchozí polohy. Následně se stejné měření opakuje pro kouli „B“. V každé poloze se vždy vyhodnocuje poloha středu dané koule ve třech směrech – radiálním, axiálním a tangenciálním. V následující tabulce jsou uvedené příklady hodnot z měření [16]

Číslo pozice	Úhlová poloha	Souřadnice měřené na					
		zkušební kouli A			zkušební kouli B		
		X_A	Y_A	Z_A	X_B	Y_B	Z_B
0	0	401.6647	0.0000	-398.276	0,0000	0,0000	0,0000
1	103	401.6632	0.0011	-398.2285	-	-	-
2	206	401.6631	-0.0016	-398.2270	-	-	-
3	309	401.6625	-0.0014	-398.22 92	-	-	-
4	412	401.6652	0.0012	-398.2285	-	-	-
5	515	401.6648	0.0009	-398.2290	-	-	-
6	618	401.6660	-0.0011	-398.2270	-	-	-
7	721	401.6646	-0.0018	-398.2263	-	-	-
8	618	401.6658	-0.0015	-398.2273	-	-	-
9	515	401.6635	0.0006	-398.2265	-	-	-
10	412	401.6623	0.0003	-398.2260	-	-	-
11	309	401.6649	-0.0011	-398.2264	-	-	-
12	206	401.6640	0.0009	-398.2278	-	-	-
13	103	401.6638	0.0004	-398.2285	-	-	-
14	0	401.6655	-0.0013	-398.2277	0.0012	-0.0011	0.0015
15	-103	-	-	-	-0.0005	0.0005	0.0007
16	-206	-	-	-	-0.0011	0.0009	-0.0003
17	-309	-	-	-	0.0014	0.0014	-0.0010
18	-412	-	-	-	0.0020	0.0000	0.0002
19	-515	-	-	-	0.0001	-0.0019	0.0012
20	-618	-	-	-	-0.0010	-0.0010	0.0012
21	-721	-	-	-	0.0017	0.0016	0.0009
22	-618	-	-	-	-0.0003	0.0003	0.0013
23	-515	-	-	-	-0.0009	-0.0003	-0.0008
24	-412	-	-	-	-0.0017	-0.0018	-0.0003
25	-309	-	-	-	0.0011	0.0004	0.0006
26	-206	-	-	-	0.0018	0.0015	0.0004
27	-103	-	-	-	0.0005	0.0004	0.0014
28	0	401.6628	0.0020	-398.2290	-0.0018	-0.0009	-0.0007
Chyba čtvrté osy		FR_A	FT_A	FA_A	FR_B	FT_B	FA_B
		3.7 μ m	3.8 μ m	3.2 μ m	3.8	3.5	2.5

Obrázek 17- Tabulka vyhodnocení přejímací a periodické zkoušky [16]

Kdy X_A a X_B jsou radiální složky středů zkušebních koulí „A“ a „B“, Y_A a Y_B jsou tangenciální složky středů zkušebních koulí „A“ a „B“ a Z_A a Z_B tangenciální složky středů zkušebních koulí „A“ a „B“, z kterých jsou následně vypočítány výsledné hodnoty chyb indikace v jednotlivých směrech FR_A , FT_A , FA_A pro kouli „A“ a FR_B , FT_B , FA_B pro kouli „B“. Tyto hodnoty se vypočítají jako variace rozpětí naměřených hodnot pro každý směr (viz obr. 17 – ohraničené zelenou barvou).

Cílem zkoušky je ověřit, zda naměřené chyby indikace OS v jednotlivých směrech jsou menší než maximální přípustné chyby indikace (MPE) stanovené výrobcem v případě přijímací zkoušky nebo uživatelem v případě periodické zkoušky. Na obr. 18 je vyobrazené schématické znázornění oblasti tvořené třemi chybami čtvrté osy. Pro přehlednost je vyobrazená pouze oblast pro kouli „B“. [16]



FR_B – chyba indikace v radiálním směru pro kouli B

FA_B - chyba indikace v axiálním směru pro kouli B

FT_B - chyba indikace v tangenciálním směru pro kouli B

H_B – výška středu koule B od povrchu pro upnutí

r – poloměr dráhy středu koule B od osy OS

Obrázek 18 - Chyby indikace otočného stolu [16]

3 Příprava otočného stolu

Na přesnost otočného stolu při měření má velký vliv jeho příprava pro měření. Pro účely této diplomové práce byl použit CMM značky Zeiss, otočný stůl RT – 01 také od firmy Zeiss a k tomu příslušný program CALYPSO.

Příprava otočného stolu RT – 01 se skládá z několika kroků. Z instalace otočného stolu do programu měření, napolohování otočného stolu a zaměření jeho osy. Jednotlivé kroky jsou popsány níže.

3.1 Instalace otočného stolu

Aby bylo možné správné měření a vyhodnocení na otočném stole, musí být nejprve OS v měřicím programu CALYPSO přihlášen. V případě mobilního OS musí být navíc elektricky spojený s řízením. Přesné mechanické vyrovnaní není nutné, jelikož poloha OS se spolu s jeho orientací zaměřují. [7]

Podrobnější postup přihlášení OS do CALYPSA je následující:

Přes nastavení doplňků se vybere požadovaný typ otočného stolu. V případě použití mobilního otočného stolu je nutné použití možnosti připojení otočného stolu k řízení. Dále je nutné aktivovat funkci otočného stolu, čímž se otočný stůl otočí do výchozí polohy a aktivuje se referenční bod. Pokud není v plánu měření automaticky uložen hmotnostní moment setrvačnosti, je nutné nastavit, jak má program v takovém případě postupovat. Existují dvě řešení. Buď je HMS určen automaticky při startu CNC průběhu, nebo je CNC průběh zrušen s příslušným varovným upozorněním. K tomu dochází v případě, že není aktivováno automatické zjištění HMS a ani natočení do referenčního bodu. Po potvrzení je OS nainstalovaný v programu. Při otevření nového plánu měření se na pracovní ploše v CALYPSU objeví dvě nové ikony, přes které je možné OS dále ovládat a nastavovat. [7]

3.2 Určení polohy otočného stolu

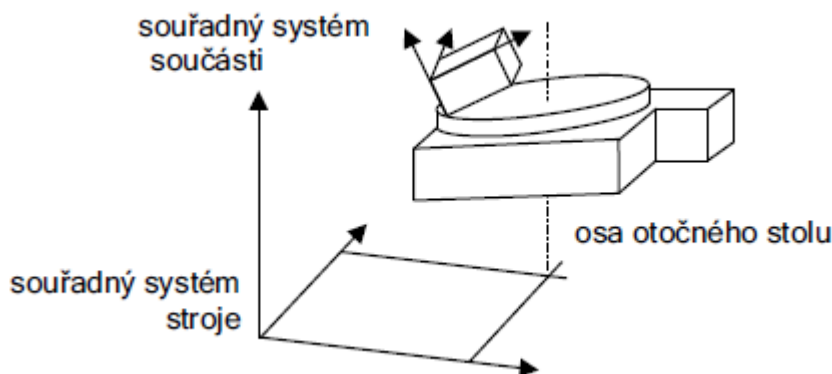
U zabudovaného OS je vždy před prvním použitím nutné určení polohy. U mobilního je to nutné vždy, když se změní jeho poloha. CALYPSU není nutné dávat přesné informace o poloze OS, ale stačí pouze hrubá poloha v měřicím rozsahu CMM.

Podrobnější postup určení polohy otočného stolu je následující:

Důležité je znát velikost desky otočného stolu jako kružnice. Pomocí tohoto změřeného elementu lze následně nastavit hrubou polohu otočného stolu v měřicím rozsahu stroje, což je potřebné pro pozdější automatické zaměření osy otočného stolu. Hrubou polohu nastavíme v menu pomocí funkce otočného stolu. Pro mobilní otočný stůl je nutné nastavit hlavní směr tak, aby nastavení OS vyvolalo otáčení v kladném směru, tzn. proti směru hodinových ručiček. V případě určování polohy OS typu RT – CAA je nutné snímat CAA – bod dle vyzvání, samostředícím způsobem. Jedná se o prohlubeň na vnějším okraji základové desky OS. U mobilních OS musí být poloha stolu nově zaměřena po každém přesunutí otočného stolu, jinak dochází k chybným výsledkům v programu. [7]

3.3 Zaměření osy otočného stolu

Vzhledem k tomu, že v tuto chvíli je zadefinována pouze hrubá poloha OS, je nyní zapotřebí určit jeho přesnou polohu vůči nulovému bodu CMM a jeho naklopení vzhledem k osám CMM, tzn. polohu v souřadném systému stroje. K definici přesné polohy slouží osa OS (viz obr. 19), kterou je nutné zaměřit. Jak již bylo řečeno, zaměření osy a chyby při zaměřování mají velký vliv na přesnost celého měření. [7]



Obrázek 19 - Osa otočného stolu [7]

Aby byla osa OS zaměřena co nejpřesněji, je nutné dodržet určitá pravidla. Prvním pravidlem je použití co nejtuzšího snímače. Nejvhodnější je snímač referenční. Dále je nutné dbát na nejvyšší možnou čistotu snímače, kalibračního etalonu a součásti a také na to, aby se osa zaměřovala pouze s jednou konfigurací snímačů a zabránilo se tak nepřesnostem vznikajícím v důsledku chyb kalibrace nebo výměny snímačů. Toho je možné docílit jen tehdy, pokud je možné změřit měřenou součást pouze s jednou konfigurací snímačů. [7]

3.3.1 Jak často je nutné zaměřovat osu otočného stolu

Jak již bylo řečeno, osa OS definuje jeho přesnou polohu vůči nulovému bodu CMM. Avšak tento nulový bod je vždy při natočení OS do ref. bodu nově určen a není pokaždé stejný. Na zaměření osy má velký vliv také okolní teplota. A pokud je nutná nová kalibrace snímačů, je nezbytné i nové zaměření osy OS. Osu je tedy nutné zaměřit vždy po každém najetí do referenčního bodu CMM, pravidelně dle požadavků na přesnost, při velkém kolísání okolní teploty a při nové kalibraci snímačů. [7]

Pro zaměření osy OS je možné využít přímo měřenou součást. Avšak podmínkou je, že součást toto zaměření musí umožnit. Tzn., že na součásti musí být prvky, které mají minimální chybu tvaru, např.: přesně broušený průměr. Poté se podle měřeného prvku zaměří osa OS vybranou metodou, a to pro každý díl před samotným měřením. Poté je jisté, že je osa OS zaměřena správně a její polohu neovlivňují žádné vnější vlivy. V důsledku tvarových nepřesností součásti bude docházet k chybným měřením v každé poloze, což povede k chybnému zaměření osy.

Osu OS lze také určit jejím načtením, což funguje tak, že stačí zaměřit osu OS pouze jednou pomocí níže popsaných metod. Program si polohu osy uloží a následně ji lze před každým měřením načíst a použít pro aktuální měření. Dochází tak ke značné časové úspoře. Je také podmíněno stabilní teplotou v laboratoři, aby poloha osy byla stále stejná, což bude také předmětem řešení experimentální části práce. Tento způsob určení osy lze také použít při měření, kde není vyžadována vysoká přesnost.

3.3.2 Metody pro zaměření osy otočného stolu

Pro zaměření osy otočného stolu se používají 4 metody:

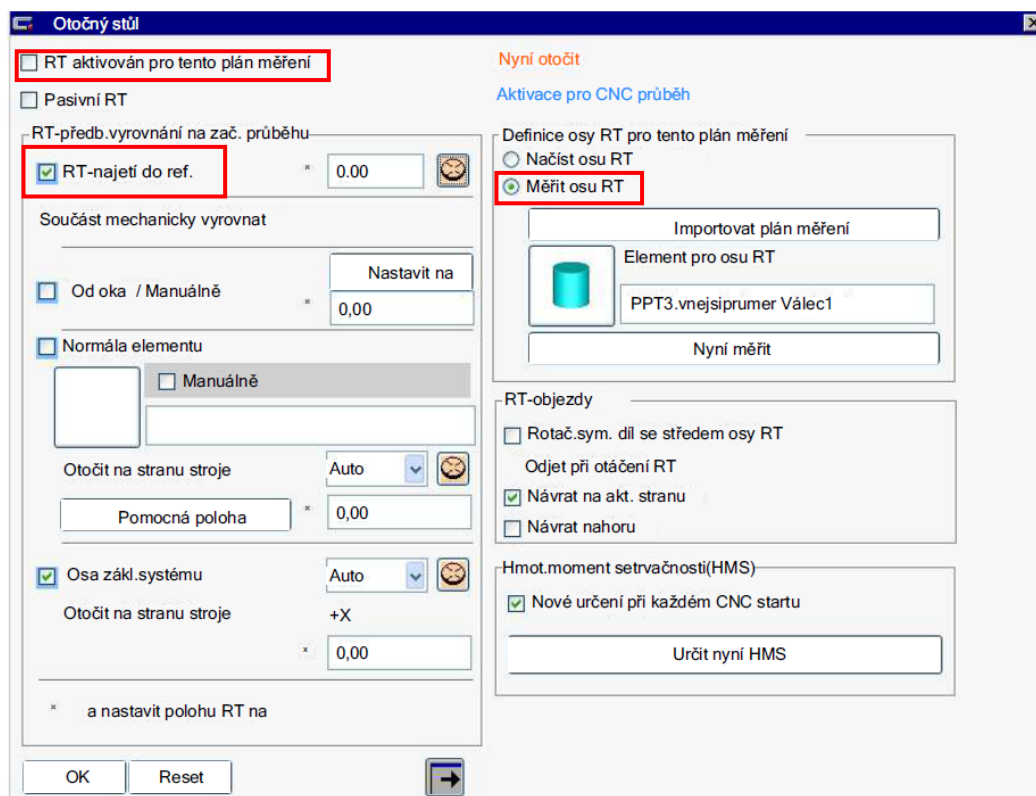
3.3.2.1 Metoda s 1 koulí

Aby bylo možné zaměřit osu OS touto metodou, je zapotřebí tvarově přesná koule, např.: kalibrační. Koule je zaměřována obvykle v šesti polohách.

Tato metoda zaměření je standartní pro měření, kde není vyžadována příliš vysoká přesnost. Nejvyšší přesnosti lze docílit tehdy, je-li měřená součást ve stejné úrovni, ve které se předtím nacházela koule pro zaměření osy. Metoda je vhodná pro ploché součásti s velkým průměrem, jako jsou např.: talířová kola. [7]

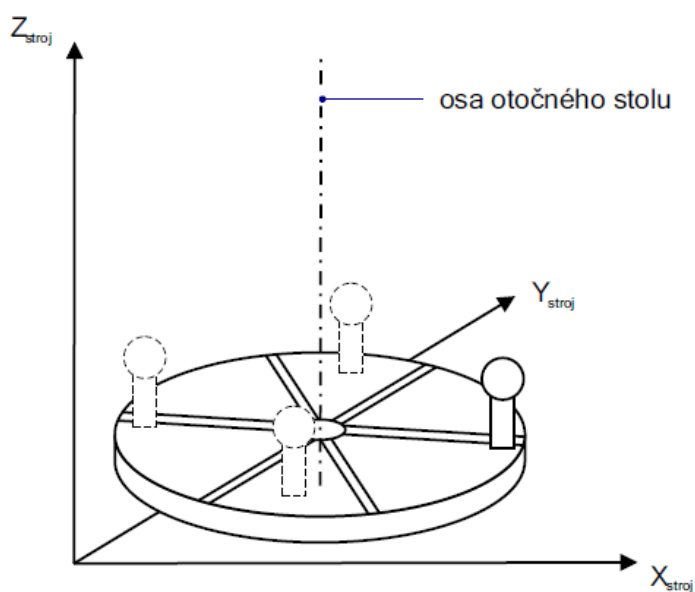
Detailnější postup pro zaměření osy metodou s jednou koulí, v programu CALYPSO, je následující:

Nejprve je potřeba připevnit kalibrační kouli co nejvíce k okraji otočného stolu a nasadit referenční snímač. Po otevření okna „otočný stůl“ v novém plánu měření je nutné zaškrtnout políčka pro aktivaci a potvrdit (viz obr. 20).



Obrázek 20 - Podokno pro zaměření osy OS metodou s jednou koulí [7]

Poté je třeba změřit kalibrační kouli v šesti bodech OS a vytvořit tak základní souřadný systém. Ze změřených středů jednotlivých koulí lze vytvořit kružnici a rovinu, v jejímž středu se vytvoří kolmice jako element pro definování osy otočného stolu. Osa je tak zdefinována a následně je zapotřebí spustit CNC průběh měření koulí. Po dokončení CNC průběhu je osa OS úspěšně zaměřena a automaticky uložena do počítače, nikoliv do plánu měření. Takto zaměřenou osu je možné použít pro měření samotné součásti. Metoda zaměření osy s jednou koulí je vyobrazena na obr. 21. [7]



Obrázek 21 – Zaměření osy OS metodou s jednou koulí [7]

Výhody:

- Není zapotřebí dalších etalonů pro zaměření
- Pro zaměření lze použít referenční snímač

Nevýhody:

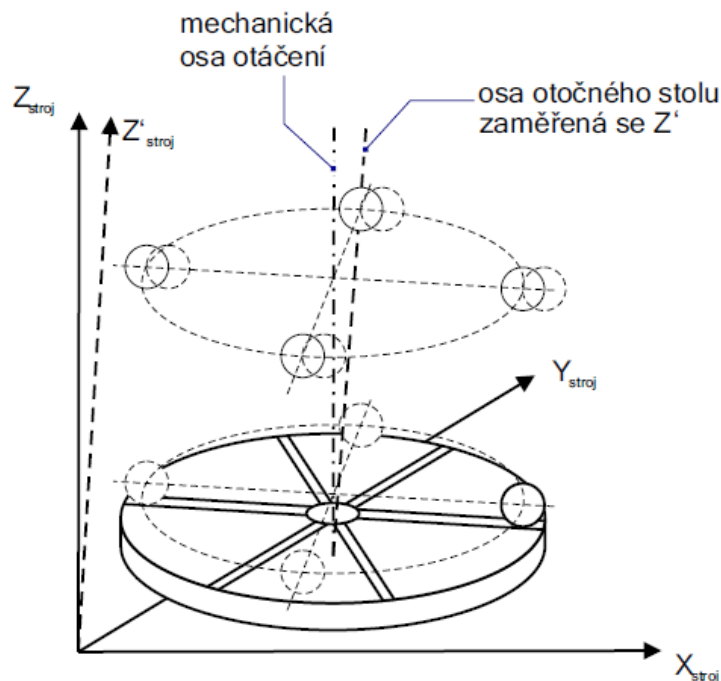
- Všechna zaměření probíhají pouze v jedné výšce
- Při měření ve větších výškách může docházet k větším chybám měření z důvodu zbytkové chyby pravoúhlosti
- V závislosti na poloze OS v měřicím rozsahu nemusí být pokryt kompletní rozsah otáčení

3.3.2.2 Metoda se dvěma koulemi

Metoda zaměření se dvěma koulemi vychází z metody s jednou koulí. Rozdíl je v tom, že je osa OS zaměřována pomocí dvou tvarově přesných (nejlépe kalibračních) koulí v různých výškách měření. Obě koule jsou měřeny obvykle v šesti polohách OS. Tato metoda zaměření osy se využívá především při měření vysokých součástí. [7]

Níže je popsán podrobný postup při zaměřování osy OS metodou se dvěma koulemi v programu CALYPSO.:

Nejprve je potřeba co nejvíce k okraji otočného stolu připevnit kalibrační koule. Koule je nutné umístit do různých výšek, které odpovídají výšce měřené součásti. Po otevření okna „otočný stůl“ v novém plánu měření je nutné zaškrtnout políčka pro aktivaci a potvrdit (viz obr. 20). Poté je třeba ručně změřit každou kouli v šesti bodech OS a vytvořit tím základní souřadný systém umístěný do horní koule. Otáčení v rovině definuje dolní koule. Ze změřených středů horních i dolních koulí jsou vytvořeny dvě kružnice, z nichž je vytvořen kužel. Osa tohoto kuželu slouží jako element pro definování osy OS. Osa je tak zadefinována a následně je třeba spustit CNC průběh měření koulí. Po dokončení CNC průběhu je osa OS úspěšně zaměřena a automaticky uložena do počítače, nikoliv do plánu měření. Takto zaměřenou osu je možné použít pro měření samotné součásti. Metoda zaměření osy s dvěma koulemi je vyobrazena na obr. 22. [7]



Obrázek 22 - Zaměření osy OS metodou se dvěma koulemi [7]

Výhody:

- Menší vliv zbytkové chyby pravouhlosti na měření z důvodu zaměření osy v celé výšce měřené součásti
- Pro zaměření lze použít referenční snímač

Nevýhody:

- Relativně dlouhá doba zaměření
- Nutnost speciálního přípravku na připevnění obou koulí nebo pracovního, ručního určení základního souřadného systému při každém průběhu
- V závislosti na poloze OS v měřicím rozsahu nemusí být pokryt kompletní rozsah otáčení

3.3.2.3 Metoda s válcem

Při zaměřování osy otočného stolu metodou s válcem je zapotřebí tvarově přesný válec. Válec se zaměřuje ve dvou různých polohách otočného stolu.

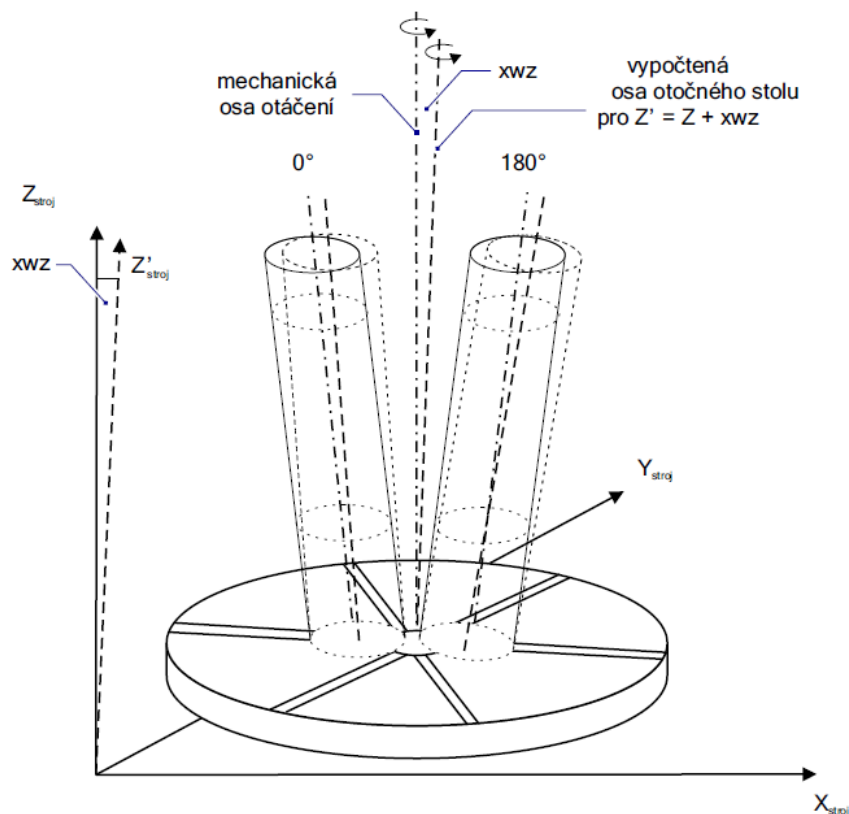
Tato metoda se využívá především při měření vysokých součástí nebo při měření hřídel s malou tvarovou chybou. Osa OS se tak může určit přímo na součásti před každým měřením a není nutné pokaždé použít válec. [7]

Níže je popsán podrobný postup při zaměřování osy OS metodou s válcem v programu CALYPSO.:

Při zaměřování osy touto metodou je důležité nejprve připevnit zkušební válec pomocí tříčelistového sklíčidla centricky na základní desku a poté nasadit kalibrovaný snímač, který bude schopn válec změřit v dolní a horní části. Po otevření okna „otočný stůl“ v novém plánu měření je nutné zaškrtnout políčka pro aktivaci a potvrdit (viz obr. 20).

Dále je potřeba válec změřit manuálně ve dvou řezech tak, aby byly řezy od sebe co nejvíce vzdáleny a snímat jeden bod z horní části válce. Tímto způsobem lze zadefinovat z.s.s. na čelo válce. Následně je vytvořena symetrie těchto dvou válců jako teoretický element definující osu OS. Osu je nutné zadefinovat po kliknutí na ikonu „Otočný stůl“ a stanovit, že se jedná o rotační symetrický díl se středem osy OS. Následně je spuštěn CNC průběh pro změření všech elementů. Po dokončení CNC průběhu je osa OS úspěšně

zaměřena a automaticky uložena do počítače, nikoliv do plánu měření. Takto zaměřenou osu je možné použít pro měření samotné součásti. Metoda zaměření osy s válcem je vyobrazena na obr. 23. [7]



Obrázek 23 - Metoda zaměření osy OS metodou s válcem [9]

Výhody:

- Krátká doba zaměření
- Jednoduchý přípravek pro upnutí válce
- Možnost opakovatelnosti připevnění válce na OS
- Menší vliv zbytkové chyby pravoúhlosti na měření z důvodu zaměření osy v celé výšce měřené součásti

Nevýhody:

- Potřeba zkušebního válce (měřicího trnu)
- Pro zaměření nelze použít referenční snímač

3.3.2.4 *Metoda samostředicí*

Tato metoda zaměřování osy je založena na principu snímání elementu (např.: otvor, kužel aj.) se samostředěním snímače obvykle v šesti polohách OS. Jedná se o nejvíce využívanou metodu přímo ve výrobě. Důvodem je možnost připevnění elementu pro zaměření osy, např.: přímo na paletu se součástmi. Tím dojde k rychlému zaměření osy OS vždy nově před každým měřením. [7]

Níže je popsán podrobný postup při zaměřování osy OS metodou samostředicí v programu CALYPSO.:

Postup je podobný metodě s jednou koulí. Měřeným elementem bývá nejčastěji kuželový otvor, který je zpravidla umístěn na největším průměru základní desky OS. Je potřeba upevnit zkalibrovaný referenční nebo jiný snímač. Po otevření okna „otočný stůl“ v novém plánu měření je nutné zaškrtnout políčka pro aktivaci a potvrdit (viz obr. 20).

V menu přípravy snímače je zvolena možnost samostředicího snímání elementu ve směru osy – Z v šesti různých polohách OS shora. Snímač je vystředěn do kuželového otvoru a za referenční bod je považován střed dotykové kuličky. Z nasnímaného bodu je následně vytvořen základní souřadný systém a ze změřených středů koulí dva elementy: kružnice a rovina. Na tyto dva elementy je dále vytvořena kolmice, která bude sloužit pro definování osy OS. Osa je tak zadefinována a následně je třeba spustit CNC průběh měření koulí. Po dokončení CNC průběhu je osa OS úspěšně zaměřena a automaticky uložena do počítače, nikoliv do plánu měření. Takto zaměřenou osu je možné použít pro měření samotné součásti. [7]

Výhody:

- Velice rychlá metoda zaměření
- Pro zaměření lze použít referenční snímač

Nevýhody:

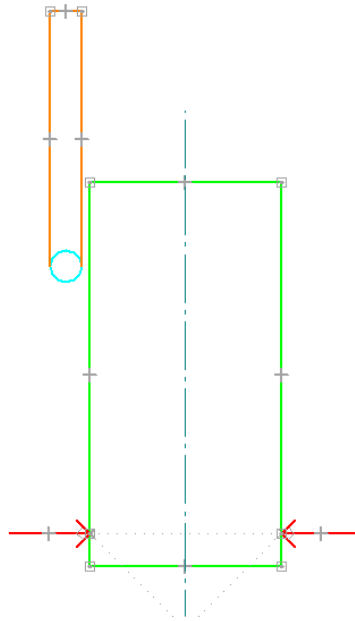
- V závislosti na poloze OS v měřicím rozsahu nemusí být pokryt kompletní rozsah otáčení
- Všechna zaměření probíhají pouze v jedné výšce měřicího stroje
- Při měření v jiných výškách může docházet k větším chybám měření z důvodu zbytkové chyby pravoúhlosti

4 Modelové úlohy představující reálné případy v praxi

Cílem této části práce je zhodnocení možností a využitelnosti otočného stolu. Aby tyto parametry mohly být zhodnoceny, je zapotřebí provést i úlohy, ke kterým OS není potřeba. Každá úloha bude měřena jinou metodou. Tyto úlohy a metody měření jsou popsány níže a mají simulovat možné alternativy měření (využití OS nebo zvolení složité konfigurace snímačů). Následně budou výsledky z jednotlivých úloh porovnány a bude vyhodnocen jejich vliv na přesnost měření. Dalším cílem této části práce je vyhodnocení vlivu změny okolní teploty na zaměření osy OS a následnou přesnost měření. Všechny měření budou prováděny v laboratořích ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie na fakultě strojní ČVUT v Praze. Předmětem pro měření bude přesně broušený válec (trn). Jako referenční hodnoty pro porovnávání budou považovány hodnoty kruhovitosti naměřené na kruhoměru a hodnoty průměrů, průměru válce a válcovitosti, které budou naměřeny na CMM Zeiss UPMC 850 CARAT. Jedná se o nejpřesnější CMM, kterým disponuje ústav technologie obrábění, projektování a metrologie. Porovnávány budou metody jedním snímačem shora, dvěma snímači proti sobě, jedním snímačem s pomocí OS, jedním snímačem s pomocí OS a excentricitou součásti 5 mm a jedním snímačem s pomocí OS a excentricitou součásti 75 mm.

1. Měření jedním snímačem shora

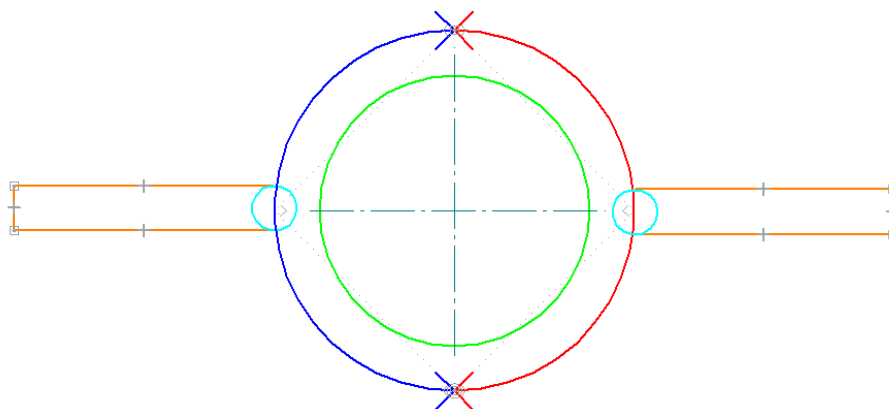
Tato metoda bude sloužit pro zjištění co nejpřesnějších hodnot, jelikož se tento způsob měření obecně považuje za nejpřesnější metodu. Strategii měření je jedna kruhová dráha v úhlovém rozsahu 380° , snímaná jedním snímačem shora (viz obr. 24).



Obrázek 24 - Metoda měření jedním snímačem z vrchu

2. Měření dvěma snímači proti sobě

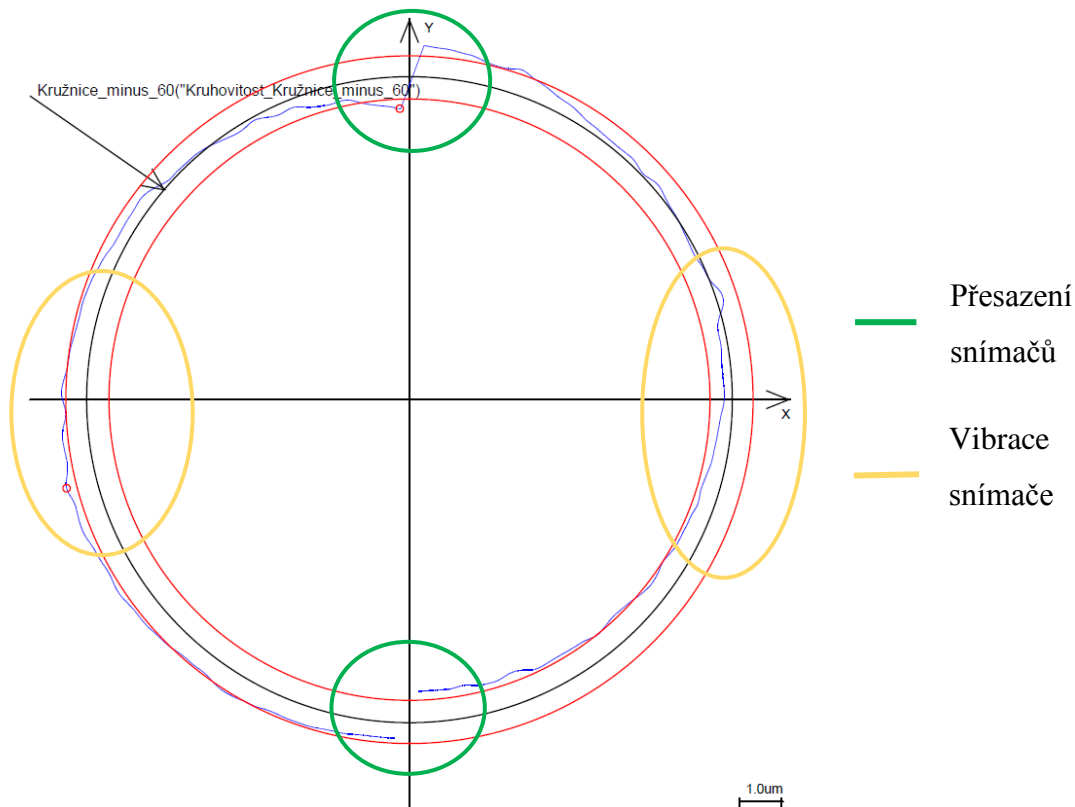
Tato metoda má simulovat problematiku měření průměrů a geometrií s ním spojených, pokud k nim není přístup jedním snímačem shora. Může se jednat například o měření hřídele s osazením nebo měření geometrie vaček na vačkové hřídeli a jiné. Aby bylo možné průměr (geometrii) změřit, je vhodné zvolit strategii se dvěma snímači proti sobě, kde jeden snímač snímá na požadovaném průměru kruhovou dráhu v úhlovém rozsahu 180° . Poté se přemístí snímací hlava na druhou stranu a druhým snímačem se ve stejné úrovni doměří zbylých 180° (viz obr. 25).



Obrázek 25 - metoda měření dvěma snímači (pohled shora)

Při této metodě měření může dojít k přesazení snímačů, což znamená, že jeden ze snímačů bude měřit s chybou v ose Y (viz obr. 26) a kruhová dráha na sebe nenavazuje. Tím vzniká velká odchylka i při vyhodnocování kruhovitosti. Tato chyba nejčastěji bývá způsobena chybou rotace pinoly. Dále pak špatnou kalibrací snímačů nebo změnou okolní teploty. V případě nutnosti použití této metody pro přesné měření, je možné chybu odstranit dodatečnou korekcí polohy snímačů vůči sobě, tzn. přepsání polohy jednoho snímače v jeho datech o hodnotu přesazení.

Také může dojít k vibraci snímače v momentě, kdy je snímač kolmo na měřený průměr. Chyba se v tomto případě projeví odskočením snímače v ose X od měřeného průměru (viz obr. 26). Nejčastěji je chyba způsobena příliš vysokou rychlostí měření a při snížení rychlosti je tato chyba eliminována.

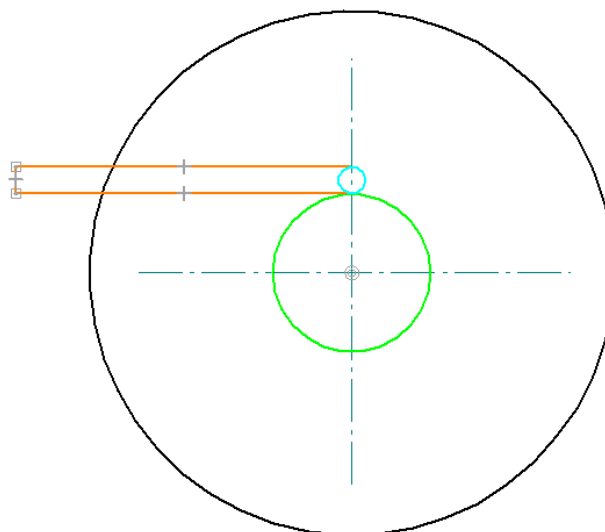


Obrázek 26 – Možné chyby při měření dvěma snímači proti sobě (zvětšeno 10 000krát)

3. Měření jedním snímačem s pomocí otočného stolu

Při této metodě dochází k upnutí součásti na OS, umístíme jeden snímač z boku na měřený průměr a pomocí otáčení OS bude průměr změřen (viz obr. 27).

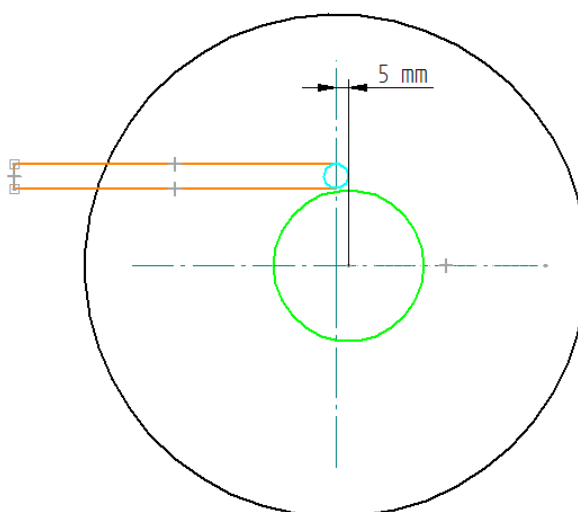
Pokud OS nevnese do měření chybu, což bude zjištěno vzájemným porovnáním všech metod, jedná se o nejjednodušší metodu.



Obrázek 27 - Metoda měření s jedním snímačem pomocí otočného stolu

4. Měření trnu s excentricitou 5 mm

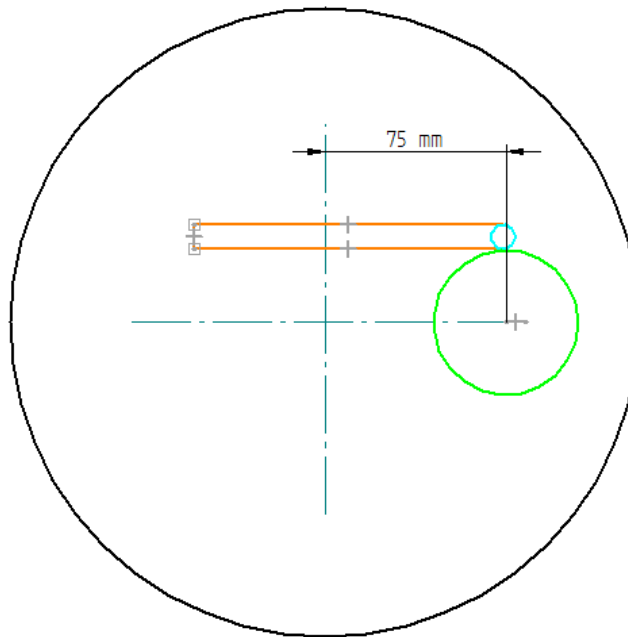
Tato metoda má simulovat špatné upnutí operátorem a jeho vliv na přesnost měření. Měření bude stále stejný trn ve stejných řezech a budou vyhodnoceny stejné charakteristiky jako v předchozích případech. Součást bude snímána z boku v úhlovém rozsahu 380° při simultánním otáčení OS (viz obr. 28).



Obrázek 28 – Metoda měření trnu s excentricitou 5 mm

5. Měření trnu s excentricitou 75 mm

Tato metoda měření simuluje např.: měření klikových hřídelí, kde je potřeba měřit průměry a geometrii čepů pro uložení klik. Opět bude měřen stejný trn ve stejných řezech a opět budou vyhodnoceny stejné charakteristiky. Snímání bude probíhat v úhlovém rozsahu 380° jedním snímačem z boku, při simultánním otáčení OS (viz obr. 29).



Obrázek 29 - Metoda měření trnu s excentricitou 75 mm

Následně proběhne ověření vlivu změny okolní teploty na zaměření osy a na přesnost měření. V praxi bývá běžné, že obsluha CMM zaměří osu OS správně na začátku směny, v průběhu směny se však okolní teplota změní a obsluha již osu OS při změně teploty znovu nezaměří. Obsluha CMM tedy stále načítá uloženou polohu osy OS ze začátku směny. Pro ověření vlivu změny okolní teploty na zaměření osy OS a na přesnost měření bude použita metoda měření polohy středů kružnic a metoda měření sousosti.

1. Metoda měření polohy středů kružnic

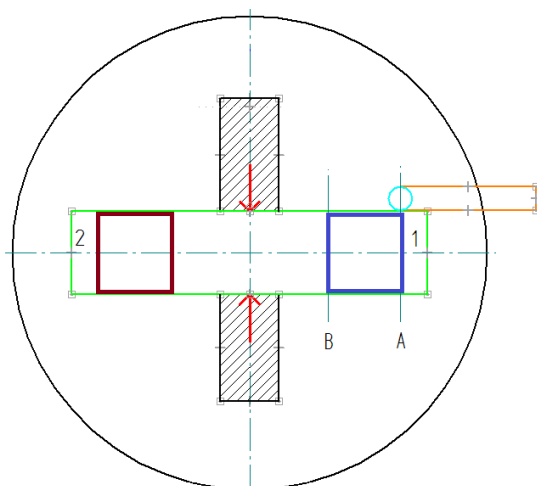
Tato metoda ověření vlivu změny okolní teploty na zaměření osy a na přesnost měření vychází z předešlých metod. Předmětem pro měření bude opět stejný trn, upnutý do univerzálního sklíčidla připevněného k základní desce OS. Nejdříve bude spuštěn program, ve kterém dojde těsně před měřením k zaměření osy dlouhým snímačem, poté

dojde k výměně snímače za snímač kolmý a pomocí OS budou změřeny kružnice ve stanovených řezech. Z naměřených kružnic budou vyhodnoceny polohy jejich středů, vůči z.s.s umístěného do osy OS. Poté dojde ke změně a ustálení okolní teploty. Program měření kružnic bude spuštěn znovu, avšak tentokrát bez zaměření osy. Osa OS bude načtena z předchozího měření. Opět budou vyhodnoceny polohy středů kružnic a potenciální rozdíl v jejich polohách bude vliv okolní teploty na zaměření osy a přesnost měření.

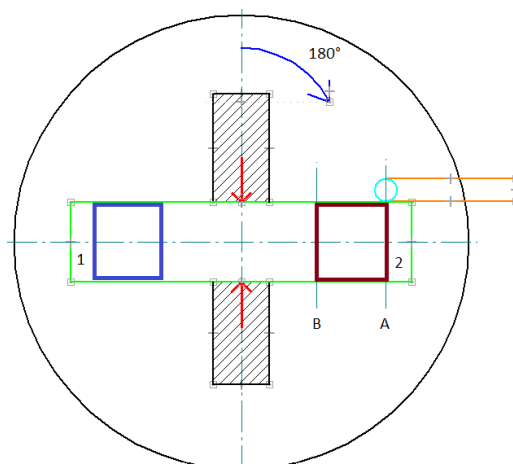
2. Metoda měření souososti

Opět bude měřen stejný trn, nicméně upnutý do vodorovné polohy na OS. Poté bude změřen válec na jedné polovině trnu (na obr. 30 označené modře a číslem 1), a to ve směru osy X. Zvolenou strategií pro všechna měření budou dvě kruhové dráhy v řezech A a B, vzdálených od sebe 62 mm. Poté se OS otočí o 180° a bude změřen válec na druhé polovině trnu označené červeně a číslem 2 (viz obr. 31). Následně bude OS otočen o 90° a proběhne měření válce ve směru osy Y na první polovině trnu (označené modře a číslem 1 na obr. 32). Dále proběhne otočení OS o 180° a na druhé polovině trnu označené červeně a číslem 2 proběhne stejné měření jako předchozí (viz obr. 33). Následně bude vyhodnocena souosost a rovnoběžnost obou polovin trnu ve směrech X a Y, kdy jako referenční válec bude brán vždy ten označený modře a číslem 1 (viz obr. 30-33). Nakonec bude změněna okolní teplota a celé měření bude zopakováno stejným způsobem. Potenciální rozdíl mezi souosostmi a rovnoběžnostmi bude považován za vliv změny okolní teploty na špatné zaměření osy OS a následně na přesnost měření.

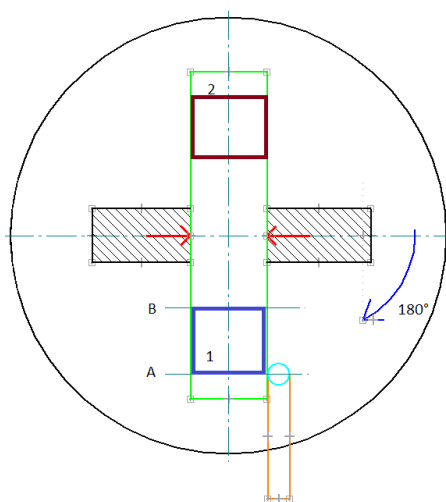
Tato metoda vychází z úvah, že měřený trn je přesně vyrobený a že při vyhodnocování poloh se vliv změny okolní teploty projeví více než při měření průměrů a tvaru.



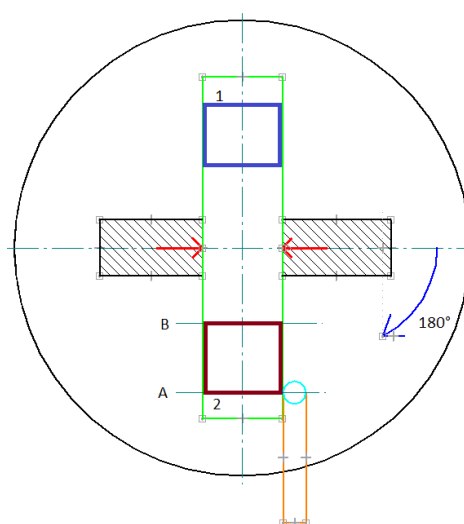
Obrázek 30 - Měření souososti ve směru X na 1. polovině trnu



Obrázek 31 - Měření souososti ve směru Y na 1. polovině trnu



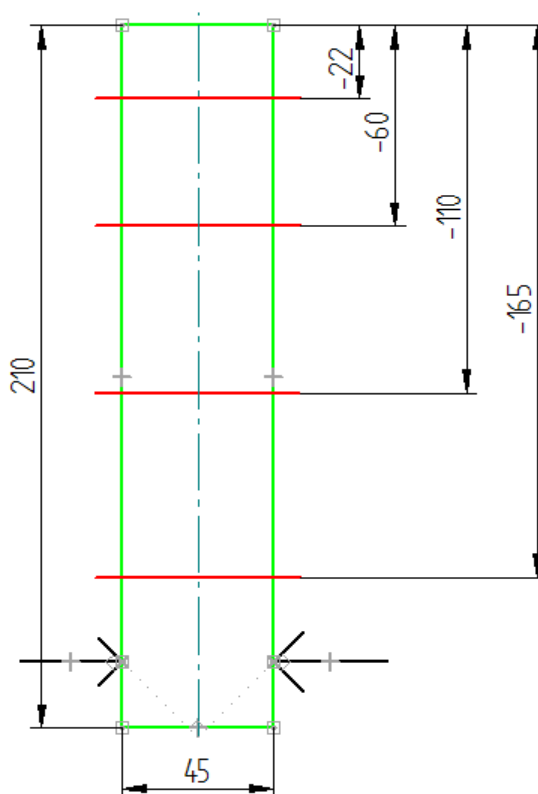
Obrázek 32 - Měření souososti ve směru X na 2. polovině trnu



Obrázek 33 - Měření souososti ve směru Y na 2. polovině trnu

4.1 Postup měření

Nejprve byly stanoveny čtyři řezy na měřené součásti (trnu), ve kterých bude pokaždé měřen průměr. Řezy byly náhodným výběrem stanoveny v úrovních -22 mm, -60 mm, -110 mm a -165 mm od čela trnu (viz obr. 34) a pomocí nich byly každou metodou stanoveny průměry.



Obrázek 34 - Vybrané řezy na měření průměrů

Z naměřených hodnot byly zjištěny jednotlivé kruhovitosti, průměr válce a byla stanovena válcovitost. První měření proběhlo na kruhoměru, kde byly změřeny pouze jednotlivé kruhovitosti. Tyto hodnoty byly použity jako referenční hodnoty pro porovnávání. Druhé měření proběhlo na souřadnicovém měřicím stroji značky Zeiss UPMC 850 CARAT, kde byly změřeny jednotlivé průměry, byly vyhodnoceny kruhovitosti, průměr válce a válcovitost. Na tomto CMM se měřilo pouze metodou jedním snímačem shora. Měření bylo zopakováno desetkrát a bylo statisticky vyhodnoceno. Naměřené hodnoty průměrů kružnic, průměru válce a válcovitosti, na tomto stroji, budou použity jako referenční hodnoty pro porovnávání. Třetí měření proběhlo na CMM značky Zeiss PRISMO, kde byly měřeny všechny výše uvedené metody. Měření všech metod se zopakovalo desetkrát a bylo statisticky vyhodnoceno. Metody měření vlivu změny okolní teploty na zaměření osy OS a následnou přesnost byly měřeny pouze jednou. Naměřené hodnoty na CMM Zeiss PRISMO byly poté porovnány s hodnotami referenčními a vyhodnoceny.

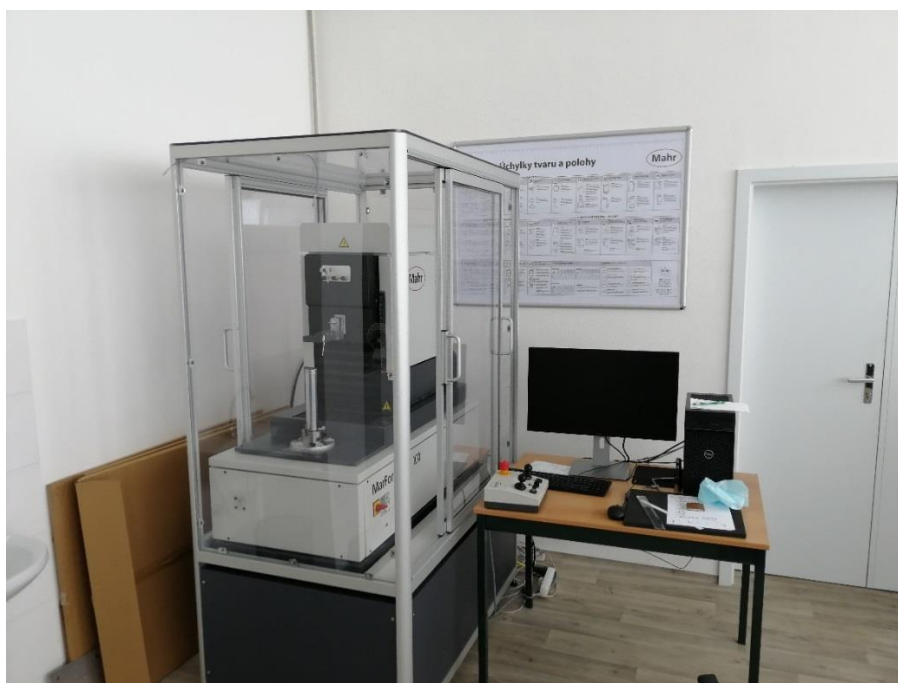
4.2 Popis měření

4.2.1 Měření na kruhoměru

První měření probíhalo na kruhoměru značky MarForm MFU 100 (viz obr. 35) a pomocí softwaru MarWin. Přesnost kruhovitosti kruhoměru výrobce udává $0,02 + 0,0004 \mu\text{m}$ dle vzorce:

$$\mu\text{m} + \frac{\mu\text{m}}{\text{výška v které se měří [mm]}} \quad (1)$$

Nejdříve byla měřená součást upnuta do univerzálního tříčelistového sklíčidla. Poté byly pomocí softwaru, najeto do všech referenčních bodů stroje a nastaven úhel snímače na 15° . Dalším krokem bylo automatické vyrovnaní a vycentrování součásti. Maximální přípustná chyba byla nastavena na $5 \mu\text{m}$. Následně bylo opakovaně spuštěno vyrovnaní a vycentrování součásti, avšak s maximální přípustnou chybou $1 \mu\text{m}$. Obě vyrovnaní proběhla úspěšně a s chybou méně než $1 \mu\text{m}$. Kritérium vyhodnocení bylo nastaveno na LSCI (metoda nejmenších čtverců) a výsledky byly filtrovány 50 vln/ot.



Obrázek 35 - Měření na kruhoměru MarForm MFU 100

Následně proběhlo samotné měření a vyhodnocování kruhovitostí v jednotlivých řezech trnu. Měření probíhalo rychlostí 20°/s a výsledky byly opět vyhodnoceny metodou LSCI a vyfiltrovány 50 v/ot. Výsledky měření jsou zaznamenány v tab. 1 a byly použity jako referenční hodnoty pro srovnání při dalších měřeních.

Tabulka 1 - Naměřené hodnoty na kruhoměru MarForm MFU 100 [μm]

	Z = -22 mm	Z = -60 mm	Z = -110 mm	Z = -165 mm
Odchylka od kruhovitosti [μm]	0,53091	0,12955	0,15288	0,1855

Z výsledků je patrné, že měřený trn má velice malou odchylku kruhovitosti a je velice přesně broušený.

4.2.2 Měření na souřadnicovém měřicím stroji Zeiss UPMC 850 CARAT

Měření dále probíhalo na souřadnicovém měřicím stroji značky Zeiss UPMC 850 CARAT. Tento stroj má parametr MPE udávaný výrobcem:

$$MPE = \pm \frac{0,7 + L}{600} \quad (2)$$

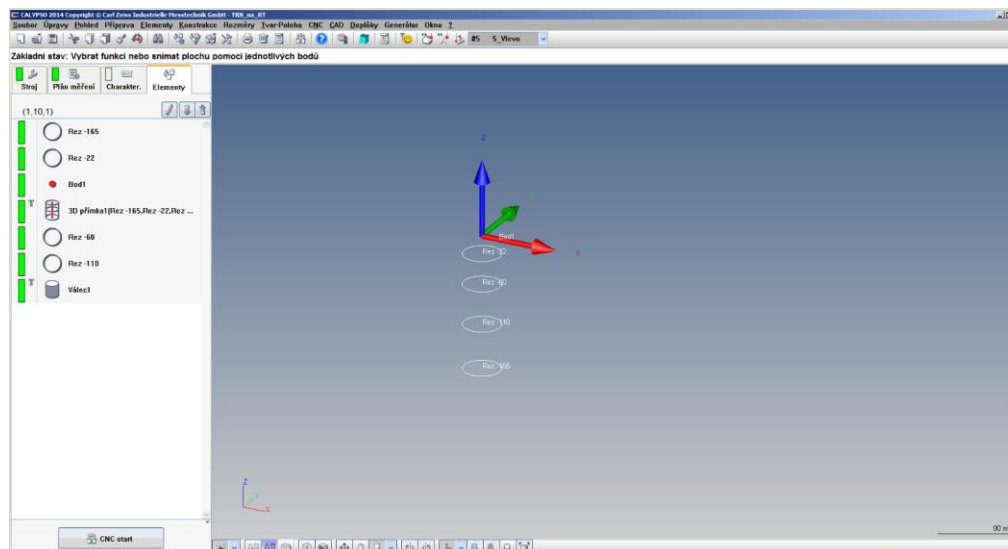
Nejprve byla do připraveného stroje upevněna kalibrační koule a pomocí referenčního snímače a programu CALYPSO byla zaměřena její přesná poloha. Při zaměřování a v průběhu celého měření byla zapnuta teplotní kompenzace. Poté byl do snímací hlavy upnut snímač zvolený pro měření o délce 180 mm a na konci opatřen rubínovou kuličkou o průměru 8 mm. Materiálem snímače bylo zvoleno uhlíkové vlákno (ThermoFit), kvůli jeho výborné teplotní stálosti, vysoké tuhosti, pevnosti a nízké hmotnosti. Jelikož snímač je dlouhého rozměru, jsou tyto vlastnosti důležité, zejména z důvodu průhybu, který by mohl nastat. Snímač byl pomocí CALYPSA zkalibrován přes kalibrační kouli (viz obr. 36).



Obrázek 36 - Kalibrace snímače zvoleného pro měření

Po zkalibrování snímače proběhla příprava pro měření, a to upnutím trnu do univerzálního tříčelistového sklíčidla a následným upnutím sklíčidla pomocí upínek k samotné základové desce CMM. Poté byl v CALYPSU zapnut nový plán měření, teplotní kompenzace a byly změřeny dvě libovolné kružnice na trnu a bod na jeho čele. Jednotlivé kružnice byly definovány pomocí čtyř bodů. Z kružnic byla vytvořena teoretická 3D přímka, procházející středy obou kružnic. Takto byl určen z.s.s., který byl umístěn do středu čela měřeného trnu, definovaného 3D přímkou a bodem. Tento z.s.s. byl použit pro všechna měření.

Po přípravě měřicího zařízení byl sestaven samotný program pro měření trnu. Byly měřeny čtyři kružnice ve stanovených řezech a jeden bod na čele trnu (viz obr. 37).



Obrázek 37 - Ukázka programu pro měření

Kružnice byly snímány strategií kruhové dráhy a formou scanningu rychlostí 3 mm/s a v úhlovém rozsahu 380°. Válec nebyl fyzicky měřen a byl to pouze element teoretický. Byl definován zpětným vyvoláním průměrů naměřených kružnic.



Obrázek 38 - Měření trnu na CMM Zeiss UPMC 850 CARAT jedním snímačem shora

Průběh měření kružnice v hladině $Z = -22$ mm lze vidět na obr. 38. Dále byly vyhodnoceny kruhovitosti všech kružnic a válcovitost. Měření bylo opakováno desetkrát a všechny hodnoty byly zaznamenány a statisticky vyhodnoceny. Výsledky jsou zaznamenány v tab. 2.

Tabulka 2 - Naměřené hodnoty na CMM Zeiss UPMC 850 CARAT jedním snímačem shora [mm]

	Průměr -22 mm	Průměr -60 mm	Průměr -110 mm	Průměr -165 mm	Kruhovitost -22 mm	Kruhovitost -60 mm	Kruhovitost -110 mm	Kruhovitost -165 mm	Průměr Válce	Válcovitost
1	44,9717	44,9716	44,9717	44,9716	0,0004	0,0005	0,0004	0,0004	44,9716	0,0007
2	44,9716	44,9715	44,9716	44,9715	0,0004	0,0005	0,0004	0,0005	44,9716	0,0006
3	44,9717	44,9716	44,9717	44,9715	0,0005	0,0004	0,0004	0,0004	44,9716	0,0007
4	44,9717	44,9716	44,9716	44,9715	0,0004	0,0005	0,0004	0,0004	44,9716	0,0007
5	44,9716	44,9716	44,9716	44,9715	0,0005	0,0004	0,0004	0,0004	44,9716	0,0007
6	44,9716	44,9716	44,9716	44,9716	0,0005	0,0005	0,0004	0,0004	44,9716	0,0007
7	44,9717	44,9716	44,9716	44,9715	0,0005	0,0005	0,0004	0,0004	44,9716	0,0007
8	44,9717	44,9716	44,9717	44,9716	0,0005	0,0005	0,0004	0,0005	44,9716	0,0007
9	44,9717	44,9716	44,9716	44,9715	0,0005	0,0005	0,0004	0,0004	44,9716	0,0007
10	44,9716	44,9716	44,9716	44,9715	0,0005	0,0004	0,0004	0,0004	44,9716	0,0007
Minimální hodnota	44,9716	44,9715	44,9716	44,9715	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	44,9716	0,0006
Maximální hodnota	44,9717	44,9716	44,9717	44,9716	0,0005	0,0005	0,0004	0,0005	44,9716	0,0007
Rozpětí	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0000	0,0001	0,0000	0,0001
Aritmetický průměr	44,97166	44,97159	44,97163	44,97153	0,00047	0,00047	0,00040	0,00042	44,97160	0,00069
Směrodatná odchylka	0,00005	0,00003	0,00005	0,00005	0,00005	0,00005	0,00000	0,00004	0,00000	0,00003

Hodnoty kruhovitosti a válcovitosti jsou udávány jako odchylka od ideálního tvaru. Výsledky byly filtrovány 50 v/ot a vyhodnocovány Gaussovou metodou. Výsledné hodnoty průměrů kružnic, průměru válce a válcovitosti byly použity jako referenční hodnoty pro porovnávání dalších výsledků.

Z výsledků lze vyčíst, že hodnoty kruhovitostí se zvyšovaly, nicméně se stále pohybovaly v hodnotě do 0,5 μm . Hodnota válcovitosti je 0,7 μm . Obecně lze říci, že se jedná o pozitivní hodnoty. Referenční hodnoty, se kterými budou porovnávány hodnoty naměřené na CMM Zeiss PRISMO, jsou uvedeny v tab. 3.

Tabulka 3 - Referenční hodnoty

	Referenční hodnoty [mm]
Průměr -22mm	44,97166
Průměr -60mm	44,97159
Průměr -110 mm	44,97163
Průměr -165mm	44,97153
Kruhovitost -22mm	0,53091
Kruhovitost -60mm	0,12955
Kruhovitost -110mm	0,15288
Kruhovitost -165mm	0,1855
Průměr Válce	44,9716
Válcovitost	0,00069

4.2.3 Měření na souřadnicovém měřicím stroji Zeiss PRISMO

Další měření bylo prováděno na CMM PRISMO od firmy Zeiss. Výrobce u tohoto stroje udává základní chybu indikace parametrem MPE:

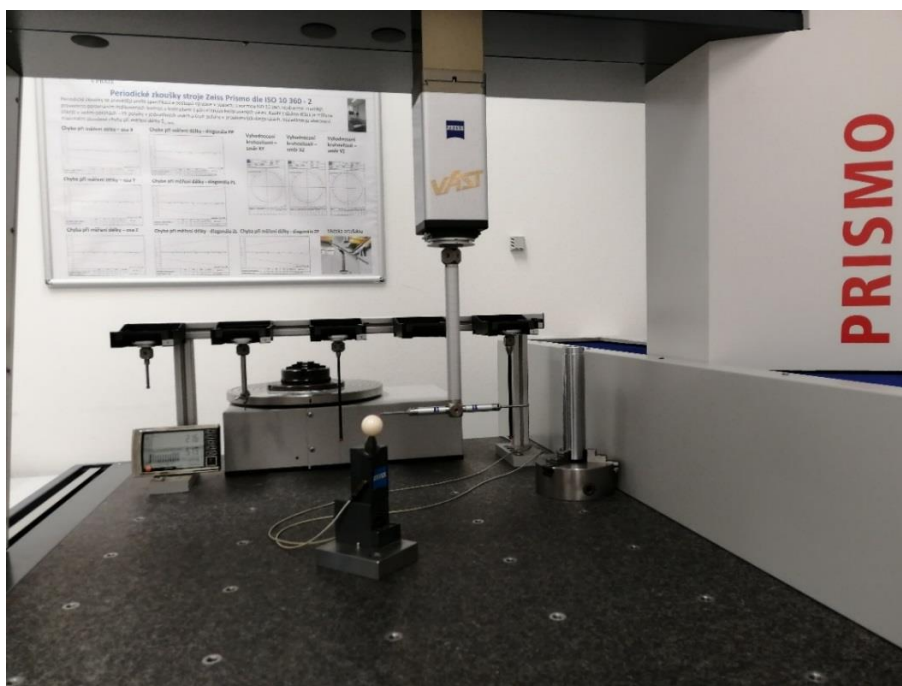
$$MPE = \pm \frac{2,7 + L}{300} \quad (3)$$

Postupem času byla u tohoto stroje Zeiss PRISMO vytvořena nová korekční mapa. Následně z výsledků současných periodických zkoušek bylo patrné, že stroj využívá svou původní specifikaci danou výrobcem pouze z jedné třetiny (tedy jeho tolerance je naplněna pouze z jedné třetiny). Lze tedy říci, že stroj měří s velkou přesností. Zároveň k tomuto CMM je možné připojit i otočný stůl Zeiss RT-01, čímž bylo možné změřit všechny výše popsané metody, které byly mezi sebou vzájemně porovnány. Dále pak byl

vyhodnocen vliv OS na přesnost měření. Tento stroj disponuje zásobníkem na snímače, což znamená, že výměna měřicích snímačů probíhá automaticky. To usnadňuje ovládání měřicího zařízení a zkracuje dobu měření. Samotný stroj je ovládán také pomocí programu CALYPSO.

Příprava měření proběhla vložením snímačů do zásobníku. Snímačem, který byl použit na CMM Zeiss PRISMO a dvěma snímači smontovanými proti sobě. Snímače byly opět vyrobeny z ThermoFitu a měřicí dotyky z rubínové kuličky. Na základní desku stroje byla upevněna kalibrační koule do poněkud nezvyklé polohy, tzn. kolmo na osu X. Úhel byl zvolen tak, aby při kalibraci dvou snímačů nedošlo u jednoho z nich k chybě, která by mohla být způsobena častějším vyhýbáním se dřívku kalibrační koule. Při této poloze kalibrační koule mají oba snímače stejné dráhy.

Po přípravě stroje pro měření byl v CALYPSU otevřen nový plán měření, zapnuta teplotní kompenzace a referenčním snímačem přesně zaměřena poloha kalibrační koule. Po zaměření proběhla automatická výměna snímačů a do snímací hlavy byl upnut dlouhý snímač. Nejprve tedy proběhla kalibrace tohoto snímače. Po úspěšné kalibraci proběhla opět výměna snímačů a do snímací hlavy byly upnuty dva snímače proti sobě. Opět proběhla kalibrace obou dotyků (viz obr. 39). Tyto snímače dostaly pracovní název „vlevo_vpravo“.



Obrázek 39 - Kalibrace snímače „vlevo_vpravo“, při kalibrování levého snímače

Po úspěšném zkalibrování tohoto snímače byl stroj připraven pro měření. Následovalo tedy upnutí univerzálního tříčelistového sklíčidla s měřeným trnem k základní desce CMM. Sklíčidlo bylo připevněno pomocí upínky a šroubu (viz obr. 40).



Obrázek 40 - Upnutí sklíčidla k CMM

Po upnutí trnu k základní desce CMM byla zaměřena hrubá poloha měřené součásti. Do snímací hlavy byl upevněn dlouhý snímač a v CALYPSU zapnut nový plán měření. Ten posloužil k zadefinování polohy trnu v měřicím rozsahu stroje. K určení polohy trnu byly dlouhým snímačem změřeny dvě libovolné kružnice. Každá byla zadefinována čtyřmi body a na čele trnu byl zaměřen jeden bod. Naměřené kružnice definují hrubou polohu trnu v ose X a Y a bod definuje nulovou hodnotu osy Z. Poté proběhlo samotné měření (viz obr. 41). V CALYPSU byl načten stejný program jako v

případě měření na CMM UPMC 850 CARAT. Měřen byl tedy opět průměr trnu v jednotlivých řezech a vyhodnocen byl průměr válce, válcovitost a jednotlivé kruhovitosti. Měření bylo opět zopakováno desetkrát.



Obrázek 41 - Měření jedním snímačem shora na CMM Zeiss PRISMO

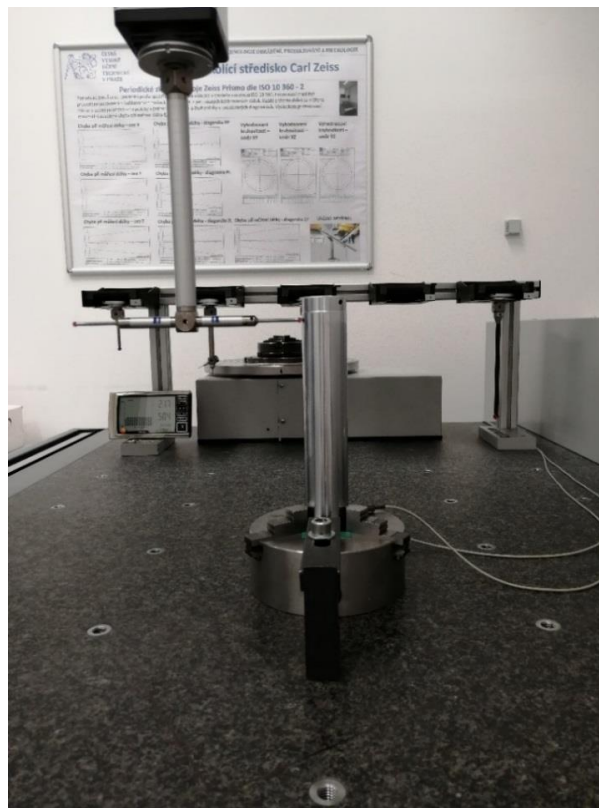
Výsledky byly vyhodnoceny Gaussovou metodou a vyfiltrovány 50 v/ot. Kružnice byly měřeny strategií kruhové dráhy v úhlovém rozsahu 380° a body byly snímány formou scanningu. Rychlost snímání byla v případě toho měření 10 mm/s, a to z důvodu snahy o přiblížení se co nejreálnějším podmínkám v praxi. Jelikož se v reálných podmínkách klade důraz spíše na rychlost měření, a to i za cenu menší přesnosti, rychlostí 3 mm/s neprobíhá téměř žádné měření. V praxi bývají často používány i rychlosti vyšší než 10 mm/s. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 4.

Tabulka 4 – Naměřené hodnoty na CMM Zeiss PRISMO jedním snímačem shora[mm]

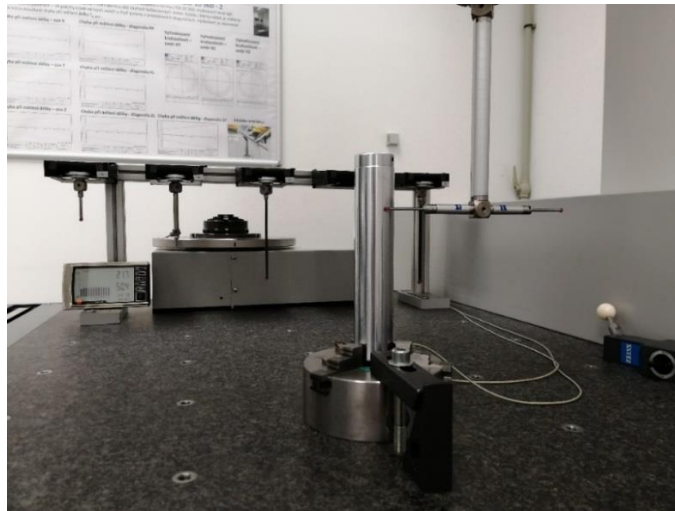
	Průměr -22 mm	Průměr -60 mm	Průměr -110 mm	Průměr -165 mm	Kruhovitost -22 mm	Kruhovitost -60 mm	Kruhovitost -110 mm	Kruhovitost -165 mm	Průměr Válce	Válcovitost
1	44,9714	44,9713	44,9714	44,9713	0,0008	0,0004	0,0003	0,0004	44,9713	0,0008
2	44,9714	44,9713	44,9713	44,9713	0,0007	0,0003	0,0003	0,0003	44,9713	0,0008
3	44,9714	44,9713	44,9714	44,9713	0,0008	0,0003	0,0004	0,0004	44,9714	0,0008
4	44,9714	44,9713	44,9714	44,9713	0,0007	0,0003	0,0003	0,0004	44,9714	0,0008
5	44,9714	44,9713	44,9714	44,9713	0,0007	0,0004	0,0003	0,0004	44,9714	0,0008
6	44,9714	44,9713	44,9714	44,9714	0,0007	0,0003	0,0003	0,0004	44,9714	0,0008
7	44,9714	44,9713	44,9714	44,9714	0,0007	0,0003	0,0003	0,0004	44,9714	0,0008
8	44,9714	44,9713	44,9714	44,9714	0,0007	0,0004	0,0004	0,0004	44,9714	0,0008
9	44,9714	44,9713	44,9714	44,9713	0,0007	0,0003	0,0004	0,0004	44,9714	0,0008
10	44,9714	44,9713	44,9714	44,9714	0,0007	0,0004	0,0003	0,0004	44,9714	0,0008
Minimální hodnota	44,9714	44,9713	44,9713	44,9713	0,0007	0,0003	0,0003	0,0003	44,9713	0,0008
Maximální hodnota	44,9714	44,9713	44,9714	44,9714	0,0008	0,0004	0,0004	0,0004	44,9714	0,0008
Rozpětí	0,0000	0,0000	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0000
Aritmetický průměr	44,9714	44,9713	44,9714	44,9713	0,0007	0,0003	0,0003	0,0004	44,9714	0,0008
Směrodatná odchylka	0	0	0,00003	0,00004	0,00004	0,00004	0,00004	0,00003	0,00004	0
Odchylka od ref. hodnoty	0,00026	0,00029	0,00024	0,00019	0,00019	0,00021	0,00018	0,00020	0,00022	0,00011

Z naměřených hodnot lze vyčíst, že hodnoty průměrů jsou velmi podobné hodnotám naměřeným na stroji Zeiss CARAT. Hodnoty průměrů mají odchylku maximálně $0,3 \mu\text{m}$, jedná se tedy o pozitivní výsledek. Odchylka může být způsobená jinou přesností stroje nebo zvýšením rychlosti měření. Hodnoty kruhovitostí v porovnání s hodnotami naměřenými na kruhoměru mají odchylku větší, ale i v tomto případě se pohybují do $0,5 \mu\text{m}$. Hodnota válcovitosti v porovnání s hodnotou naměřenou na CARATU se liší pouze o $0,1 \mu\text{m}$. Celkově lze říci, že se jedná o příznivé výsledky měření.

Měření pokračovalo výměnou dlouhého snímače za snímač „vlevo_vpravo“, který byl již zkalibrovan, tudíž bylo možné začít samotné měření. Bylo však potřeba změnit strategii měření kružnic, a to rozdělením na dva segmenty po 180° . V nastavení bylo stanoveno, aby jeden segment kruhové dráhy (tedy 180°) měřil jeden snímač, poté snímací hlava přejela na druhou stranu a druhý segment (zbylých 180°) doměřil snímač druhý ve stejné hladině (viz obr. 42 a 43). Měření bylo opět opakováno desetkrát a vyhodnoceno Gaussovou metodou a filtrováno 50 v/ot. Snímání kruhových drah probíhalo opět formou scanningu.

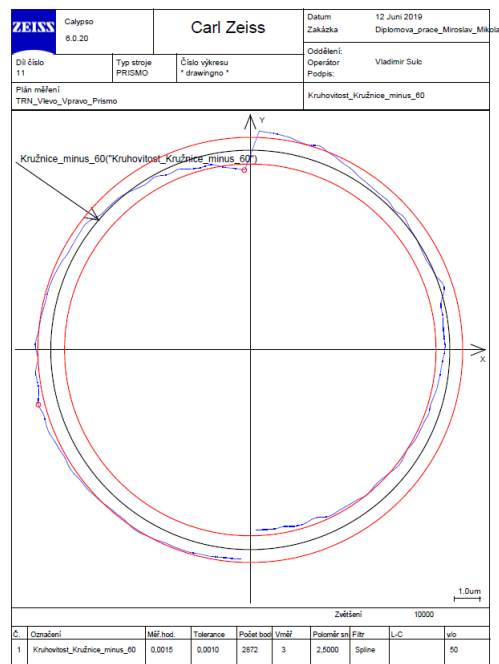


Obrázek 42 - Měření pravého segmentu kruhové dráhy (180°) pravým snímačem



Obrázek 43 - Měření levého segmentu kruhové dráhy (180°) levým snímačem

Při měření touto strategií docházelo nejdříve k problémům, které jsou uvedeny v popisu této metody měření, tzn. k přesazení snímačů v ose Y a vibraci snímačů v ose X. Na obr. 44 jsou graficky zobrazeny výsledky měření i s těmito chybami se zvětšením 10 000krát.



Obrázek 44 – Grafické vyhodnocení výsledků z měření dvěma snímači

Pro odstranění vibrace snímačů v ose X byla nastavena nižší rychlost měření, tzn. 3 mm/s. Bylo zjištěno, že přesazení snímačů bylo způsobeno vyšší okolní teplotou i přes zapnutou teplotní kompenzaci. Druhý den bylo totiž měření opakováno při teplotě 20° a přesazení snímačů se již neprojevovalo. Výsledky měření jsou zaznamenány v tab. 5.

Tabulka 5 - Naměřené hodnoty na CMM Zeiss PRISMO dvěma snímači proti sobě [mm]

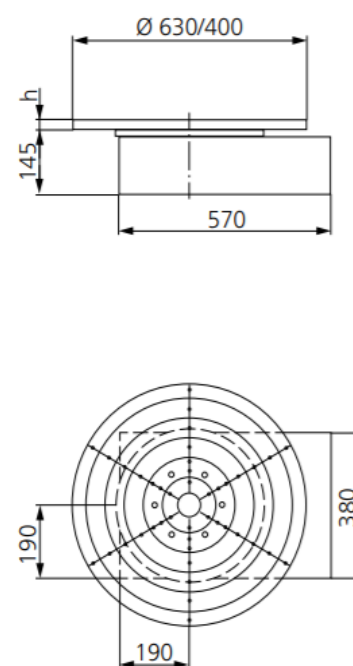
	Průměr -22 mm	Průměr -60 mm	Průměr -110 mm	Průměr -165 mm	Kruhovitost -22 mm	Kruhovitost -60 mm	Kruhovitost -110 mm	Kruhovitost -165 mm	Průměr Válce	Válcovitost
1	44,9714	44,9714	44,9715	44,9713	0,0006	0,0004	0,0005	0,0005	44,9714	0,0007
2	44,9714	44,9714	44,9715	44,9714	0,0006	0,0004	0,0004	0,0005	44,9714	0,0007
3	44,9714	44,9714	44,9715	44,9715	0,0006	0,0005	0,0004	0,0005	44,9714	0,0007
4	44,9714	44,9714	44,9715	44,9715	0,0007	0,0005	0,0004	0,0005	44,9715	0,0007
5	44,9714	44,9714	44,9715	44,9715	0,0006	0,0005	0,0004	0,0005	44,9715	0,0006
6	44,9715	44,9714	44,9715	44,9715	0,0007	0,0005	0,0004	0,0006	44,9715	0,0007
7	44,9715	44,9714	44,9716	44,9715	0,0006	0,0005	0,0004	0,0006	44,9715	0,0006
8	44,9715	44,9714	44,9716	44,9715	0,0005	0,0005	0,0005	0,0007	44,9715	0,0007
9	44,9715	44,9715	44,9716	44,9715	0,0005	0,0005	0,0005	0,0007	44,9715	0,0007
10	44,9715	44,9715	44,9716	44,9716	0,0006	0,0006	0,0005	0,0008	44,9716	0,0008
Minimální hodnota	44,9714	44,9714	44,9715	44,9713	0,0005	0,0004	0,0004	0,0005	44,9714	0,0006
Maximální hodnota	44,9715	44,9715	44,9716	44,9716	0,0007	0,0006	0,0005	0,0008	44,9716	0,0008
Rozpětí	0,0001	0,0001	0,0001	0,0003	0,0002	0,0002	0,0001	0,0003	0,0002	0,0002
Aritmetický průměr	44,9715	44,9714	44,9715	44,9715	0,0006	0,0005	0,0004	0,0006	44,9715	0,00069
Směrodatná odchylka	0,00005	0,00004	0,00004	0,00007	0,00006	0,00005	0,00004	0,00010	0,00006	0,00005
Odchylka od ref. hodnoty	0,00021	0,00017	0,00009	0,00005	0,00007	0,0004	0,0003	0,0004	0,0001	0

Po změření trnu a vyhodnocení výsledků těmito metodami se práce zabývala měřením pomocí OS. Pro měření byl vybrán pohyblivý otočný stůl RT-01 od firmy Zeiss. Jeho specifikace uvedené výrobcem jsou uvedeny v tab. 6 a na obr. 45.

Tabulka 6 - Technické specifikace OS RT-01 [10]

Uložení:	Kuličkové ložiska
Točivý moment:	20 Nm
Max. úhlová rychlost:	45°/s
Max. úhlové zrychlení:	50 °/s ²
Rychlost otáčení:	7,5 min ⁻¹
Odchyška úhlové polohy:	± 1“
Opakovatelnost úhlové polohy:	± 0,5 “
Axiální házení:	≤ 0,5 μm
Radiální házení:	≤ 0,5 μm
Váha:	107 kg

ZEISS RT1



Obrázek 45 - Rozměry OS RT-01 [10]

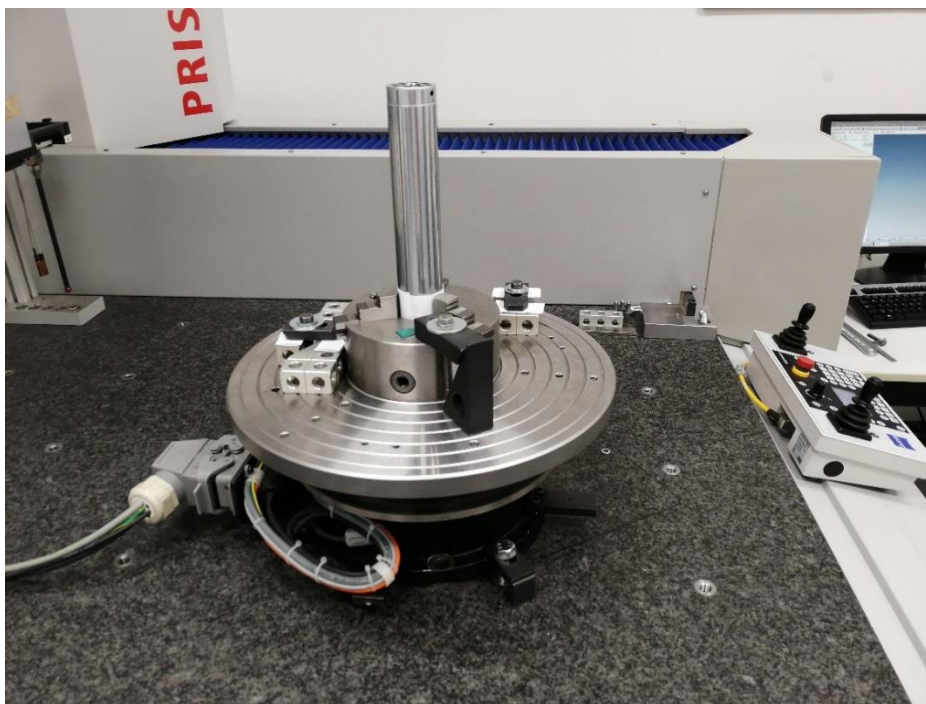
V tab. 7 jsou zaznamenány výsledky chyb indikace po periodické zkoušce OS RT – 01, který byl využit při měření, dle normy ČSN EN ISO 10360-3:

Tabulka 7 - Chyby indikace OS RT-01, použitého pro měření, po periodické zkoušce

	Maximální chyba indikace (MPE) [μm]	Naměřená chyba indikace [μm]	Využití tolerance [%]
FR	3,00000	1,99594	66,5
FT	3,00000	2,72516	90,8
FA	2,00000	0,79976	39,9

Z tabulky je patrné, že chyba indikace v tangenciálním směru je téměř limitní. Potenciální nepřesné výsledky měření mohou být tedy způsobeny i tímto faktorem.

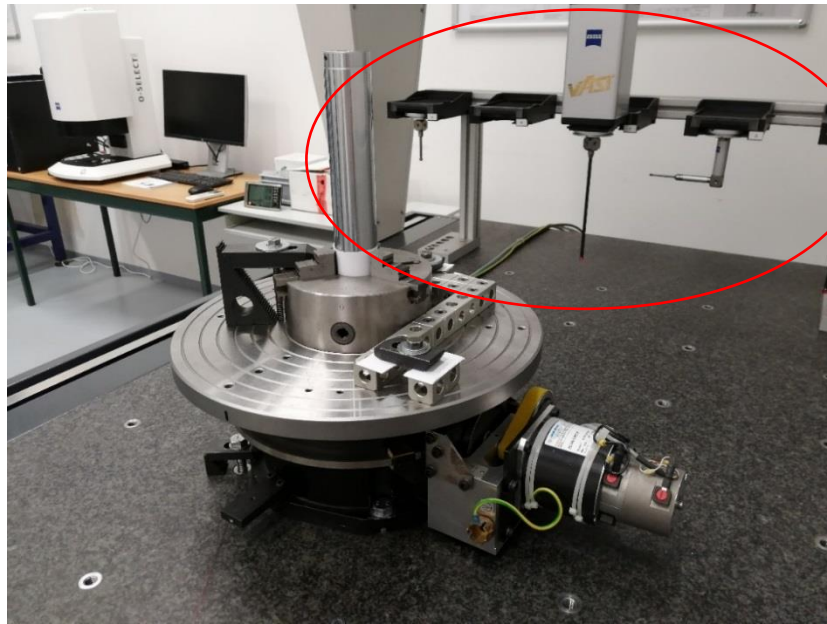
OS byl nejdříve připraven pro měření (viz obr. 46), a to odkrytováním, umístěním na základní desku CMM a pevně přišroubován pomocí šroubů a upínek. Na střed stolu bylo umístěno univerzální sklíčidlo s upnutým trnem.



Obrázek 46 - Příprava otočného stolu pro měření

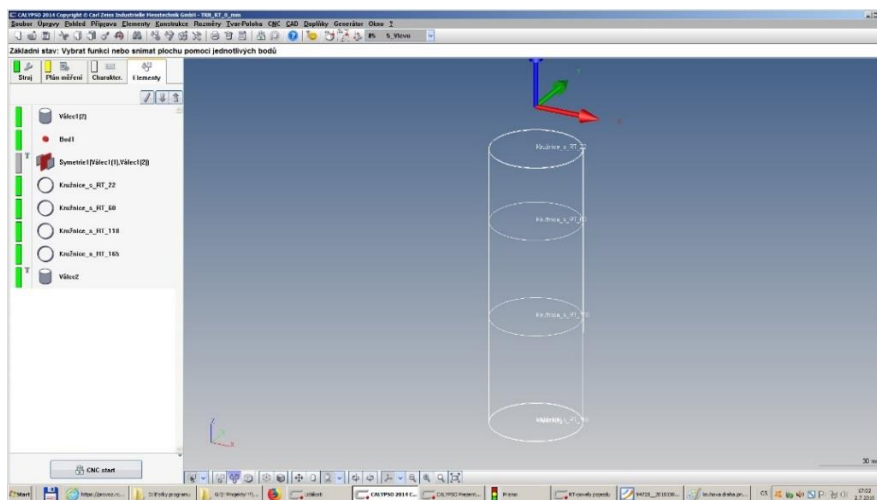
Takto umístěný a připravený stůl bylo zapotřebí přihlásit do programu CALYPSO. Po přihlášení stolu bylo v programu zdefinováno, kde v prostoru měřicího rozsahu CMM se OS nachází. Došlo tedy k určení jeho hrubé polohy pomocí základní desky OS, na které byla čtyřmi body změřena kružnice, jejíž průměr odpovídal průměru základní desky OS. Pomocí tohoto elementu byla následně zdefinována hrubá poloha OS a určen jeho kladný směr otáčení.

Do zásobníku byl umístěn nový snímač směřující do strany, který byl následně použit pro všechna měření s OS. Pro zaměření osy OS bude sloužit dlouhý snímač a k přesnému zaměření polohy kalibrační koule bude sloužit snímač referenční (viz obr. 47). Vlevo se nachází snímač referenční, uprostřed snímač dlouhý a vpravo snímač kolmý.



Obrázek 47 - Ukázka použitých snímačů pro měření s otočným stolem

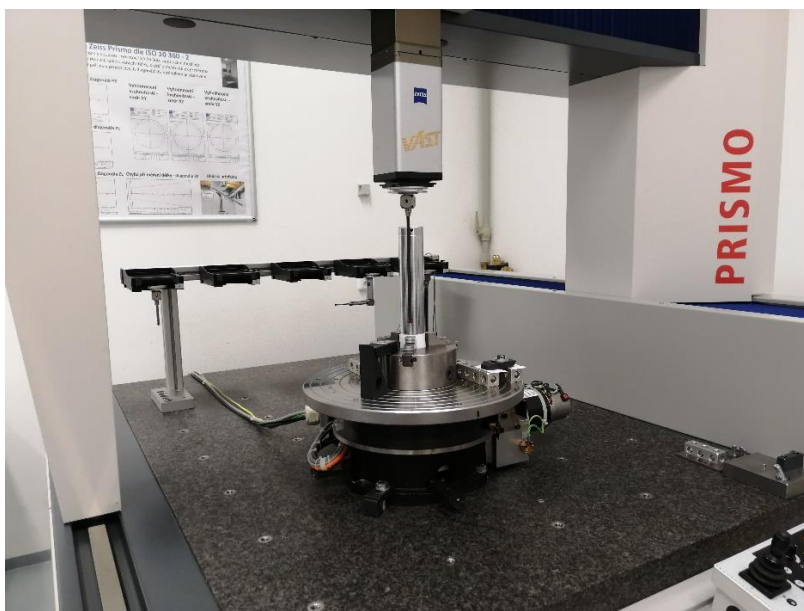
Následně byla k základní desce CMM upnuta kalibrační koule a její přesná poloha byla zaměřena referenčním snímačem. Po zaměření následovala kalibrace dlouhého a bočního snímače. Po úspěšné kalibraci snímačů byl vytvořen samotný program měření (viz obr. 48). Program vycházel z programu předchozího, pouze bylo na začátek programu přidáno měření elementů, kterými se zaměřila osa OS. Zaměření osy OS bylo provedeno metodou s válcem vždy před každým měřením a použita byla měřená součást, jelikož má vlivem způsobu výroby minimální chyby tvaru.



Obrázek 48 - Ukázka programu pro měření s otočným stolem

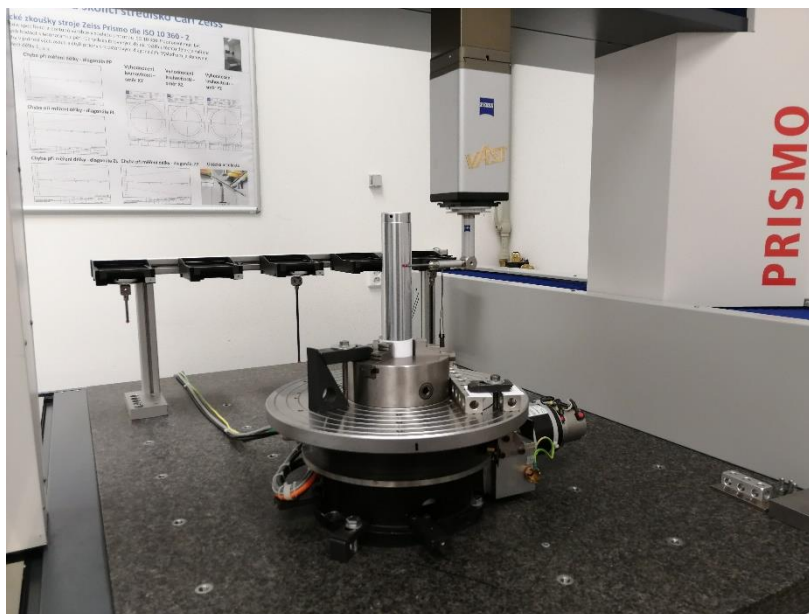
Do programu byly přidány čtyři elementy. Dva válce, jeden bod na čele trnu a teoretický element symetrie válců. Jinak byl program stejný jako v případě předchozího měření. Měření byly průměry čtyř kružnic v definovaných řezech a pomocí nich vyhodnoceny kruhovitosti, průměr válce a válcovistost.

Samotné zaměření osy OS proběhlo měřením válce v nulové poloze, tzn. 0° OS dlouhým snímačem (obr. 49). Strategii měření válce byly dvě kruhové dráhy. Jedna ve spodní části a druhá v horní části trnu v úhlovém rozsahu 360° a formou scanningu. Poté byl OS otočen o 180° a měření válce se opakovalo. Následovalo měření bodu na čele trnu. Následně pomocí programu proběhlo vyhodnocení symetrie změřených válců. Za symetrii byla považována osa OS a z.s.s. byl pomocí změřeného bodu umístěn do této osy a na čelo trnu.



Obrázek 49 - Zaměřování osy OS dlouhým snímačem

Následně proběhla výměna dlouhého snímače za snímač kolmý. Tento snímač byl umístěn z boku na požadované řezy, ve kterých se již měřily průměry. Strategii byla opět kruhová dráha v úhlovém rozsahu 360° a snímání formou scanningu. Avšak tentokrát probíhalo otáčení trnu pomocí OS (viz obr. 50).



Obrázek 50 - Měření průměrů pomocí OS

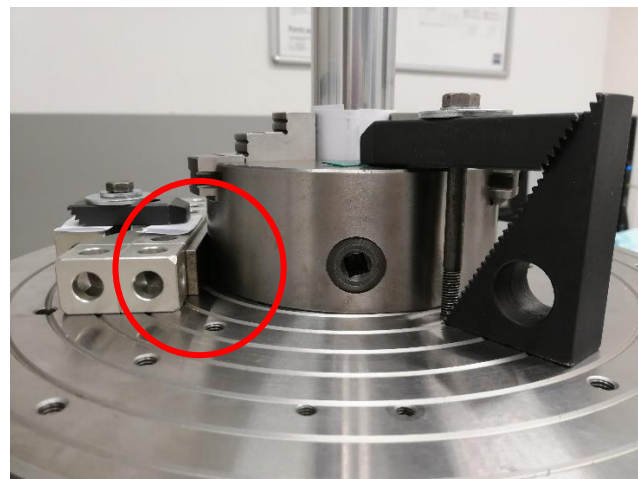
Měření probíhalo rychlostí 5 mm/s. Výsledky byly vyhodnoceny pomocí Gaussovy metody a filtr byl nastaven na 50 v/ot. Výsledky jsou zaznamenány v tab. 8.

Tabulka 8 - Naměřené hodnoty na CMM Zeiss PRISMO pomocí OS se součástí umístěnou v ose [mm]

	Průměr -22 mm	Průměr -60 mm	Průměr -110 mm	Průměr -165 mm	Kruhovitost -22 mm	Kruhovitost -60 mm	Kruhovitost -110 mm	Kruhovitost -165 mm	Průměr Válce	Válcovitost
1	44,9697	44,9703	44,9713	44,9724	0,0007	0,0005	0,0004	0,0004	44,9724	0,0018
2	44,9706	44,9715	44,9724	44,9734	0,0007	0,0006	0,0004	0,0005	44,9720	0,0018
3	44,9709	44,9716	44,9725	44,9735	0,0007	0,0005	0,0004	0,0005	44,9721	0,0017
4	44,9708	44,9717	44,9728	44,9738	0,0007	0,0006	0,0005	0,0005	44,9723	0,0019
5	44,9716	44,972	44,9734	44,9742	0,0007	0,0005	0,0004	0,0004	44,9728	0,0017
6	44,972	44,9719	44,9732	44,9744	0,0006	0,0006	0,0005	0,0005	44,9729	0,0018
7	44,9717	44,9719	44,9732	44,9743	0,0007	0,0006	0,0005	0,0005	44,9728	0,0018
8	44,9723	44,9722	44,9733	44,9741	0,0006	0,0005	0,0005	0,0004	44,973	0,0015
9	44,9721	44,9726	44,9739	44,9746	0,0007	0,0006	0,0005	0,0004	44,9733	0,0018
10	44,9722	44,9727	44,9737	44,9749	0,0008	0,0005	0,0005	0,0005	44,9734	0,0019
Minimální hodnota	44,9697	44,9703	44,9713	44,9724	0,0006	0,0005	0,0004	0,0004	44,972	0,0015
Maximální hodnota	44,9723	44,9727	44,9739	44,9749	0,0008	0,0006	0,0005	0,0005	44,9734	0,0019
Rozpětí	0,0026	0,0024	0,0026	0,0025	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001	0,0014	0,0004
Aritmetický průměr	44,97139	44,97184	44,97297	44,97396	0,00069	0,00055	0,00046	0,00046	44,97270	0,00177
Směrodatná odchylka	0,00081	0,00064	0,00072	0,00068	0,00005	0,00005	0,00005	0,00005	0,00046	0,00011
Odchylka od ref. hodnoty	0,00027	0,00025	0,00134	0,00243	0,00016	0,00042	0,00031	0,00027	0,00110	0,00108

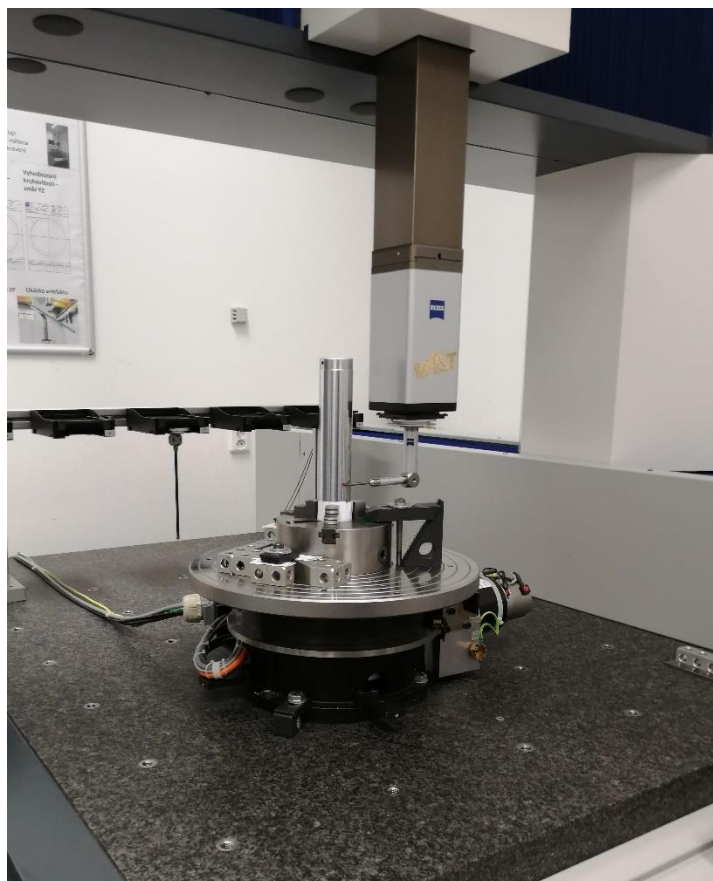
Na základě dosažených výsledků lze říci, že hodnoty průměrů jsou ve velkém rozpětí. Zároveň došlo také ke zvýšení odchylek od referenčních hodnot. Stále se však odchylky pohybují v řádu jednotek μm . Zvýšené odchylky od referenčních hodnot mohla způsobit vyšší rychlost měření nebo vliv otočného stolu na měření.

Měření dále pokračovalo měřením trnu umístěného excentricky na OS. Hodnota excentricity byla zvolena nejdříve 5 mm a byla zajištěna měrkou, vloženou v jednom směru před sklíčidlo (viz obr. 51 a 52). Tato metoda měření byla zvolena z důvodu simulace špatného upnutí součásti operátorem a jeho vlivu na přesnost měření.



Obrázek 51 a 52 - Zajištění excentricity trnu 5 mm

Nejprve byl umístěn trn do středu OS a byla zaměřena jeho osa, která byla následně uložena do CALYPSA. Poté proběhlo vyosení sklíčidla v jednom směru pomocí měrky a určení polohy trnu pomocí dlouhého snímače v horní a dolní části trnu, kde byly změřeny dvě kruhové dráhy v úhlovém rozsahu 380° a jeden bod na čele. Následně proběhla výměna snímače za snímač do boku. V CALYPSU byl načten program pro měření čtyř kružnic ve stanovených řezech a vyhodnocování ostatních charakteristik. Před spuštěním programu byla zvolena možnost načtení osy OS z předchozího měření. Po tomto nastavení proběhlo měření čtyř kružnic v jednotlivých řezech při simultánním otáčení OS (viz obr. 53).



Obrázek 53 - Měření trnu s excentricitou 5 mm

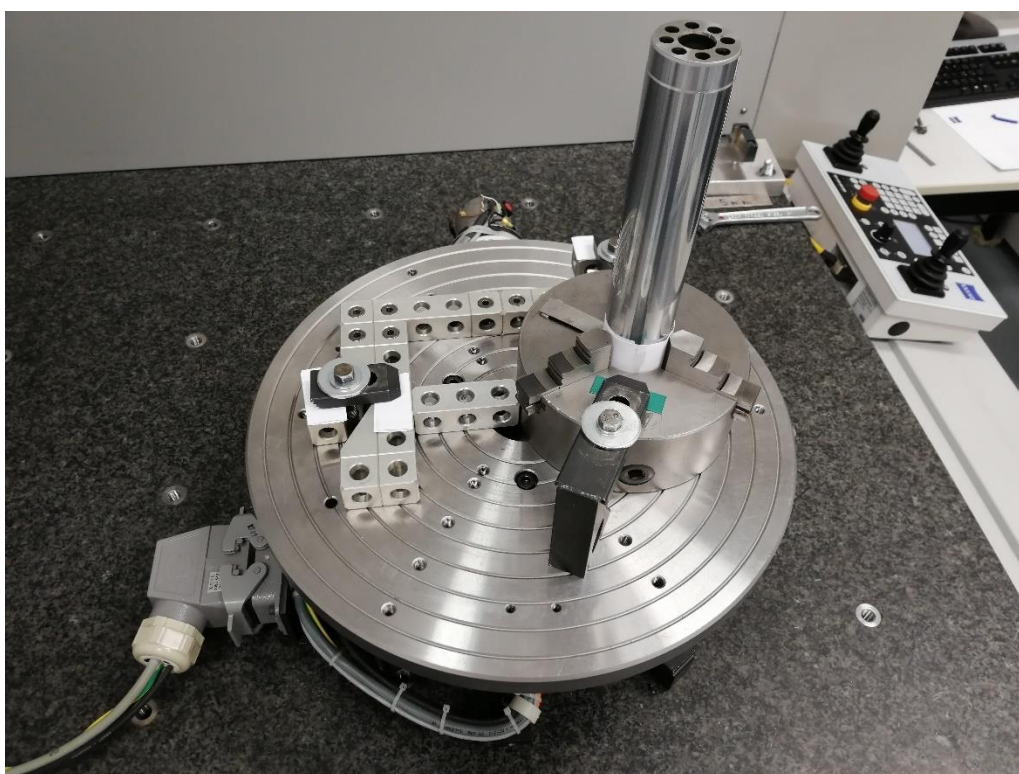
Měření probíhalo rychlostí 5 mm/s. Výsledky byly vyhodnoceny Gaussovou metodou a filtr byl nastaven na 50 v/ot. Výsledky jsou zaznamenány v tab. 9.

Tabulka 9 – Naměřené hodnoty na CMM Zeiss PRISMO pomocí otočného stolu se součástí umístěnou s excentricitou 5 mm [mm]

	Průměr -22 mm	Průměr -60 mm	Průměr -110 mm	Průměr -165 mm	Kruhovitost -22 mm	Kruhovitost -60 mm	Kruhovitost -110 mm	Kruhovitost -165 mm	Průměr Válce	Válcovitost
1	44,9713	44,9718	44,9728	44,9739	0,0006	0,0004	0,0004	0,0004	44,9724	0,0022
2	44,9713	44,9717	44,9726	44,9739	0,0006	0,0005	0,0004	0,0005	44,9724	0,0022
3	44,9715	44,9718	44,9727	44,9742	0,0006	0,0005	0,0005	0,0005	44,9725	0,0023
4	44,9715	44,9715	44,9727	44,9739	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	44,9724	0,0021
5	44,9716	44,9713	44,9729	44,9738	0,0006	0,0005	0,0004	0,0004	44,9724	0,0021
6	44,9715	44,9713	44,9729	44,9734	0,0006	0,0005	0,0004	0,0003	44,9723	0,0019
7	44,9708	44,9709	44,973	44,9738	0,0006	0,0005	0,0004	0,0004	44,9721	0,0023
8	44,9711	44,9708	44,9727	44,9732	0,0006	0,0004	0,0005	0,0004	44,972	0,0021
9	44,9712	44,9709	44,9727	44,9734	0,0005	0,0004	0,0004	0,0004	44,9721	0,0022
10	44,971	44,9709	44,9725	44,9738	0,0005	0,0004	0,0005	0,0004	44,9721	0,0025
Minimální hodnota	44,9708	44,9708	44,9725	44,9732	0,0005	0,0004	0,0004	0,0003	44,972	0,0019
Maximální hodnota	44,9716	44,9718	44,973	44,9742	0,0006	0,0005	0,0005	0,0005	44,9725	0,0025
Rozpětí	0,0008	0,0010	0,0005	0,0010	0,0001	0,0001	0,0001	0,0002	0,0005	0,0006
Aritmetický průměr	44,97128	44,97129	44,97275	44,97373	0,00057	0,00046	0,00044	0,00042	44,97227	0,00219
Směrodatná odchylka	0,00024	0,00038	0,00014	0,00029	0,00005	0,00005	0,00005	0,00006	0,00017	0,00015
Odchylka od ref. hodnoty	0,00038	0,00030	0,00112	0,00220	0,00004	0,00033	0,00029	0,00023	0,00067	0,00150

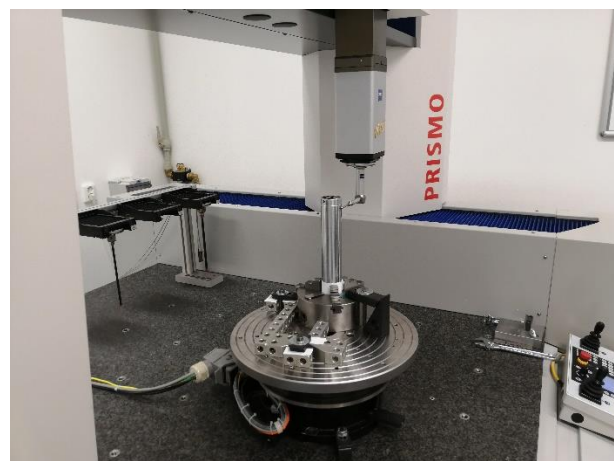
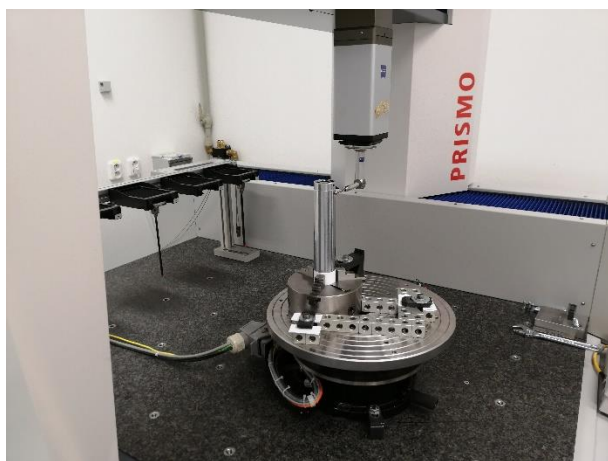
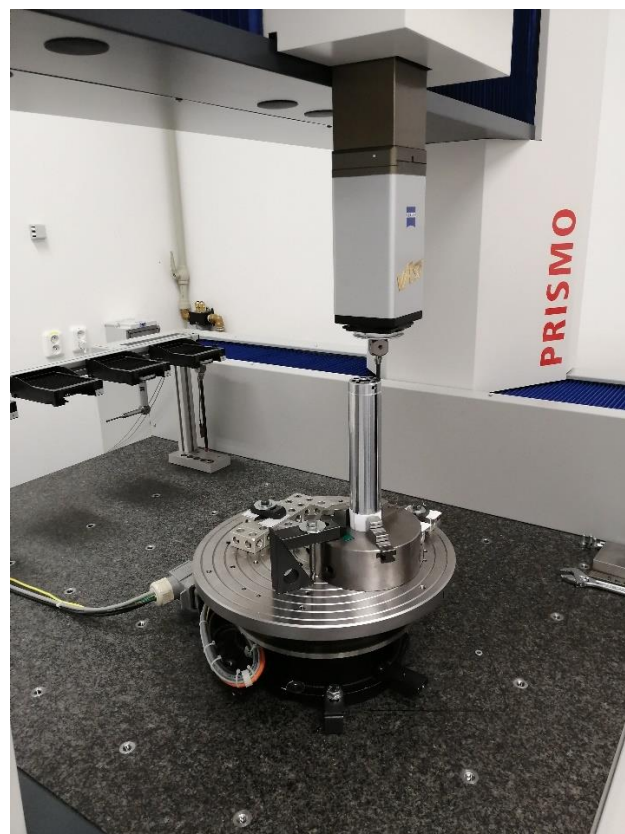
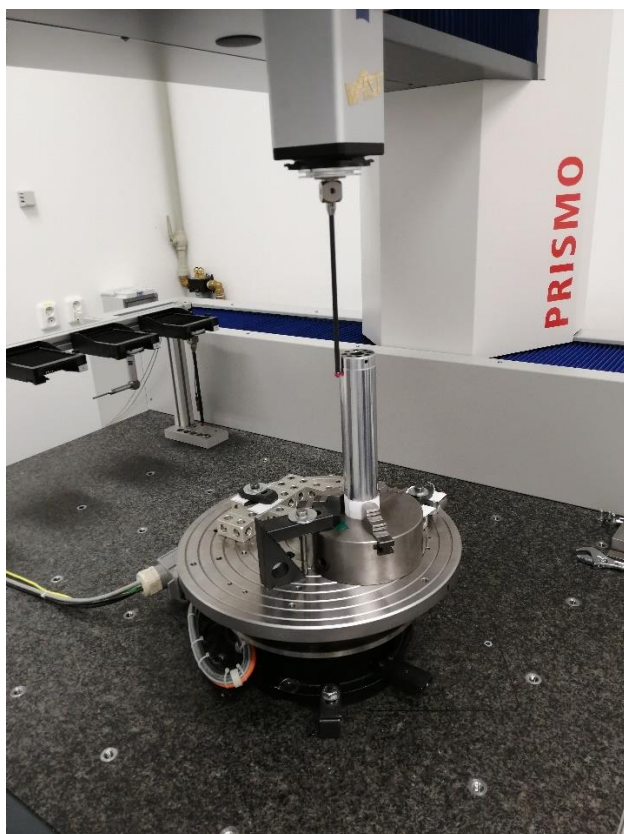
Naměřené hodnoty odchylek od referenčních hodnot jsou téměř totožné s naměřenými hodnotami z měření trnu v ose OS. Hodnoty se stále pohybují maximálně v řádech jednotek μm . Největší odchylka od referenční hodnoty je v případě průměru měřeném v hladině – 165 mm, a to $-2,2 \mu\text{m}$.

Po tomto měření následovalo téměř totožné měření s excentricitou měřeného trnu 75 mm. Excentricita byla zajištěna posunutím sklíčidla do jednoho směru pomocí hliníkového profilu o délce 75 mm (viz obr. 54). Toto měření simulovalo měření např.: excentrických čepů klikových hřídelí.



Obrázek 54 – Zajištění excentricity trnu 75 mm

Postup měření byl stejný jako v případě předchozí metody měření, pouze došlo k posunutí sklíčidla o 75 mm (viz obr. 55 až 58). Měření probíhalo opět rychlostí 5 mm/s. Výsledky byly opět vyhodnoceny Gaussovou metodou a filtr byl nastaven na 50 v/ot. Výsledky měření jsou uvedeny v tab. 10.



Obrázek 55 až 58 - Měření trnu s excentricitou 75 mm

Tabulka 10 – Naměřené hodnoty na CMM Zeiss PRISMO pomocí otočného stolu se součástí umístěnou s excentricitou 75 mm [mm]

	Průměr -22 mm	Průměr -60 mm	Průměr -110 mm	Průměr -165 mm	Kruhovitost -22 mm	Kruhovitost -60 mm	Kruhovitost -110 mm	Kruhovitost -165 mm	Průměr Válce	Válcovitost
1	44,9698	44,9695	44,971	44,9718	0,0009	0,0013	0,0011	0,0011	44,9705	0,0033
2	44,9698	44,9695	44,9711	44,9722	0,0011	0,0011	0,0011	0,0012	44,9706	0,0036
3	44,9697	44,9695	44,9708	44,9717	0,0011	0,0012	0,0011	0,0012	44,9704	0,0033
4	44,9698	44,9695	44,9711	44,9719	0,0012	0,0011	0,0012	0,0012	44,9706	0,0033
5	44,9699	44,9695	44,9712	44,9718	0,0012	0,001	0,0011	0,0012	44,9706	0,0033
6	44,9701	44,9697	44,9717	44,972	0,0011	0,0011	0,0011	0,001	44,9709	0,0031
7	44,9698	44,9695	44,9713	44,9714	0,0011	0,0012	0,0011	0,0012	44,9705	0,0031
8	44,9698	44,9693	44,9713	44,9717	0,0011	0,0012	0,0012	0,0012	44,9705	0,0033
9	44,9698	44,9693	44,9711	44,9715	0,0011	0,0011	0,001	0,0011	44,9704	0,0032
10	44,9699	44,9693	44,9707	44,9712	0,001	0,0012	0,0011	0,0012	44,9703	0,0031
Minimální hodnota	44,9697	44,9693	44,9707	44,9712	0,0009	0,001	0,001	0,001	44,9703	0,0031
Maximální hodnota	44,9701	44,9697	44,9717	44,9722	0,0012	0,0013	0,0012	0,0012	44,9709	0,0036
Rozpětí	0,0004	0,0004	0,0010	0,0010	0,0003	0,0003	0,0002	0,0002	0,0006	0,0005
Aritmetický průměr	44,96984	44,96946	44,97113	44,97172	0,00109	0,00115	0,00111	0,00116	44,97053	0,00326
Směrodatná odchylka	0,00010	0,00012	0,00026	0,00028	0,00008	0,00008	0,00005	0,00007	0,00016	0,00014
Odchylka od ref. hodnoty	0,00182	0,00213	0,00050	0,00019	0,00056	0,00102	0,00096	0,00097	0,00107	0,00257

Z naměřených výsledků lze pozorovat zvýšení odchylek od referenčních hodnot u průměrů v řezech -22 mm a -60 mm na hodnoty přibližně 2 μm . Hodnoty odchylek kruhovitostí se pohybují do 1 μm , což je uspokojivý výsledek. Hodnota odchylky válcovitosti se však naopak zvýšila na hodnotu 2,5 μm .

4.2.4 Porovnání jednotlivých metod

V následující tabulce jsou porovnány jednotlivé hodnoty odchylek od referenčních hodnot všech metod měření. Zeleně jsou vyznačeny nejmenší naměřené hodnoty a červeně jsou vyznačeny nejvyšší hodnoty.

Tabulka 11 - Porovnání všech metod měření [mm]

	Referenční hodnoty [mm]	PRISMO dlouhý snímač	PRISMO dva snímače	PRISMO s OS v ose	PRISMO s OS, excentr 5 mm	PRISMO s OS, excentr 75 mm
Průměr -22 mm	44,97166	0,00026	0,00021	0,00027	0,00038	0,00182
Průměr -60 mm	44,97159	0,00029	0,00017	0,00025	0,0003	0,00213
Průměr -110 mm	44,97163	0,00024	0,00009	0,00134	0,00112	0,0005
Průměr -165 mm	44,97153	0,00019	0,00005	0,00243	0,0022	0,00019
Kruhovitost -22 mm	0,00053091	0,00019	0,00007	0,00016	0,00004	0,00056
Kruhovitost -60 mm	0,00012955	0,00021	0,0004	0,00042	0,00033	0,00102
Kruhovitost -110 mm	0,00015288	0,00018	0,0003	0,00031	0,00029	0,00096
Kruhovitost -165 mm	0,0001855	0,00020	0,0004	0,00027	0,00023	0,00097
Průměr Válce	44,9716	0,00022	0,0001	0,00110	0,00067	0,00107
Válcovitost	0,00069	0,00011	0	0,00108	0,0015	0,00257

Po vyhodnocení naměřených hodnot lze říci, že z hlediska hodnot průměrů byla nejpresnější metoda měření bez OS dvěma snímači proti sobě, kde se všechny odchylky pohybovaly do hodnoty 0,21 μm . Nejmenší odchylka byla naměřena v řezu -165 mm s hodnotou 0,05 μm od referenční hodnoty. Největší hodnota odchylky byla naměřena v řezu -22 mm s hodnotou 0,21 μm . Naopak nejméně přesné metody z hlediska měření

průměrů byly metoda s OS a součástí vyosenou o 75 mm v případě hladin -22 mm a -60 mm a metoda s OS se součástí v ose v případě hladin -110 mm a -165 mm.

Z hlediska kruhovitostí lze považovat jako nejpřesnější metodu měření s jedním snímačem bez OS, kde se hodnoty odchylek od referenčních hodnot pohybovaly kolem 0,2 μm . Ovšem nejmenší hodnota odchylky byla naměřena v řezu -22 mm metodou s OS a součástí vyosenou o 5 mm, a to 0,039 μm . Ostatní hodnoty kruhovitostí měřené touto metodou tak přesné nebyly. Za nejméně přesnou metodu pro vyhodnocení kruhovitostí lze považovat metodu s OS a součástí vyosenou o 75 mm, kde se hodnoty odchylek od referenčních hodnot pohybovaly kolem 1 μm .

Jelikož průměr válce byl vyhodnocován z naměřených průměrů kružnic, je tedy za nejvhodnější metodu považována metoda bez OS se dvěma snímači proti sobě.

Na základě dosažených výsledků lze dále říci, že i z hlediska odchylek od referenčních hodnot pro měření válcovitosti je nejvhodnější metoda bez OS se dvěma snímači proti sobě. Naměřená odchylka byla nulová a hodnota válcovitosti vycházela stejná jako referenční. Nejméně přesná byla metoda s OS a součástí vyosenou o 75 mm, kdy byla naměřena odchylka od referenční hodnoty 2,57 μm .

Předpokladem před měřením bylo, že nejpřesnější bude metoda bez OS s jedním snímačem shora. Toto tvrzení bylo potvrzeno pouze u tří kruhovitostí a ostatní měřené charakteristiky byly změřeny přesněji jinou metodou. Důvodem mohou být průhyby snímače způsobené jeho délkou nebo vyšší rychlost měření. Druhým předpokladem před měřením bylo, že metoda měření s OS a součástí vyosenou o 75 mm bude nejméně přesná, což se potvrdilo. Důvodem je pravděpodobně excentricita součásti, avšak obecně méně přesné měření s pomocí otočného stolu mohlo být způsobeno chybou indikace OS v tangenciálním směru. Na základě naměřených výsledků lze konstatovat, že celkově nejpřesnější byla metoda měření bez OS se dvěma snímači proti sobě. Tohoto výsledku mohlo být dosaženo vlivem snížení rychlosti měření z důvodu vibrace snímačů. Lze tedy říci, že pro měření např.: klikových hřídelí a jejich geometrie, by bylo vhodnější využít metodu měření s dvěma snímači proti sobě.

Pokud mezi sebou bude porovnána metoda jedním snímačem shora a metoda dvěma snímači proti sobě, výsledkem budou odchylky v řádech desetin μm . Odchylky od referenčních hodnot obou metod se pohybují opět v řádech desetin μm . Lze tedy říci, že

bylo dosaženo velmi přesných a srovnatelných výsledků pomocí obou metod. Při srovnání metod měření s OS se součástí v ose a s OS se součástí vyosenou o 5 mm, výsledkem jsou odchylky pohybující se opět v řádech desetin μm . Odchylky od referenčních hodnot v případě obou metod se pohybují v řádech jednotek μm , kdy maximální hodnota odchylky je 2,4 μm . Za nejméně přesnou metodu měření se dá z hlediska naměřených výsledků považovat měření s OS a součástí vyosenou o 75 mm. Naměřené hodnoty odchylek od referenčních hodnot se pohybují v jednotkách μm , kdy nejvyšší odchylka dosahuje hodnoty 2,5 μm . Je však nutné v tomto případě přihlídnout k oscilaci měřeného trnu v průběhu měření a z hlediska absolutního měřítka je odchylka 2,5 μm přijatelnou hodnotou.

Z naměřených výsledků vyplývá, že rozdíly mezi jednotlivými metodami jsou minimální a použitý stroj Zeiss PRISMO měří s vysokou přesností.

4.3 Vliv okolní teploty na zaměření osy OS

Druhá část byla zaměřena na prozkoumání vlivu změny okolní teploty na zaměření osy OS a následnou přesnost měření. K tomuto účelu byly použity metody měření polohy středů a sousostí.

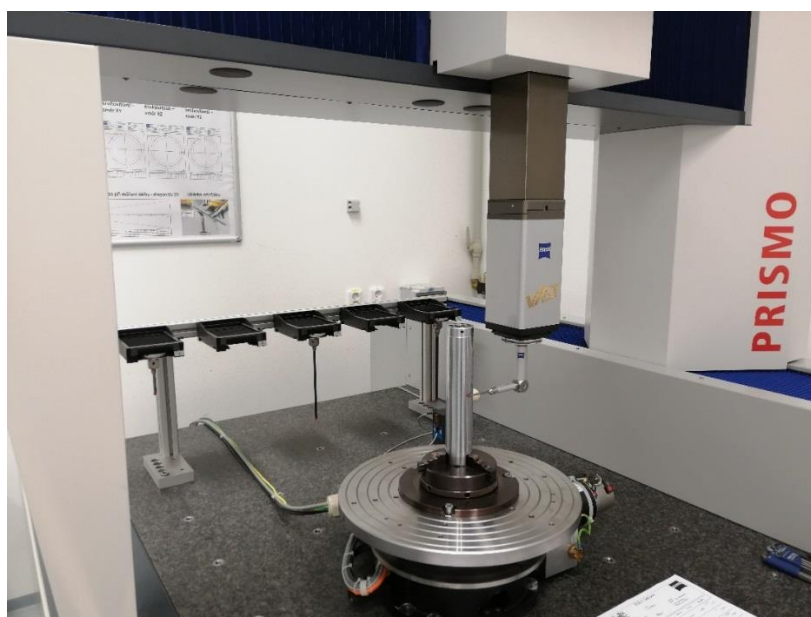
4.3.1 Metoda měření polohy středů kružnic

Tato metoda vycházela z metody měření součástí jedním snímačem s pomocí OS bez excentricity. Nejprve byla součást pevně upnuta tříčelistovým sklíčidlem do osy OS (viz obr. 59). Poté pomocí klimatizace proběhlo stabilizování teploty na 21° C. Tato teplota byla ponechána v laboratoři do následujícího dne, aby se teplotně stabilizovaly všechny části CMM.



Obrázek 59 - Upnutí trnu na OS při metodě měření polohy středů

Následující den pokračovalo měření kalibrační snímačů při stabilní teplotě. Referenčním snímačem byla zaměřena poloha kalibrační koule a následně překalibrován dlouhý a kolmý snímač. Dále proběhlo dlouhým snímačem určení hrubé polohy OS, zaměřením jeho základní desky čtyřmi body (viz obr 59). Poté byl použit stejný program pro zaměření osy OS metodou s válcem, který byl popsán v předešlých metodách měření. Po zaměření osy OS proběhla výměna dlouhého snímače za snímač kolmý a spuštění programu pro měření kružnic pomocí OS (viz obr. 60).



Obrázek 60 - Měření poloh středů kružnic

V programu byl umístěn z.s.s. do zaměřené osy OS a byly přidány další vyhodnocované charakteristiky, tzn. odchylky poloh středů jednotlivých kružnic v osách X a Y. Jako referenční hodnota polohy byl nastaven z.s.s. umístěný na osu OS. Výsledky měření jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 12 - Naměřené hodnoty poloh středů kružnic při teplotě 21 °C [mm]

	Celková odchylka	Odchylka v ose X	Odchylka v ose Y
Kružnice -22 mm	0,0162	0,0069	0,0042
Kružnice -60 mm	0,0159	0,0068	0,0041
Kružnice -110 mm	0,0163	0,007	0,0042
Kružnice -165 mm	0,0159	0,0067	0,0043

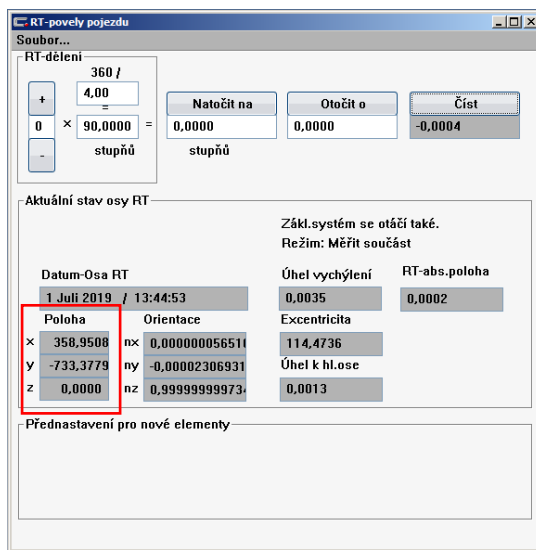
Z tabulky lze vyčíst, že celkové odchylky poloh středů se pohybují kolem hodnoty 16 μm , zatímco odchylky v ose X se pohybují kolem 7 μm a v ose Y jsou hodnoty kolem 4 μm .

Měření dále pokračovalo nastavením okolní teploty na 23° C. Po dosažení této teploty byl opět spuštěn program s měřením čtyř kružnic, tentokrát však bez zaměření osy před měřením. Osa OS byla načtena z předchozího měření při 21° C. Porovnání výsledků měření je v následující tabulce.

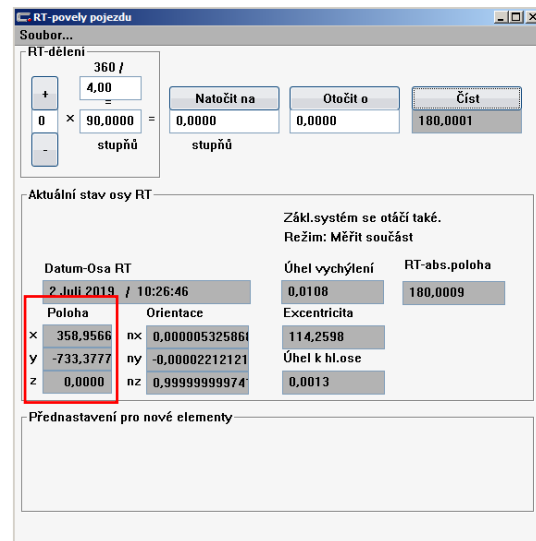
Tabulka 13 - Naměřené hodnoty poloh středů kružnic při teplotě 21 °C a 23 °C [mm]

	Celková odchylka		Odchylka v ose X		Odchylka v ose Y	
	21 °C	23 °C	21 °C	23 °C	21 °C	23 °C
Kružnice -22 mm	0,0162	0,0006	0,0069	0,0001	0,0042	0,0003
Kružnice -60 mm	0,0159	0,001	0,0068	0,0003	0,0041	0,0004
Kružnice -110 mm	0,0163	0,0012	0,007	0,0004	0,0042	0,0004
Kružnice -165 mm	0,0159	0,0013	0,0067	0,0004	0,0043	0,0005

Na základě výsledků lze říci, že hodnota odchylek poloh středů od osy OS se při zvýšení teploty snížila. Cílem experimentu však bylo prokázat, zda má změna okolní teploty vliv na zaměření osy a na následnou přesnost měření. Z výsledků je patrné, že poloha osy OS se vlivem změny okolní teploty změnila (viz obr. 61 a 62), čímž se změnily i polohy středů měřených kružnic.



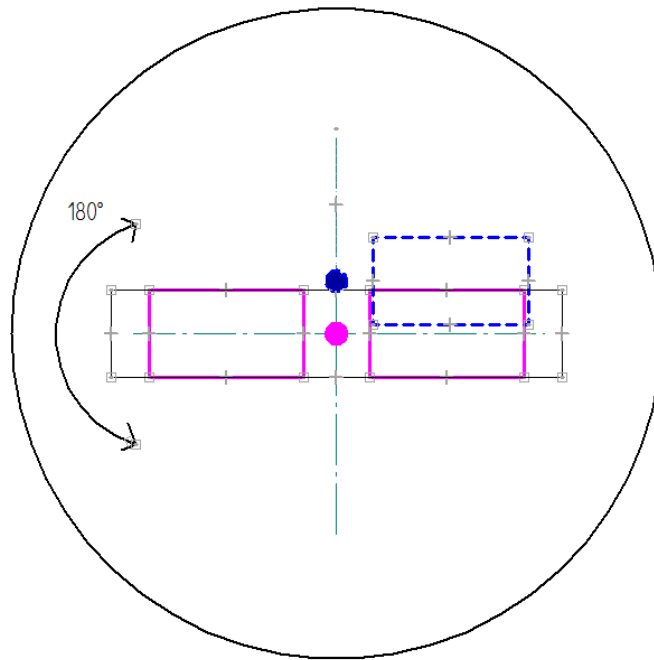
Obrázek 61 - Poloha osy při teplotě 21 °C



Obrázek 62 - Poloha osy při teplotě 23 °C

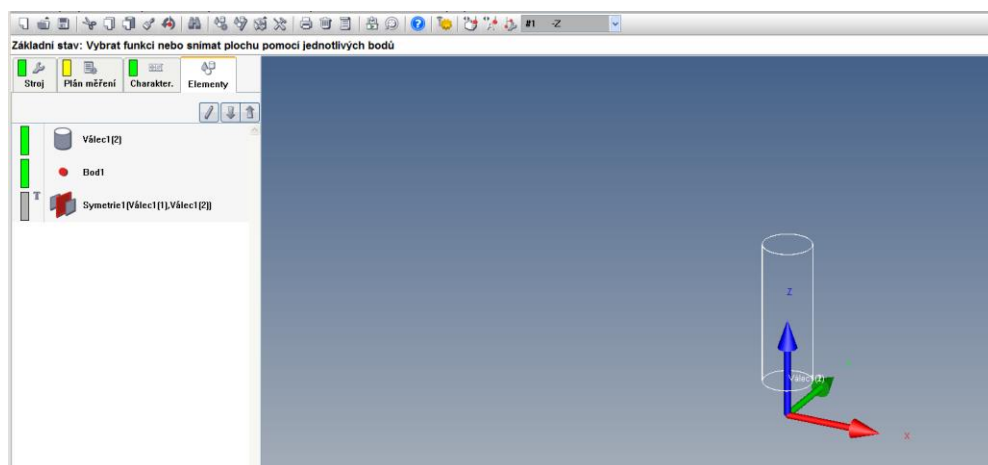
4.3.2 Metoda měření sousostí

Druhou úlohou, která měla ověřit vliv změny okolní teploty na zaměření osy OS, byla metoda měření sousostí a rovnoběžnosti válců. Tato metoda vycházela z úvahy, že měřený trn je přesně vyrobený. Pokud tedy bude bezprostředně před měřením zaměřena osa OS (na obr. 63 znázorněna růžovým bodem) a následně změřen válec na jedné straně trnu (na obr. 63 znázorněn růžovou barvou), měl by po otočení OS o 180° měřený válec na druhé straně trnu zaujmout stejnou pozici jako válec předchozí. Výsledná sousost a rovnoběžnost by tedy měla být nulová. Pokud se však změní okolní teplota, změní se i poloha osy OS, tedy i středu rotace (na obr. 63. znázorněna modrou barvou). Jestliže tedy bude změřen válec na jedné straně trnu (růžová barva) a následně otočeno OS o 180° podle osy se změněnou polohou (modrá barva), výsledná poloha válce na druhé straně trnu se po otočení změní (jak je znázorněno modrou čárkovanou čarou na obr. 63) a hodnota sousostí se zvýší. Hodnota rovnoběžnosti by se však zvyšovat neměla.



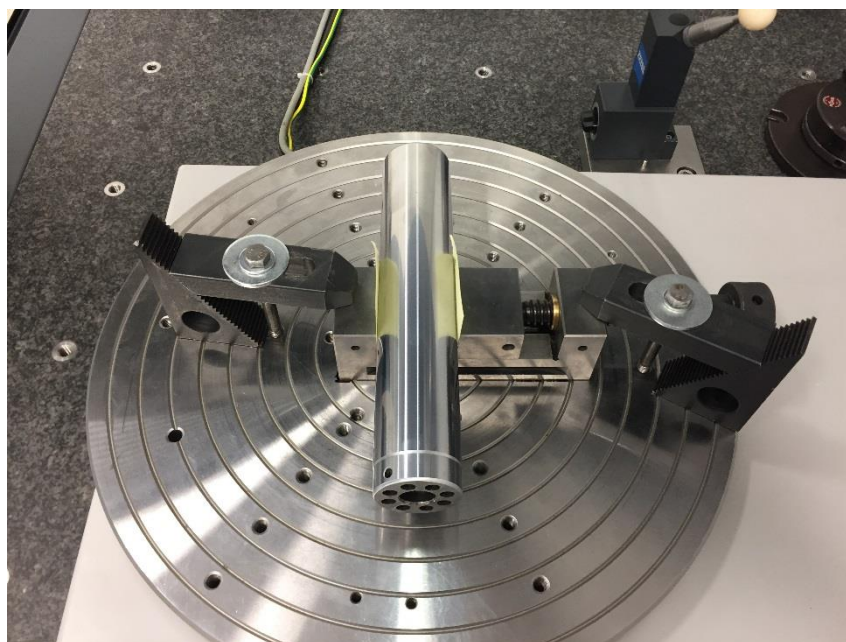
Obrázek 63 - Metoda měření souososti

Před měřením byl nejdříve upnut válec do osy OS ve svislém směru a opět proběhla stabilizace okolní teploty na 21,1 °C. Následně při této teplotě byla zaměřena kalibrační koule referenčním snímačem a proběhla kalibrace dlouhého snímače i snímačů kolmých do směrů X a Y. Dlouhým snímačem byla následně určena hrubá poloha OS, a to zaměřením jeho základní desky čtyřmi body. Následovalo přesné zaměření osy OS metodou s válcem pomocí nově vytvořeného programu (viz obr. 64).



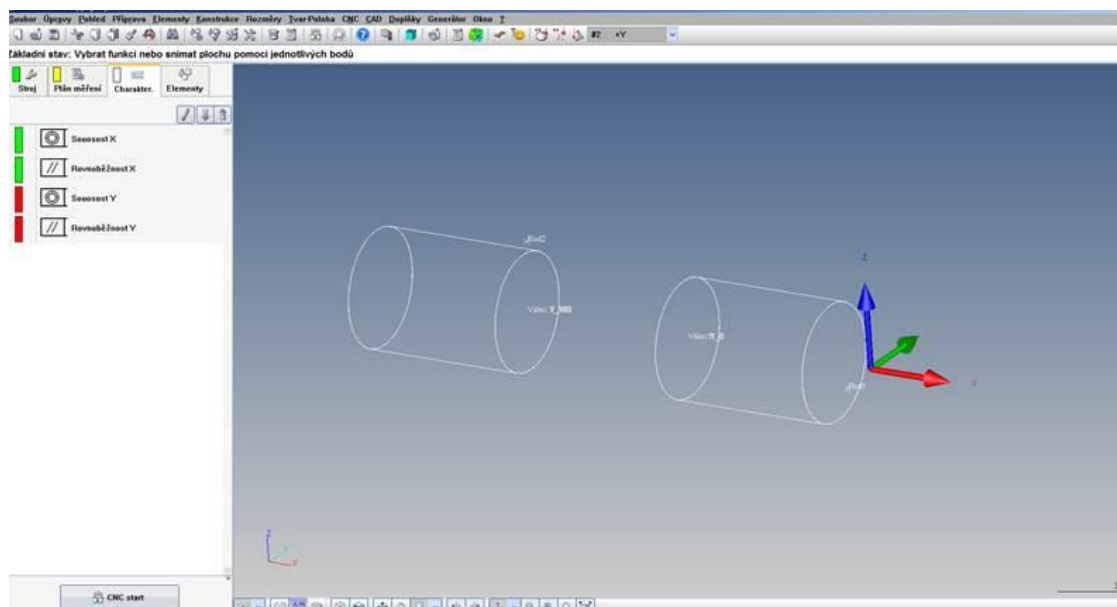
Obrázek 64 – Program pro zaměření osy OS

Následně bylo zapotřebí pro samotné měření řádně upnout měřený trn do vodorovné polohy pomocí svěráku a upínek (viz obr. 65).



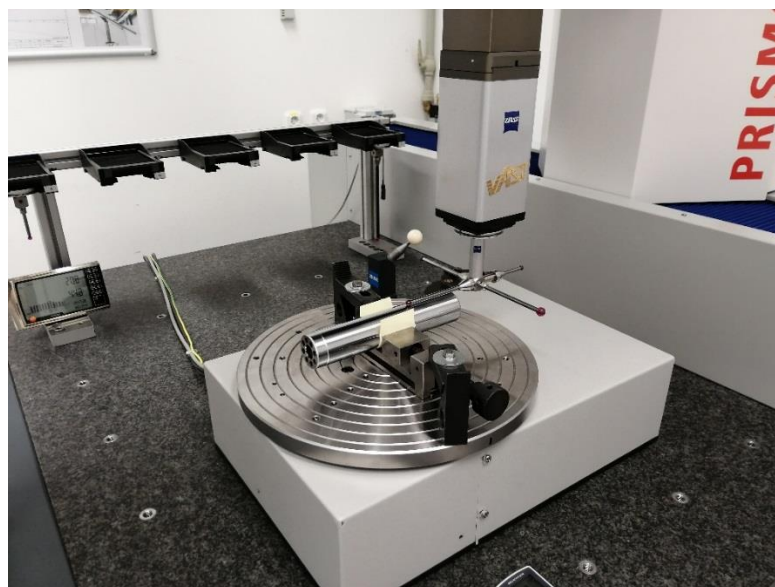
Obrázek 65 - Upnutí trnu do vodorovné polohy

Po upnutí trnu proběhla výměna dlouhého snímače za snímače kolmé do směrů X i Y a v CALYPSU byl načten nově vytvořený program, který sloužil pro měření metody sousostí (viz obr 66).



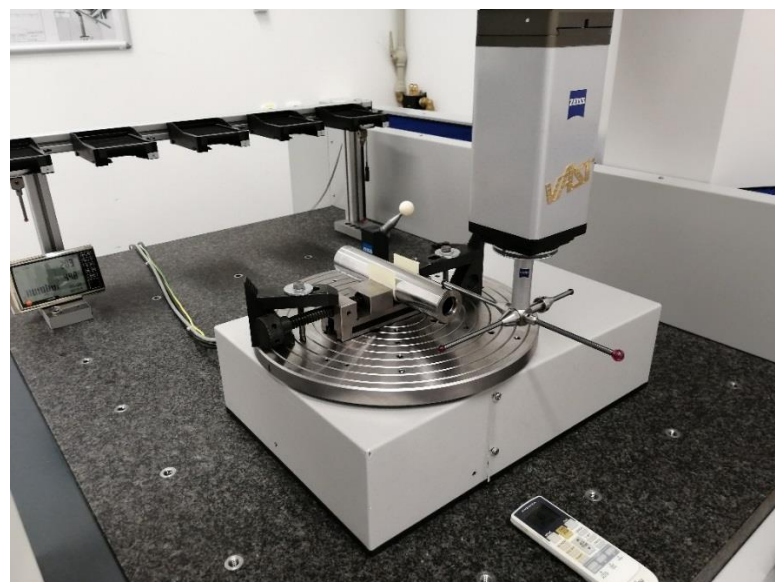
Obrázek 66 - Program pro měření metody sousostí

Pomocí programu byly měřeny v nulové poloze stolu (úhel otočení stolu 0°) na jedné polovině trnu, ve směru osy X, dvě kruhové dráhy v rozsahu 380° , z nichž byl vytvořen element válec. Poté se OS otočil o 180° a měření se opakovalo na druhé straně trnu (viz obr. 67).



Obrázek 67 - Měření trnu na straně "2" ve směru osy X

Následně bylo otočeno s OS o 90° a proběhlo měření válce stejnou strategií na první straně trnu ve směru osy Y (viz obr. 68).



Obrázek 68 – Měření trnu na straně „1“ ve směru osy Y

Dále proběhlo otočení OS o 180° a měřil se válec na druhé straně trnu ve směru osy Y stejným způsobem (viz obr 69).

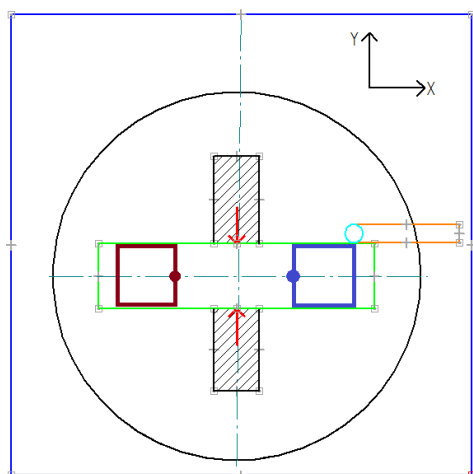


Obrázek 69 - Měření trnu na straně „2“ ve směru osy Y

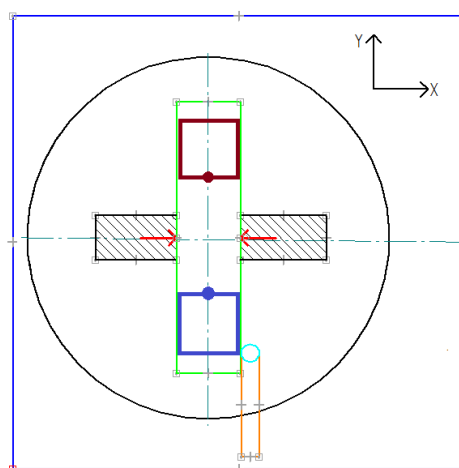
Nakonec proběhlo vyhodnocení sousostí a rovnoběžnosti ve směrech X a Y těchto dvou válců. Referenčním válcem, ke kterému se vždy vztahovaly hodnoty sousostí i rovnoběžnosti, byl válec na první straně trnu označené jako „1“ (viz popis metody v kapitole 4).

Na obr. 67-69, je vidět konfigurace snímačů do všech stran. Pro měření však byly použity pouze snímače „2“ a „5“ (označené na obr. 69). Ostatní snímače byly použity pouze na vyvážení konfigurace, jelikož snímače měly vysokou hmotnost a hrozilo poničení snímací hlavy.

Vyhodnocení této metody měření proběhlo celkovou sousostí a rovnoběžností válců ve směru X a Y. Dále také vyhodnocením souřadnic podstav jednotlivých válců (na obr. 70 a 71 vyobrazených tečkou) v daných směrech. Pokud tedy byly válce měřeny ve směru osy X (viz obr. 70), proběhlo vyhodnocení souřadnic podstav válců ve směrech osy Y a Z. Pokud byly válce měřeny ve směru osy Y (viz obr. 71), proběhlo vyhodnocení souřadnic podstav válců ve směrech osy X a Z. Obr. 70 a 71 znázorňují pohled na měření shora, tedy ve směru osy Z.



Obrázek 70 – Vyhodnocení poloh středů ve směru osy X



Obrázek 71 - Vyhodnocení poloh středů ve směru osy Y

Měření probíhalo rychlostí 5 mm/s. Vyhodnocení pak Gaussovou metodou a filtr výsledků byl nastaven na 50 v/ot. Hodnoty odchylek jsou zaznamenány v tabulce 14 a 15.

Tabulka 14 - Hodnoty odchylek měření souososti ve směru osy X při 21,1 °C [mm]

	Celková odchylka [mm]	Odchytky souřadnic válce "1"		Odchytky souřadnic válce "2"	
		Ve směru osy Y	Ve směru osy Z	Ve směru osy Y	Ve směru osy Z
Souosost ve směru osy X	0,0044	-0,0017	-0,0006	-0,0017	-0,0013
Rovnoběžnost ve směru osy X	0,0007				

Tabulka 15 - Hodnoty odchylek měření souososti ve směru osy Y při 21,1 °C [mm]

	Celková odchylka [mm]	Odchytky souřadnic válce "1" [mm]		Odchytky souřadnic válce "2" [mm]	
		Ve směru osy X	Ve směru osy Z	Ve směru osy X	Ve směru osy Z
Souosost ve směru osy Y	0,0047	-0,0014	-0,0007	-0,0013	0,002
Rovnoběžnost ve směru osy Y	0,0013				

Jelikož bylo vycházeno z předpokladu, že měřená součást je přesně vyrobena, měly být hodnoty souosostí a rovnoběžností obou válců nulové. Tento předpoklad byl potvrzen naměřenými hodnotami rovnoběžnosti trnu, které se pohybovaly okolo 1 μm . Odchytky souosostí se však pohybují v obou případech měření okolo 4,5 μm . Čím je tato chyba způsobena i přesto, že došlo před měřením k zaměření osy OS, by mohlo být předmětem k dalšímu měření. Nicméně všechny odchytky pro měření ve směru os X a Y se téměř shodují, tudíž lze toto měření považovat za přesné.

Po uplynutí přibližně čtyř hodin od zaměření osy se v laboratoři zvedla okolní teplota o 0,5 $^{\circ}\text{C}$. Následně bylo celé měření zopakováno, ale bez zaměřování osy před měřením. Osa OS byla načtena z předchozího měření při teplotě 21,1 $^{\circ}\text{C}$. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab. 16 a 17.

Tabulka 16 - Hodnoty odchylek měření souososti ve směru osy X při 21,6 $^{\circ}\text{C}$ [mm]

	Celková odchylka [mm]	Odchytky souřadnic válce "1"		Odchytky souřadnic válce "2"	
		Ve směru osy Y	Ve směru osy Z	Ve směru osy Y	Ve směru osy Z
Souosost ve směru osy X	0,0039	-0,0012	-0,0006	-0,0013	-0,0014
Rovnoběžnost ve směru osy X	0,0008				

Tabulka 17 - Hodnoty odchylek měření souososti ve směru osy Y při 21,6 $^{\circ}\text{C}$ [mm]

	Celková odchylka [mm]	Odchytky souřadnic válce "1" [mm]		Odchytky souřadnic válce "2" [mm]	
		Ve směru osy X	Ve směru osy Z	Ve směru osy X	Ve směru osy Z
Souosost ve směru osy Y	0,01	-0,0048	0,0005	-0,0047	0,0016
Rovnoběžnost ve směru osy Y	0,0011				

Z výsledků je patrné, že hodnota rovnoběžnosti válců je stejná jako v případě předchozího měření a pohybuje se okolo 1 μm , čímž je potvrzen předpoklad, že měřený trn je přesně vyrobený. Zatímco celková odchylka souososti při měření ve směru osy X klesla a jednotlivé odchytky poloh středů podstav válců zůstaly téměř stejné, při měření ve směru osy Y se celková odchylka souososti výrazně zvýšila na hodnotu 10 μm . U výsledků měření ve směru osy Y bylo zaznamenáno také zvětšení odchylek souřadnic

středů podstav válců ve směru osy X přibližně o 3 μm . Ve směru osy Z zůstaly odchylky podobné.

Následující den byla pomocí klimatizace teplota snížena o 0,4 $^{\circ}\text{C}$ od původní teploty, tzn. na teplotu 20,7 $^{\circ}\text{C}$. Při této teplotě proběhlo celé měření znovu a opět s načtením osy OS z původního měření při 21,1 $^{\circ}\text{C}$. Výsledky měření jsou uvedeny v tab. 18 a 19.

Tabulka 18 - Hodnoty odchylek měření sousosti ve směru osy X při 20,7 $^{\circ}\text{C}$ [mm]

	Celková odchylka [mm]	Odchylky souřadnic válce "1"		Odchylky souřadnic válce "2"	
		Ve směru osy Y	Ve směru osy Z	Ve směru osy Y	Ve směru osy Z
Souosost ve směru osy X	0,0025	0	-0,0005	-0,0001	-0,0013
Rovnoběžnost ve směru osy X	0,0008				

Tabulka 19 - Hodnoty odchylek měření sousosti ve směru osy Y při 20,7 $^{\circ}\text{C}$ [mm]

	Celková odchylka [mm]	Odchylky souřadnic válce "1" [mm]		Odchylky souřadnic válce "2" [mm]	
		Ve směru osy X	Ve směru osy Z	Ve směru osy X	Ve směru osy Z
Souosost ve směru osy Y	0,0049	-0,0022	0,0004	-0,0019	0,0016
Rovnoběžnost ve směru osy Y	0,0012				

Poté, co byla snížena teplota a neproběhlo zaměření osy OS, se celková odchylka sousosti při měření ve směru osy X snížila na hodnotu 2,5 μm . Odchylky souřadnic středů podstav válců ve směru osy Y se při tomto měření snížily na nulovou hodnotu. Odchylky poloh ve směru osy Z se nezměnily. Lze tedy konstatovat, že snížení okolní teploty mělo na měření ve směru osy X pozitivní vliv.

Při měření ve směru osy Y bylo po snížení teploty dosaženo zhruba stejných hodnot celkové sousosti jako při původním měření při 21,1 $^{\circ}\text{C}$. Avšak odchylky souřadnic středů podstav válců se v porovnání s původním měřením zvýšily přibližně o 1 μm . Polohy středů ve směru osy Z se opět výrazně nezměnily.

Cílem této úlohy bylo opět ověřit vliv okolní teploty na zaměření osy OS a následnou přesnost. Z naměřených výsledků je patrné, že i malá změna teploty, tzn. řádově v desetinách °C, má značný vliv na zaměření osy OS a její poloha byla změněna, což dokazují zvýšené odchylky sousostí válců. Pokud by okolní teplota neměla vliv na zaměření osy OS a přesnost měření, dosahovaly by odchylky sousostí stále stejných hodnot.

Dále bylo touto úlohou prokázáno, že na přesnost měření má velký vliv i směr snímání měřené součásti. Dokazují to naměřené hodnoty souřadnic středů podstav válců. Při měření trnu ve směru osy X se při změně teploty polohy středů v ose Y výrazně neměnily. Avšak při měření trnu ve směru osy Y se při změně teploty polohy středů v ose X výrazně měnily. Při zvýšení teploty se původní hodnoty $-1,4$ a $-1,3$ μm změnilly na hodnoty $-4,8$ a $-4,7$ μm . Při snížení teploty se odchylky poloh středů ve směru osy X z původních hodnot také zvýšily, a to na hodnoty $-2,2$ a $-1,9$ μm .

Tento jev byl způsoben vlivem rozdílných materiálů pojezdů. Pojezd, který zaručuje pohyb CMM v ose Y je granitový a má velmi malou tepelnou roztažnost. Proto hodnoty souřadnic středů podstav válců v ose Y byly stále porovnatelné. Avšak materiál příčnicku, který zajišťuje pohyb CMM ve směru osy X je hliník, který má daleko vyšší tepelnou roztažnost. Proto se odchylky poloh středů podstav válců ve směru osy X při změně okolní teploty zvyšovaly.

Z naměřených hodnot lze tedy konstatovat, že pokud se bude jednat o měření s využitím pasivního režimu OS, kde se budou měřit polohové charakteristiky na více stranách měřené součásti vůči sobě (např.: sousost, poloha, kolmost a jiné,) je nutné před měřením každého dílu znovu zaměřit osu OS, aby bylo dosaženo přesného měření. Pokud však půjde o měření polohových charakteristik pouze na jedné straně měřené součásti (např.: rovnoběžnost dvou otvorů vedle sebe), zaměření osy OS před každým měřením není pro přesné měření nutné.

5 Závěr

Cílem této práce bylo uvedení do problematiky měření CMM s využitím otočného stolu jako čtvrtou osou. Dále pak navržení modelových úloh představující reálné případy z praxe pro porovnání a vyhodnocení vlivu otočného stolu a změny okolní teploty na přesnost měření.

V úvodní části této práce byly popsány výhody a nevýhody použití OS jako čtvrté osy pro měření na CMM. Dále pak konstrukce, využití a ověřování přesnosti OS. Následně byla detailněji popsána příprava pro měření, určení polohy a zaměření osy OS.

V druhé části této práce byly navrženy modelové úlohy představující reálné případy v praxi. V první části úloh byly mezi sebou porovnávány jednotlivé metody měření bez využití a s využitím OS a zároveň ověřen jeho vliv na přesnost měření. Druhá část modelových úloh byla zaměřena na problematiku změny okolní teploty a zaměřování osy OS a následného vlivu na přesnost měření.

Pro vyhodnocení vlivu OS na přesnost měření bylo navrženo 5 úloh (metod) měření, z nichž dvě byly bez využití OS a tři s využitím OS. Všechny metody měření byly měřeny desetkrát kvůli věrohodnosti a statistickému vyhodnocení. Z naměřených výsledků lze konstatovat, že rozdíly mezi jednotlivými metodami byly minimální a pohybovaly se v řádech jednotek μm . Dále lze z naměřených hodnot říci, že nejpřesnější metodou měření byla metoda s dvěma snímači proti sobě bez použití OS. Naopak nejméně přesná metoda měření byla s použitím OS a součástí vyosenou o 75 mm. Lze tedy říci, že OS použitý pro měření má nepříznivý vliv na přesnost měření, jelikož nejhorších výsledků se dosahovalo právě při použití OS, a to při všech metodách měření. Nicméně naměřené odchylky od referenčních hodnot se pohybovaly maximálně do 2,5 μm . Závěrem lze tedy říci, že použitý stroj Zeiss PRISMO měří s vysokou přesností.

Pro ověření vlivu změny okolní teploty na zaměření osy a následnou přesnost OS byly navrženy dvě úlohy. První úloha zkoumala změny polohy souřadnic středů kružnic v jednotlivých řezech trnu před změnou okolní teploty a zaměřením osy OS před měřením a po změně okolní teploty s načtením osy OS z předchozího měření. Druhá úloha byla navržena na principu vyhodnocení sousostí a rovnoběžností dvou válců na stejném trnu a změn hodnot odchylek těchto polohových charakteristik při změně okolní teploty.

Z naměřených výsledků obou metod lze říci, že i drobná změna okolní teploty v řádech desetin °C má vliv na polohu zaměřené osy OS. Aby tedy při vyhodnocování polohových charakteristik bylo dosaženo vždy přesných výsledků, je nezbytné zaměřit osu OS vždy před každým měřením.

Závěrem je nutné zdůraznit, že všechny naměřené výsledky se vztahují na použité zařízení pro měření, konkrétněji pak na CMM Zeiss PRISMO a OS RT-01, nacházející se na fakultě strojní ČVUT v Praze. Aby se tyto výsledky mohly zobecnit, bylo by zapotřebí všechny úlohy změřit opakovaně a za využití i jiného CMM a zároveň i jiného, přesnějšího OS. Tyto úlohy byly navrženy především s cílem navržení obecné metodiky testování a porovnání jednotlivých metod měření, ať už s využitím nebo bez využití OS, použitelné i pro jiné CMM.

Seznam použité literatury

- [1] Eluc. *Souřadnicové měřicí stroje* [online]. b.r. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1111>
- [2] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0672-x.
- [3] *STEMPLINGER KVF* [online]. b.r. [cit. 2019-07-16]. Dostupné z: <https://www.fronthydraulik.de/maschinenpark.html>
- [4] RPI rotary table enables major European aerospace manufacturer to save up to 40% in inspection time. *RPI: Rotational Inovation* [online]. b.r. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <http://www.rpiuk.com/rpi-rotary-table-enables-major-european-aerospace-manufacturer-save-40-inspection-time/>
- [5] QuadSlimeLine. *RPI: Rotational Inovation* [online]. 2017 [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <http://www.rpiuk.com/products/QuadSlimLine>
- [6] Why use a rotary table with a CMM?. *Wyvern* [online]. b.r. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://wyvernamerica.com/use-rotary-table-cmm/>
- [7] *Calypso: Návod k obsluze* [online]. Praha, 2015 [cit. 2019-05-06]. ISBN 61212-2011212.
- [8] *Accretech: Rotary table* [online]. b.r. [cit. 2019-05-27]. Dostupné z: https://www.accretech.jp/product/measuring/cmm/rotary_table.html
- [9] *Perry Technology: Inspection Services* [online]. 2016 [cit. 2019-05-27]. Dostupné z: <https://www.perrygear.com/quality-inspection/inspection-services>

- [10] *ZEISS Rotary tables Specifications* [online]. b.r., , 6 [cit. 2019-06-12]. Dostupné z: [https://applications.zeiss.com/C1257A26006EFF9E/0/30175112420D6D74C1257BF0004DBECD/\\$FILE/Rotary_Table_EN_60_022_0329X.pdf](https://applications.zeiss.com/C1257A26006EFF9E/0/30175112420D6D74C1257BF0004DBECD/$FILE/Rotary_Table_EN_60_022_0329X.pdf)
- [11] Gear Inspection with Leitz Coordinate Measuring Machines. *Hexagon* [online]. b.r. [cit. 2019-06-12]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/solutions/technical-resources/technical-articles/gear-inspection-with-leitz-measuring-machines>
- [12] *Hexagon Manufacturing Intelligence Launches HTA Measurement Solution Range* [online]. 2017 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <http://www.machiningnews.com/2017/10/hexagon-manufacturing-intelligence-launches-hta-measurement-solution-range/>
- [13] Rotary Tables - Leitz: Rotary Tables from Leitz - The new spin on measurement. *Hexagon* [online]. b.r. [cit. 2019-06-12]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/products/coordinate-measuring-machines/accessories-for-cmms/rotary-tables--leitz>
- [14] VAST XTR gold. *Zeiss* [online]. b.r. [cit. 2019-07-17]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/senzory/vast-xtr-gold.html>
- [15] *Měřicí hlavy pro souřadnicové měřicí stroje: Mitutoyo* [online]. b.r. [cit. 2019-07-16]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/9848894-Merici-hlavy-pro-souradnicove-merici-stroje.html>
- [16] ČSN EN ISO 10 360-3. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM): Část 3: Souřadnicové měřicí stroje s osou otočného stolu jako čtvrtou osou*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [17] Souřadnicové měřicí stroje. *Technická univerzita v Liberci: katedra výrobních systémů a automatizace* [online]. b.r. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <http://www.ksa.tul.cz/getFile/id:2522>

Seznam obrázků

Obrázek 1 - CMM Zeiss PRISMO s integrovaným otočným stolem [3]	10
Obrázek 2 - Měřicí rozsah CMM bez použití otočného stolu [7].....	12
Obrázek 3 - Měřicí rozsah CMM s použitím otočného stolu [7].....	12
Obrázek 4 - Zabudovaná konstrukce otočného stolu [10]	14
Obrázek 5 - Pohyblivá konstrukce otočného stolu [9].....	15
Obrázek 6 - Ukázka chyby měření vlivem driftu OS [7].....	16
Obrázek 7 - Měření hlavy motoru s využitím pasivního režimu otočného stolu.....	17
Obrázek 8 - aktivní využití otočného stolu při měření šnekového kola [8].....	17
Obrázek 9 - Měření hřídele s ozubenými koly pomocí otočného stolu [10]	18
Obrázek 10 - Složitá konfigurace snímačů při měření šikmého ozubení bez otočného stolu [11].....	19
Obrázek 11 – Měření vačkové hřídele s využitím otočného stolu [12]	19
Obrázek 12 - Měření klikové hřídele s využitím otočného stolu [10]	20
Obrázek 13 - Měření oběžného kola s využitím otočného stolu [13].....	21
Obrázek 14 - Otočná snímací hlava [15]	21
Obrázek 15 - Otočná hlava Zeiss Vast XTR Gold [14].....	21
Obrázek 16 - Polohy zkušebních koulí na otočném stole pro přejímací a periodickou zkoušku [16]	22
Obrázek 17- Tabulka vyhodnocení přejímací a periodické zkoušky [16]	23
Obrázek 18 - Chyby indikace otočného stolu [16]	24
Obrázek 19 - Osa otočného stolu [7]	26
Obrázek 20 - Podokno pro zaměření osy OS metodou s jednou koulí [7]	28
Obrázek 21 – Zaměření osy OS metodou s jednou koulí [7].....	29

Obrázek 22 - Zaměření osy OS metodou se dvěma koulemi [7].....	30
Obrázek 23 - Metoda zaměření osy OS metodou s válcem [9]	32
Obrázek 24 - Metoda měření jedním snímačem z vrchu	35
Obrázek 25 - metoda měření dvěma snímači (pohled shora)	35
Obrázek 26 – Možné chyby při měření dvěma snímači proti sobě (zvětšeno 10 000krát)	36
Obrázek 27 - Metoda měření s jedním snímačem pomocí otočného stolu.....	37
Obrázek 28 – Metoda měření trnu s excentricitou 5 mm	37
Obrázek 29 - Metoda měření trnu s excentricitou 75 mm	38
Obrázek 30 - Měření souososti ve směru X na 1. polovině trnu	40
Obrázek 31 - Měření souososti ve směru Y na 1. polovině trnu	40
Obrázek 32 - Měření souososti ve směru X na 2. polovině trnu	40
Obrázek 33 - Měření souososti ve směru Y na 2. polovině trnu	40
Obrázek 34 - Vybrané řezy na měření průměrů	41
Obrázek 35 - Měření na kruhoměru MarForm MFU 100.....	42
Obrázek 36 - Kalibrace snímače zvoleného pro měření.....	44
Obrázek 37 - Ukázka programu pro měření	45
Obrázek 38 - Měření trnu na CMM Zeiss UPMC 850 CARAT jedním snímačem shora	45
Obrázek 39 - Kalibrace snímače „vlevo_vpravo“, při kalibrování levého snímače.....	48
Obrázek 40 - Upnutí sklíčidla k CMM	49
Obrázek 41 - Měření jedním snímačem shora na CMM Zeiss PRISMO	50
Obrázek 42 - Měření pravého segmentu kruhové dráhy (180°) pravým snímačem.....	52
Obrázek 43 - Měření levého segmentu kruhové dráhy (180°) levým snímačem	53
Obrázek 44 – Grafické vyhodnocení výsledků z měření dvěma snímači.....	53
Obrázek 45 - Rozměry OS RT-01 [10].....	55

Obrázek 46 - Příprava otočného stolu pro měření	56
Obrázek 47 - Ukázka použitých snímačů pro měření s otočným stolem.....	57
Obrázek 48 - Ukázka programu pro měření s otočným stolem	57
Obrázek 49 - Zaměřování osy OS dlouhým snímačem	58
Obrázek 50 - Měření průměrů pomocí OS	59
Obrázek 51 a 52 - Zajištění excentricity trnu 5 mm	61
Obrázek 53 - Měření trnu s excentricitou 5 mm.....	62
Obrázek 54 - Zajištění excentricity trnu 75 mm	64
Obrázek 55 až 58 - Měření trnu s excentricitou 75 mm	65
Obrázek 59 - Upnutí trnu na OS při metodě měření polohy středů	70
Obrázek 60 - Měření poloh středů kružnic	70
Obrázek 61 - Poloha osy při teplotě 21 °C	72
Obrázek 62 - Poloha osy při teplotě 23 °C	72
Obrázek 63 - Metoda měření sousosti	73
Obrázek 64 - Program pro zaměření osy OS	73
Obrázek 65 - Upnutí trnu do vodorovné polohy.....	74
Obrázek 66 - Program pro měření metody sousosti	74
Obrázek 67 - Měření trnu na straně "2" ve směru osy X	75
Obrázek 68 - Měření trnu na straně „1“ ve směru osy Y	75
Obrázek 69 - Měření trnu na straně „2“ ve směru osy Y	76
Obrázek 70 - Vyhodnocení poloh středů ve směru osy X	77
Obrázek 71 - Vyhodnocení poloh středů ve směru osy Y	77

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Naměřené hodnoty na kruhoměru MarForm MFU 100 [μm].....	43
Tabulka 2 - Naměřené hodnoty na CMM Zeiss UPMC 850 CARAT jedním snímačem shora [mm].....	46
Tabulka 3 - Referenční hodnoty	47
Tabulka 4 – Naměřené hodnoty na CMM Zeiss PRISMO jedním snímačem shora[mm]	51
Tabulka 5 - Naměřené hodnoty na CMM Zeiss PRISMO dvěma snímači proti sobě [mm].....	54
Tabulka 6 - Technické specifikace OS RT-01 [10]	55
Tabulka 7 - Chyby indikace OS RT-01, použitého pro měření, po periodické zkoušce	55
Tabulka 8 - Naměřené hodnoty na CMM Zeiss PRISMO pomocí OS se součástí umístěnou v ose [mm].....	60
Tabulka 9 – Naměřené hodnoty na CMM Zeiss PRISMO pomocí otočného stolu se součástí umístěnou s excentricitou 5 mm [mm]	63
Tabulka 10 – Naměřené hodnoty na CMM Zeiss PRISMO pomocí otočného stolu se součástí umístěnou s excentricitou 75 mm [mm]	66
Tabulka 11 - Porovnání všech metod měření [mm]	67
Tabulka 12 - Naměřené hodnoty poloh středů kružnic při teplotě 21 °C [mm]	71
Tabulka 13 - Naměřené hodnoty poloh středů kružnic při teplotě 21 °C a 23 °C [mm]	71
Tabulka 14 - Hodnoty odchylek měření sousosti ve směru osy X při 21,1 °C [mm]...	77
Tabulka 15 - Hodnoty odchylek měření sousosti ve směru osy Y při 21,1 °C [mm]...	77
Tabulka 16 - Hodnoty odchylek měření sousosti ve směru osy X při 21,6 °C [mm]...	78
Tabulka 17 - Hodnoty odchylek měření sousosti ve směru osy Y při 21,6 °C [mm]...	78
Tabulka 18 - Hodnoty odchylek měření sousosti ve směru osy X při 20,7 °C [mm]...	79
Tabulka 19 - Hodnoty odchylek měření sousosti ve směru osy Y při 20,7 °C [mm]...	79

Seznam rovnic

Rovnice 1 – Přesnost kruhovitosti kruhoměru.....	42
Rovnice 2 – Parametr MPE stroje Zeiss UPMC 850 CARAT.....	43
Rovnice 3 – Parametr MPE stroje Zeiss PRISMO.....	47