

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Porovnání přesnosti CMM stroje s pevnou a otočnou hlavou

Comparison of accuracy CMM's with fixed and rotary probe
head

Vypracoval: Jiří Maryt

Vedoucí práce: Ing. Jan Urban

V Praze 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Maryt** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **473631**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Porovnání přesnosti CMM stroje s pevnou a otočnou hlavou

Název bakalářské práce anglicky:

Comparison of accuracy CMM's with fixed and rotary probehead

Pokyny pro vypracování:

- 1) Provedení rešerše CMM strojů
- 2) Volba vhodné metody vyhodnocení
- 3) Provedení srovnání naměřených dat
- 4) Zhodnocení závěrů

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Urban, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS


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

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020** Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Ing. Jan Urban
podpis vedoucí(ho) práce



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


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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

23.6.2020
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího Ing. Jana Urbana a použil jsem pouze zdroje a literaturu uvedenou v příloženém seznamu.

V Praze dne: _____

Podpis: _____

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Janu Urbanovi za ochotu a trpělivost při vytváření mé bakalářské práce, a především za cenné rady, které mi předal. Dále bych poděkoval ŠKODA AUTO a.s. za poskytnutá data.

Anotace

Tato bakalářská práce se bude věnovat porovnáním přesnosti měření na CMM s pevnou a s otočnou hlavou. Ve velkých průmyslových podnicích jako je ŠKODA AUTO se uplatňuje sériová výroba, z toho důvodu se vylepšují výrobní stroje, a proto je potřeba, aby kontrolní stroje za nimi nezaostávaly. Cílem práce je ukázat, že otočná hlava považovaná za méně přesnou, může dosahovat i lepších výsledků než klasický pevný snímací systém. Společnost Renishaw vyvinula otočnou hlavu kontrolovanou laserem, která by měla být přesnější a mohla by pevné snímací systémy nahradit. V práci bude provedeno měření součásti pevnou i otočnou hlavou a porovnáno s výsledky měření na referenčním stroji.

Klíčová slova

Souřadnicové měřicí stroje, CMM, porovnání přesnosti, otočná hlava

Annotation

This thesis will concern comparison of accuracy CMM's with fixed and rotary probe head. In the big industrial companies such as ŠKODA AUTO is employed mass production, therefore manufacturing machines are upgraded as well as inspecting machines. The purpose of thesis is to point out that rotary probe head, which is considered as less accurate than tactile probe system is able to reach better results than tactile probe system. The company Renishaw has developed rotary laser-controlled probe head, which should be more accurate and could replace fixed probe heads. In the thesis the component will be measured by fixed and rotary probe head and compared with the results from reference measuring machine.

Key words

Coordinate measuring machines, CMM, comparison of accuracy, rotary probe head

Obsah

Úvod	1
Provedení rešerše CMM strojů	2
1 Základní seznámení s CMM strojem	2
2 Rozdělení CMM	3
2.1 Kartézsky uspořádané CMM	4
2.1.1 Portálový	5
2.1.2 Konzolový	6
2.1.3 Stojanový	7
2.1.4 Mostový	8
2.2 Nekartézsky uspořádané CMM	9
2.2.1 Měřící ramena	9
2.2.2 Ruční CMM	10
2.2.3 Laser tracker	11
3 Části CMM	12
3.1 Konstrukční díly	12
3.1.1 Materiály konstrukčních dílů	12
3.2 Uložení pohyblivých částí	13
3.3 Pohony CMM	14
3.3.1 Ozubený hřeben s pastorkem	14
3.3.2 Řemenový	15
3.3.3 Třecí	15
3.3.4 Vodící šroub	16
3.3.5 Lineární pohon	16
4 Snímací systémy	16

4.1	Dotykové snímací systémy	17
4.1.1	Části snímacího doteku.....	18
4.1.2	Materiály doteku	19
4.1.3	Materiály dříku	20
4.2	Pevná měřící hlava	21
4.2.1	Spínací systém	21
4.2.2	Aktivní dotykový snímací systém.....	23
4.3	Otočná měřící hlava	24
4.3.1	Indexovatelný snímací systém.....	25
4.3.2	Měřící otočné hlavy	25
	Volba vhodné metody vyhodnocení	25
5	Popisná statistika.....	25
6	Způsobilost měřidel.....	27
	Porovnání naměřených dat.....	28
7	Porovnání pomocí popisné statistiky	32
8	Porovnání pomocí koeficientů způsobilosti	36
	Závěr	39
	Seznam použité literatury	40
	Seznam obrázků	42
	Seznam tabulek	43
	Seznam grafů.....	44



Úvod

V dnešní době jsou ve strojírenské výrobě kladeny čím dál větší požadavky na kvalitu a efektivitu práce. Aby firma mohla prosperovat je zapotřebí zamezit co nejvíce nekvalitním a nepřesným výrobkům ve výrobě. Z toho důvodu je nutné, aby byly výrobky kontrolovány, například přeměřováním, čímž lze odhalit nepřesnost výrobního stroje a následně ji opravit. Pro tvarově komplexní součásti, které mohou být vyráběny například v automobilovém průmyslu nestačí kontrola pomocí komunálních měřidel z hlediska přesnosti, ale převážně z hlediska složitosti daného výrobku.

Souřadnicové měřicí stroje, známější pod zkratkou CMM (z angl. Coordinate Measuring Machine), jsou používány právě k rychlé, efektivní a přesné kontrole rozměrů geometricky komplexních součástí. Dalším podstatným důvodem použití CMM je snaha co nejvíce automatizovat výrobní proces, kdy měření na CMM strojích je značně rychlejší, a proto také mnohem výhodnější pro plynulý chod výroby. Pomocí CMM lze měřit rozměry, tvary, nebo polohy různých prvků na součásti. Snímání polohy geometrických prvků, které dříve bylo nesmírně komplikovaný a zdlouhavý proces, je dnes právě díky CMM daleko jednodušší.

Cílem této práce je provést měření na CMM s pevnou snímací hlavou a s otočnou snímací hlavou a poté porovnat přesnost měření s referenčním měřením a také časovou náročnost měření na jednotlivých strojích.

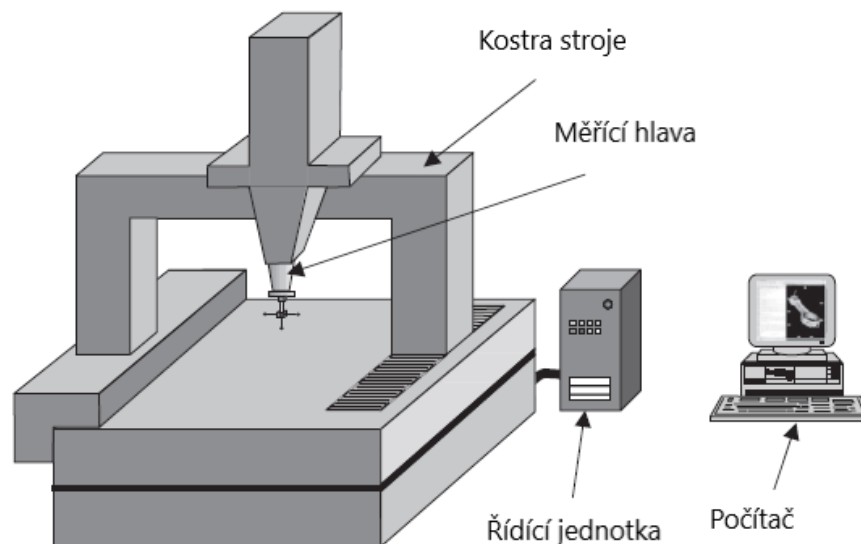
Provedení rešerše CMM strojů

1 Základní seznámení s CMM strojem

Hlavním úkolem souřadnicových strojů je extrahovat body z povrchu měřené součásti snímacím systémem, které pak slouží k výpočtu jednotlivých základních geometrických elementů dílu. Charakteristiky vypočtených elementů jsou následně porovnány s jmenovitými daty, které jsou zadány buď jako CAD model, nebo výkresovou dokumentací. Výstupem měření je poté informace o tvaru, velikosti, poloze nebo orientaci.

Měřicí systém celého stroje se skládá z jednotlivých dílčích systémů, kde každý vykonává specifickou činnost:

- Mechanická „kostra“ stroje se třemi pohyblivými posuvy v osách souřadného systému stroje
- Snímací hlava, která provádí extrakci bodů ze součásti s příslušným snímacím systémem
- Řídící jednotka, která slouží k řízení pohybů stroje a přenáší výsledky do počítače
- Počítač s příslušným softwarem pro vyhodnocení měření



obr. 1 Schéma CMM [1]



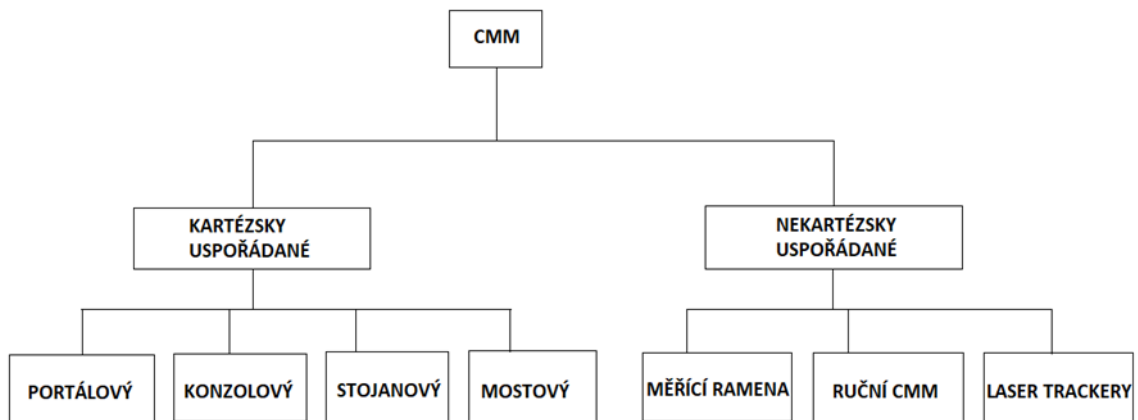
Na *obr.1* je zobrazen běžný kartézsky uspořádaný CMM, ze kterého lze dobře pochopit technologii měření na CMM. Princip měření ve třech souřadnicích spočívá nejprve v kvalifikaci snímacího systému operátorem, která by měla být provedena pro všechny doteky, kterými se bude následně měřit. Snímací systém se nejčastěji pomocí kalibrační koule daných rozměrů kvalifikuje. Nejdříve se kalibrační koule změří referenčním snímačem, čímž se získá přesná poloha referenčního snímače. Následně se kalibrační koule změří dalšími snímacími doteky a získá se tak informace o jejich poloze. Na pevně upnuté součásti v pracovním prostoru stroje je zapotřebí provést vyrovnaní. Změřením referenčních elementů na součásti, nejčastěji geometrických základů, se definuje poloha součásti ve stroji tak, aby došlo k odstranění všech 6 stupňů volnosti tělesa v prostoru. Definuje se poloha měřeného dílu, respektive jeho souřadného systému, umístěného v pracovním prostoru stroje, vzhledem k souřadnému systému stroje. Následné snímání polohy bodů na povrchu měřené součásti probíhá formou souřadnicových rozměrů ve třech osách X, Y a Z. Dalším krokem je vyhodnocení nasnímaných geometrických tvarů součásti. Finálním výsledkem celého měření je protokol, na kterém jsou informace o naměřené hodnotě porovnané s jmenovitou hodnotou a pro tvarové charakteristiky bývá součástí protokolu i grafický záznam naměřených hodnot.

[1][3][4]

2 Rozdělení CMM

Pro rozdělení CMM lze postupovat podle různých aspektů. Můžeme je dělit například podle uspořádání souřadného systému stroje, což je nejběžnější způsob dělení, který použiji v této práci. Konstrukce stroje se skládá z několika dílčích komponent, podle kterých pak můžeme dále CMM rozčlenit. Dalším možným faktorem, podle kterého lze souřadnicové stroje klasifikovat je lokalita, ve které bude stroj pracovat, jako je například výrobní hala s nepříznivými podmínkami pro měření nebo laboratoř s optimalizovanými podmínkami pro měření.

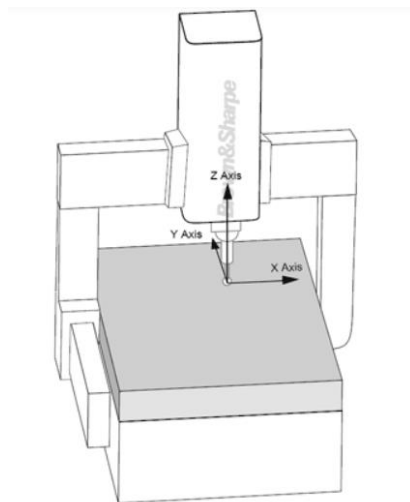
[2]



obr. 2 Rozdělení CMM [2]

2.1 Kartézsky uspořádané CMM

Kartézský souřadnicový systém je jeden z nejpoužívanějších souřadných systémů na CMM. Jedná se o systém, který je určen počátečním bodem a třemi navzájem kolmými osami procházejícími daným počátkem, ve kterých lze odečítat souřadnice v pracovním prostoru stroje. CMM s kartézským systémem souřadnic vykonává pouze lineární posuvné pohyby v jednotlivých osách.



obr. 3 Kartézský souřadnicový systém na CMM [5]

[1]

2.1.1 Portálový

Nejčastěji používaná konfigurace CMM je portálového uspořádání. Portálové stroje se používají hlavně pro měření malých až středně velkých součástí. Tato konfigurace se vyrábí ve dvou různých variantách, a to buď s pevnou portálovou („mostovou“) konstrukcí (z angl. Fixed Bridge), nebo s pohyblivou portálovou („mostovou“) konstrukcí (z angl. Moving Bridge).

První zmíněná varianta se vyznačuje vysokou tuhostí portálové konstrukce, která je pevně připevněná ke spodní části stroje. Na nehybné portálové konstrukci se svisle poháněnou pinolou jsou vykonávány posuvné pohyby ve směru dvou os a zbylý translační pohyb v poslední ose umožňuje posuvná pracovní deska, na které je pevně upnutý měřený objekt. Hlavní výhodou tohoto provedení stroje je jeho tuhost a tím i velká přesnost měření, avšak na úkor malé rychlosti měření, způsobené posouváním těžké, nejčastěji granitové desky s upnutou součástí. Hmotnost měřeného objektu může být také omezoována pohyblivou deskou.



obr. 4 Leitz Infinity [5]

Druhá zmíněná varianta stroje má pohyblivou portálovou konstrukci, na které je umístěna pinola se svislým posuvem, která se pohybuje ve všech osách. Různá rychlost konstrukce dvou svislých nosníků spojených v horní části může způsobit krut portálu, a tím i nepřesné měření. Tento nepříjemný efekt lze eliminovat, například pohonem umístěným ve středové ose portálu. Právě pohyb portálu, který je v porovnání s granitovou deskou mnohem lehčí, umožňuje větší rychlost měření.



obr. 5 ZEISS Contura [6]

[1][5][6]

2.1.2 Konzolový

Konzolový neboli výložníkový typ konstrukce souřadnicového stroje umožňuje velmi dobrý přístup k měřené součásti. Pracovní deska je buď granitová pro laboratoře, nebo litinová pro dílenské použití a je nepohyblivá, tudíž měření se provádí pomocí vyložené konzole. Snadný a rychlý pohyb poměrně lehké pinoly s měřicí hlavou v konzole je výhodou této konstrukce. Většinou je možné měřit malé až středně velké obrobky, podobně jako na portálovém stroji, s tím rozdílem, že na konzolovém stroji vzniká větší riziko ohybu při měření v krajní poloze, kde není konzola ničím podepřena, proto je vhodné měřit delší součásti ve směru vyložení, kvůli menší tuhosti stroje. Jako nevýhodu lze považovat to, že umístění těžkých součástí není možné shora, kde se nachází konzola.



obr. 6 Mitutoyo MiSTAR55 [14]



obr. 7 ZEISS GageMax [6]

[1][3][6][14]

2.1.3 Stojanový

Stojanové uspořádání CMM stroje nachází největší uplatnění například v automobilovém průmyslu při kontrole karoserií. Často bývají umístěny dva stojanové stroje naproti sobě, aby bylo možné měřit současně z obou stran součásti. Hlavní část této konfigurace je svislý stojan, na kterém je horizontálně umístěna pinola s měřicí hlavou. Stojan jako takový umožňuje měření ve dvou osách, proto pro pohyb do třetí osy musí být buď stojan umístěn na desce, kde budou koleje pro zbylý posuvný pohyb, nebo je stojan pevně umístěn na jednom místě a pohyb vykonává pracovní deska s upnutou součástí. Hlavní výhodou je dokonalý přístup k měřenému objektu a velká rychlost měření. Nevýhodou u tohoto provedení může být menší přesnost oproti tužším konstrukcím uvedeným výše.



obr. 8 ZEISS Pro [6]

[1][3][6]

2.1.4 Mostový

Měření velkých součástí, jejichž objem je již v jednotkách m^3 , umožňuje konfigurace souřadnicového měřicího stroje do tzv. mostu. Využití takto uspořádaných strojů nacházíme například při kontrole komponent turbín, nebo velkých sestav svařenců v automobilovém a leteckém průmyslu. Konstrukce mostového typu je velmi velká a je zapotřebí, aby byla i dostatečně tuhá a nedocházelo tak k velkým deformacím. Pro eliminování krutu příčného nosníku s pinolou a měřicí hlavou, je zapotřebí pohon na obou podélných nosnících synchronizovat. Mostový CMM umožňuje ideální přístup k měřené součásti a možnost kontrolovat součásti přemísťované pomocí podlahových přepravníků nebo založení součásti jeřábem. Nevýhoda této konstrukce je její vysoká cena a nižší dosažitelná přesnost.



obr. 9 ZEISS MMZ E [6]

[1][3][6]

2.2 Nekartézsky uspořádané CMM

Většina CMM strojů používaných v průmyslu byly stroje založené na kartézském souřadnicovém systému, ale postupem času bylo zapotřebí vyvinout stroje, které by dokázaly měřit v nekartézském souřadnicovém systému. Nejznámější nekartézské souřadnicové systémy jsou sférický a cylindrický. Mezi hlavní důvody patří nutnost měřit obrovské díly, kdy kartézské CMM musí mít větší rozsah měření, než je samotný díl, a to činilo náklady na výrobu takového měřicího stroje příliš velké. Existuje několik možných aplikací měření v nekartézském souřadnicovém systému. Patří mezi ně například měření pomocí kloubových ramen a měření laser trackery ve sférickém souřadnicovém systému.

[1]

2.2.1 Měřící ramena

Měřící ramena neboli AACMM (z angl. Articulated arm coordinate measuring machine) jsou velmi často využívána k měření v mnoha odvětvích průmyslu. Jejich nejsilnější stránkou je velká flexibilita. Měří ve sférických souřadnicích, což znamená, že jsou schopná naměřit body ohraničené polokoulí o poloměru délky ramene. Konstrukce stroje se skládá z několika dílů, které jsou spojeny pomocí kloubů. V jednotlivých kloubech se nachází úhlové snímače pro vyhodnocení polohy natočení ramene vůči referenčnímu. Na konci ramene je umístěna měřicí

hlava, buď s dotykovými senzory, nebo optickými senzory. Měřící ramena nedosahují tak vysoké přesnosti, jako kartézské CMM s více tuhou konstrukcí, ale jsou mnohonásobně flexibilnější.



obr. 10 Absolute Arm Compact [5]

[1][5]

2.2.2 Ruční CMM

Tento typ souřadnicových strojů je specifický kvůli tomu, že veškeré měření provádí operátor manuálně přikládáním dotykového senzoru. Jako příklad ručně ovládaného CMM uvedu produkt od firmy Fowler. Na *obrázku 11* je produkt zCAT, který je snadno přenosný, váží pouze 13,6 kg a může se s ním měřit například v cylindrických souřadnicích. Je zřejmé, že u takto malého přenosného stroje je značně omezený rozsah měření. V osách X a Y je to 700 mm a v ose Z 250 mm.



obr. 11 Fowler zCAT [7]

[7][8]

2.2.3 Laser tracker

Laser trackery jsou velmi oblíbené pro měření velmi rozměrných součástí, například v leteckém průmyslu. Měřicí systém se skládá z laserového interferometru, který měří radiální vzdálenost od základního bodu a dvou úhlových enkodérů, kdy jeden měří azimut a druhý elevaci laserového paprsku. Laser trackery měří ve sférických souřadnicích, které se následně pomocí softwaru převádí na kartézské souřadnice. Pomocí laser trackerů lze měřit také špatně dostupné komponenty. Měření probíhá velmi rychle a snadno.



obr. 12 Leica Absolute Tracker AT403 [9]

[1][10]



3 Části CMM

V této části práce se zkráceně zmíním o dílčích součástech souřadnicových strojů, jejich funkci a vlivu na celkové měření. Bude se jednat o konstrukční díly, uložení pohyblivých částí a pohonů.

3.1 Konstrukční díly

Části konstrukce tvoří základní kostru celého CMM, proto se také od jejich vlastností odvíjí celkový výkon měření. Z toho důvodu by měly splňovat tato kritéria:

- Nízká hmotnost
- Nízký koeficient teplotní roztažnosti
- Velmi velká tuhost
- Vysoká schopnost tlumení
- Rozměrová stálost

Žádný materiál nedokáže splnit všechny výše uvedené požadavky zároveň, proto se jednotlivé části konstrukce stroje vyrábí z různých materiálů.

[1]

3.1.1 Materiály konstrukčních dílů

Granit

Granit je jeden z nejčastěji používaných materiálů na CMM. Pro pracovní desku je ideální použít materiál, který bude dobře tlumit veškeré vibrace, bude otěruvzdorný, a také bude mít hodně nízký koeficient teplotní roztažnosti, díky kterému bude stabilní. Vhodným materiálem je granit, který tyto požadavky splňuje. Dále se využívá například na horní nosník portálové konstrukce nebo na pinolu. Granit také méně podléhá korozi než železné materiály, nicméně by neměl přijít do kontaktu s vodou. Mezi nevýhody patří komplikované obrobení granitu, jako například vyvrtání různých otvorů.

Hliníkové slitiny

Na měřicí konstrukční díly, jako jsou rámy, je naopak vhodná nízká hmotnost, která zaručí dynamické pohyby během měření a rozměrová stálost. Hliníkové slitiny jsou poměrně pevné



a mají vysokou tepelnou vodivost a teplotní roztažnost. Kvůli vysoké tepelné vodivosti, která způsobí rychlé, rovnoměrné šíření tepla součástí, a koeficientu teplotní roztažnosti slitin hliníku se při změně teploty části deformují, a proto je potřeba teplotní korekce při vyhodnocování.

Ocel

Ocel jako jeden z nejběžnějších konstrukčních materiálů se nabízí právě díky své dostupnosti, avšak má velkou hmotnost a koeficient teplotní roztažnosti. Slitiny hliníku jsou pro konstrukční díly mnohem lepší volbou, protože jsou oproti oceli výrazně lehčí.

Kompozity

Uhlíkové kompozitní materiály jsou velmi lehké, pevné a také teplotně stálé, což jsou ideální vlastnosti pro konstrukční díly, avšak hlavní nevýhodou jsou jejich vysoké náklady na výrobu.

Keramika

Velmi přesné vedení pohyblivých částí stroje je nejčastěji vyrobeno právě z keramiky, protože je dostatečně pevná, lehká a teplotně stabilní, což zaručí značně tuhé vedení. Nevýhodou je opět vysoká cena.

Litina

Litina patří stále mezi využívané materiály pro měřicí stroje, a to především na základny strojů, protože má dobrou tuhost a oproti granitu je lépe obrobitelná.

[1][2][13]

3.2 Uložení pohyblivých částí

Další důležitou a nedílnou částí CMM stroje je uložení jednotlivých pohyblivých dílů, protože má přímý vliv na přesnost měření. Je důležité zamezit velkým třecím silám při pohybu a docílit plynulému chodu, jak při rychloposuvu pohyblivých částí, tak i při velmi pomalém přibližování senzorů. Uložení používané v CMM jsou buď bezkontaktní vzduchová ložiska, nebo klasicky mechanická kontaktní ložiska. Jak vzduchové, tak i mechanické uložení vyžaduje pečlivou



údržbu, aby plnilo správně svou funkci. Podobně jako u částí konstrukce, tak i na ložiska jsou kladeny určité nároky:

- Dynamická tuhost
- Únosnost zátěže
- Tlumení
- Třecí efekt

Použití laboratorní

Vzduchové aerostatické ložisko zprostředkovává pohyb různých částí po velmi tenké vrstvě stlačeného vzduchu tloušťky 1 μ m-10 μ m. Mezi výhody tohoto způsobu uložení patří velká tuhost, plynulost při rozjezdu a dlouhá životnost v porovnání s mechanickými, kde dochází ke kontaktu. Je však zapotřebí zamezit možnému znečištění povrchu, a proto se používá převážně v čistém laboratorním prostředí. Nevýhodou je menší únosnost a nutnost přívodu stlačeného vzduchu.

Použití dílenské

Mechanická ložiska snesou větší zatížení než vzduchová. Valivá ložiska mají nízký valivý odpor, při použití kuličkového nebo válečkového provedení. Oproti aerostatickým je nutné valivá ložiska mazat, na druhou stranu nepotřebují stálý přívod stlačeného vzduchu a stroj je tak flexibilní. Pohyblivé části je potřeba zakrýt prachotěsným pouzdrem.

[1][3]

3.3 Pohony CMM

Pohony CMM strojů zajišťují pohyb částí měřicí konstrukce, nebo i měřené součásti, a proto je kladen důraz na rychlost a tuhost. Umožňují pouze pohyby, nikoliv však určování polohy. Existuje několik různých typů pohonných systémů, které se používají.

[1]

3.3.1 Ozubený hřeben s pastorkem

Tento jednoduchý pohonný systém generuje lineární posuvný pohyb. Běžné je uspořádání, kdy pastorek je hnací element a ozubený hřeben hnaný element. Uplatnění nachází především

tam, kde je zapotřebí dlouhých posuvů, například v mostové konstrukci. Nevýhodou tohoto pohonu je velký třecí odpor a opotřebení.

[1]

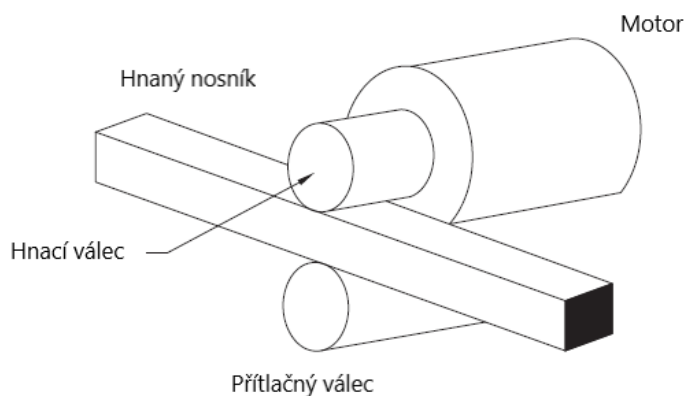
3.3.2 Řemenový

Dalším typem je pohon složený z řemene, alespoň dvou řemenic a servomotoru. Tento pohon je velmi tichý a zároveň umožňuje dynamické zrychlení a rychloposuvy. Nevýhodou je elasticita řemene, protože vznikne riziko vytahání řemene, což by způsobilo nepřesné měření, nebo prokluz řemene při nedostatečném tření.

[1]

3.3.3 Třecí

Třecí pohon se skládá z hnacího kola, plochého nebo kruhového nosníku, který v tomto pohonu vystupuje jako hnaný člen a přítlačného suportu ve tvaru válce. Hnací člen může být poháněn přímo z motoru nebo přes spojku. Tento pohon využívá stálý, hladký záběrový kontakt, který umožní plynulý pohyb. Mezi výhody patří jednoduchost celého pohonu, zanedbatelný odpor a nízká třecí síla. Naopak nevýhodou je malá tuhost, špatné tlumení a opotřebení.

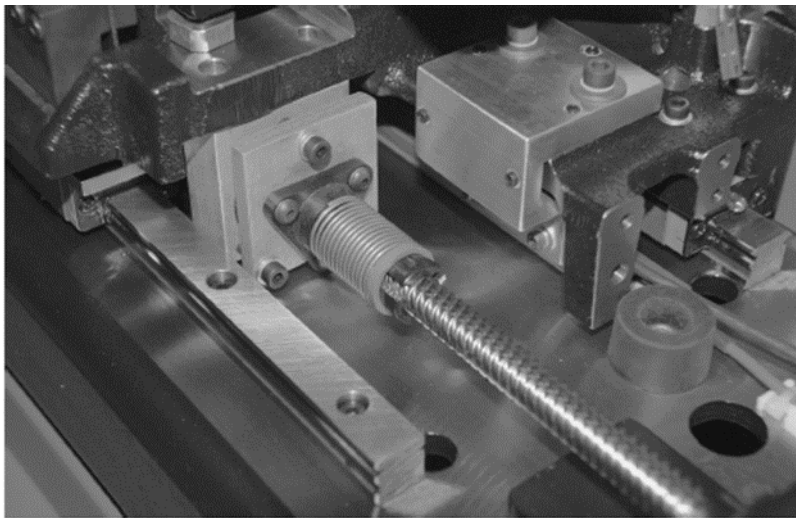


obr. 13 Třecí pohon [1]

[1]

3.3.4 Vodící šroub

Klasické vodící šrouby poskytují převod kroutícího momentu na posuvný pohyb, čehož se využívá u pohonů různých strojů. Vodící šroub přenáší rotační pohyb z motoru, který se transformuje na posuvný pohyb suportu připevněného k matici. Nejčastějším typem jsou kuličkové šrouby, kde kuličky vystupují jako valivé elementy. Kuličkové šrouby mají dobrou dynamickou tuhost a přesnost, ale mohou být hlučné.



obr. 14 Kuličkový vodící šroub [1]

[1]

3.3.5 Lineární pohon

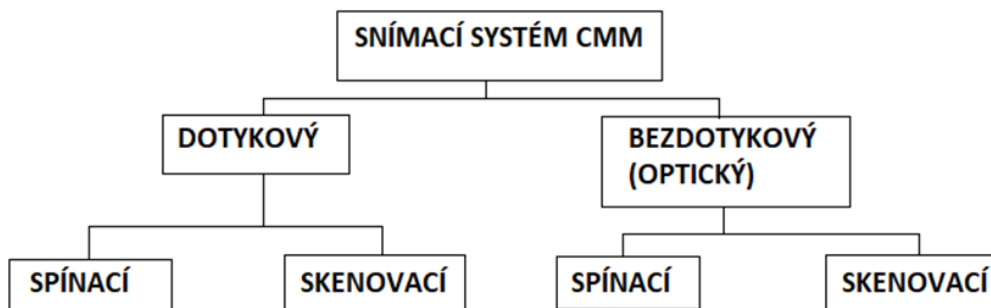
Lineární pohony vykonávají přímo lineární posuvný pohyb a poskytují velmi dobrou tuhost. Přímým pohonem odpadá nutnost převodovky, tudíž i nepřesnost způsobená mechanickou převodovkou. Vyznačují se velkou rychlostí a vysokou přesností, za předpokladu použití systému s velkým rozlišením pro zpětné určení polohy motoru.

[1]

4 Snímací systémy

Tato část bude věnována snímacím systémům, bez kterých by nebylo možné provést měření, tudíž je to jedna z nejdůležitějších částí CMM strojů. Tvoří určitou nedílnou vazbu mezi měřenou součástí a strojem. Slouží ke snímání polohy prostorových souřadnic z povrchu měřeného dílu vzhledem k souřadnicovému systému stroje. Základní rozdělení snímacích

systemu je na dotykové a bezkontaktní, kde je možné dělení ještě rozvětvit na spínací a skenovací, jak je zobrazeno na *obr. 15*.



obr. 15 Rozdělení podle snímacího systému [2]

V této práci se budu dále zabývat pouze snímacími systémy dotykovými, kde mám za úkol porovnat přesnost měření pomocí pevné a otočné měřící hlavy.

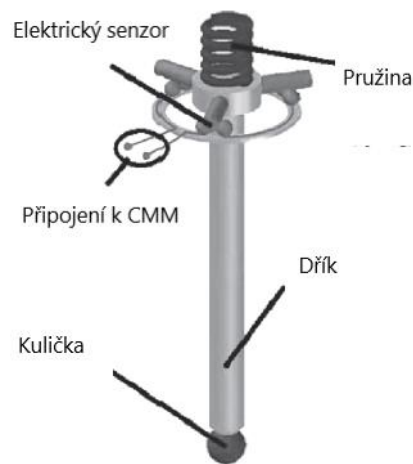
[2][11]

4.1 Dotykové snímací systémy

Na většině CMM strojů se používá k měření právě dotykových snímačů, které oproti optickým dosahují lepší přesnosti snímání. Pro určení polohy snímaného bodu musí dojít ke kontaktu povrchu součásti s dotekem umístěným na hrotu snímacího systému. Hlavní předpoklad pro konstrukci dotekového snímacího systému je to, že by měl pracovat s větší přesností, než je požadována při výrobě měřené součásti.

[11]

4.1.1 Části snímacího doteku



obr. 16 Části doteku [1]

Snímací dotek je ta část systému, která se přímo dostává do kontaktu s povrchem součásti. Nejčastěji se používá kulový snímač. Musí být velmi tuhý, odolný vůči opotřebení a vykazovat co nejmenší tvarovou odchylku. Snímací dotek může mít několik různých tvarů, kdy záleží na geometrickém tvaru měřené součásti a směru, ze kterého provádíme měření části. Kromě kuličkových se vyrábí i válcové, hrotové, diskové nebo hvězdicové. Diskové doteky se využijí například pro měření zápichů, nebo různých drážek v otvorech, kam se není možné dostat s hvězdicovým snímačem. Válcový snímač je vhodný například pro měření tvaru tenkých plechů, kde by kulička z povrchu mohla sklouznout. Hvězdicové doteky jsou většinou konfigurací čtyř doteků na jednom pevném středovém doteku. Je možné s nimi měřit v navzájem kolmých rovinách, aniž by bylo nutné změnit směr doteku.



obr. 17 Diskový dotek [16]



obr. 18 Hvězdicový dotek [16]



obr. 19 Válcový dotek [16]



Dřík, na jehož konci je umístěn dotek slouží, například k přenosu síly vzniklé při kontaktu doteku s povrchem. Tato část by měla být lehká, pevná, tuhá a mít nízký koeficient teplotní roztažnosti.

[1][2][11]

4.1.2 Materiály doteku

Rubín

Nejčastěji se používají doteky vyrobené z rubínu, který je jedním z nejtvrděších materiálů a je tak velmi odolný proti opotřebení. Díky jeho hladkému povrchu má nízký koeficient tření a je vhodný i ke skenování součástí. Avšak pro měření komponent ze slitin hliníku je nevhodný, protože by docházelo k nanášení tenké vrstvy hliníku na rubínovou kuličku, která je tvořená převážně Al_2O_3 a měření by bylo nepřesné. Dalším omezením je měření litinových součástí, kdy se povrch rubínového doteku rychle opotřebuje otěrem.

Nitrid křemíku

Podobně jako rubín, tak i nitrid křemíku je velmi tvrdý materiál. Doteky z nitridu křemíku jsou leštěny a díky jejich hladké ploše jsou vhodné například ke skenování hliníkových dílů, kdy nelze použít rubín. Nevýhodou je náročnost opracování, a tak i vyšší cena než rubínového doteku.

Zirkon

Dalším možným materiálem pro dotek je zirkon. Tento keramický materiál z oxidu zirkoničitého je mechanicky podobný rubínu nebo nitridu křemíku, avšak liší se jednou speciální vlastností, a to že s ním lze měřit i litinové díly.

Diamant

Nejtvrděší materiál, který během měření na CMM nelze opotřebit, ani nijak poškodit. Oproti jiným materiálům je cena diamantového doteku nesrovnatelně vysoká.

[2][15][16]



4.1.3 Materiály dříku

Ocel

Dříky vyrobené převážně z nerezové oceli poskytují dobrý poměr tuhosti a hmotnosti. Pro běžné použití se z oceli vyrábí dříky do 30 mm. Ocel je navíc oproti ostatním materiálům cenově dostupná.

Karbid wolframu

Nejpoužívanějším materiálem je karbid wolframu, který poskytne maximální tuhost a zároveň malý průměr dříku. Lze použít kuličky s velmi malým průměrem. Nevýhodou je vyšší hmotnost, takže tam, kde je snímací systém citlivý na hmotnost dříku jej nelze použít.

Keramika

Materiál s podobnou tuhostí jako má ocel, ale je podstatně lehčí. Keramika je hodně tvrdý materiál, a proto se při velkých délkách méně ohýbá. Navíc díky své křehkosti zabrání poruše snímací sondy, protože se při případné kolizi roztříští.

Uhlíková vlákna

Dříky z uhlíkových vláken nabízí dostatečnou tuhost, a navíc jsou velmi lehké. Díky své tepelné stabilitě jsou vhodné pro práci mimo laboratorní prostředí. Nízká hmotnost umožňuje použít dlouhé dříky.

Hliník

Hliník je vhodný pro prodloužení, protože je velice lehký, ale nelze ho používat v tepelně nestabilním prostředí, protože má velkou tepelnou roztažnost.

Titan

Titan má velmi dobrou tuhost a zároveň je dostatečně lehký, takže je vhodný pro dlouhá prodloužení. Nevýhodou je vysoká cena.

[2][15][16]

4.2 Pevná měřicí hlava

Pevná měřicí hlava umožňuje snímání součásti pouze v jednom nastavení orientace hlavy. Veškerý pohyb při měření vykonává konstrukce stroje. Tato konfigurace je vhodná pro měření dobře přístupných rovinných součástí, kde není potřeba natočení hlavy do jiné polohy. Výhodou je vysoká tuhost a velká přesnost.

Jako příklad uvedu pevnou měřicí hlavu Vast Gold od společnosti ZEISS.



obr. 20 ZEISS Vast Gold [6][6]

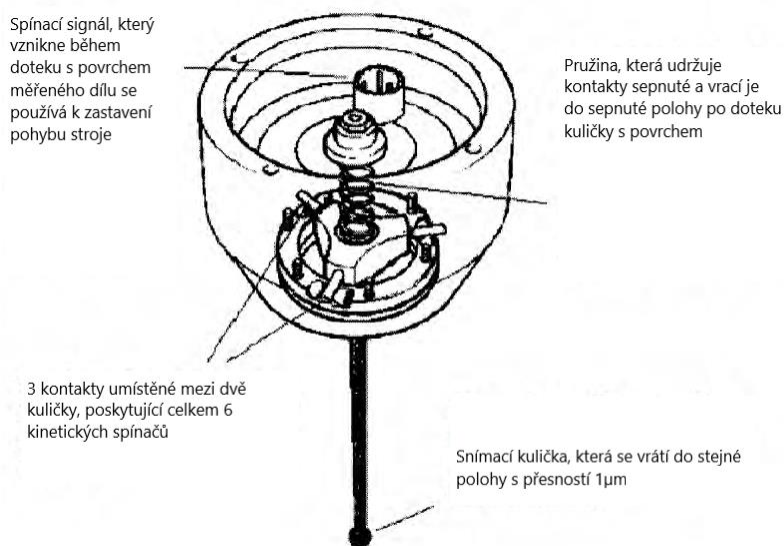
Tato dotyková hlava je vhodná pro bodové měření, ale i pro skenování povrchu součásti. Umožňuje měřit pomocí doteků dlouhých až 800 mm vážících až 600 g. Spolu s technologií VAST Navigator dokáže skenovat velmi rychle. Další vlastností je velká robustnost díky integrované ochraně proti kolizi. Snímací sílu lze přizpůsobit materiálu součásti a geometrii snímače. Síla je stále konstantní a lze ji naprogramovat v rozsahu od 50 mN do 1000 mN.

[6][11]

4.2.1 Spínací systém

Spínací neboli bodový systém funguje tak, že během jednoho měřicí cyklu, kdy dojde ke kontaktu s povrchem součásti, snímá pouze prostorové souřadnice jednoho bodu. Pro další měření souřadnic jiných bodů musí být přerušen kontakt s povrchem součásti. Spínací systémy

mohou pracovat pomocí kinematiky. Při kontaktu s měřeným povrchem dojde k vychýlení snímacího doteku, což způsobí rozpojení jednoho ze tří kontaktů rozmístěných po 120° mezi tři senzory, a tím i rozpojení celého elektrického obvodu. Souřadnice daného bodu jsou následně zaznamenány. Nevýhodou tohoto provedení bývá různá velikost průhybu dříku, což je způsobeno směrem, kterým se dotek přiblíží k povrchu a tím i odlišnou silou potřebnou k rozepnutí jednoho z kontaktů.



obr. 21 Schéma spínacího snímače [11]

Spínací režim pracuje se dvěma výstupy a to hodnota 1 nebo 0. Po zaznamenání souřadnic se musí dotek vzdálit od povrchu, a právě díky pružině se vrací do ustáleného stavu, kdy jsou všechny kontakty elektrického obvodu sepnuty. Tento režim je velmi jednoduchý, poměrně levný a taky vhodný pro měření jednoduchých geometrických prvků, kde stačí málo nasnímaných bodů. Dalším možným provedením dotykového spínacího systému je pomocí malých tenzometrů. Použitím tenzometrických sond se zpřesní měření tím, že není zapotřebí tak velká síla během doteku jako u kinematického provedení, takže se sníží velikost průhybu dříku. Lze měřit pomocí delších snímačů. Nevýhodou spínacích systémů je doba měření, která se značně prodlužuje odjetím od povrchu a znovu následným najetím pro snímání dalších bodů.

[1][2][11][12]

4.2.2 Aktivní dotykový snímací systém

Aktivní dotykový snímací systém disponuje oproti spínacímu systému schopností naměřit během jednoho měřicího cyklu až několik tisíc bodů, dokud nedojde k přerušení kontaktu mezi snímacím dotekem a povrchem součásti. Při skenování je zapotřebí složitějšího systému než u bodového snímání.



obr. 22 Aktivní dotykový snímací systém [11]

Systém je složen ze tří pružinových paralelogramů, díky kterým je umožněn neustálý kontakt doteku s povrchem součásti. Běžný rozsah vychýlení těchto paralelogramů bývá ± 3 mm do směru jednotlivých os X, Y a Z. Každý paralelogram je upnut v neutrální pozici, která je nulovou počáteční pozicí pro snímací indukční systém. U každého paralelogramu je umístěn indukční snímací systém, který se skládá z pevné cívky a pohyblivého jádra, které je již při malém vychýlení paralelogramu posouváno dovnitř, nebo ven z cívky. Pohyblivé jádro mění hodnotu indukovaného proudu v cívce, v závislosti na dotekové síle při měření. Tento dynamický systém je vhodný pro měření různých tvarově komplexních součástí, kde je zapotřebí nasnímat velké množství souřadnic. Pracuje velmi rychle a je možné provádět měření různých tvarových odchylek součásti.

[1][2][11][12]

4.3 Otočná měřicí hlava

Otočné měřicí hlavy se vyznačují velkou flexibilitou snímání, kdy pohyb měření je vykonáván i měřicí hlavou. Díky možnosti natočení hlavy lze snímat body i na špatně dostupných místech součástí. Oproti pevným hlavám je měření tvarově složitých součástí rychlejší a jednodušší, právě díky možnosti natočení měřicí hlavy. Riziko při použití otočných hlav je vnesení nepřesnosti měření způsobené pohony pro natočení hlavy.

Jako příklad uvedu otočnou měřicí hlavu RDS od společnosti ZEISS.



obr. 23 ZEISS RDS [6]

Tato otočná měřicí hlava je nejlepší variantou ve své třídě, která umožňuje snímat v různých polohách, prakticky ve všech prostorových úhlech. Je vhodná pro měření složitých součástí, které by vyžadovaly měření více snímači s odlišnou prostorovou orientací. Natáčení hlavy se provádí s krokem 2,5 stupně a lze tak snímat v 20 736 polohách, což umožní přístup ke každému měřenému prvku. Základem jsou tři vodorovně a svisle uspořádané osy, kolem kterých se může otáčet v rozsahu $\pm 180^\circ$. S hlavou RDS-CAA pro spínací a měřicí senzory je zapotřebí pouze krátká doba na kalibraci pár prostorových, úhlových poloh. Hlava RDS se při programování snadno polohuje, díky joystickům na ovládacím panelu, a to výrazně snižuje dobu potřebnou na programování.

[6][11]



4.3.1 Indexovatelný snímací systém

Měřicí hlavy s indexovatelným snímacím systémem lze podle potřeby natočit do různých poloh tak, aby bylo možné změřit špatně dostupný prvek. Natočení je předem definováno pomocí tzv. indexů. Vyrábí se indexovatelné hlavice, které se nastaví do požadované polohy manuálně, ale nedosahují takové přesnosti jako hlavice motorizované. Opakovatelnost motorizovaných hlavic dovozuje použít nastavenou polohu opakovaně, aniž by bylo zapotřebí provést kvalifikaci snímacího systému.

[12]

4.3.2 Měřicí otočné hlavy

Měřicí otočné hlavy, nebo také často nazývané jako pěti-osé snímací systémy, umožňují rychlé a přesné měření komplexních dílů. Velká flexibilita během měření je nesmírnou výhodou, kdy je možný pohyb ve třech osách stroje plus ještě natočení samotné měřicí hlavy v dalších dvou osách. Oproti indexovatelným systémům měřicí otočná hlava nemusí opustit povrch součásti kvůli indexování, protože řídicí systémy synchronizují pohyb stroje a měřicí hlavy. Díky algoritmům řídicích systémů je optimalizována dráha měření a eliminují se tak dynamické chyby CMM.

[12]

Volba vhodné metody vyhodnocení

V této části práce popíšu metodu, kterou jsem zvolil pro vyhodnocení výsledků měření, které budou v další části porovnány.

5 Popisná statistika

Pro vyhodnocení naměřených dat bloku motoru od firmy ŠKODA AUTO jsem zvolil popisnou statistiku, kterou lze jednoduše a rychle popsat jednotlivé numerické charakteristiky a získat tak informaci o měřené součásti obsažené v naměřených datech.

Minimum a maximum

Funkce, které popisují minimální, respektive maximální hodnotu vyskytující se ve výběru dat. Interval daný minimální a maximální hodnotou má šířku nazývanou jako rozpětí R.



Výběrový průměr

Tato charakteristika popisuje průměrnou hodnotu výběru n naměřených dat x_i a vypočte se pomocí vzorce:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Výběrový průměr je charakteristika popisující polohu neznámého parametru.

Výběrový rozptyl

Charakteristika popisující rozptýlenost hodnot dat z výběru.

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

Výběrová směrodatná odchylka

Tato charakteristika popisuje variabilitu výsledků. Výběrová směrodatná odchylka se vypočte jako druhá odmocnina z výběrového rozptylu a popisuje nám s jakou přesností bylo měření provedeno. Vypočte se pomocí vzorce:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

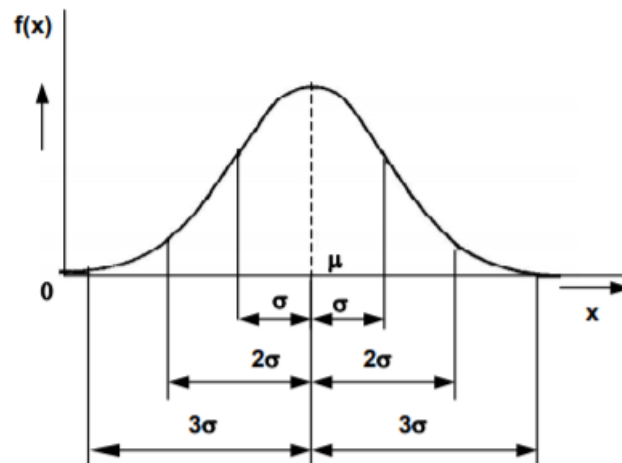
[17]

Jednotlivá data z měření vložek válců na bloku motoru, které mi poskytla ŠKODA AUTO jsem pomocí softwaru Excel zpracoval a vypočítal potřebné statistické charakteristiky do přehledné tabulky, kterou uvedu v další části této práce.

Normální rozdělení pravděpodobnosti

Ke grafickému vyjádření četnosti výsledků jsem zvolil normální rozdělení popisující hustotu pravděpodobnosti. Grafickým výstupem této funkce je křivka, která je často nazývána Gaussovo křivkou. Na svislé ose jsou vyneseny četnosti pozorovaných hodnot a na vodorovné

ose jsou velikosti hodnot pozorování. Normální rozdělení $N(\mu, \sigma)$ je funkcí dvou parametrů, a to μ -průměrné hodnoty a σ -směrodatné odchylky. Průměr představuje maximum normálního rozdělení a pomocí směrodatné odchylky jsme schopni určit hustotu pravděpodobnosti. Například v intervalu $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ leží 99,73 % pozorovaných hodnot a pouze 0,27 % pozorovaných hodnot leží mimo tento interval.



obr. 24 Gaussovo křivka [3]

6 Způsobilost měřidel

Vyhodnocení přesnosti měřidel, jakožto kvalitativní vlastnosti, kdy se snažíme dostat výsledky podobné hodnotám na referenčním měřidle, lze získat způsobností měřidla. Způsobilost měřidla popisují bezrozměrné koeficienty způsobilosti C_g a C_{gk} . Pro stanovení koeficientů se používají dva postupy od firem Bosch a Ford. Já jsem zvolil postup od první zmíněné firmy. Tyto koeficienty se stanovují většinou pro měřicí automaty jako je například CMM, kdy výsledek měření není ovlivněn měřicí obsluhou. Způsobilost měřidla podléhá normálnímu rozdělení a vztáhnul jsem ji k předepsané šířce tolerančního pole, ale je možné vztáhnout způsobilost měřidla i k rozptylu procesu. Koeficienty C_g a C_{gk} popisují měřidlo z pohledu opakovatelnosti a strannosti. Opakovatelnost je také nazývána jako variabilita výsledků několika po sobě jdoucích měření, které byly provedeny na jednom stroji, za stejných podmínek jedním operátorem. Neopakovatelnost bývá nejčastěji způsobena měřidlem, nebo různým umístěním měřené součásti v měřidle. Strannost popisuje vychýlení průměrné



naměřené hodnoty od referenční etalonové hodnoty. Strannost představuje celkovou systematickou chybu měření.

Koeficient C_g se vypočte:

$$C_g = \frac{0,2 \cdot T}{6 \cdot s_a}$$

Koeficient C_{gk} se vypočte:

$$C_{gk} = \min \left(\frac{(X_r + 0,1 \cdot T) - \bar{x}}{3 \cdot s_a}, \frac{\bar{x} - (X_r - 0,1 \cdot T)}{3 \cdot s_a} \right)$$

$T = USL - LSL$; USL-horní mezní hodnota, LSL-dolní mezní hodnota

X_r je referenční hodnota

\bar{x} je výběrový průměr výsledků měření

s_a je výběrová směrodatná odchylka výsledků měření

U koeficientu C_{gk} je správné vycházet z nejmenšího výsledku. Koeficienty C_g a C_{gk} udávají, zda výsledek měření leží s pravděpodobností 99,73 % ve zvoleném pásmu tolerance měřidla, které je dáno podle Bosche jako 20 % šířky tolerančního pole měřené součásti. Jelikož C_{gk} popisuje i strannost výsledků měla by platit nerovnost: $C_g \geq C_{gk}$

Hodnoty koeficientů určují způsobilost měřidla za předpokladu, že operátor, který provádí měření je schopen zvládnout požadavky plynoucí z měření. Minimální hranicí způsobilosti pro oba koeficienty je podle Bosche hodnota 1,33.

$$C_g \geq 1,33 ; C_{gk} \geq 1,33$$

[17][18]

Porovnání naměřených dat

V této části práce se budu věnovat porovnání naměřených dat. Referenční neboli etalonové hodnoty různých geometrických charakteristik byly naměřeny na kruhoměru MFK 600 od společnosti Mahr. Cílem mé práce bylo porovnat přesnost měření na CMM s pevnou a



otočnou hlavou. Stroj s pevnou měřicí hlavou byl portálového typu Prismo Ultra od společnosti Zeiss, který se vyznačuje vysokou přesností a někdy je používán i pro kalibraci. Nakonec byl díl změřen na stroji s měřicí otočnou hlavou REVO 2 od společnosti Renishaw. Naměřená data jsou uvedena v *Tabulce 1* a *Tabulce 2* dále.



Tabulka 1

	Charakteristika	Tolerance [mm]	PEVNÁ HLAVA-PRISMO						OTOČNÁ HLAVA-REVO 2											
			1. měření [mm]	2. měření [mm]	3. měření [mm]	4. měření [mm]	5. měření [mm]	VÝB.SM. ODCH. [mm]	1. měření [mm]	2. měření [mm]	3. měření [mm]	4. měření [mm]	5. měření [mm]	6. měření [mm]	7. měření [mm]	8. měření [mm]	9. měření [mm]	10. měření [mm]	VÝB.SM. ODCH. [mm]	
V Á L E C 1	Kruhovitost hloubka 5 mm	0,006	0,0023	0,0019	0,0019	0,0032	0,0017	0,000610369	0,0023	0,0022	0,0021	0,0023	0,0022	0,0021	0,0022	0,0023	0,0023	0,0021	0,000087560	
	Kruhovitost hloubka 7 mm	0,006	0,0027	0,0020	0,0022	0,0022	0,0019	0,000286309	0,0022	0,0020	0,0021	0,0022	0,0023	0,0023	0,0021	0,0024	0,0022	0,0022	0,000115470	
	Kruhovitost hloubka 9 mm	0,006	0,0017	0,0020	0,0020	0,0022	0,0016	0,000243447	0,0021	0,0022	0,0022	0,0021	0,0024	0,0023	0,0021	0,0022	0,0022	0,0021	0,000099443	
	Kruhovitost hloubka 17 mm	0,006	0,0018	0,0018	0,0017	0,0024	0,0016	0,000315660	0,0023	0,0021	0,0022	0,0023	0,0022	0,0022	0,0022	0,0022	0,0022	0,0024	0,000082327	
	Kruhovitost hloubka 24 mm	0,006	0,0023	0,0019	0,0017	0,0021	0,0020	0,000220438	0,0021	0,0020	0,0025	0,0021	0,0022	0,0023	0,0023	0,0020	0,0023	0,0022	0,000156347	
	Kruhovitost hloubka 39 mm	0,006	0,0021	0,0024	0,0026	0,0025	0,0019	0,000292474	0,0021	0,0022	0,0022	0,0022	0,0019	0,0021	0,0019	0,0022	0,0021	0,0021	0,000115470	
	Kruhovitost hloubka 70 mm	0,006	0,0029	0,0024	0,0024	0,0021	0,0023	0,000289413	0,0027	0,0027	0,0027	0,0025	0,0027	0,0027	0,0028	0,0027	0,0028	0,0025	0,000103280	
	Kruhovitost hloubka 110 mm	0,006	0,0034	0,0029	0,0030	0,0029	0,0028	0,000234899	0,0031	0,0032	0,0030	0,0031	0,0030	0,0026	0,0031	0,0030	0,0031	0,0029	0,000166333	
	Kruhovitost hloubka 125 mm	0,006	0,0038	0,0030	0,0037	0,0032	0,0031	0,000383181	0,0029	0,0030	0,0030	0,0027	0,0027	0,0029	0,0030	0,0029	0,0030	0,0028	0,000119722	
	Přímost 0°	0,006	0,0019	0,0019	0,0020	0,0017	0,0019	0,000089734	0,0011	0,0011	0,0011	0,0011	0,0012	0,0010	0,0011	0,0011	0,0011	0,0012	0,0010	0,000066667
	Přímost 90°	0,006	0,0009	0,0009	0,0007	0,0007	0,0007	0,000090411	0,0020	0,0020	0,0019	0,0020	0,0020	0,0020	0,0020	0,0019	0,0020	0,0020	0,000042164	
	Přímost 180°	0,006	0,0025	0,0025	0,0024	0,0024	0,0024	0,000061398	0,0007	0,0009	0,0007	0,0008	0,0008	0,0008	0,0009	0,0009	0,0008	0,0008	0,000073786	
	Přímost 270°	0,006	0,0014	0,0013	0,0013	0,0013	0,0012	0,000063073	0,0014	0,0013	0,0013	0,0013	0,0014	0,0013	0,0013	0,0014	0,0013	0,0014	0,000051640	
	Rovnoběžnost 0-180°	0,008	0,0030	0,0031	0,0031	0,0031	0,0031	0,000025110	0,0041	0,0041	0,0042	0,0040	0,0043	0,0040	0,0039	0,0040	0,0042	0,0039	0,000133749	
	Rovnoběžnost 90-270°	0,008	0,0037	0,0013	0,0013	0,0014	0,0015	0,001031460	0,0018	0,0019	0,0019	0,0019	0,0019	0,0020	0,0019	0,0019	0,0019	0,0019	0,000105935	
	Válcovitost	0,008	0,0043	0,0039	0,0041	0,0043	0,0042	0,000162914	0,0052	0,0054	0,0055	0,0054	0,0053	0,0050	0,0056	0,0054	0,0053	0,0053	0,000164655	
	V Á L E C 2	Kruhovitost hloubka 5 mm	0,006	0,0025	0,0023	0,0020	0,0020	0,0023	0,000220108	0,0021	0,0020	0,0018	0,0020	0,0020	0,0020	0,0021	0,0019	0,0020	0,0022	0,000110050
		Kruhovitost hloubka 7 mm	0,006	0,0018	0,0019	0,0026	0,0018	0,0023	0,000336256	0,0021	0,0022	0,0023	0,0023	0,0022	0,0023	0,0022	0,0023	0,0022	0,0022	0,000067495
		Kruhovitost hloubka 9 mm	0,006	0,0020	0,0024	0,0025	0,0023	0,0022	0,000202898	0,0025	0,0027	0,0025	0,0025	0,0026	0,0025	0,0025	0,0023	0,0024	0,0024	0,000110050
		Kruhovitost hloubka 17 mm	0,006	0,0037	0,0032	0,0033	0,0032	0,0032	0,000228112	0,0034	0,0034	0,0034	0,0035	0,0033	0,0035	0,0033	0,0033	0,0032	0,0034	0,000094868
Kruhovitost hloubka 24 mm		0,006	0,0035	0,0036	0,0036	0,0036	0,0037	0,000089434	0,0038	0,0037	0,0036	0,0038	0,0036	0,0036	0,0037	0,0036	0,0036	0,0037	0,000082327	
Kruhovitost hloubka 39 mm		0,006	0,0038	0,0033	0,0033	0,0034	0,0035	0,000186651	0,0033	0,0034	0,0034	0,0035	0,0034	0,0035	0,0036	0,0035	0,0036	0,0035	0,000094868	
Kruhovitost hloubka 70 mm		0,006	0,0023	0,0024	0,0022	0,0020	0,0023	0,000139343	0,0030	0,0026	0,0027	0,0028	0,0026	0,0028	0,0027	0,0026	0,0026	0,0027	0,000128668	
Kruhovitost hloubka 110 mm		0,006	0,0029	0,0024	0,0024	0,0024	0,0024	0,000225300	0,0025	0,0024	0,0025	0,0024	0,0025	0,0023	0,0025	0,0025	0,0026	0,0025	0,000082327	
Kruhovitost hloubka 125 mm		0,006	0,0033	0,0029	0,0029	0,0028	0,0027	0,000216185	0,0025	0,0029	0,0027	0,0025	0,0027	0,0026	0,0028	0,0027	0,0026	0,0025	0,000135401	
Přímost 0°		0,006	0,0016	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,000056608	0,0011	0,0012	0,0012	0,0010	0,0011	0,0011	0,0011	0,0012	0,0011	0,0011	0,000063246	
Přímost 90°		0,006	0,0020	0,0021	0,0026	0,0020	0,0021	0,000257514	0,0019	0,0018	0,0019	0,0018	0,0018	0,0018	0,0019	0,0018	0,0018	0,0018	0,000048305	
Přímost 180°		0,006	0,0023	0,0025	0,0025	0,0024	0,0025	0,000089956	0,0024	0,0025	0,0024	0,0022	0,0024	0,0023	0,0023	0,0023	0,0022	0,0022	0,000103280	
Přímost 270°		0,006	0,0005	0,0008	0,0008	0,0008	0,0006	0,000145798	0,0020	0,0021	0,0022	0,0020	0,0022	0,0022	0,0021	0,0020	0,0022	0,0022	0,000091894	
Rovnoběžnost 0-180°		0,008	0,0050	0,0045	0,0046	0,0045	0,0044	0,000241727	0,0034	0,0035	0,0034	0,0032	0,0035	0,0033	0,0033	0,0034	0,0031	0,0033	0,000126491	
Rovnoběžnost 90-270°		0,008	0,0046	0,0025	0,0035	0,0022	0,0026	0,000987422	0,0053	0,0052	0,0054	0,0052	0,0052	0,0054	0,0054	0,0052	0,0055	0,0053	0,000110050	
Válcovitost		0,008	0,0046	0,0047	0,0049	0,0048	0,0047	0,000112461	0,0054	0,0054	0,0051	0,0054	0,0049	0,0051	0,0051	0,0050	0,0052	0,0053	0,000179196	
V Á L E C 3		Kruhovitost hloubka 5 mm	0,006	0,0021	0,0018	0,0021	0,0020	0,0021	0,000108148	0,0020	0,0021	0,0019	0,0019	0,0021	0,0020	0,0019	0,0020	0,0019	0,0019	0,000082327
		Kruhovitost hloubka 7 mm	0,006	0,0019	0,0020	0,0019	0,0017	0,0023	0,000227462	0,0020	0,0022	0,0020	0,0022	0,0022	0,0020	0,0021	0,0021	0,0019	0,0020	0,000105935
		Kruhovitost hloubka 9 mm	0,006	0,0023	0,0024	0,0019	0,0020	0,0018	0,000263348	0,0021	0,0022	0,0020	0,0022	0,0022	0,0021	0,0022	0,0023	0,0022	0,0022	0,000082327
		Kruhovitost hloubka 17 mm	0,006	0,0017	0,0023	0,0025	0,0022	0,0020	0,000324181	0,0022	0,0022	0,0023	0,0023	0,0024	0,0023	0,0024	0,0023	0,0022	0,0024	0,000081650
	Kruhovitost hloubka 24 mm	0,006	0,0017	0,0023	0,0032	0,0022	0,0020	0,000552214	0,0023	0,0021	0,0021	0,0021	0,0023	0,0023	0,0023	0,0021	0,0023	0,0022	0,000099443	
	Kruhovitost hloubka 39 mm	0,006	0,0026	0,0021	0,0023	0,0025	0,0023	0,000201039	0,0019	0,0018	0,0021	0,0019	0,0019	0,0019	0,0019	0,0019	0,0022	0,0019	0,000117851	
	Kruhovitost hloubka 70 mm	0,006	0,0030	0,0026	0,0026	0,0027	0,0026	0,000149957	0,0023	0,0024	0,0024	0,0023	0,0024	0,0022	0,0022	0,0022	0,0024	0,0024	0,000091894	
	Kruhovitost hloubka 110 mm	0,006	0,0036	0,0033	0,0031	0,0032	0,0031	0,000174112	0,0030	0,0029	0,0028	0,0030	0,0028	0,0029	0,0030	0,0029	0,0032	0,0030	0,000117851	
	Kruhovitost hloubka 125 mm	0,006	0,0043	0,0036	0,0034	0,0033	0,0037	0,000399782	0,0030	0,0031	0,0029	0,0031	0,0031	0,0031	0,0033	0,0031	0,0027	0,0029	0,000163639	
	Přímost 0°	0,006	0,0015	0,0019	0,0017	0,0018	0,0017	0,000135438	0,0010	0,0009	0,0011	0,0009	0,0009	0,0009	0,0009	0,0009	0,0010	0,0009	0,000069921	
	Přímost 90°	0,006	0,0012	0,0011	0,0010	0,0011	0,0011	0,000064383	0,0021	0,0020	0,0021	0,0020	0,0020	0,0020	0,0021	0,0019	0,0019	0,000081650		
	Přímost 180°	0,006	0,0032	0,0033	0,0031	0,0031	0,0031	0,000070544	0,0013	0,0014	0,0014	0,0013	0,0013	0,0013	0,0014	0,0012	0,0013	0,000063246		
	Přímost 270°	0,006	0,0004	0,0006	0,0005	0,0005	0,0004	0,000056184	0,0026	0,0026	0,0027	0,0025	0,0026	0,0026	0,0025	0,0026	0,0026	0,0026	0,000056765	
	Rovnoběžnost 0-180°	0,008	0,0049	0,0049	0,0052	0,0049	0,0051	0,000149485	0,0018	0,0015	0,0017	0,0016	0,0016	0,0015	0,0018	0,0017	0,0016	0,0016	0,000107497	
	Rovnoběžnost 90-270°	0,008	0,0034	0,0011	0,0012	0,0011	0,0012	0,001007813	0,0086	0,0082	0,0084	0,0085	0,0085	0,0086	0,0089	0,0086	0,0087	0,0089	0,000213177	
	Válcovitost	0,008	0,0053	0,0049	0,0046	0,0045	0,0044	0,000342606	0,0058	0,0056	0,0059	0,								



Tabulka 2

Charakteristika	Tolerance [mm]	KRUHOMĚR-MFK					VÝB.SM.ODCH. [mm]	PRISMO PRŮMĚR [mm]	REVO 2 PRŮMĚR [mm]	MFK PRŮMĚR [mm]	PRISMO ODCHYLKA [mm]	REVO 2 ODCHYLKA [mm]	PRISMO Zaplnění tol. pole [%]	REVO 2 Zaplnění tol. pole [%]	MFK Zaplnění tol. pole [%]																														
		1. měření [mm]	2. měření [mm]	3. měření [mm]	4. měření [mm]	5. měření [mm]																																							
V Á L E C 1															Kruhovistost hloubka 5 mm	0,006	0,0011	0,0011	0,0011	0,0010	0,0011	0,0022	0,0022	0,0011	0,00113	0,00113	36,85	36,83	18,00																
															Kruhovistost hloubka 7 mm	0,006	0,0013	0,0012	0,0012	0,0012	0,0011	0,0022	0,0022	0,0012	0,00100	0,00100	36,68	36,67	20,00																
															Kruhovistost hloubka 9 mm	0,006	0,0013	0,0013	0,0015	0,0013	0,0013	0,0019	0,0022	0,0013	0,00055	0,00085	31,44	36,50	22,33																
															Kruhovistost hloubka 17 mm	0,006	0,0013	0,0013	0,0013	0,0012	0,0013	0,0019	0,0022	0,0013	0,00057	0,00095	30,87	37,17	21,33																
															Kruhovistost hloubka 24 mm	0,006	0,0010	0,0010	0,0011	0,0010	0,0010	0,0020	0,0022	0,0010	0,00103	0,00118	34,10	36,67	17,00																
															Kruhovistost hloubka 39 mm	0,006	0,0010	0,0008	0,0009	0,0008	0,0008	0,0023	0,0021	0,0009	0,00143	0,00124	38,14	35,00	14,33																
															Kruhovistost hloubka 70 mm	0,006	0,0019	0,0020	0,0019	0,0020	0,0020	0,0024	0,0027	0,0020	0,00048	0,00072	40,61	44,67	32,67																
															Kruhovistost hloubka 110 mm	0,006	0,0022	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023	0,0030	0,0030	0,0023	0,00073	0,00073	50,11	50,17	38,00																
															Kruhovistost hloubka 125 mm	0,006	0,0028	0,0024	0,0024	0,0024	0,0024	0,0034	0,0029	0,0025	0,00088	0,00041	55,97	48,17	41,33																
															Přimost 0°	0,006	0,0017	0,0025	0,0022	0,0023	0,0020	0,000304959	0,0019	0,0011	0,0021	0,00027	0,00104	31,12	18,33	35,67															
															Přimost 90°	0,006	0,0033	0,0035	0,0023	0,0020	0,0025	0,000649615	0,0008	0,0020	0,0027	0,00192	0,00074	13,29	33,00	45,33															
															Přimost 180°	0,006	0,0023	0,0024	0,0024	0,0026	0,0025	0,000114018	0,0024	0,0008	0,0024	0,00001	0,00163	40,53	13,50	40,67															
															Přimost 270°	0,006	0,0036	0,0036	0,0023	0,0023	0,0025	0,000680441	0,0013	0,0013	0,0029	0,00156	0,00152	21,65	22,33	47,67															
															Rovnoběžnost 0-180°	0,008	0,0036	0,0043	0,0046	0,0046	0,0045	0,000420714	0,0031	0,0041	0,0043	0,00125	0,00025	38,37	50,88	54,00															
															Rovnoběžnost 90-270°	0,008	0,0047	0,0048	0,0039	0,0037	0,0040	0,000496991	0,0018	0,0019	0,0042	0,00238	0,00229	22,97	24,13	52,75															
															Válcovitost	0,008	0,0032	0,0033	0,0031	0,0031	0,0032	0,000083666	0,0042	0,0053	0,0032	0,00098	0,00216	52,04	66,75	39,75															
															V Á L E C 2															Kruhovistost hloubka 5 mm	0,006	0,0018	0,0018	0,0016	0,0017	0,0016	0,0022	0,0020	0,0017	0,00051	0,00031	36,87	33,50	28,33	
																														Kruhovistost hloubka 7 mm	0,006	0,0019	0,0019	0,0020	0,0019	0,0019	0,000044721	0,0021	0,0022	0,0019	0,00019	0,00031	35,10	37,17	32,00
Kruhovistost hloubka 9 mm	0,006	0,0040	0,0038	0,0037	0,0036	0,0035	0,000192354	0,0023	0,0025	0,0037	0,00142	0,00123	38,33	41,50																62,00															
Kruhovistost hloubka 17 mm	0,006	0,0031	0,0031	0,0031	0,0031	0,0031	0,000000336	0,0033	0,0034	0,0031	0,00022	0,00027	55,27	56,17																51,67															
Kruhovistost hloubka 24 mm	0,006	0,0035	0,0036	0,0035	0,0036	0,0035	0,000054772	0,0036	0,0037	0,0035	0,00005	0,00013	59,87	61,17																59,00															
Kruhovistost hloubka 39 mm	0,006	0,0032	0,0032	0,0032	0,0033	0,0033	0,000054772	0,0035	0,0035	0,0032	0,00022	0,00023	57,72	57,83																54,00															
Kruhovistost hloubka 70 mm	0,006	0,0018	0,0018	0,0019	0,0018	0,0018	0,000044721	0,0022	0,0027	0,0018	0,00040	0,00089	36,96	45,17																30,33															
Kruhovistost hloubka 110 mm	0,006	0,0018	0,0018	0,0018	0,0017	0,0018	0,000044721	0,0025	0,0025	0,0018	0,00071	0,00069	41,55	41,17																29,67															
Kruhovistost hloubka 125 mm	0,006	0,0035	0,0034	0,0034	0,0032	0,0030	0,000200000	0,0029	0,0027	0,0033	0,00039	0,00065	48,54	44,17																55,00															
Přimost 0°	0,006	0,0018	0,0020	0,0017	0,0016	0,0017	0,000151658	0,0015	0,0011	0,0018	0,00021	0,00064	25,80	18,67																29,33															
Přimost 90°	0,006	0,0030	0,0039	0,0036	0,0044	0,0048	0,000698570	0,0022	0,0018	0,0039	0,00178	0,00211	35,98	30,50																65,67															
Přimost 180°	0,006	0,0008	0,0008	0,0006	0,0007	0,0007	0,000083666	0,0025	0,0023	0,0007	0,00174	0,00160	40,98	38,67																12,00															
Přimost 270°	0,006	0,0034	0,0024	0,0026	0,0026	0,0025	0,000400000	0,0007	0,0021	0,0027	0,00203	0,00058	11,16	35,33																45,00															
Rovnoběžnost 0-180°	0,008	0,0032	0,0032	0,0030	0,0029	0,0030	0,000134164	0,0046	0,0033	0,0031	0,00153	0,00028	57,32	41,75																38,25															
Rovnoběžnost 90-270°	0,008	0,0052	0,0053	0,0054	0,0057	0,0063	0,000443847	0,0031	0,0053	0,0056	0,00249	0,00027	38,68	66,38																69,75															
Válcovitost	0,008	0,0053	0,0053	0,0051	0,0046	0,0049	0,000296648	0,0048	0,0052	0,0050	0,00029	0,00015	59,43	64,88																63,00															
V Á L E C 3																														Kruhovistost hloubka 5 mm	0,006	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0012	0,000044721	0,0020	0,0020	0,0013	0,00075	0,00069	33,84	32,83	21,33
																														Kruhovistost hloubka 7 mm	0,006	0,0013	0,0013	0,0014	0,0014	0,0013	0,000054772	0,0019	0,0021	0,0013	0,00061	0,00073	32,50	34,50	22,33
															Kruhovistost hloubka 9 mm	0,006	0,0014	0,0015	0,0016	0,0016	0,0015	0,000083666	0,0021	0,0022	0,0015	0,00054	0,00065	34,35	36,17	25,33															
															Kruhovistost hloubka 17 mm	0,006	0,0020	0,0019	0,0018	0,0017	0,0018	0,000114018	0,0021	0,0023	0,0018	0,00030	0,00046	35,61	38,33	30,67															
															Kruhovistost hloubka 24 mm	0,006	0,0015	0,0015	0,0016	0,0016	0,0016	0,000054772	0,0023	0,0022	0,0016	0,00071	0,00065	37,75	36,83	26,00															
															Kruhovistost hloubka 39 mm	0,006	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,000000336	0,0023	0,0020	0,0008	0,00155	0,00115	39,10	32,50	13,34															
															Kruhovistost hloubka 70 mm	0,006	0,0020	0,0021	0,0021	0,0020	0,0021	0,000054772	0,0027	0,0023	0,0021	0,00064	0,00026	45,05	38,67	34,33															
															Kruhovistost hloubka 110 mm	0,006	0,0026	0,0026	0,0027	0,0027	0,0026	0,000054772	0,0033	0,0030	0,0026	0,00062	0,00031	54,34	49,17	44,00															
															Kruhovistost hloubka 125 mm	0,006	0,0027	0,0027	0,0028	0,0028	0,0028	0,000054772	0,0036	0,0030	0,0028	0,00089	0,00027	60,75	50,50	46,00															
															Přimost 0°	0,006	0,0014	0,0016	0,0014	0,0012	0,0012	0,000167332	0,0017	0,0009	0,0014	0,00036	0,00042	28,74	15,67	22,67															
															Přimost 90°	0,006	0,0033	0,0026	0,0024	0,0028	0,0024	0,000374166	0,0011	0,0020	0,0027	0,00161	0,00070	18,10	33,33	45,00															
															Přimost 180°	0,006	0,0010	0,0007	0,0007	0,0008	0,0007	0,000130384	0,0032	0,0013	0,0008	0,00240	0,00054	53,05	22,00	13,00															
															Přimost 270°	0,006	0,0035	0,0026	0,0029	0,0026	0,0028	0,000370135	0,0005	0,0026	0,0029	0,00239	0,00029	8,19	43,17	48,00															
															Rovnoběžnost 0-180°	0,008	0,0033	0,0032	0,0031	0,0035	0,0032	0,000151658	0,0050	0,0016	0,0033	0,00176	0,00162	62,70	20,50	40,75															
															Rovnoběžnost 90-270°	0,008	0,0064	0,0059	0,0057	0,0057	0,0058	0,000291548	0,0016	0,0086	0,0059	0,00429	0,00269	20,18	107,38	73,75															
															Válcovitost	0,008	0,0044	0,0042	0,0040	0,0044	0,0038	0,000260768	0,0047	0,0058	0,0042	0,00057	0,00168	59,13	73,00	52,00															

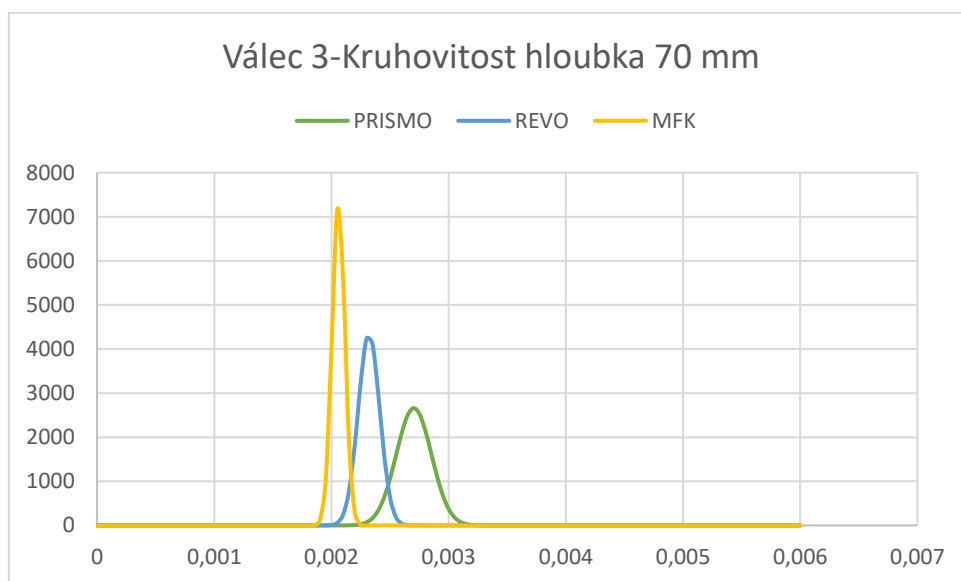


Ideální by bylo, kdyby bylo provedeno alespoň deset měření na každém stroji. Jak je zřejmé z tabulek, tak s otočnou měřicí hlavou bylo provedeno 10 měření, kdežto na referenčním stroji a na stroji s pevnou hlavou jich bylo provedeno pouze 5. Je to z důvodu, že ŠKODA AUTO, kde se měřilo, provádí sériovou výrobu a nelze ji brzdít a nadřazovat nad ní měření pro závěrečnou práci. Měření s otočnou hlavou poskytla pro ŠKODA AUTO společnost Renishaw Brno.

7 Porovnání pomocí popisné statistiky

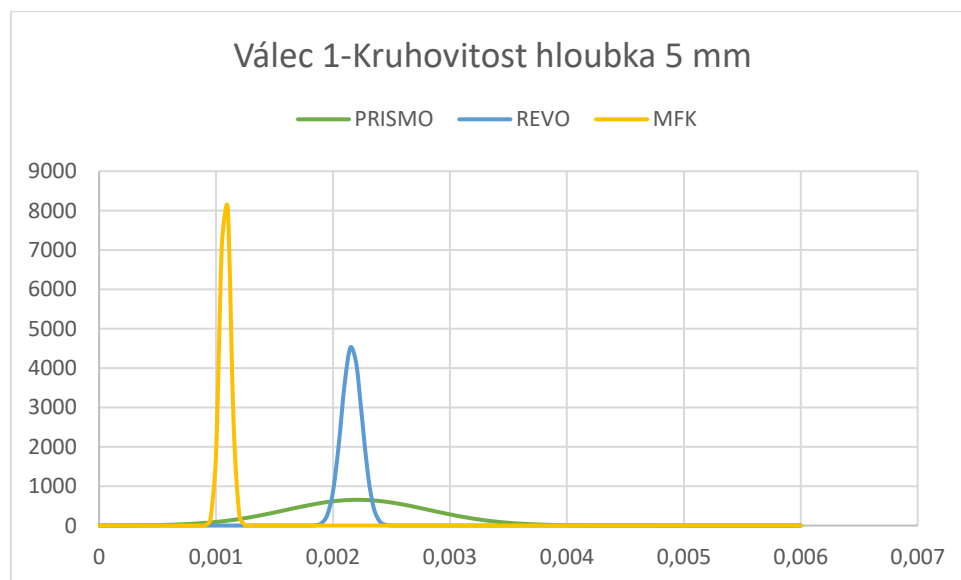
Při vyhodnocení výsledků pro jednotlivé charakteristiky jsem vypočítal jejich průměrnou hodnotu označenou v *Tabulce 2* jako PRŮMĚR. Průměrná hodnota z MFK je brána jako referenční. Vyhodnocení strannosti výsledků, to znamená vzdálenost průměrné hodnoty získané na pevné a otočné hlavě vůči referenční hodnotě, je v *Tabulce 2* označené jako ODCHYLKA. Strannost vychází hodně vyrovnaně avšak pro otočnou hlavu o trochu lépe. Z výsledků je zřejmé, že referenční kruhoměr MFK měřil podle očekávání s nejmenší chybou měření. Je to dobře vidět podle hodnot výběrové směrodatné odchyly, která dosahuje převážně řádově menších hodnot oproti ostatním strojům. Při porovnávání chyby měření CMM s pevnou a otočnou hlavou vychází menší výběrová směrodatná odchylna pro měření kruhovitosti na stroji s otočnou hlavou. Důvodem je, že měřicí otočná hlava Revo 2, se kterou bylo měření provedeno, kontroluje pohyb během měření, jak stroje, tak i hlavy pomocí laseru.

[12]



graf 1

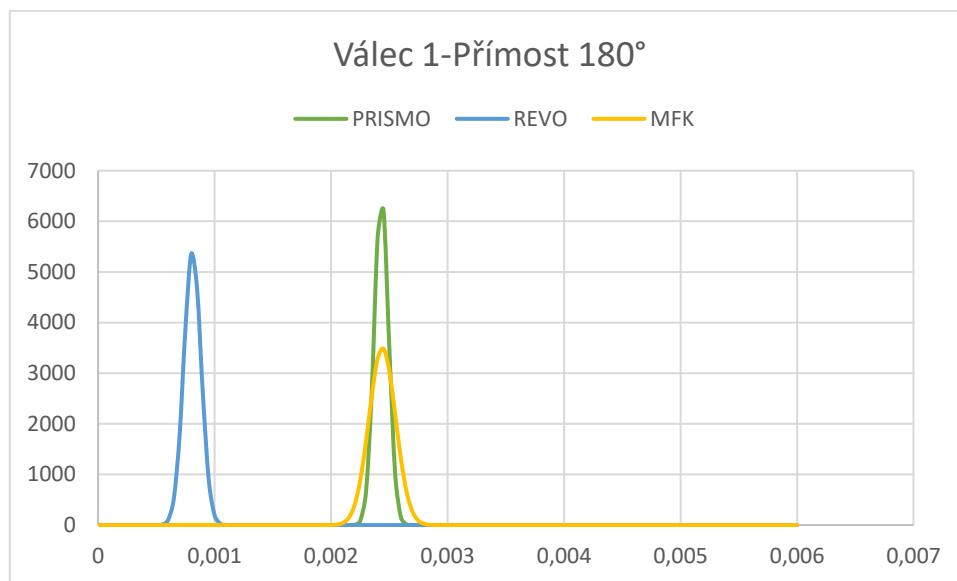
V *grafu 1* je normální rozdělení, které zobrazuje četnost výsledků kruhovitosti v hloubce 70 mm. Z grafu je hezky vidět, že čím je štíhlejší Gaussovo křivka, tím se měřilo s menší chybou. Otočná hlava označená v legendě jako REVO má štíhlejší Gaussovu křivku než pevná hlava označená jako PRISMO. Co se strannosti výsledků vůči referenčnímu měření tyče, vychází zde opět lépe otočná hlava.



graf 2

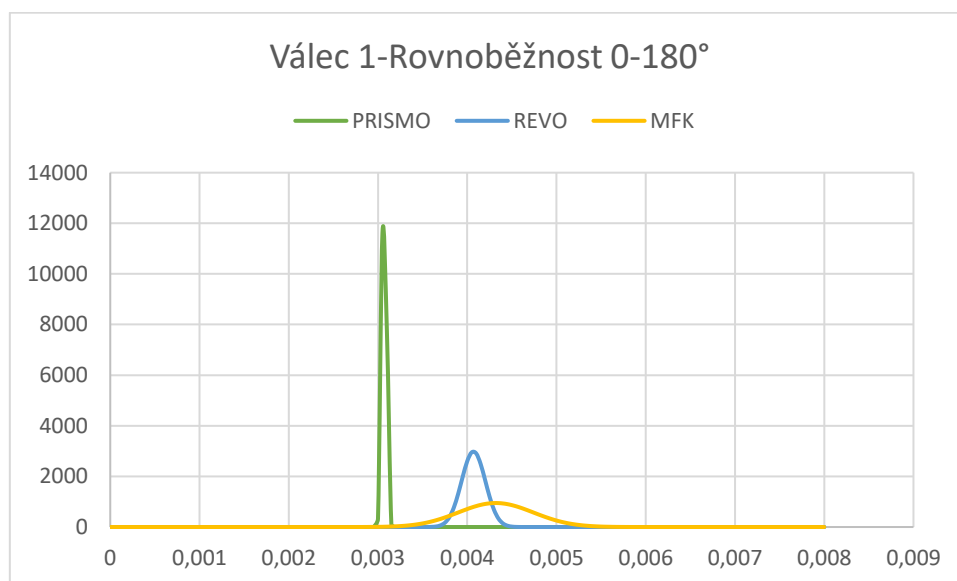
V *grafu 2* je normální rozdělení četnosti pro kruhovitost v hloubce 5 mm. Zde je vidět, že měření kruhovitosti pomocí kontrolované hlavy Revo 2 vychází opět mnohem lépe než pevný

snímací systém. Možným důvodem, proč výsledky z přesného stroje Prismo Ultra vychází hůř, je použití špatného snímače. Pro měření vložek válců motoru byl použit dlouhý snímač z uhlíkového kompozitu. Snímač je sice z hlediska hmotnosti lehký, ale snadno se mechanicky deformuje. Pro měření by bylo vhodnější použít snímač z tužšího materiálu. Výsledky pro Revo 2, kde bylo také měřeno s dlouhým snímačem z uhlíkového kompozitu, vychází lépe právě díky již zmíněné kontrole laserem.

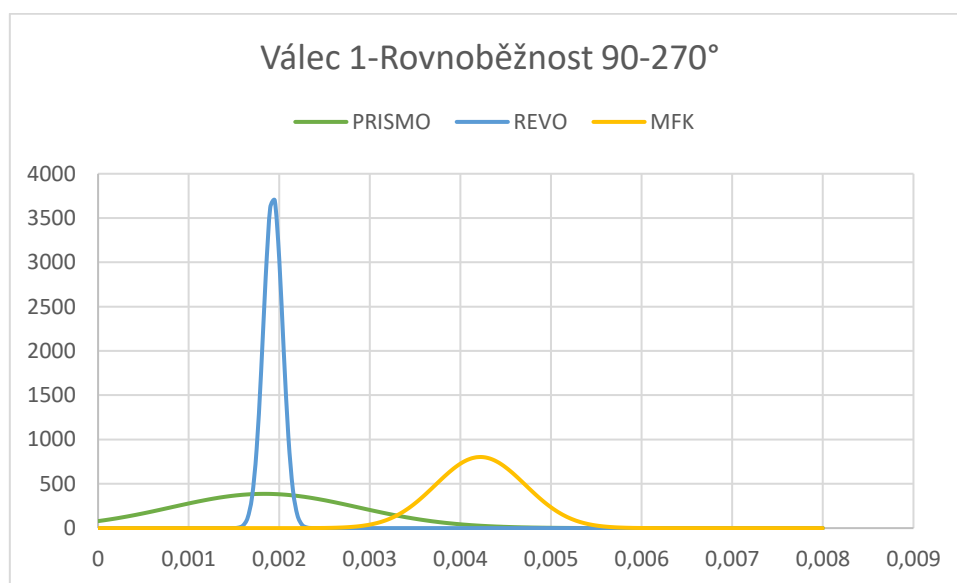


graf 3

Na vyhodnocení přímosti je z *grafu 3* vidět normální rozdělení četnosti výsledků. Při měření přímosti záleží hlavně na přesnosti samotného CMM stroje. Pevný snímací systém umístěný na stroji Prismo Ultra vyšel ze všech nejlépe. Je to z důvodu, že maximální přípustná chyba pro délkové měření neboli MPE_E (z angl. Maximum Permissible Error) pro tento stroj je $MPE_E = 0,6 + L/600$. Kdežto stroj s otočnou hlavou měl $MPE_E = 2,5 + L/250$. Prismo Ultra měří se základní maximální přípustnou chybou $0,6 \mu\text{m}$ a za každých 600 mm naroste tato chyba o $1 \mu\text{m}$, kdežto stroj s otočnou hlavou má základní maximální přípustnou chybu $2,5 \mu\text{m}$ a za 250 mm naroste o $1 \mu\text{m}$. Při měření přímosti je lepší stroj s přesnějším odečítacím systémem. Kruhoměr podle štíhlosti Gaussovy křivky z *grafu 3* naměřil s větší chybou než Prismo Ultra, což při takto přesném měření, kdy šířka tolerančního pole je $6 \mu\text{m}$ mohlo být způsobeno nečistotou. Dalším důvodem by mohlo být to, že stroj byl před repasí a dnes, kdy už je po generální opravě, by měřil s mnohem menší chybou.



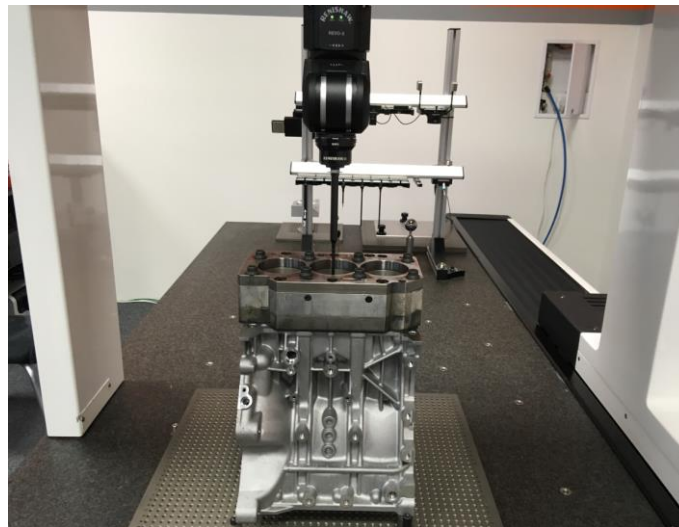
graf 4



graf 5

Na *grafu 4* a *grafu 5* je názorně vidět vliv polohy upnutí součásti ve stroji. Blok motoru je měřen spolu s přípravkem zvaným brýle, který simuluje přišroubovanou hlavu motoru a slouží zároveň jako ochrana při honování vložek válců motoru. Tento přípravek svou vahou zatěžuje blok, čímž dochází k deformaci. Na CMM Prismo Ultra byl blok motoru s brýlemi měřen naležato, to znamená, že osa válců byla rovnoběžně s pracovní deskou, a to způsobilo ohyb válců vlivem gravitační síly působící na brýle. Pro rovnoběžnost v rovině 0-180°, tedy v rovině rovnoběžné s pracovní deskou, kde nebyl blok deformovaný, měřilo PRISMO s nejmenší

chybou. Naopak v rovině 90-270°, tedy v rovině kolmé k pracovní desce, kde je blok vlivem gravitace ohýbaný pod vahou brýlí, PRISMO měřilo s největší chybou. Na stroji s otočnou hlavou a kruhoměru byl blok motoru s brýlemi měřen nastojato, to znamená osa válců byla kolmá k pracovní desce a válce tak nebyly ohýbány pod vahou přípravku. V *grafu 4* a *grafu 5* je vidět, že výsledky pro MFK a REVO dosahují v obou rovinách přibližně stejných četností výsledků.



obr. 25 Měření s hlavou REVO 2

8 Porovnání pomocí koeficientů způsobilosti

Z vypočtených dat pomocí popisné statistiky jsem vypočítal koeficienty způsobilosti C_g a C_{gk} , které jsou v *Tabulce 3*.



Tabulka 3

Charakteristika	PRISMO	REVO 2	MFK	PRISMO	REVO 2	PRISMO	REVO 2	MFK	PRISMO	REVO 2	PRISMO	REVO 2	MFK	PRISMO	REVO 2
	Cg	Cg	Cg	Cgk	Cgk	Cg	Cg	Cg	Cgk	Cgk	Cg	Cg	Cg	Cgk	Cgk
Kruhovitost hloubka 5 mm	0,327671	2,284161	4,472136	-0,28986	-2,01768	0,908646	1,817348	2	0,132571	0,878385	1,849326	2,429329	4,472136	-0,46424	-0,3644
Kruhovitost hloubka 7 mm	0,698545	1,732051	2,828427	-0,4664	-1,1547	0,594784	2,963189	4,472136	0,41054	1,432208	0,879267	1,88795	3,651484	-0,01454	-0,40906
Kruhovitost hloubka 9 mm	0,821535	2,011205	2,236068	0,073062	-0,838	0,985717	1,817348	1,03975	-1,34774	-1,90821	0,759453	2,429329	2,390457	0,074401	-0,20244
Kruhovitost hloubka 17 mm	0,633593	2,429329	4,472136	0,029124	-1,41711	0,876762	2,108185	594,9641	0,560953	1,160345	0,61694	2,44949	1,754116	0,312192	0,571548
Kruhovitost hloubka 24 mm	0,907286	1,279204	4,472136	-0,64402	-1,23656	2,236297	2,429329	3,651484	2,042858	1,902974	0,362179	2,011205	3,651484	-0,06348	-0,1676
Kruhovitost hloubka 39 mm	0,683821	1,732051	2,236068	-0,94438	-1,84752	1,071518	2,108185	3,651484	0,673163	1,300047	0,994834	1,697056	594,9641	-1,56826	-1,55496
Kruhovitost hloubka 70 mm	0,691053	1,936492	3,651484	0,142219	-0,3873	1,435308	1,554383	4,472136	0,484704	-0,75129	1,333717	2,176429	3,651484	-0,09607	1,23331
Kruhovitost hloubka 110 mm	0,851428	1,202407	4,472136	-0,17996	-0,26052	0,887706	2,429329	4,472136	-0,1676	-0,3644	1,148685	1,697056	3,651484	-0,03848	0,820244
Kruhovitost hloubka 125 mm	0,521947	1,670538	1,118034	-0,24203	0,529004	0,925135	1,477098	1	0,32759	-0,12309	0,500273	1,222201	3,651484	-0,23766	0,672211
Přímost 0°	2,228806	3	0,655826	1,215888	-2,2	3,533052	3,162278	1,318761	2,285649	-0,21082	1,47669	2,860388	1,195229	0,580536	0,858116
Přímost 90°	2,212115	4,743416	0,307875	-4,87698	-1,1068	0,776657	4,140393	0,286299	-1,52901	-10,42	3,106432	2,44949	0,534522	-5,25111	-0,40825
Přímost 180°	3,257431	2,710524	1,754116	3,213782	-4,65307	2,223312	1,936492	2,390457	-4,21933	-3,22749	2,835125	3,162278	1,53393	-8,51927	0,316228
Přímost 270°	3,170919	3,872983	0,293927	-5,07865	-5,93857	1,371764	2,176429	0,5	-3,26978	0,072548	3,55972	3,523321	0,540343	-10,6101	1,820383
Rovnoběžnost 0-180°	10,62007	1,993779	0,633844	-5,97538	1,370723	1,103173	2,108185	1,987616	-1,00058	1,37032	1,783906	2,480695	1,758348	-2,13101	-2,54271
Rovnoběžnost 90-270°	0,258533	2,517267	0,536562	-0,51151	-4,68841	0,270064	2,42313	0,600808	-0,56911	1,605324	0,264599	1,250917	0,914659	-1,15287	-2,95529
Válcovitost	1,636853	1,619553	3,187276	-0,37459	-2,75324	2,371186	1,488131	0,898933	1,525799	1,209106	0,778348	2,108185	1,02262	0,223522	-2,319

Pokud se nejprve zaměříme na koeficient C_g popisující způsobilost z pohledu opakovatelnosti, tak vychází nejlépe otočná hlava Revo 2. Kruhoměr MFK vychází také velmi dobře obzvlášť pro charakteristiku kruhovitosti, ale jak již bylo zmíněno, stroj byl těsně před repasí a myslím, že dnes by výsledky měl značně lepší. Pevná hlava na Prismo Ultra dopadla nejhůř, což mohlo být způsobeno právě dlouhým snímačem, který byl málo tuhý a kroutil se při měření, nebo polohou bloku na pracovní desce.

Koeficienty C_{gk} pro pevnou a otočnou hlavu vyšly podstatně hůř než koeficienty C_g . Koeficient C_{gk} popisuje způsobilost i z pohledu strannosti výsledků vůči referenční hodnotě. Zatímco do koeficientu C_g vstupuje pouze šířka tolerančního pole a směrodatná odchylka, tak do koeficientu C_{gk} vstupuje i průměrná hodnota, a hlavně referenční etalonová hodnota. Hlavním důvodem, proč koeficienty C_{gk} vyšly záporné je velká strannost naměřených dat od referenčních hodnot a také malá šířka tolerančního pole.

$$C_g = \frac{0,2 \cdot T}{6 \cdot s_a}$$

$$C_{gk} = \min \left(\frac{(X_r + 0,1 \cdot T) - \bar{x}}{3 \cdot s_a}, \frac{\bar{x} - (X_r - 0,1 \cdot T)}{3 \cdot s_a} \right)$$



Tabulka 4

Charakteristika	PRISMO				REVO				MFK					
	MIN	MAX	ROZPĚTÍ	ROZPTYL	MIN	MAX	ROZPĚTÍ	ROZPTYL	MIN	MAX	ROZPĚTÍ	ROZPTYL		
V Á L E C 1	Kruhovitost hloubka 5 mm	0,0017	0,0032	0,0015	0,000000373	0,0021	0,0023	0,0002	0,000000008	0,0010	0,0011	0,0001	0,000000002	
	Kruhovitost hloubka 7 mm	0,0019	0,0027	0,0007	0,000000082	0,0020	0,0024	0,0004	0,000000013	0,0011	0,0013	0,0002	0,000000005	
	Kruhovitost hloubka 9 mm	0,0016	0,0022	0,0006	0,000000059	0,0021	0,0024	0,0003	0,000000010	0,0013	0,0015	0,0002	0,000000008	
	Kruhovitost hloubka 17 mm	0,0016	0,0024	0,0008	0,000000100	0,0021	0,0024	0,0003	0,000000007	0,0012	0,0013	0,0001	0,000000002	
	Kruhovitost hloubka 24 mm	0,0017	0,0023	0,0006	0,000000049	0,0020	0,0025	0,0005	0,000000024	0,0010	0,0011	0,0001	0,000000002	
	Kruhovitost hloubka 39 mm	0,0019	0,0026	0,0007	0,000000086	0,0019	0,0022	0,0003	0,000000013	0,0008	0,0010	0,0002	0,000000008	
	Kruhovitost hloubka 70 mm	0,0021	0,0029	0,0008	0,000000084	0,0025	0,0028	0,0003	0,000000011	0,0019	0,0020	0,0001	0,000000003	
	Kruhovitost hloubka 110 mm	0,0028	0,0034	0,0006	0,000000055	0,0026	0,0032	0,0006	0,000000028	0,0022	0,0023	0,0001	0,000000002	
	Kruhovitost hloubka 125 mm	0,0030	0,0038	0,0009	0,000000147	0,0027	0,0030	0,0003	0,000000014	0,0024	0,0028	0,0004	0,000000032	
	Přimost 0°	0,0017	0,0020	0,0002	0,000000008	0,0010	0,0012	0,0002	0,000000004	0,0017	0,0025	0,0008	0,000000093	
	Přimost 90°	0,0007	0,0009	0,0002	0,000000008	0,0019	0,0020	0,0001	0,000000002	0,0020	0,0035	0,0015	0,000000422	
	Přimost 180°	0,0024	0,0025	0,0002	0,000000004	0,0007	0,0009	0,0002	0,000000005	0,0023	0,0026	0,0003	0,000000013	
	Přimost 270°	0,0012	0,0014	0,0002	0,000000004	0,0013	0,0014	0,0001	0,000000003	0,0023	0,0036	0,0013	0,000000463	
	Rovnoběžnost 0-180°	0,0030	0,0031	0,0001	0,000000001	0,0039	0,0043	0,0004	0,000000018	0,0036	0,0046	0,0010	0,000000177	
	Rovnoběžnost 90-270°	0,0013	0,0037	0,0024	0,000001064	0,0018	0,0022	0,0004	0,000000011	0,0037	0,0048	0,0011	0,000000247	
	Válcovitost	0,0039	0,0043	0,0004	0,000000027	0,0050	0,0056	0,0006	0,000000027	0,0031	0,0033	0,0002	0,000000007	
	V Á L E C 2	Kruhovitost hloubka 5 mm	0,0020	0,0025	0,0005	0,000000048	0,0018	0,0022	0,0004	0,000000012	0,0016	0,0018	0,0002	0,000000010
		Kruhovitost hloubka 7 mm	0,0018	0,0026	0,0008	0,000000113	0,0021	0,0023	0,0002	0,000000005	0,0019	0,0020	0,0001	0,000000002
		Kruhovitost hloubka 9 mm	0,0020	0,0025	0,0005	0,000000041	0,0023	0,0027	0,0004	0,000000012	0,0035	0,0040	0,0005	0,000000037
		Kruhovitost hloubka 17 mm	0,0032	0,0037	0,0005	0,000000052	0,0032	0,0035	0,0003	0,000000009	0,0031	0,0031	0,0000	0,000000000
		Kruhovitost hloubka 24 mm	0,0035	0,0037	0,0002	0,000000008	0,0036	0,0038	0,0002	0,000000007	0,0035	0,0036	0,0001	0,000000003
Kruhovitost hloubka 39 mm		0,0033	0,0038	0,0005	0,000000035	0,0033	0,0036	0,0003	0,000000009	0,0032	0,0033	0,0001	0,000000003	
Kruhovitost hloubka 70 mm		0,0020	0,0024	0,0004	0,000000019	0,0026	0,0030	0,0004	0,000000017	0,0018	0,0019	0,0001	0,000000002	
Kruhovitost hloubka 110 mm		0,0024	0,0029	0,0005	0,000000051	0,0023	0,0026	0,0003	0,000000007	0,0017	0,0018	0,0001	0,000000002	
Kruhovitost hloubka 125 mm		0,0027	0,0033	0,0006	0,000000047	0,0025	0,0029	0,0004	0,000000018	0,0030	0,0035	0,0005	0,000000040	
Přimost 0°		0,0015	0,0016	0,0001	0,000000003	0,0010	0,0012	0,0002	0,000000004	0,0016	0,0020	0,0004	0,000000023	
Přimost 90°		0,0020	0,0026	0,0006	0,000000066	0,0018	0,0019	0,0001	0,000000002	0,0030	0,0048	0,0018	0,000000488	
Přimost 180°		0,0023	0,0025	0,0002	0,000000008	0,0022	0,0025	0,0003	0,000000011	0,0006	0,0008	0,0002	0,000000007	
Přimost 270°		0,0005	0,0008	0,0003	0,000000021	0,0020	0,0022	0,0002	0,000000008	0,0024	0,0034	0,0010	0,000000160	
Rovnoběžnost 0-180°		0,0044	0,0050	0,0006	0,000000058	0,0031	0,0035	0,0004	0,000000016	0,0029	0,0032	0,0003	0,000000018	
Rovnoběžnost 90-270°		0,0022	0,0046	0,0024	0,000000975	0,0052	0,0055	0,0003	0,000000012	0,0052	0,0063	0,0011	0,000000197	
Válcovitost		0,0046	0,0049	0,0003	0,000000013	0,0049	0,0054	0,0005	0,000000032	0,0046	0,0053	0,0007	0,000000088	
V Á L E C 3		Kruhovitost hloubka 5 mm	0,0018	0,0021	0,0003	0,000000012	0,0019	0,0021	0,0002	0,000000007	0,0012	0,0013	0,0001	0,000000002
		Kruhovitost hloubka 7 mm	0,0017	0,0023	0,0006	0,000000052	0,0019	0,0022	0,0003	0,000000011	0,0013	0,0014	0,0001	0,000000003
		Kruhovitost hloubka 9 mm	0,0018	0,0024	0,0006	0,000000069	0,0020	0,0023	0,0003	0,000000007	0,0014	0,0016	0,0002	0,000000007
		Kruhovitost hloubka 17 mm	0,0017	0,0025	0,0008	0,000000105	0,0022	0,0024	0,0002	0,000000007	0,0017	0,0020	0,0003	0,000000013
		Kruhovitost hloubka 24 mm	0,0017	0,0032	0,0015	0,000000305	0,0021	0,0023	0,0002	0,000000010	0,0015	0,0016	0,0001	0,000000003
	Kruhovitost hloubka 39 mm	0,0021	0,0026	0,0005	0,000000040	0,0018	0,0022	0,0004	0,000000014	0,0008	0,0008	0,0000	0,000000000	
	Kruhovitost hloubka 70 mm	0,0026	0,0030	0,0004	0,000000022	0,0022	0,0024	0,0002	0,000000008	0,0020	0,0021	0,0001	0,000000003	
	Kruhovitost hloubka 110 mm	0,0031	0,0036	0,0004	0,000000030	0,0028	0,0032	0,0004	0,000000014	0,0026	0,0027	0,0001	0,000000003	
	Kruhovitost hloubka 125 mm	0,0033	0,0043	0,0010	0,000000160	0,0027	0,0033	0,0006	0,000000027	0,0027	0,0028	0,0001	0,000000003	
	Přimost 0°	0,0015	0,0019	0,0004	0,000000018	0,0009	0,0011	0,0002	0,000000005	0,0012	0,0016	0,0004	0,000000028	
	Přimost 90°	0,0010	0,0012	0,0002	0,000000004	0,0019	0,0021	0,0002	0,000000007	0,0024	0,0033	0,0009	0,000000140	
	Přimost 180°	0,0031	0,0033	0,0002	0,000000005	0,0012	0,0014	0,0002	0,000000004	0,0007	0,0010	0,0003	0,000000017	
	Přimost 270°	0,0004	0,0006	0,0001	0,000000003	0,0025	0,0027	0,0002	0,000000003	0,0026	0,0035	0,0009	0,000000137	
	Rovnoběžnost 0-180°	0,0049	0,0052	0,0004	0,000000022	0,0015	0,0018	0,0003	0,000000012	0,0031	0,0035	0,0004	0,000000023	
	Rovnoběžnost 90-270°	0,0011	0,0034	0,0023	0,000001016	0,0082	0,0089	0,0007	0,000000045	0,0057	0,0064	0,0007	0,000000085	
	Válcovitost	0,0044	0,0053	0,0008	0,000000117	0,0056	0,0060	0,0004	0,000000016	0,0038	0,0044	0,0006	0,000000068	



V *Tabulce 4* jsou vypočteny minimální a maximální hodnoty jednotlivých výběrů naměřených dat, které nám určují interval rozpětí výsledků a ve sloupci ROZPĚTÍ je šířka tohoto intervalu. Dále je vypočtený rozptyl naměřených dat, který nám říká, jak moc jsou data jednotlivých výběrů rozptýlena. Tam, kde je záporný koeficient C_{gk} se referenční hodnota spolu s desetinou šířky tolerančního pole nevešla do intervalu rozpětí.

Závěr

Při porovnání přesnosti pevné a otočné hlavy vyšla lépe hlava otočná. Díky vnitřní kontrole laserem je schopná měřit přesněji. Na stroji s pevným snímacím systémem by bylo vhodnější použít snímač například z titanu, který bude tužší než snímač z uhlíkového kompozitu, který byl použit. Dále pro dosažení lepších výsledků z CMM Prismo Ultra by bylo vhodnější měřit blok motoru v poloze, kdy osy válců jsou kolmo k pracovní desce. Dalším důležitým faktorem je doba měření. Zatímco na stroji s pevnou hlavou se blok motoru měřil přibližně 24 minut, tak na stroji s otočnou hlavou Revo 2 byl blok motoru změřen během 6 minut. Otočná hlava měří daleko rychleji a na změření bloku motoru jí stačila jedna čtvrtina času, který potřebovala pevná hlava. Ovšem v obou případech, jak s otočnou, tak i s pevnou hlavou vyšla měření jako nezpůsobilá. Pro dosažení způsobilosti by bylo zapotřebí upravit strategii měření. Jedním z možných zásahů do strategie měření je snížení rychlosti skenování, čímž se eliminují dynamické vlivy stroje během měření. Další možností je již zmíněné vhodné napolohování součásti především ve stroji Prismo Ultra.



Seznam použité literatury

- [1] HOCKEN, R.J. a P.H. PEREIRA, ed. *Coordinate measuring machines and systems*. Second edition. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2012. Manufacturing engineering and materials processing. ISBN 978-142-0017-533.
- [2] BERÁNEK, Libor. *Strojírenská metrologie: ČVUT V PRAZE, FAKULTA STROJNÍ, ÚSTAV METROLOGIE A OBRÁBĚNÍ*. Praha, 2019.
- [3] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-1209-6.
- [4] Souřadnicové měřicí stroje. *Katedra výrobních systémů a automatizace* [online]. Liberec [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <http://www.ksa.tul.cz/getFile/id:2522>
- [5] Hexagon produkty: Souřadnicové měřicí stroje. *HEXAGON* [online]. [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/coordinate-measuring-machines>
- [6] ZEISS Průmyslová měřicí technika. *ZEISS* [online]. [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/home.html>
- [7] ZCAT - Portable CMM. *Fowler* [online]. [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <http://www.fowlerprecision.com/Products/zCAT-DCC-CMM/>
- [8] *Optimalizace strategie měření na CMM s ohledem na maximální produktivitu a opakovatelnost*. Praha, 2019. Diplomová práce. ČVUT V PRAZE, FAKULTA STROJNÍ. Vedoucí práce Ing. Jan Urban.
- [9] Laser trackery. *HEXAGON* [online]. [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/laser-tracker-systems>
- [10] FLACK, David a John HANNAFORD. *Measurement Good Practice Guide No. 80: Fundamental Good Practice in Dimensional Metrology* [online]. Teddington: © Queen's Printer and Controller of HMSO, 2012 [cit. 2020-04-24]. ISSN 1368-6550. Dostupné z: https://www.npl.co.uk/special-pages/guides/gpg80_metrology
- [11] FLACK, David. *Measurement Good Practice Guide No. 43: CMM probing* [online]. Teddington: © Crown Copyright 2014, 2014 [cit. 2020-04-24]. ISSN 1368-6550. Dostupné z: https://www.npl.co.uk/special-pages/guides/gpg43_cmp



- [12] Sondy a software pro souřadnicové měřicí stroje. *RENISHAW* [online]. [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/sondy-a-software-pro-souradnicove-merici-stroje--6329>
- [13] *The Most Common Used Material Of CMM* [online]. In: . 20 February 2017 [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <http://www.cmm-nano.com/info/the-most-common-used-material-of-cmm-11368749.html>
- [14] Souřadnicové měřicí stroje. *Mitutoyo* [online]. [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: https://shop.mitutoyo.cz/web/mitutoyo/cs_CZ/mitutoyo/08/Sou%C5%99adnicov%C3%A9%20m%C4%9B%C5%99ic%C3%AD%20stroje/index.xhtml
- [15] OSTERSTOCK, Mark. Stylus Materials Get Lighter, Stiffer, and Harder. *Quality magazine* [online]. 1 June 2015 [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://www.qualitymag.com/articles/92645-stylus-materials-get-lighter-stiffer-and-harder>
- [16] Doteky společnosti Renishaw. *RENISHAW* [online]. [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/doteky-spolecnosti-renishaw--18675>
- [17] FABIAN, František. *Statistické metody řízení jakosti*. Praha: Česká společnost pro jakost, 2007. ISBN 978-80-02-01897-1.
- [18] PERNIKÁŘ, Jiří. *Hodnocení způsobilosti kontrolních prostředků* [online]. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav metrologie a zkušebnictví [cit. 2020-07-20]. Dostupné z: http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/31_Pernikar_VUTBR.pdf



Seznam obrázků

obr. 1 Schéma CMM [1]	2
obr. 2 Rozdělení CMM [2]	4
obr. 3 Kartézský souřadnicový systém na CMM [5]	4
obr. 4 Leitz Infinity [5]	5
obr. 5 ZEISS Contura [6].....	6
obr. 6 Mitutoyo MiSTAR55 [14]	7
obr. 7 ZEISS GageMax [6]	7
obr. 8 ZEISS Pro [6]	8
obr. 9 ZEISS MMZ E [6]	9
obr. 10 Absolute Arm Compact [5]	10
obr. 11 Fowler zCAT [7]	11
obr. 12 Leica Absolute Tracker AT403 [9]	11
obr. 13 Třecí pohon [1].....	15
obr. 14 Kuličkový vodící šroub [1]	16
obr. 15 Rozdělení podle snímacího systému [2]	17
obr. 16 Části doteku [1]	18
obr. 17 Diskový dotek [16]	18
obr. 18 Hvězdicový dotek [16]	18
obr. 19 Válcový dotek [16]	18
obr. 20 ZEISS Vast Gold [6]	21
obr. 21 Schéma spínacího snímače [11].....	22
obr. 22 Aktivní dotykový snímací systém [11]	23
obr. 23 ZEISS RDS [6]	24
obr. 24 Gaussovo křivka [3].....	27
obr. 25 Měření s hlavou REVO 2	36



Seznam tabulek

Tabulka 1	30
Tabulka 2	31
Tabulka 3	37
Tabulka 4	38



Seznam grafů

graf 1.....	33
graf 2.....	33
graf 3.....	34
graf 4.....	35
graf 5.....	35