

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



**Způsoby vyrovnání součástí při měření na souřadnicových
měřicích strojích**

*Methods of component alignment when measuring on coordinate
measuring machines*

Bakalářská práce

2020

Autor: Jana Jirásková
Vedoucí práce: Ing. Petr Mikeš, Ph. D.
Studijní program: Výroba a ekonomika ve strojírenství
Studijní obor: Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jirásková** Jméno: **Jana** Osobní číslo: **456998**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Způsoby vyrovnání součástí při měření na souřadnicových měřicích strojích

Název bakalářské práce anglicky:

Methods of component alignment when measuring on coordinate measuring machines

Pokyny pro vypracování:

- 1) Vyrovnání součástí při souřadnicovém měření, souřadnicové systémy.
- 2) Metody pro definici základního souřadnicového systému.
- 3) Aplikace jednotlivých metod na reálných součástech.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Petr Mikeš, Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Ing. Petr Mikeš, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


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



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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna 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 studentky

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci *Způsoby vyrovnání součástí při měření na souřadnicových měřicích strojích* vypracovala samostatně za použití v práci uvedených pramenů a literatury.

V Praze dne

.....

Jana Jirásková

Poděkování

V první řadě děkuji Ing. Petru Mikešovi, Ph.D. za školení se souřadnicovou měřicí technikou a poskytnutí vedení a rad při vypracování této bakalářské práce. Dále děkuji Ing. Janu Urbanovi za úvod do programu Calypso a Ing. Vladimíru Šulcovi za pomoc při měření praktické části. Děkuji také své rodině za poskytnutí zázemí a prostředků ke studiu.

Abstrakt

Tato bakalářská práce pojednává o vyrovnání součástí při měření na souřadnicových měřicích strojích. Popisuje, jak měření na souřadnicových měřicích strojích probíhá, jaké souřadnicové systémy existují, které stroje jich využívají. Dále se zaměřuje na jednotlivé metody vyrovnání a pro jaké typy součástí jsou vhodné. V praktické části je metoda vyrovnání na geometrické prvky použita na několika modelových úlohách a reálné součásti.

Klíčová slova

souřadnicové měřicí stroje, CMM, vyrovnání součástí, souřadnicové systémy

Abstract

This bachelor thesis discusses component alignment when measuring on coordinate measuring machines. It describes the way measuring on coordinate measuring machines takes place, what coordinate systems exist and which machines use them. In the next section it focuses on individual methods of component alignment and which method is suitable for what kind of component. In the practical part the standard method is used on several model tasks and a real component.

Keywords

coordinate measuring machines, CMM, component alignment, coordinate systems

Obsah

Seznam použitých zkratek	7
Úvod.....	8
1 Vyrovnání součásti při souřadnicovém měření	9
2 Souřadnicové systémy	11
2.1 Kartézský souřadnicový systém.....	11
2.1.1 Portálové měřicí stroje	12
2.1.2 Mostové měřicí stroje	13
2.1.3 Konzolové (výložníkové) měřicí stroje	13
2.1.4 Stojanové (sloupové) měřicí stroje s vodorovným ramenem	14
2.2 Cylindrický souřadnicový systém.....	14
2.3 Sférický souřadnicový systém.....	16
2.3.1 Měřicí ramena	17
2.3.2 Laser trackery	18
3 Metody pro definici základního souřadnicového systému	19
3.1 Metoda 3D připasování	21
3.2 Metoda RPS	22
3.3 Metoda P6	24
4 Aplikace metody vyrovnání na geometrické prvky	26
4.1 Modelové úlohy	26
4.1.1 Hřídél	27
4.1.2 Deska	32
4.1.3 Příruba.....	37
4.2 Reálná součást.....	46
Závěr	49
Seznam použité literatury	50
Seznam obrázků.....	52
Seznam rovnic.....	54
Seznam tabulek	54

Seznam použitých zkratk

CMM	Coordinate Measuring Machine	<i>(Souřadnicový měřicí stroj)</i>
CNC	Computer Numerical Control	<i>(Počítačově číslicové řízení)</i>
CAD	Computer-aided Design	<i>(Počítačem podporované projektování)</i>
SW	Software	<i>(Programové vybavení)</i>
RPS	Reference Point System	<i>(Systém referenčních bodů)</i>

Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá možnými způsoby vyrovnání součásti při jejich kontrole na souřadnicových měřicích strojích.

První kapitola se věnuje postupu měření na souřadnicových měřicích strojích a vyrovnání. Popisuje, co to vyrovnání je, proč a kde se používá, objasňuje definici polohy tělesa v prostoru pomocí šesti stupňů volnosti.

Druhá kapitola se zabývá popisem polohy objektu pomocí souřadnicových systémů. Jsou zde popsány kartézské i nekartézské (cylindrické a sférické) souřadnicové systémy a převod mezi nimi, u každého systému jsou uvedena zařízení, která ho využívají.

Třetí kapitola se zabývá různými metodami vyrovnání součástí (metoda vyrovnání na geometrické elementy, 3D připasování, RPS a P6) a zmiňuje, pro jaký typ součástí jsou vhodné a jak se používají.

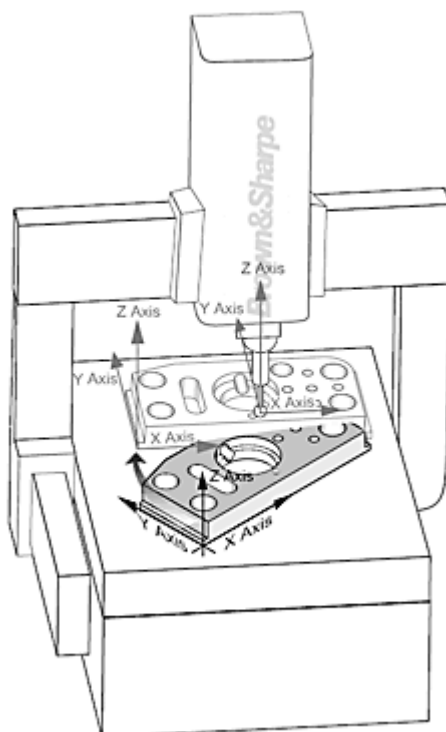
V závěrečné kapitole, která se skládá ze dvou částí, je prakticky využita metoda vyrovnání na geometrické prvky. V první se na modelových úlohách určuje souřadnicový systém u přesně obroběných součástí, aby se předešlo nepřesnostem v důsledku chyby tvaru dílu a mohl se zkoumat vliv samotného vyrovnání na výsledky měření. Vady jsou simulovány nalepením kousku papíru na součásti. V druhé části je uveden příklad z praxe, kde způsob vyrovnání zásadním způsobem ovlivňuje naměřené výsledky.

1 Vyrovnání součásti při souřadnicovém měření

Souřadnicové měřicí stroje (CMM) jsou v současné době jedny z nejpoužívanějších zařízení pro kontrolu rozměrů všech velikostí díky své výkonnosti a univerzálnosti, které zajišťují rychlé, levné a přesné měření. Jsou schopné komplexního měření součásti, určení rozměrů i tvaru, vzájemné polohy geometrických prvků na součásti, umožňují kontrolu rozměrových charakteristik a geometrických tolerancí. [1]

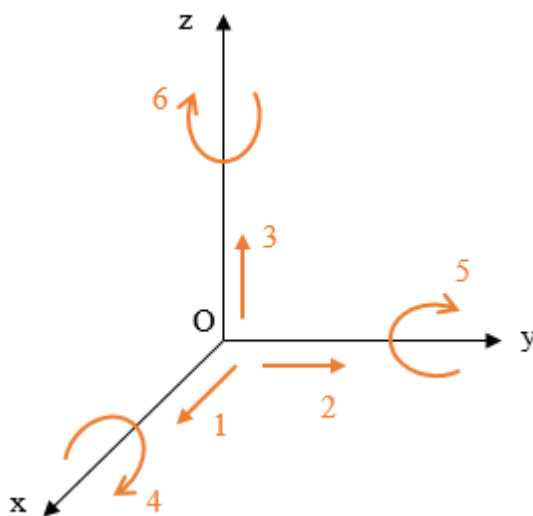
Při měření je nutné nejprve stanovit základní bod v prostoru, pak je možné měřit polohy bodů na dané součásti. Jsou tak popsány v nepohyblivém souřadnicovém systému stroje. Z naměřených bodů lze dále vypočítat elementy (geometrické prvky), pomocí kterých se na konec určují požadované rozměrové charakteristiky nebo geometrické tolerance. [1]

Před začátkem měření je vhodné prostudovat výkresovou dokumentaci součásti, pokud je dostupná. Definuje se upnutí dílu tak, aby byly všechny měřené charakteristiky dosažitelné, pokud možno tak, aby byl souřadnicový systém součásti rovnoběžný se souřadnicovým systémem stroje. Následuje sestavení konfigurace snímacího systému a jeho kvalifikace pomocí kalibrační koule. [1]



Obr. 1.1 Vyrovnání součásti [2]

Pro zajištění správnosti a přesnosti výsledků měření je nutné jednoznačně stanovit polohu měřené součásti, čehož se dosáhne vyrovnáním součásti. Vyrovnáním součásti se při měření na souřadnicových měřicích strojích rozumí proces vztažení jejího vlastního souřadnicového systému k souřadnicovému systému stroje (obr. 1.1). Poloha tělesa v prostoru je určena šesti stupni volnosti (obr. 1.2), tedy šesti nezávislými parametry udávající vzdálenost tělesa od počátku souřadnicového systému ve třech osách (translace) a otočení kolem nich (rotace). Těchto šest stupňů je proto potřeba definovat. [2]



Obr. 1.2 Stupně volnosti

Vyrovnání se dále používá i pro vyhodnocení některých geometrických tolerancí, jako je například tolerance polohy, kde základny určují souřadnicový systém, ke kterému se poloha vyhodnocuje.

Vyrovnání však nemá význam jen v metrologii, zasahuje do mnoha jiných odvětví a využívá se všude, kde se pracuje se souřadnicovými systémy. Ve strojní technologii se může jednat o obrábění na CNC strojích, které jsou schopny pracovat i s několika souřadnicovými systémy najednou. Využití najde i ve stavebnictví, geodézii nebo kartografii.

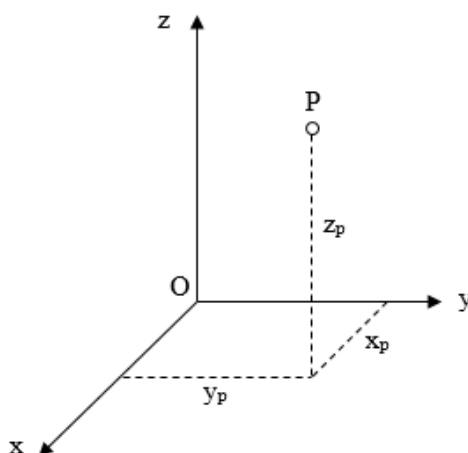
2 Souřadnicové systémy

Souřadnicové systémy umožňují jednoznačný popis polohy objektů a jejich následné znázornění pomocí matematických prostředků.

Souřadnicové měřicí stroje k realizaci měření v trojrozměrném prostoru nejčastěji využívají kartézský souřadnicový systém, existují ale i stroje nekartézské, které pracují s cylindrickým nebo sférickým souřadnicovým systémem.

2.1 Kartézský souřadnicový systém

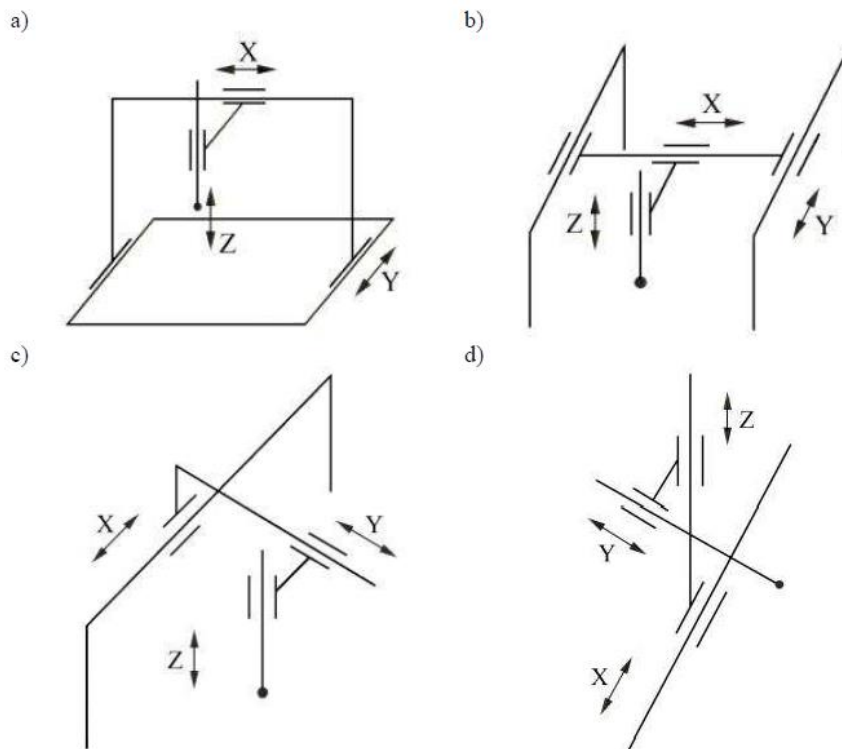
Nejpoužívanější je kartézský souřadnicový systém. Ten se vyznačuje třemi navzájem kolmými osami, které se protínají v počátku O , jak je znázorněno na obr. 2.1. Tyto osy se nejčastěji nazývají x , y , a z . Bod P v prostoru je definován vzdáleností od počátku ve směru těchto tří os, zapisuje se $P[x_p, y_p, z_p]$.



Obr. 2.1 Kartézský souřadnicový systém

Stroje s kartézským souřadnicovým systémem patří k nejjednodušejí ovladatelným zejména proto, že lidé jsou na tento systém zvyklí z každodenního života, navíc má většina součástí rozměry uvedené v kartézském systému. Tento typ strojů zaručuje oproti nekartézsky uspořádaným strojům obecně lepší přesnost. [3]

Mezi hlavní složky kartézsky uspořádaných souřadnicových měřicích strojů patří pohyblivá konstrukce se třemi osami, snímací hlava s konfigurací snímačů, které provádí samotné měření, řídicí jednotka a počítač s dalším vybavením potřebným pro vyhodnocení výsledků měření a případné zpracování protokolu. [1, 3]



Obr. 2.2 Schéma kartézsky uspořádaných CMM. a) Portálový CMM. b) Mostový CMM. c) Konzolový CMM. d) Stojanové CMM. [4]

Tyto stroje se liší ve způsobu provedení konstrukce. Rozdělují se na čtyři základní typy, kterými jsou portálové, mostové, konzolové a stojanové souřadnicové měřicí stroje (obr. 2.2). [1]

2.1.1 Portálové měřicí stroje

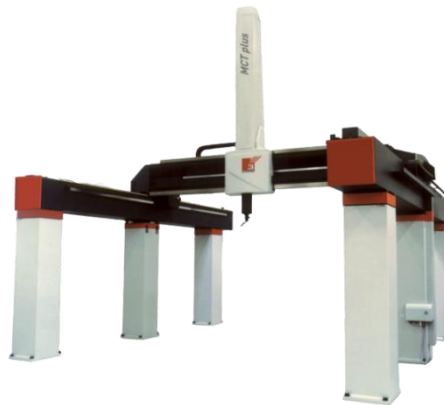


Obr. 2.3 ZEISS PRISMO [5]

Portálový typ patří mezi nejrozšířenější díky své vysoké přesnosti, která je zaručena vysokou tuhostí stroje. Patří mezi ně i stroje PRISMO (obr. 2.3) nebo CARAT od firmy

Carl Zeiss, na kterém probíhala měření. Existují dvě konfigurace, varianta s pohyblivým portálem a pevným stolem nebo varianta s pevným portálem, která je pevnější, ale kvůli nutnosti pohybovat těžkým stolem je možné pracovat jen menšími rychlostmi, což se projevuje na míře výkonnosti stroje. [3]

2.1.2 Mostové měřicí stroje



Obr. 2.4 MCT plus [6]

Mostový typ se používá pro měření dílů velkých rozměru s relativně přísnými tolerancemi, jako jsou lodní motory a převodovky, letecké konstrukce, rotory, součásti vyráběné pro jaderné a tepelné elektrárny nebo komponenty větrných turbín. Výhodou tohoto typu je snadný přístup operátora k součásti ze všech stran. Příkladem je stroj MCT plus společnosti Coord3 na obr. 2.4. [3, 6]

2.1.3 Konzolové (výložníkové) měřicí stroje



Obr. 2.5 TIGO SF [7]

Konzolový (výložníkový) typ disponuje pohyblivým konzolovým ramenem, na kterém je umístěn pojezd s pinolou, jak je vidět na obr. 2.5. Umožňuje přístup k součásti ze tří stran.

Nabízí vysokou výkonnost, zejména pro dlouhé a tenké součásti, které vyžadují velký měřicí rozsah jen v jedné ose. Kromě omezení velikosti měřené součásti je nevýhodou také možné prohýbání konzolové konstrukce. [3, 8]

2.1.4 Stojanové (sloupové) měřicí stroje s vodorovným ramenem

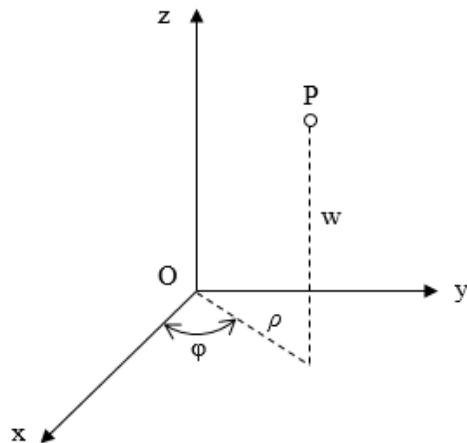


Obr. 2.6 ZEISS CALENO [5]

Stojanové (sloupové) měřicí stroje s vodorovným ramenem se používají při kontrole součástí například v automobilovém, leteckém, lodním nebo železničním průmyslu. Jejich konstrukce se skládá z nosného sloupu a posuvného horizontálního ramene se snímací hlavou. Výhodou je rychlé měření a možnost přístupu k součásti ze všech stran, nevýhodou omezená přesnost. Pro zvýšení výkonnosti se používají dva stroje současně (obr. 2.6). [3, 7, 8]

2.2 Cylindrický souřadnicový systém

Cylindrický (válcový) souřadnicový systém (obr. 2.7) definuje polohu bodu P v prostoru pomocí souřadnic ρ , φ a w . Souřadnice ρ a φ jsou polárními souřadnicemi bodu v rovině xy , tedy souřadnice ρ udává vzdálenost bodu P od osy z , souřadnice φ udává úhel průmětu průvodiče bodu do půdorysny od zvolené osy, která v ní leží. Souřadnice w udává výšku bodu P (vzdálenost od roviny xy). [9, 10]



Obr. 2.7 Cylindrický souřadnicový systém

Pro převod cylindrických souřadnic (ρ, φ, w) na kartézské (x, y, z) se používá vztahů [9]:

$$x = \rho \cdot \cos\varphi \quad (2.1)$$

$$y = \rho \cdot \sin\varphi \quad (2.2)$$

$$z = w \quad (2.3)$$

Pro převod kartézských souřadnic na cylindrické pak platí:

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2.4)$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{y}{x}\right) = \arcsin\left(\frac{y}{\rho}\right) = \arccos\left(\frac{x}{\rho}\right) \quad (0 \leq \varphi \leq 2\pi) \quad (2.5)$$

$$w = z \quad (2.6)$$

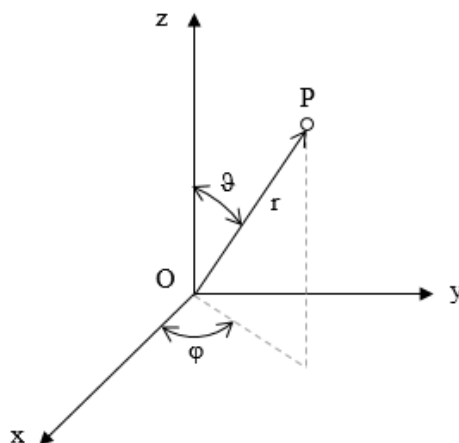
Cylindrický souřadnicový systém využívá např. stroj ScanMax firmy Zeiss (obr. 2.8). Jedná se o ruční CMM se snadným ovládáním, který je schopný odolat nepříznivým podmínkám, je tedy vhodný i pro měření v dílenském prostředí. Body na součásti se snímají manuálně. Stroj umožňuje vertikální pohyb v ose z, pro pohyb v osách x a y využívá ramene. [1, 11, 12]



Obr. 2.8 ScanMax [11]

2.3 Sférický souřadnicový systém

Bod P je ve sférickém systému určen souřadnicemi r , φ a ϑ (obr. 2.9). Souřadnice r je hodnotou vzdálenosti bodu P od počátku O . Souřadnice φ je velikost úhlu, který svírá průmět úsečky OP do roviny xy s kladnou částí osy x . Souřadnice ϑ udává velikost úhlu, který úsečka OP svírá s kladnou částí osy z *. [9, 13]



Obr. 2.9 Sférický souřadnicový systém

* Jiné literatury [10] definují souřadnici ϑ jako úhel mezi úsečkou OP a jejím průmětem do roviny xy . V tom případě pak pro převodní vztahy místo (2.9) platí $\vartheta = \arcsin(z/r) = \arctg(z/\sqrt{x^2+y^2})$ a $x = r \cdot \cos\vartheta \cdot \cos\varphi$, $y = r \cdot \cos\vartheta \cdot \sin\varphi$ a $z = r \cdot \sin\vartheta$ namísto uvedených rovnic (2.10), (2.11) a (2.12) v tomto pořadí.

Pro vztahy mezi sférickými (r, φ, ϑ) a kartézskými (x, y, z) souřadnicemi platí [9]:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (2.7)$$

$$\varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{y}{x}\right) = \arcsin\left(\frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) = \arccos\left(\frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) \quad (2.8)$$

$$\vartheta = \arccos\left(\frac{z}{r}\right) = \operatorname{arctg}\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z}\right) \quad (2.9)$$

$$x = r \cdot \sin\vartheta \cdot \cos\varphi \quad (2.10)$$

$$y = r \cdot \sin\vartheta \cdot \sin\varphi \quad (2.11)$$

$$z = r \cdot \cos\vartheta \quad (2.12)$$

Mezi stroje se sférickým souřadnicovým systémem se řadí měřicí ramena a laser trackery.

2.3.1 Měřicí ramena



Obr. 2.10 Absolute Arm Compact [14]

Měřicí ramena se skládají z několika kloubů a ramen, jejichž úhly jsou zaznamenávány a následně z nich lze vyhodnotit polohu měřené součásti v prostoru. Jsou přenosná, je s nimi proto možné měřit přímo ve výrobním prostředí a měřit součásti, které nelze přenášet nebo umístit do běžného kartézsky uspořádaného stroje.

Existují i stroje, jako je Absolute Arm Compact firmy Hexagon na obr. 2.10, které lze umístit přímo do obráběcího centra. Měřit mohou sondou (dotykově) i laserem (bezdotykově). Měření probíhají rychle, zvyšují produktivitu, měřicí ramena si proto najdou využití v mnoha odvětvích průmyslu. [14, 15]

2.3.2 Laser trackery



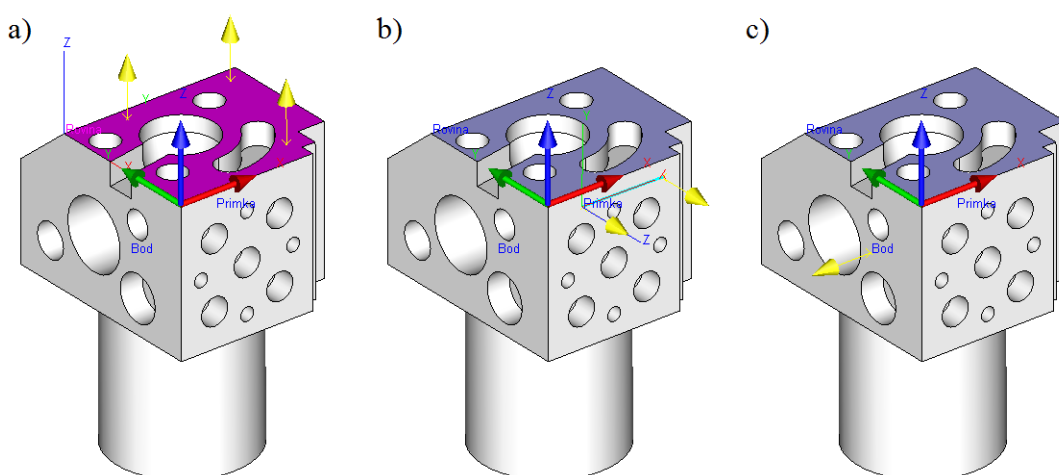
Obr. 2.11 Leica Absolute Tracker ATS600 [16]

Laserové trackery (obr. 2.11) jsou přesné, spolehlivé a odolné přenosné přístroje, vhodné pro měření velkých objektů a dílů, které nelze měřit klasickými dotykovými metodami, přímo ve výrobním prostředí. Laserový tracker se skládá ze stojanu, optické hlavice a řídicí jednotky. V optické hlavici se nachází interferometr s lasery, úhlový a polohovací systém, laserová optika a elektronika. [16, 17]

Své uplatnění najdou kdekoli při výrobě rozměrově rozsáhlých dílů, zejména v automobilovém a leteckém průmyslu, energetice, těžkém strojírenství nebo stavebnictví. Využit se dají i k měření nástrojů, forem, pojezdů, dopravních a manipulačních systémů nebo upevňovacích konstrukcí. [16, 17]

3 Metody pro definici základního souřadnicového systému

Existuje několik metod pro vyrovnání součástí, jejich použití záleží na měřeném dílu. Za standardní metodu se považuje metoda vyrovnání na geometrické prvky, která většinou probíhá dle pravidla 3-2-1, kdy se postupně odebírají tři, dva a jeden stupeň volnosti. Na příkladu základního modelu, který je dostupný v softwaru Calypso od firmy Zeiss, by se postupovalo třeba tak, že by se v prvním kroku minimálně třemi body určila rovina na horní ploše součásti, v druhém minimálně dvěma body přímka na přední straně a ve třetím bod na boku dílu (obr. 3.1).



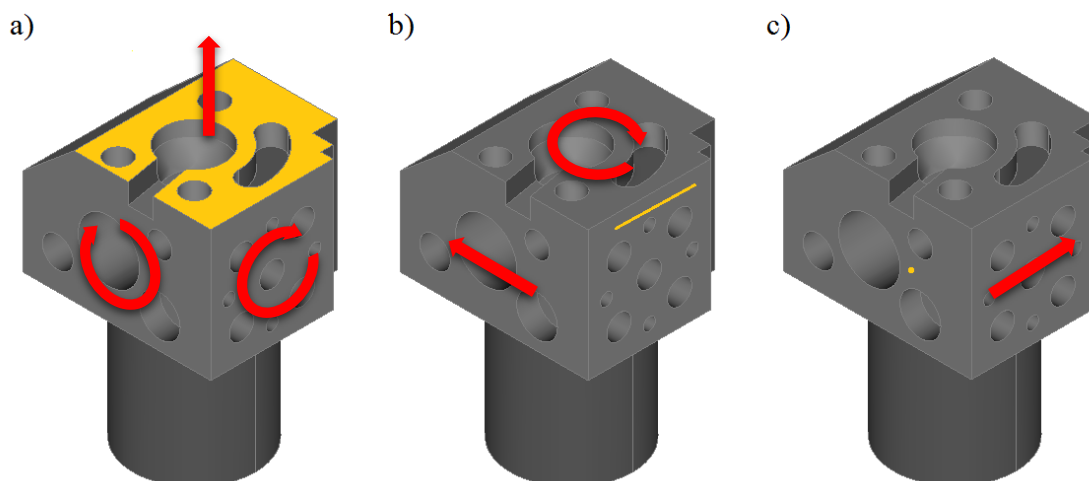
Obr. 3.1 Určení a) roviny, b) přímky a c) bodu na součásti

Pomocí těchto tří elementů je možné definovat souřadnicový systém součásti (obr. 3.2).

	Primární (prostor)	Osa +Z
	Rovina	
	Sekundární (rovina)	Osa +X
	Přímka	
	Terciární (nul.bod X)	
	Bod	
	Terciární (nul.bod Y)	
	Přímka	
	Terciární (nul.bod Z)	
	Rovina	

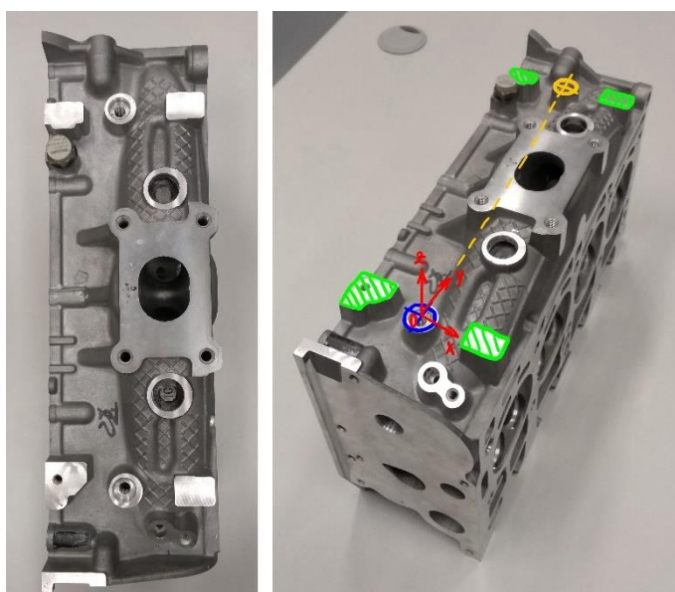
Obr. 3.2 Definice základního souřadnicového systému součásti

Primární rovina odebrá tři stupně volnosti, a to translaci podél osy Z a dva rotační stupně kolem os X a Y . Sekundární přímka v přední straně odebrá další dva stupně volnosti, zamezuje translaci v ose Y a rotaci kolem osy Z . Poslední stupeň, translaci v ose X , odebrá bod v boční straně (obr. 3.3). Počátek souřadnicového systému je určen nulovými body v jednotlivých osách.



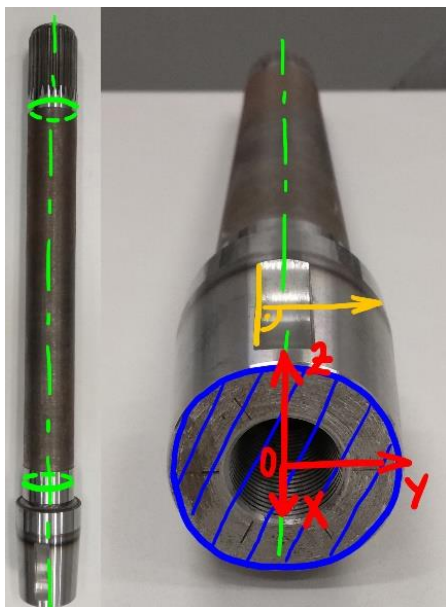
Obr. 3.3 Znáornění ubíraných stupňů volnosti a) rovinou, b) přímkou a c) bodem

Mezi typické součásti, u kterých se využívá metody vyrovnání na geometrické prvky, patří například hlava motoru (obr. 3.4). Na té je dána primární reference jako rovina určena čtyřmi ploškami (vyznačeny zeleně), směr rotace určí spojnice děr na čepy (vyznačeny žlutě), počátek souřadnicového systému je ve středu jedné z nich (vyznačeno modře).

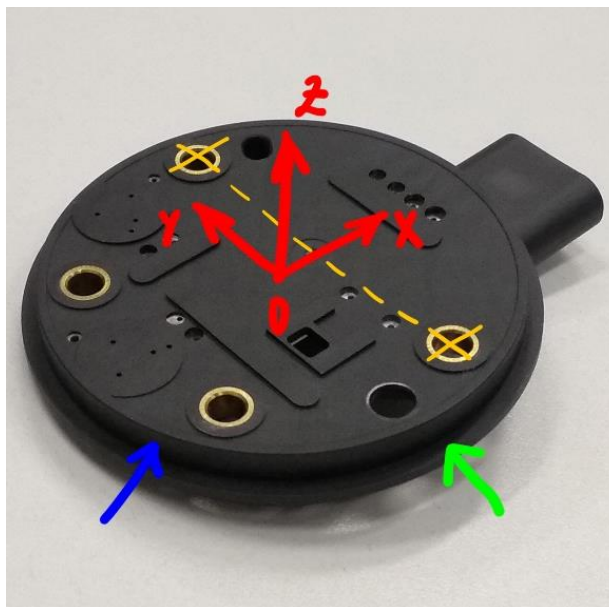


Obr. 3.4 Hlava motoru

Další typickou součástí je hřídel (obr. 3.5). U té je primární referencí osa součásti (určená jako spojnice středů dvou přesných kružnic, značena zeleně), směr rotace je možné určit normálou z roviny na boku drážky pro pero (značena žlutě), počátek souřadnicového systému je v úrovni čela součásti (značeno modře).



Obr. 3.5 Hřídel



Obr. 3.6 Příruba

Jinou typickou součástí je příruba (obr. 3.6), kde je může být primární referencí rovina dosedací plochy (zelená šipka), směr rotace je určen spojnicí děr (žlutá), počátek souřadnicového systému je ve středu povrchové kružnice válce (modrá šipka).

Kromě standardní metody je možné souřadnicový systém součásti definovat i následujícími alternativními metodami.

3.1 Metoda 3D připasování

Metodou 3D připasování je možné neomezené množství bodů nebo geometrických elementů (nejčastěji z CAD modelu) připasovat do jejich jmenovité geometrie. Toho se využívá především při měření obecných, tvarově složitých součástí, kde nejsou vztažné elementy jednoznačně definovány, jako jsou např. lopatky turbín (obr. 3.7), listy vrtulí lodního šroubu nebo křídla letadel. Jedná se o matematické vyrovnání, výsledkem není stanovení jednoznačného souřadnicového systému, ale nejpravděpodobnější zvolený bod. Součást pak přebírá souřadnicový systém modelu. [18, 19]



Obr. 3.7 Lopatka turbíny

Pro připasování existuje několik algoritmů. Software Calypso například provádí vyrovnání za pomoci metody nejmenších čtverců, tedy vyrovnání se provádí do té doby, než je součet druhých mocnin všech odchylek mezi jmenovitými a skutečně naměřenými body minimální. [18, 20]

Obdobně minimaxový algoritmus k sobě přiřazuje množiny dvou bodů tím, že minimalizuje maximální vzdálenosti mezi sobě si odpovídajícími body (jejich odchylku). Tento algoritmus je velmi citlivý na nejistoty měření, na výsledku vyrovnání se silně projeví každý špatný prvek. [21, 22]

Pokud je u měření prioritní směr vyrovnání ve smyslu, že je více žádoucí posun bodů podél povrchu součásti než v kolmém směru od ní, je výhodné vektorové připasování. To minimalizuje čtverce velikostí vektorů vzdáleností promítnutých na dané nominální vektory (většinou normály). [21, 22]

3.2 Metoda RPS

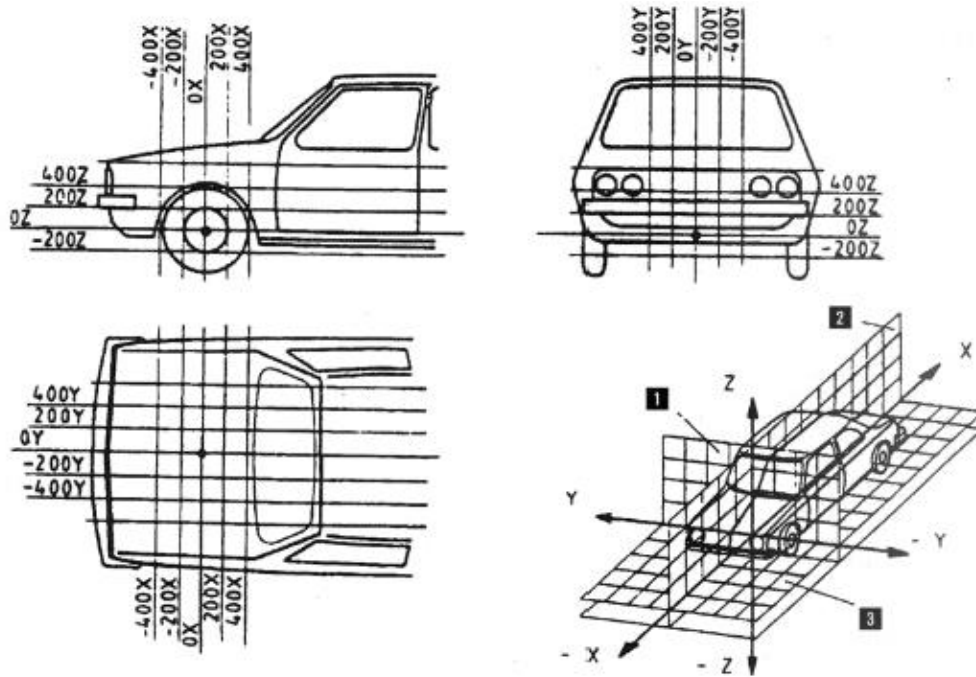
Vyrovnání lze dále provést metodou RPS, která je upravena normou VW 010 55. RPS je zkratka pro systém referenčních bodů. Tato metoda nalézá uplatnění v automobilovém

průmyslu při měření karoserií (obr. 3.8), jelikož umožňuje jednotné umístění součásti sestavy v průběhu celé výroby i při kontrole. [23]



Obr. 3.8 Část karoserie automobilu s výkresem

Střed souřadnicového systému se nachází ve středu přední nápravy vozidla, od něj jako reference se pak odvíjí souřadnice veškerých bodů určujících polohu součástí sestavy. Střed systému se proto většinou nenalézá na dané součásti, ale daleko mimo ni, jedná se o jeden globální systém. Po celém voze je rozprostřena mřížka, pomocí které je snadné okótovat a nalézt kterýkoliv bod nebo součást (obr. 3.9). [20]



Obr. 3.9 RPS mřížka [23]

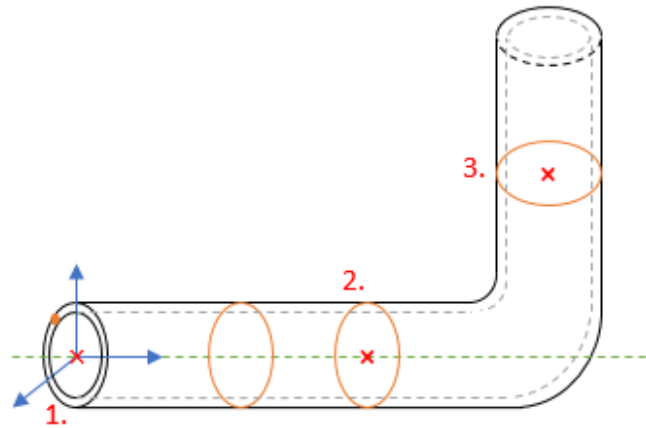
V SW Calypso má metoda RPS dvě varianty, RPS 321 a RPS volný tvar.

Varianta RPS 321 funguje podle pravidla 3-2-1 jako standardní metoda. Vychází z bodů, které jsou předepsány na výkresu součásti se jmenovitými souřadnicemi, není proto vhodná pro volné tvary. Vyrovnání tedy nelze volit libovolně, ale podle daných předpisů. Díky tomu je pak možné porovnávat výsledky rozdílných řešení na též součásti, protože měření vycházejí ze stejného souřadnicového systému. Metoda probíhá tak, že jedna ze souřadnic X, Y, Z je zaznamenána třikrát, druhá dvakrát a poslední jednou, je tudíž potřeba minimálně tři a maximálně šesti elementů. [18]

Varianta RPS volný tvar je podobná 3D připisování metodou nejmenších čtverců s tím rozdílem, že body a elementy které jsou promítány do jmenovitých rovin, kterými jsou hlavní roviny souřadnicového systému vyrovnání. Naměřené body jsou poté napasovány do těchto průmětů. [18]

3.3 Metoda P6

Software Calypso umožňuje vyrovnání součásti také pomocí metody P6. Ta ke stanovení souřadnicového systému potřebuje tři body. Počátek systému je stanoven jedním bodem. Tento bod společně s dalším pak definují hlavní osu. Poslední bod určuje otáčení kolem hlavní osy. Tohoto způsobu vyrovnání se využívá především při měření trubek. [18]



Obr. 3.10 Vyrovnání součásti metodou P6

Konkrétně toto vyrovnání tedy může vypadat jako na obr. 3.10. Na součásti se naměří tři kružnice a bod na čele (vyznačeny oranžově). První bod určující počátek systému leží na ose válce (vyznačena zeleně), který je stanoven ze dvou naměřených souosých kružnic, v úrovni čela. Druhý a třetí bod jsou středy dvou naměřených kružnic, přičemž druhý leží na ose válce a třetí mimo ni.

4 Aplikace metody vyrovnání na geometrické prvky

Pro splnění praktického cíle práce je aplikována metoda vyrovnání na geometrické prvky na modelové úlohy s uměle vnesenou nepřesností a na reálnou součást z praxe, kde není souřadnicový systém výkresem jednoznačně určen.

4.1 Modelové úlohy

Pro modelové úlohy byly vybrány součásti typu hřídel, deska a příruba, na kterých provedu vyrovnání různými způsoby. Zkoumala jsem vliv těchto vyrovnání na naměřené hodnoty. Jelikož se jedná o přesně obrobene díly, na výsledcích měření se projeví jen chyba metody vyrovnání, ne součásti jako takové. Proto na ně byly chyby uměle dodané, konkrétně nalepením kousku papíru, který představuje chybu tvaru (nepřesnost, nečistotu aj.), aby bylo možné výsledky porovnat.

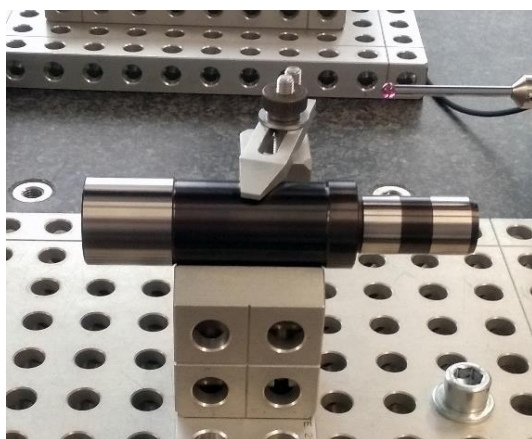


Obr. 4.1 ZEISS UPMC 850 CARAT

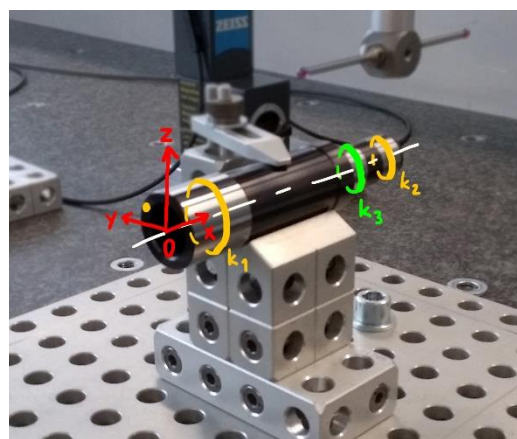
Samotné měření probíhalo na stroji společnosti Zeiss UPMC 850 CARAT (obr. 4.1) s maximální dovolenou chybou $\pm 0,7 + L/600 \mu\text{m}$. K měření a vyhodnocení výsledků

jsem použila SW Calypso. Při měření se postupuje tak, jak je popsáno v první kapitole. Protože k jednotlivým dílům nebyl k dispozici výkres ani CAD model, začínalo se upnutím součásti do přípravku z modulárního systému Alufix firmy Witte. Poté byla sestavena konfigurace snímacího systému a proběhla jeho kvalifikace (v SW Calypso označeno jako kalibrace). Následovalo vyrovnání součásti, definování elementů a charakteristik, a nakonec samotné vyhodnocení měření pomocí protokolů a grafů.

4.1.1 Hřídel

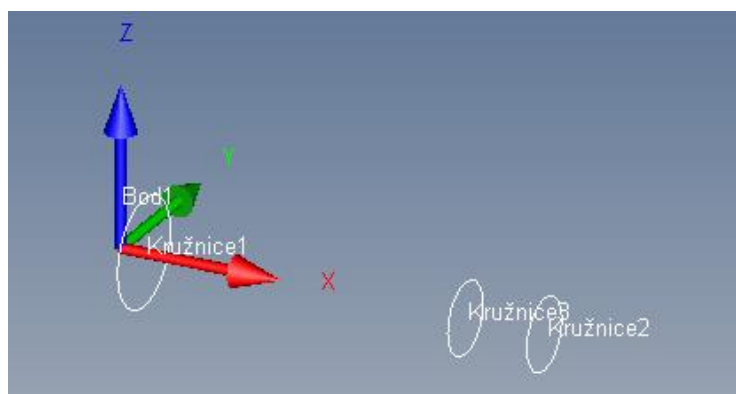


Obr. 4.2 Měřená součást (hřídel)



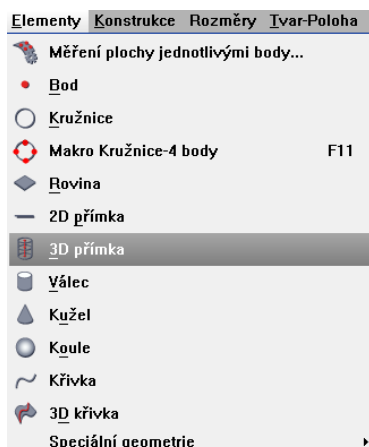
Obr. 4.3 Elementy na součásti (hřídel)

Jako první jsem měřila rotační součást typ hřídel na obr. 4.2. K určení souřadnicového systému bylo potřeba naměřit kružnice k_1 a k_2 a bod na čele součásti (na obr. 4.3 vyznačeny žlutě). Vyhodnocovala jsem charakteristiky kružnice k_3 (vyznačena zeleně). S naměřenými elementy jsem dále pracovala v SW Calypso (obr. 4.4).

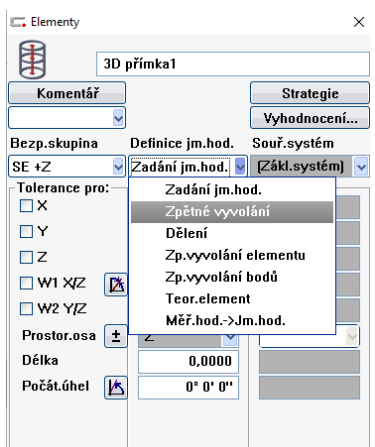


Obr. 4.4 Naměřené elementy v prostředí SW Calypso (hřídel)

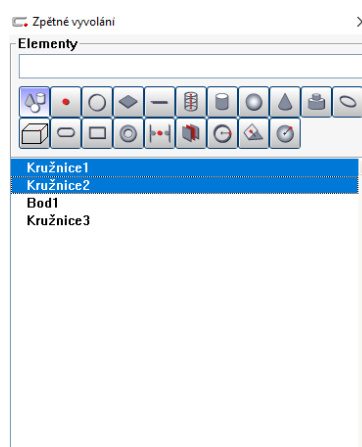
Z kružnic k_1 a k_2 jsem zpětným vyvoláním určila 3D přímku, tím jsem získala osu součásti (obr. 4.5-4.7).



Obr. 4.5 Výběr elementu z horního menu

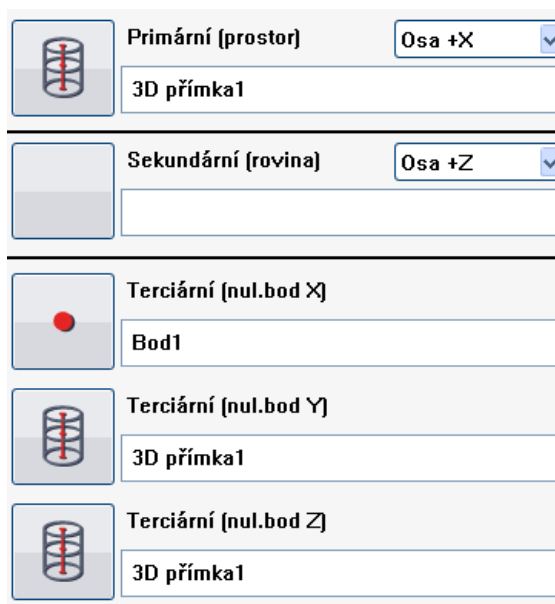


Obr. 4.6 Definice 3D přímky pomocí zpětného vyvolání



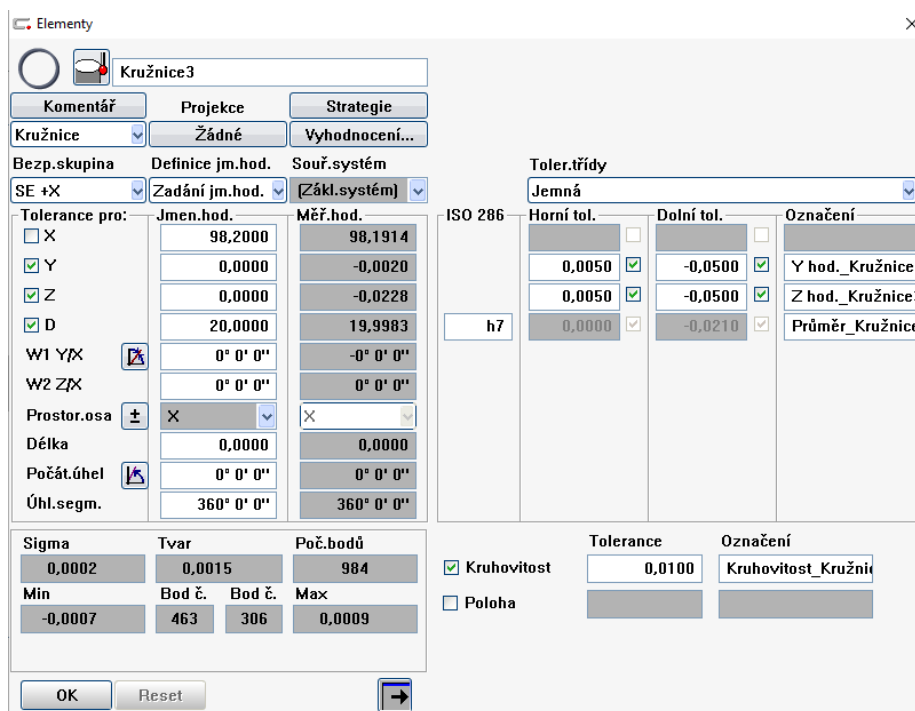
Obr. 4.7 Zpětné vyvolání ze dvou kružnic

Za pomoci těchto elementů jsem určila souřadnicový systém součásti (obr. 4.8). Primárním elementem je 3D přímka, která ubírá čtyři stupně volnosti (dvě rotace a dvě translace). Jelikož se jedná o rotační součást a třetí rotační stupeň nemá na polohu tělesa vliv, zůstává sekundární element určující směr rotace nevyplněn. Translace v posledním směru je omezena bodem z čela součásti (terciální element). Střed souřadnicového systému je umístěn v ose součásti na úrovni čela.



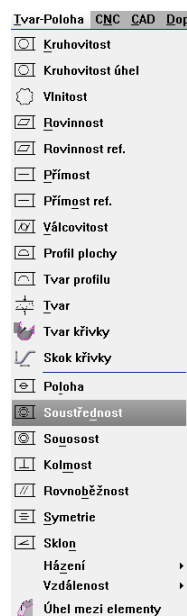
Obr. 4.8 Vyrovnání (hřidel)

Vyhodnocované charakteristiky byly z elementu kružnice k_3 . Vyhodnocovala se poloha jejího středu a průměr. Protože k součásti není dostupný výkres, tolerance byly zvoleny s ohledem na její očekávanou přesnost (obr. 4.9).



Obr. 4.9 Zadání tolerancí kružnice (hřídel)

Také jsem chtěla vyhodnotit její soustřednost vůči ose součásti. Charakteristiku jsem vybrala z menu Tvar-Poloha (obr. 4.10) a zadala toleranci. Jako základna pro hodnocení byla vybrána 3D přímka (obr. 4.11).







Obr. 4.10 Výběr charakteristiky



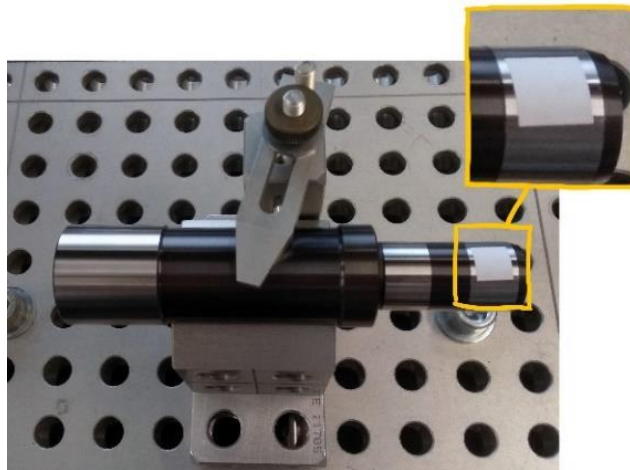
Obr. 4.11 Zadání charakteristiky (soustřednost)

Z těchto údajů jsem vygenerovala protokol (obr. 4.12). Jelikož se jedná o přesně vyrobenou součást, všechny charakteristiky se vyskytovaly v mnou zadaných tolerancích (označeny zeleně).

	Měř.hod.	Jm.hod.	Horní tol.	Dolní tol.	Odchyka
 Soustřednost1	0.0005	0.0000	0.0050		-
 Y hod._Kružnice3	0.0000	0.0000	0.0050	-0.0500	---
 Z hod._Kružnice3	0.0002	0.0000	0.0050	-0.0500	---
 Průměr_Kružnice3	19.9983	20.0000	0.0000	-0.0210	---

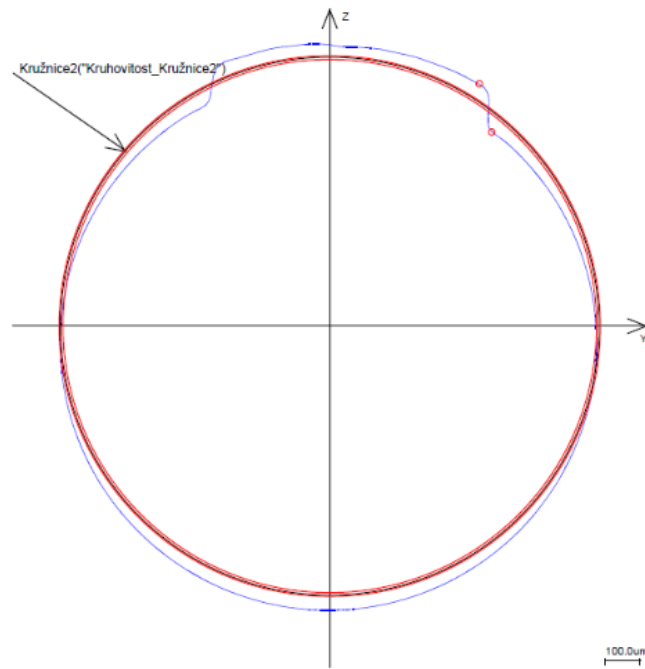
Obr. 4.12 Údaje z protokolu (hřídel)

Pro simulaci nepřesnosti na součásti na ni byla umístěna nálepka (obr. 4.13) do pozice, kde se nachází kružnice k_2 , která definuje souřadnicový systém součásti.










Obr. 4.13 Hřídel s nálepkou

Vyhodnocovat nyní budu navíc ještě kruhovitost jednotlivých kružnic. Aby bylo možné vyhodnotit chybu tvaru, je nutné element měřit metodou scanningu a ne bodově, kdy by mohlo dojít k tomu, že se snímané body budou nacházet mimo nepřesnost. Po přeměření je na grafu (obr. 4.14) vidět, jak tato vada ovlivnila tvar kružnice a posunula její střed.



Obr. 4.14 Graf kruhovitosti kružnice k_2

Na údajích z výsledného protokolu (obr. 4.15) je kromě vlivu na kruhovitost kružnice k_2 zřejmý také vliv na soustřednost kružnice k_3 , daný změnou polohy referenční 3D přímky v důsledku změny polohy středu kružnice k_2 . Neovlivněn zůstává průměr kružnice.

	Měř.hod.	Jm.hod.	Horní tol.	Dolní tol.	Odchylka
	Soustřednost1 0.0458	0.0000	0.0050		0.0408 0.0458
	Y hod._Kružnice3 -0.0020	0.0000	0.0050	-0.0500	- -0.0020
	Z hod._Kružnice3 -0.0228	0.0000	0.0050	-0.0500	- -0.0228
	Průměr_Kružnice3 19.9983	20.0000	0.0000	-0.0210	- -0.0017
	Kruhovitost_Kružnice1 0.0008	0.0000	0.0100		- 0.0008
	Kruhovitost_Kružnice2 0.0892	0.0000	0.0100		0.0792 0.0892
	Kruhovitost_Kružnice3 0.0006	0.0000	0.0100		- 0.0006

Obr. 4.15 Údaje z protokolu (hřídel s nálepkou)

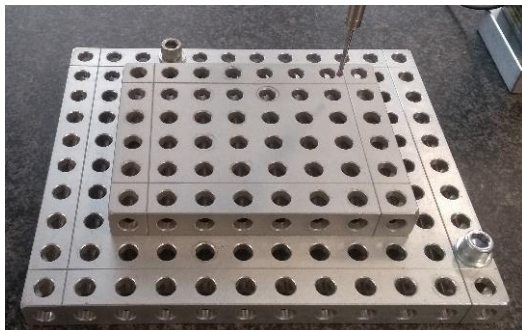
Porovnání těchto měření shrnuje tab. 1. Modře je vyznačena charakteristika s umělou nepřesností, červeně ovlivněná charakteristika. Chyba je zhruba desetina milimetru, což odpovídá tloušťce papíru.

Tab. 1 Srovnání měření součásti typ hřídel

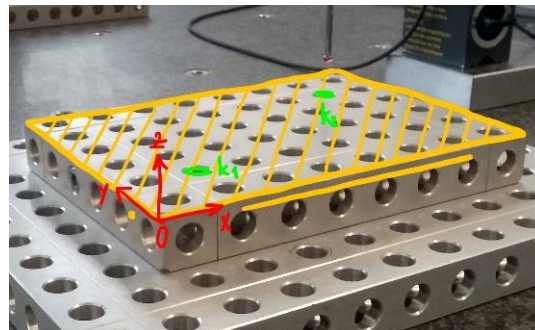
charakteristika	odchylka od jmenovité hodnoty [mm]	
	bez chyby tvaru	s chybou tvaru
soustřednost k_3	0,0005	0,0458
Y hodnota k_3	0,0000	-0,0020
Z hodnota k_3	0,0002	-0,0228
průměr k_3	-0,0017	-0,0017
kruhovitost k_2	0,0007	0,0892

4.1.2 Deska

Druhá úloha probíhala na součásti tvaru kvádrů (obr. 4.16), jedná se o desku z modulárního upínacího systému Alufix. Pro díly tohoto tvaru je vhodné k vyrovnání využít pravidla 3-2-1, jak je popsáno v kapitole 3. Na součásti se proto naměřila rovina, přímka a bod (obr. 4.17). Pro vyhodnocení dalších charakteristik se dále naměřily ještě dvě kružnice, které leží v otvorech součásti, kde jedna se nachází blízko počátku souřadnicového systému, druhá leží dál.

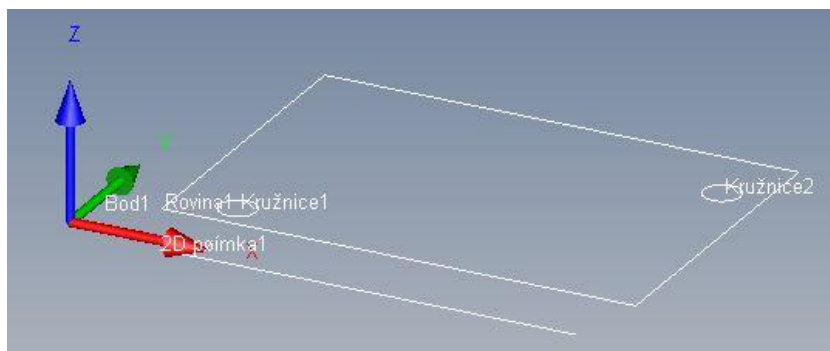


Obr. 4.16 Měřená součást (deska)



Obr. 4.17 Elementy na součásti (deska)

Naměřené elementy v programu Calypso je možné vidět na obr. 4.18.



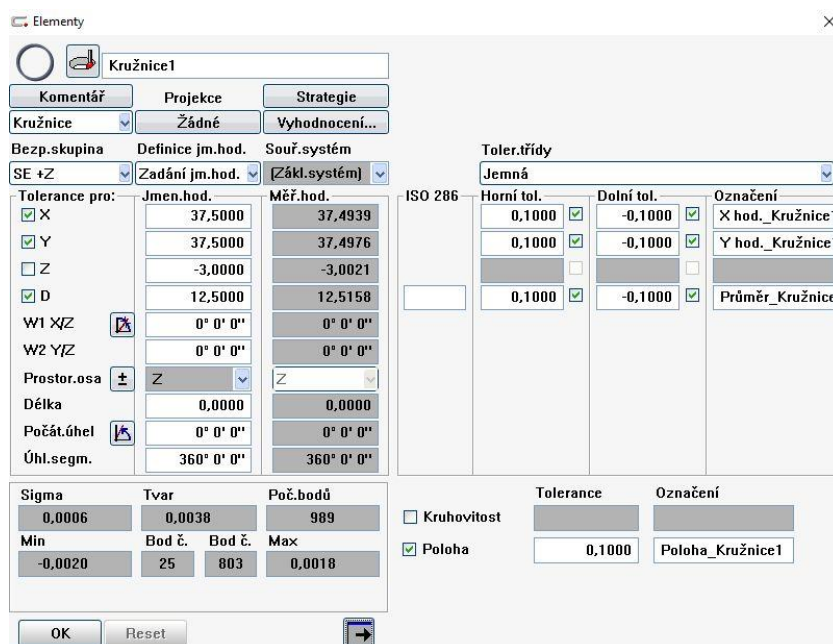
Obr. 4.18 Naměřené elementy v prostředí SW Calypso (deska)

Pro vyrovnání součásti (obr. 4.19) se jako primární element určí rovina, která ubírá tři stupně volnosti (dvě rotace a jednu translaci). Sekundárním elementem je přímka, která omezuje další dva stupně (rotaci a translaci). Bod zafixuje poslední stupeň volnosti (třetí translaci). Střed souřadnicového systému je ve směru osy X vynulován bodem, ve směru osy Y přímkou a ve směru osy Z rovinou.



Obr. 4.19 Vyrovnání (deska)

Po určení souřadnicového systému jsem mohla vyhodnotit požadované charakteristiky. V první řadě jsem chtěla pro kružnice k_1 a k_2 v otvorech měřit odchylku polohy jejich středu vůči jmenovité hodnotě, a to souřadnicemi i pomocí geometrické tolerance polohy, kde referencí je souřadnicový systém součásti (obr. 4.20). Zároveň jsem vyhodnocovala i jejich průměr. Postupovala jsem obdobně jako v předchozí úloze.



Obr. 4.20 Zadání tolerancí kružnice (deska)

Také mě zajímalo, jaký bude vliv na vzdálenost kružnic v osách X a Y i pokud se bude lišit jejich polární vzdálenost, kterou by nálepka neměla ovlivnit (obr. 4.21).

	Jmen.hod.	Měř.hod.	Horní tol.	Dolní tol.
<input checked="" type="checkbox"/> X	125,0000	124,9721	0,0500	-0,0500
<input checked="" type="checkbox"/> Y	75,0000	75,0523	0,0500	-0,0500
<input type="checkbox"/> Z	0,0000	0,0002	0,0500	-0,0500
<input checked="" type="checkbox"/> R	145,7738	145,7768	0,0500	-0,0500
<input type="checkbox"/> W	149° 2'10	149° 0'47	2°51'53	-2°51'53
<input type="checkbox"/> 3D	145,7738	145,7768	0,2000	-0,2000












Obr. 4.21 Zadání charakteristiky (vzdálenost)

Protože nálepka bude umístěna do polohy, kde je měřena přímka definující souřadnicový systém, vyhodnocovala jsem i její přímost (obr 4.22).

	Jmen.hod.	Měř.hod.	Horní tol.	Dolní tol.
<input type="checkbox"/> X				
<input type="checkbox"/> Y				
<input type="checkbox"/> Z				
<input type="checkbox"/> R				
<input type="checkbox"/> W				
<input type="checkbox"/> 3D				

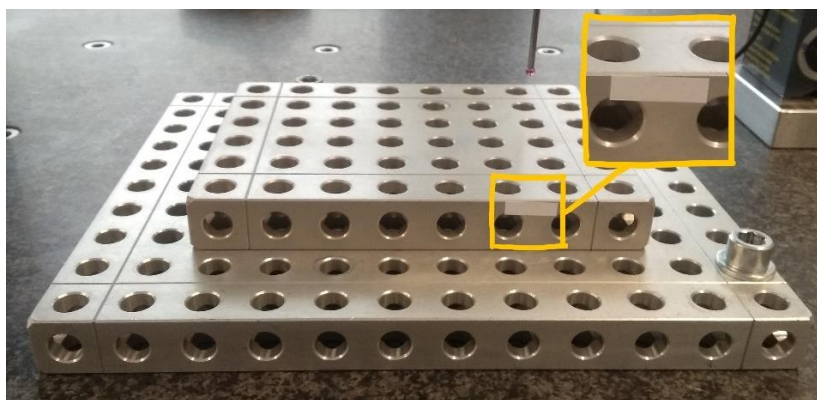
Obr. 4.22 Zadání charakteristiky (přímost)

Údaje z protokolu o těchto charakteristikách jsou na obr. 4.23.

	Měř.hod.	Jm.hod.	Horní tol.	Dolní tol.	Odchyka
	X hod._Kružnice1 37.5024	37.5000	0.1000	-0.1000	- 0.0024
	Y hod._Kružnice1 37.5138	37.5000	0.1000	-0.1000	- 0.0138
	Průměr_Kružnice1 12.5158	12.5000	0.1000	-0.1000	- 0.0158
	Poloha_Kružnice1 0.0280	0.0000	0.1000		-- 0.0280
	X hod._Kružnice2 162.5126	162.5000	0.1000	-0.1000	- 0.0126
	Y hod._Kružnice2 112.5024	112.5000	0.1000	-0.1000	- 0.0024
	Průměr_Kružnice2 12.5168	12.5000	0.1000	-0.1000	- 0.0168
	Poloha_Kružnice2 0.0258	0.0000	0.1000		-- 0.0258
	Vzdálenost1_X 125.0103	125.0000	0.0500	-0.0500	- 0.0103
	Vzdálenost1_Y 74.9886	75.0000	0.0500	-0.0500	- -0.0114
	Vzdálenost1_R 145.7767	145.7738	0.0500	-0.0500	- 0.0029
	Přímost1 0.0018	0.0000	0.0100		- 0.0018

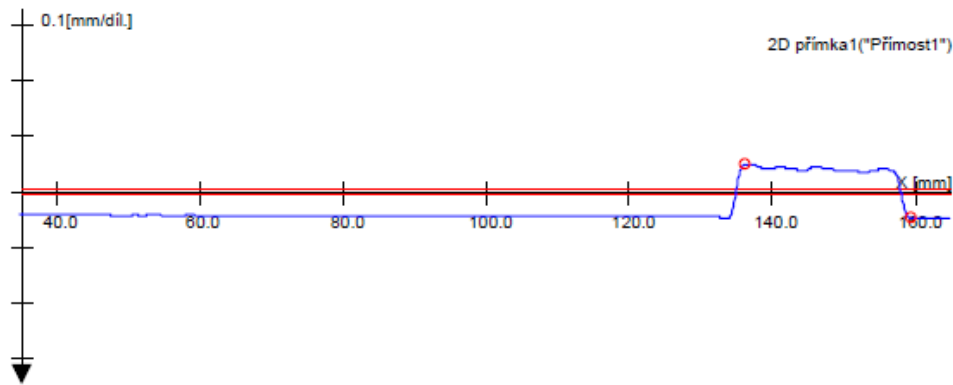
Obr. 4.23 Údaje z protokolu (deska)

Dále byla na součást umístěna z boku nálepka tak, aby ovlivnila data naměřená pro sekundární element souřadnicového systému (obr. 4.24).















Obr. 4.24 Deska s nálepkou

Po přeměření je na grafu přímosti (obr 4.25) vidět chyba tvaru měřené přímky.



Obr. 4.25 Graf přímosti přímky

Z údajů na výsledném protokolu (obr. 4.26) lze vidět, že poloha vzdálenější kružnice je mnohem více ovlivněna. Velmi rozdílná je také vzdálenost obou kružnic v ose Y. Žádný vliv naopak nálepka neměla na jejich polární vzdálenost a velikost průměrů.

	Měř.hod.	Jm.hod.	Horní tol.	Dolní tol.	Odchylka
 X hod._Kružnice1 37.4939	37.4939	37.5000	0.1000	-0.1000	- -0.0061
 Y hod._Kružnice1 37.4976	37.4976	37.5000	0.1000	-0.1000	- -0.0024
 Průměr_Kružnice1 12.5158	12.5158	12.5000	0.1000	-0.1000	0.0158
 Poloha_Kružnice1 0.0131	0.0131	0.0000	0.1000		0.0131
 X hod._Kružnice2 162.4660	162.4660	162.5000	0.1000	-0.1000	-- -0.0340
 Y hod._Kružnice2 112.5499	112.5499	112.5000	0.1000	-0.1000	0.0499
 Průměr_Kružnice2 12.5169	12.5169	12.5000	0.1000	-0.1000	0.0169
 Poloha_Kružnice2 0.1208	0.1208	0.0000	0.1000		0.0208 0.1208
 Vzdálenost1_X 124.9721	124.9721	125.0000	0.0500	-0.0500	--- -0.0279
 Vzdálenost1_Y 75.0523	75.0523	75.0000	0.0500	-0.0500	0.0023 0.0523
 Vzdálenost1_R 145.7768	145.7768	145.7738	0.0500	-0.0500	0.0030
 Přímost1 0.0983	0.0983	0.0000	0.0100		0.0883 0.0983

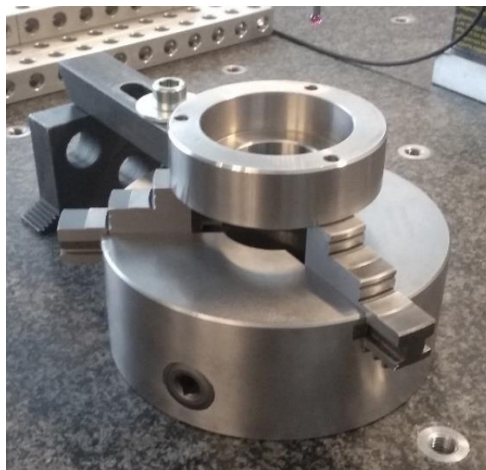
Obr. 4.26 Údaje z protokolu (deska s nálepkou)

Pro srovnání měření s nálepkou a bez ní slouží tab. 2.

Tab. 2 Srovnání měření součásti typ deska

charakteristika	odchylka od jmenovité hodnoty [mm]	
	bez chyby tvaru	s chybou tvaru
X hodnota k ₁	0,0024	-0,0061
Y hodnota k ₁	0,0138	-0,0024
průměr k ₁	0,0158	0,0158
poloha k ₁	0,0280	0,0131
X hodnota k ₂	0,0126	-0,0340
Y hodnota k ₂	0,0024	0,0499
průměr k ₂	0,0168	0,0169
poloha k₂	0,0258	0,1208
X vzdálenost kružnic	0,0103	-0,0279
Y vzdálenost kružnic	-0,0114	0,0523
polární vzdálenost kružnic	0,0029	0,0030
přímost	0,0018	0,0983

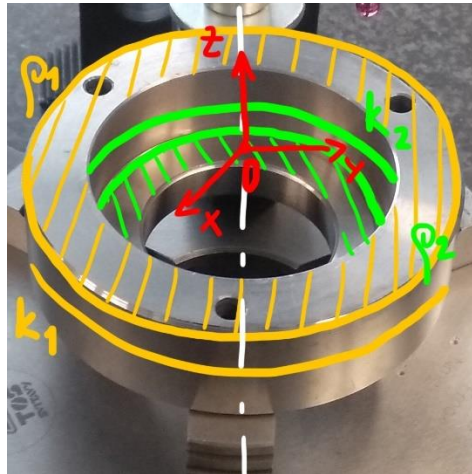
4.1.3 Příruba



Obr. 4.27 Měřená součást (příruba)

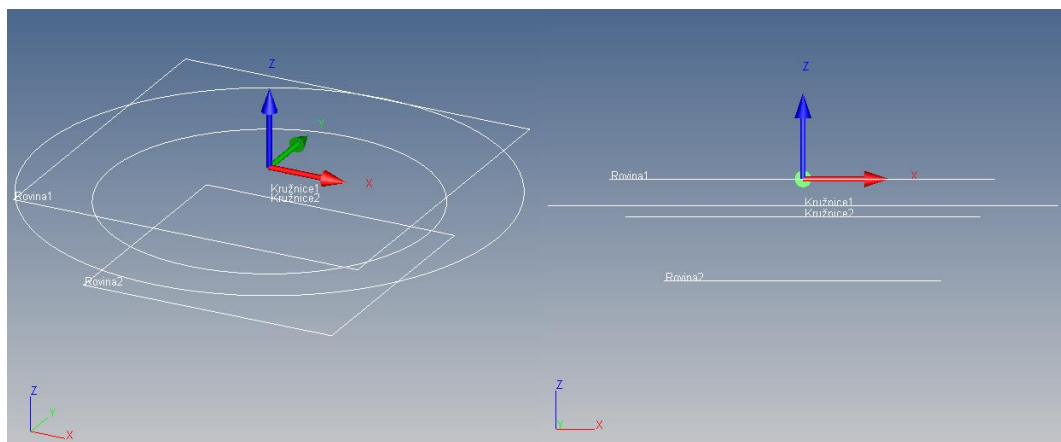
Posledním měřeným dílem je rotační součást přírubového typu (obr. 4.27). Vyrovnání na této součásti proběhne dvěma způsoby, v první části pomocí čelní roviny a vnějšího průměru, v druhé části pomocí vnějšího válce a čelní roviny.

Vyrovnání na čelo



Obr. 4.28 Elementy na součásti (příruba – čelo)

Pro vyrovnání na čelo je potřeba naměřit čelní rovinu ρ_1 a kružnici k_1 na vnějším obvodu součásti (obr. 4.28). Nálepka bude posléze umístěna na čelní rovinu, vyhodnocovala jsem charakteristiky kružnice k_2 na vnitřním průměru válce a roviny ρ_2 . Dále jsem pokračovala v SW Calypso (obr. 4.29).



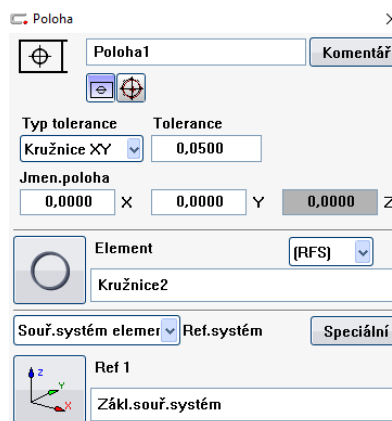
Obr. 4.29 Naměřené elementy v prostředí SW Calypso (příruba – čelo)

Primárním elementem pro vyrovnání je rovina ρ_1 (osa její normály). Ta omezuje tři stupně volnosti, dvě rotace a jednu translaci. Jedná se opět o rotační součást, sekundární element tak zůstává nevyplněn, protože rotace v posledním směru nemá na její polohu vliv (otvory na čele součásti jsou zanedbány). Terciálním elementem je kružnice k_1 , resp. její střed, který brání pohybu ve zbylých dvou translačních stupních. Střed souřadnicového systému je umístěn na úrovni čela s X a Y souřadnicemi středu kružnice k_1 (obr. 4.30).



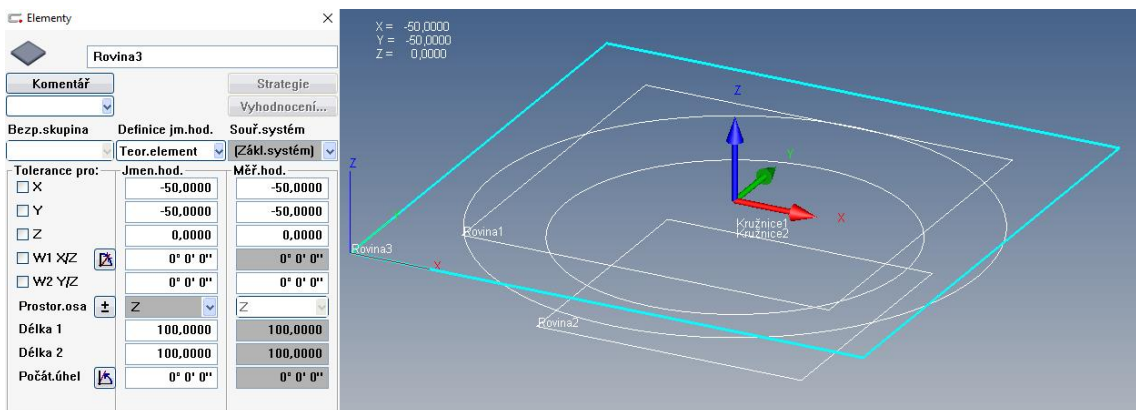
Obr. 4.30 Vyrovnání (příruba – čelo)

První vyhodnocovanou charakteristikou je poloha středu kružnice k_2 vůči základnímu systému (obr 4.31).



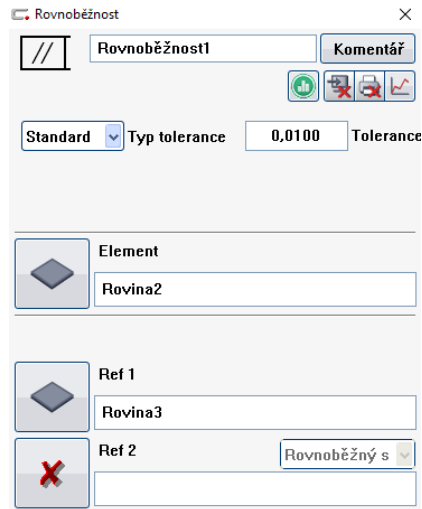
Obr. 4.31 Zadání charakteristiky (poloha)

Dále jsem vytvořila teoretickou rovinu ρ_3 v úrovni roviny ρ_1 (obr. 4.32)



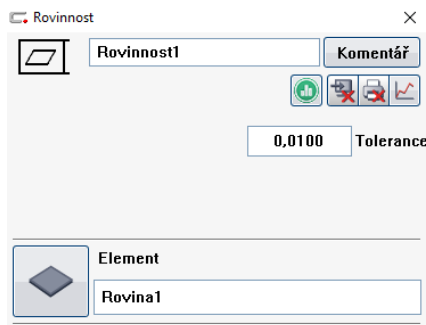
Obr. 4.32 Teoretická rovina

Ta je potřebná jako základna pro vyhodnocení rovnoběžnosti (obr. 4.33) roviny ρ_2 (rovinnost roviny ρ_1 ovlivní nálepka).






Obr. 4.33 Zadání charakteristiky (rovnoběžnost)

Pro posouzení vlivu nálepky v následujícím kroku je vyhodnocována výchozí rovinnost roviny ρ_1 (obr. 4.34).



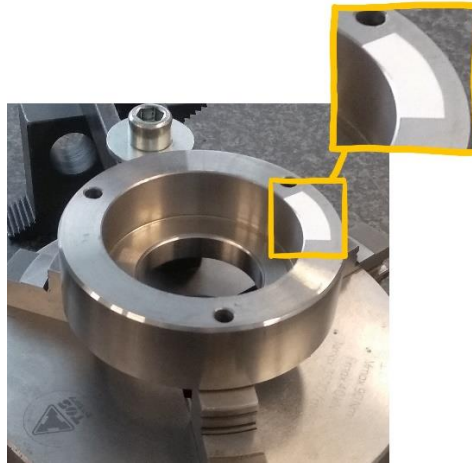
Obr. 4.34 Zadání charakteristiky (rovinnost)

Naměřená data z protokolu jsou na obr. 4.35.

	Měř.hod.	Jm.hod.	Horní tol.	Dolní tol.	Odchylka
 Poloha1	0.0180	0.0000	0.0500		┆- 0.0180
 Rovnoběžnost1	0.0026	0.0000	0.0100		┆- 0.0026
 Rovinnost1	0.0021	0.0000	0.0100		┆- 0.0021

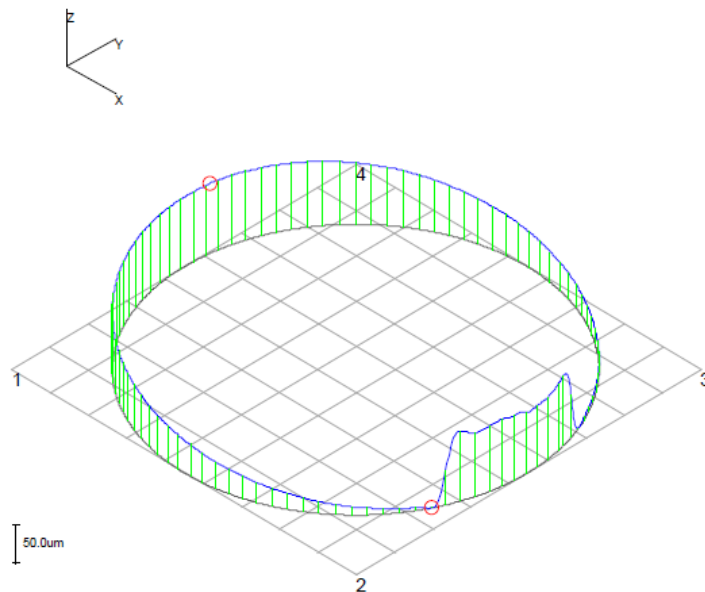
Obr. 4.35 Údaje z protokolu (příruba – čelo)

Na čelo součásti poté byla umístěna nálepka (obr. 4.36).





Obr. 4.36 Příruba s nálepkou na čele

Ta ovlivní rovinnost roviny ρ_1 , jak je vidět na grafu na obr. 4.37, celý souřadnicový systém se tak mírně natočí.



Obr. 4.37 Graf rovinnosti roviny ρ_1

Změnu odchylek lze vyčíst z protokolu (obr. 4.38). Simulovaná chyba nemá velký vliv na polohu středu kružnice k_2 , průmět do roviny XY se o moc neliší. Pootočení souřadnicového systému ale značně ovlivňuje rovnoběžnost roviny ρ_1 vůči teoretické rovině ρ_3 , která zůstala ve stejné poloze.

	Měř.hod.	Jm.hod.	Horní tol.	Dolní tol.	Odchylka
	Poloha1 0.0196	0.0000	0.0500		0.0196
	Rovnoběžnost1 0.0281	0.0000	0.0100		0.0181 0.0281
	Rovinnost1 0.0895	0.0000	0.0100		0.0795 0.0895

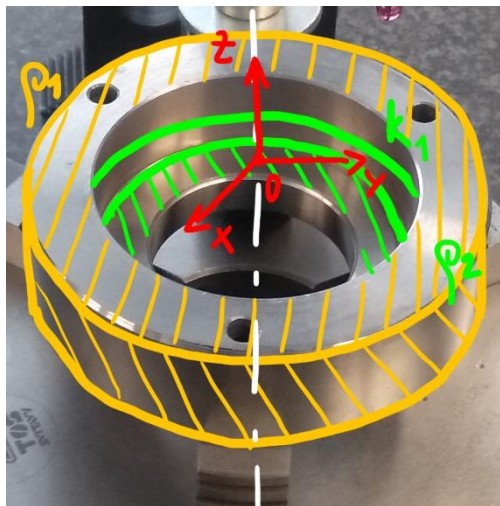
Obr. 4.38 Údaje z protokolu (příruba s nálepkou na čele)

Výsledky měření bez nálepky a s nálepkou porovnává tab. 3.

Tab. 3 Srovnání měření součásti typ příruba s vyrovnáním na čelo

charakteristika	odchylka od jmenovité hodnoty [mm]	
	bez chyby tvaru	s chybou tvaru
poloha k ₂	0,0180	0,0196
rovnoběžnost p ₂	0,0026	0,0281
rovinnost p ₁	0,0021	0,0895

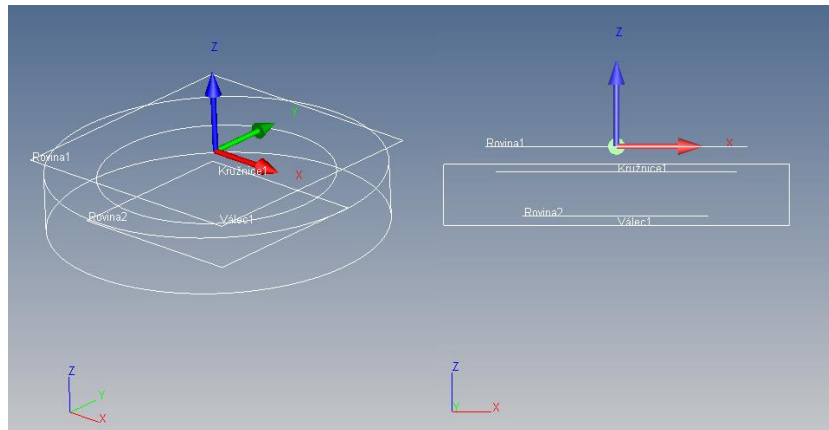
Vyrovnání na vnější válec



Obr. 4.39 Elementy na součásti (příruba – válec)

Měření při vyrovnání na vnější válec probíhá obdobně, většina měřených elementů je stejná (obr 4.39). Jen element kružnice na vnějším průměru je nahrazen válcem, který se určí ze dvou kružnic na jeho plášti. Do místa, kde se jedna z těchto kružnic měří, bude

posléze umístěna nálepka, která způsobí nepřesnost. Ta osu válce nakloní. Čelní rovina jen vynuluje systém v ose Z. Naměřené elementy v SW Calypso jsou na obr. 4.40.



Obr. 4.40 Naměřené elementy v prostředí SW Calypso (příruba – válec)

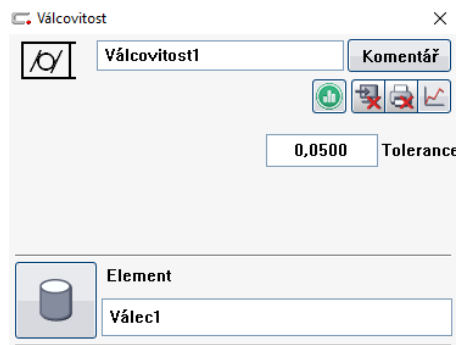
Souřadnicový systém součásti je určen pomocí naměřeného válce (jeho osy) a čelní roviny (obr. 4.41). Prostorová osa válce je primárním elementem, který ubírá čtyři stupně volnosti, ponechává jen možnost rotace kolem vlastní osy a translaci ve směru osy Z. Rotace součásti nemá na polohu vliv a není proto fixovaná. Poslední translace je omezena čelní rovinou. Střed souřadnicového systému je stejně jako v předchozím případě umístěn v ose součásti na úrovni čela.



Obr. 4.41 Vyrovnání (příruba – válec)




I vyhodnocované charakteristiky jsou podobné. První je soustřednost kružnice k_1 vztažena k válci. Druhou je rovnoběžnost roviny ρ_2 vůči teoretické rovině, která je odvozena z jmenovitých hodnot čelní roviny, která určuje základní souřadnicový systém,

stejně jako v předchozí úloze. Poslední vyhodnocovanou charakteristikou je válcovitost (obr. 4.42), která zobrazí vliv nálepky na jedné z měřených kružnic na povrchu válce.



Obr. 4.42 Zadání charakteristiky (válcovitost)

Výsledky z měření jsou na obr. 4.43.

	Měř.hod.	Jm.hod.	Horní tol.	Dolní tol.	Odchylka
 Soustřednost1	0.0141	0.0000	0.0500		-- 0.0141
 Rovnoběžnost1	0.0348	0.0000	0.0500		--- 0.0348
 Válcovitost1	0.0131	0.0000	0.0500		-- 0.0131

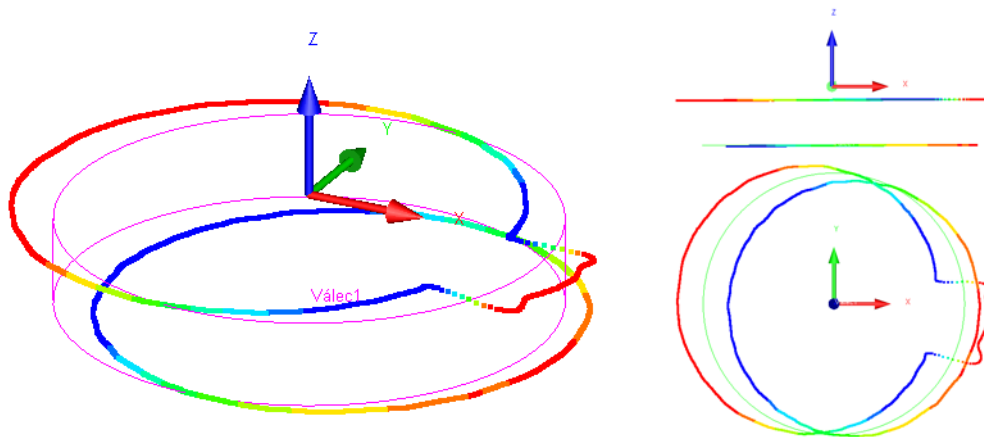
Obr. 4.43 Údaje z protokolu (příruba – válec)

Poté jsem na vnější průměr válce umístila nálepku tak, aby při následném měření válce ze dvou kružnic byla jedna naměřena s chybou (obr. 4.44).






Obr. 4.44 Příruba s nálepkou na vnějším průměru

Osa válce se tak mírně vychýlí (obr. 4.45).



Obr. 4.45 Znárodnění válcovosti

Vliv této nepřesnosti je vidět na údajích z výsledného protokolu (obr. 4.46). Soustřednost kružnice k_1 byla oproti předchozímu měření asi o 0,025 mm vychýlena, ztelnější je i rozdíl v odchylce rovnoběžnosti. Ačkoliv není tato součást tak přesná jako hřídel z kapitoly 4.1, nálepka má na výsledky větší vliv.

	Měř.hod.	Jm.hod.	Horní tol.	Dolní tol.	Odchylka
 Soustřednost1	0.0396	0.0000	0.0500		0.0396
 Rovnoběžnost1	0.0834	0.0000	0.0500		0.0834
 Válcovitost1	0.0928	0.0000	0.0500		0.0928

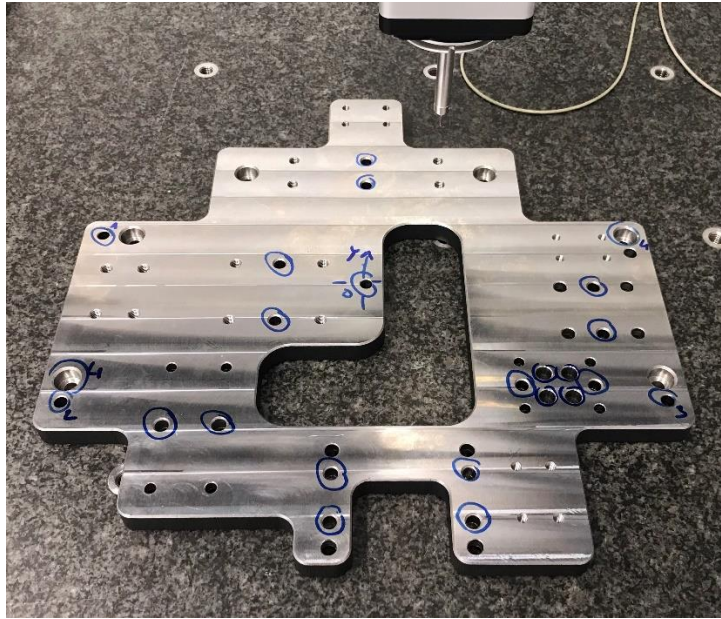
Obr. 4.46 Údaje z protokolu (příruba s nálepkou na vnějším průměru)

Srovnání výsledků z protokolů je shrnuto v tab. 4.

Tab. 4 Srovnání měření součásti typ příruba s vyrovnáním na válec

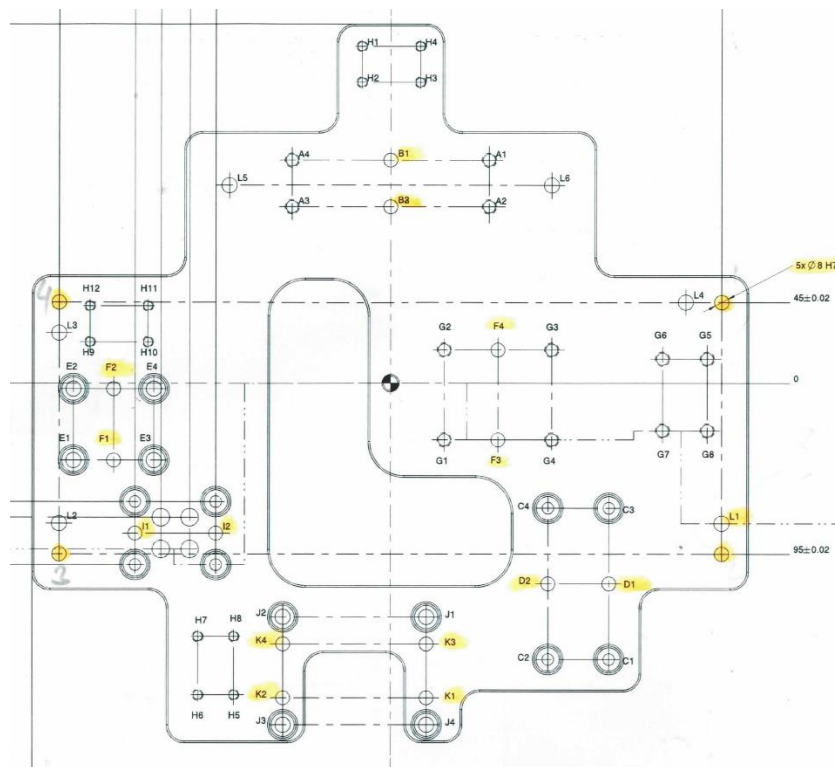
charakteristika	odchylka od jmenovité hodnoty [mm]	
	bez chyby tvaru	s chybou tvaru
soustřednost k_1	0,0141	0,0396
rovnoběžnost p_2	0,0348	0,0834
válcovitost	0,0131	0,0928

4.2 Reálná součást



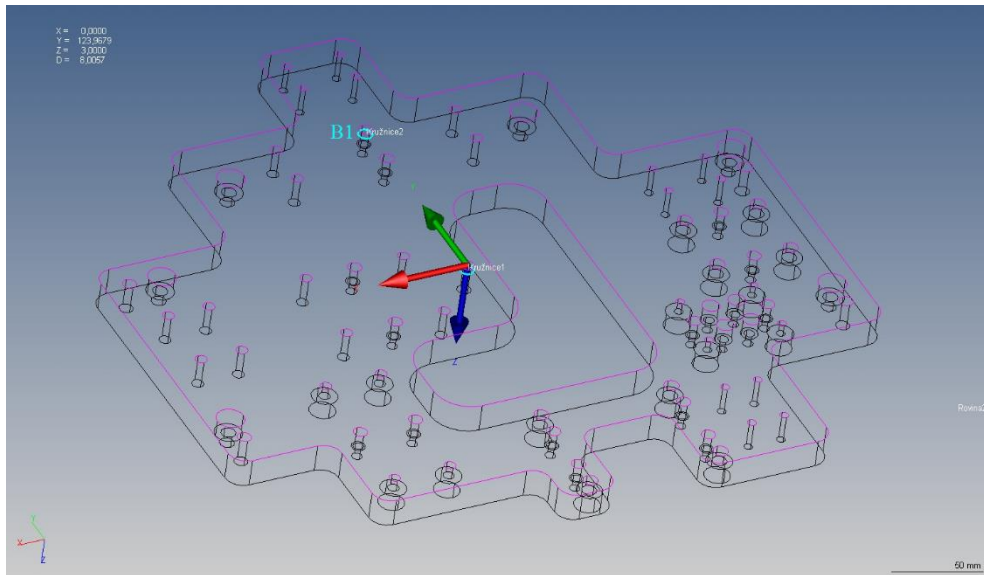
Obr. 4.47 Deska

V rámci měrového střediska fakulty strojní byla měřena obráběná deska (obr. 4.47), u které nebyla známá konkrétní funkce a vyrovnání nebylo výkresem (obr. 4.48) jasně specifikováno, byl dán jen počátek souřadnicového systému, rotace nikoliv.



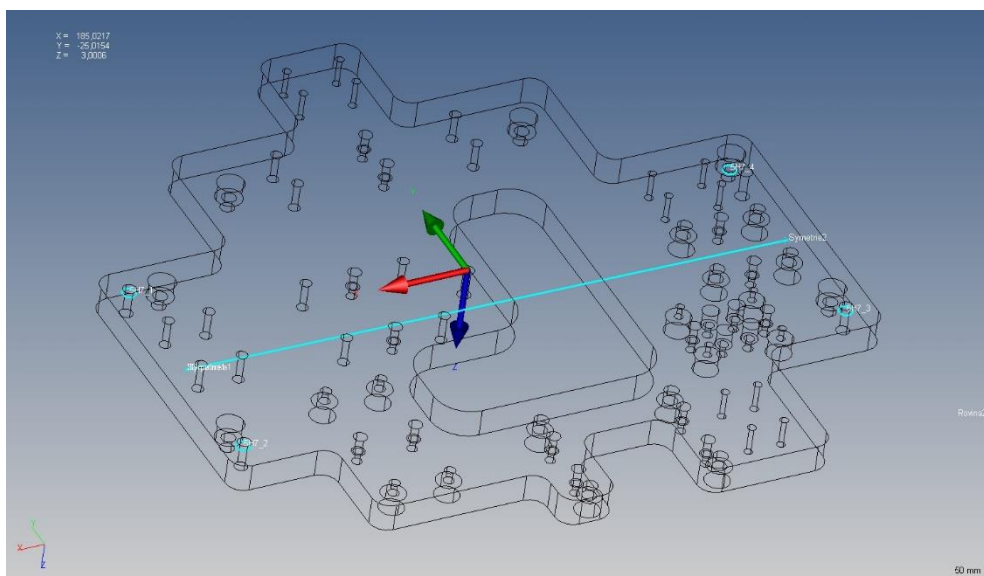
Obr. 4.48 Výkres součásti (výřez)

Na součásti se nachází přesné díry (na výkrese zvýrazněny) s tolerancí polohy $\pm 0,02$ mm. Kdyby byly vyvrtané bez chyby, neměl by způsob vyrovnání na měřené výsledky vliv. Otvory však byly rozdílné, byly proto zvoleny dvě metody, jak vyrovnání určit.



Obr. 4.49 První způsob vyrovnání

Při obou vyrovnáních byla primární referencí horní rovina součásti. V prvním způsobu (obr. 4.49) byl směr natočení (osa Y) určen spojnicí středu souřadnicového systému se středem kružnice B1. Při druhém vyrovnání (obr. 4.50) byl směr rotace (osa X) určen jako přímka symetrie děr 8H7 v rozích desky po pravé a levé straně.



Obr. 4.50 Druhý způsob vyrovnání

Díl byl poté přeměřen. Údaje pro několik otvorů jsou uvedeny v tab. 5. Červeně jsou vyznačeny hodnoty mimo tolerance. Jak je vidět, pro různou metodu vyrovnání je možné, aby měřená hodnota polohy stejného prvku byla jednou v toleranci a podruhé ne, rozdíl v naměřených hodnotách se blíží až čtyřem setinám milimetru. Otázkou pak zůstává, které vyrovnání použít. Záleží na konstrukci daného dílu, zde například to, která díra je pro funkci součásti důležitější.

Tab. 5 Srovnání naměřených hodnot obou způsobů vyrovnání

díra	poloha	jmenovitá hodnota [mm]	měřená hodnota [mm]	
			první způsob	druhý způsob
B2	X	0,000	-0,016	0,009
	Y	98,000	98,016	98,017
D1	X	122,000	122,036	122,010
	Y	-111,500	-111,464	-111,495
F2	X	-154,500	-154,484	-154,484
	Y	-3,000	-3,007	-2,969
I1	X	-142,500	-142,436	-145,454
	Y	-83,500	-83,508	-83,472
K3	X	20,000	20,063	20,028
	Y	-145,000	-144,969	-144,975

Závěr

Tato bakalářská práce byla zaměřena na způsoby vyrovnání součástí při jejich měření na souřadnicových měřicích strojích.

V první kapitole jsem se věnovala uvedení do problematiky měření na souřadnicových měřicích strojích a jak se při něm postupuje, popsala jsem, proč se vyrovnání provádí. V následující kapitole jsem uvedla existující souřadnicové systémy a s nimi spojené stroje. Další kapitola rozebírala konkrétní metody vyrovnání součástí a jejich použití.

Poslední část práce na modelových úlohách i reálné součásti ukázala, jak je důležité volit vyrovnání správně s ohledem na charakter a využití měřené součásti a jejich možných chyb tvaru. Vzhledem k tomu, že v dokumentaci často nebývá souřadnicový systém součásti jednoznačně popsán, spoléhá se mnohdy na zkušenost operátora vhodné vyrovnání zvolit.

Nevhodné vyrovnání tak může mít za následek chyby i na jinak velmi přesném stroji při měření přesně obrobene součásti. Vyrovnání slouží i jako reference pro vyhodnocení některých geometrických tolerancí, např. tolerance polohy, kde základny tvoří souřadnicový systém, k problémům proto nedochází jen při zaměřování dílce. Proto by vyrovnání mělo být ideálně jednoznačně specifikováno výkresem s ohledem na konstrukci dané součásti.

Seznam použité literatury

- [1] BERÁNEK, Libor. Strojírenská metrologie: Studijní podklad. Praha: FS ČVUT, 2018.
- [2] Úvod do souřadnicového měření. Hexagon Manufacturing Intelligence [online]. [cit. 2020-07-18]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-cz/solutions/technical-resources/metrology-101/intro-to-coordinate-metrology>
- [3] HOCKEN, Robert J. a Paulo H. PEREIRA, ed. Coordinate Measuring Machines and Systems. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2012. ISBN 978-1-4200-1753-3.
- [4] Pomiary ręczne i automatyczne na maszynach współrzędnościowych [online]. Dostupné také z: http://kbm.polsl.pl/lab-met/instrukcje/instrukcja_2012_Zeiss_C400.pdf
- [5] Coordinate Measuring Machines from ZEISS. ZEISS United States of America, optical and optoelectronic technology [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology/products/systems/coordinate-measuring-machines.html>
- [6] Coord3 Coordinate Measuring Machines for Quality Inspection. Perceptron [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://perceptron.com/solutions/coordinate-measuring-machines/>
- [7] Coordinate Measuring Machines. Hexagon Manufacturing Intelligence [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/products/coordinate-measuring-machines>
- [8] HRBKOVÁ, Eliška. Problematika měření obecných tvarových ploch s využitím CMM. Praha, 2016. Dostupné také z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/66029>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [9] BARTSCH, Hans-Jochen. Matematické vzorce. 2. vyd., opravené. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965.
- [10] NEUSTUPA, Jiří. Matematika II. 3. vydání. Praha: České vysoké učení technické, 2015. ISBN 978-80-01-05684-4.
- [11] ScanMax® Specifications [online]. Dostupné také z: http://www.menegon-metrologie.com/_pdf/scanmax%2060-22-200-ii_e%20M.pdf
- [12] ScanMax®. The Intelligent Gage for the Workshop and Pre-production. Dostupné také z: https://www.maschinen-kistner.de/files/Produkte/Diverse%20Maschinen/Zeiss-ScanMax/PDF_englisch/ZEISS_ScanMax._.pdf

- [13] Soustavy souřadnic [online]. Praha: MFF UK [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <http://matematika.cuni.cz/dl/analyza/animace/k0033/souradnice/home.htm>
- [14] Portable Measuring Arms. Hexagon Manufacturing Intelligence [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/en-US/products/portable-measuring-arms>
- [15] CIMCORE Arm. Metrotest [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://www.metrotest.cz/pristroje-pro-mereni/merici-ramena/cimcore-arm/>
- [16] Laser Tracker Systems. Hexagon Manufacturing Intelligence [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/products/laser-tracker-systems>
- [17] PROKOP, Martin. Co je laserový tracker a jak se s ním měří? Automa. 2009(8-9), 40-41. Dostupné také z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/co-je-laserovy-tracker-a-jak-se-s-nim-meri-2009_08_39584_5371/
- [18] CALYPSO: Základní program. Návod k obsluze. Zeiss, 2015. 61212-2011212.
- [19] MÜLLER, Marek. Vliv produktivity kontroly na CMM na způsobilost procesu měření. Praha, 2015. Dostupné také z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/63650>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [20] ŠUMSKÝ, Ladislav. Kontrola montážních přípravků s využitím CMM. Praha, 2019. Dostupné také z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/84873>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [21] The Best Fit Alignment Methods. PC-DMIS Help Center [online]. [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: https://docs.hexagonmi.com/pcdmis/2019.1/en/helpcenter/mergedProjects/core/18_alignment_topics/The_Best_Fit_Alignment_Methods.htm
- [22] Understanding Best Fit Alignments. Hexagon Manufacturing Intelligence [online]. 2018 [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: <https://support.hexagonmi.com/s/article/Understanding-Best-Fit-Alignments-1527312042816>
- [23] VW 010 55. VOLKSWAGEN, 1996. Dostupné také z: <https://www.pdfFiller.com/jsfiller-desk18/?projectId=505746754>

Seznam obrázků

Obr. 1.1 Vyrovnání součásti [22].....	9
Obr. 1.2 Stupně volnosti	10
Obr. 2.1 Kartézský souřadnicový systém	11
Obr. 2.2 Schéma kartézsky uspořádaných CMM. a) Portálový CMM. b) Mostový CMM. c) Konzolový CMM. d) Stojanové CMM. [13]	12
Obr. 2.3 ZEISS PRISMO [6]	12
Obr. 2.4 MCT plus [5]	13
Obr. 2.5 TIGO SF [7].....	13
Obr. 2.6 ZEISS CALENO [6].....	14
Obr. 2.7 Cylindrický souřadnicový systém.....	15
Obr. 2.8 ScanMax [16].....	16
Obr. 2.9 Sférický souřadnicový systém	16
Obr. 2.10 Absolute Arm Compact [14]	17
Obr. 2.11 Leica Absolute Tracker ATS600 [10]	18
Obr. 3.1 Určení a) roviny, b) přímky a c) bodu na součásti	19
Obr. 3.2 Definice základního souřadnicového systému součásti.....	19
Obr. 3.3 Znázornění ubíraných stupňů volnosti a) rovinou, b) přímkou a c) bodem	20
Obr. 3.4 Hlava motoru	20
Obr. 3.5 Hřídel	21
Obr. 3.6 Příruba.....	21
Obr. 3.7 Lopatka turbíny.....	22
Obr. 3.8 Část karoserie automobilu s výkresem	23
Obr. 3.9 RPS mřížka [23]	24
Obr. 3.10 Vyrovnání součásti metodou P6	25
Obr. 4.1 ZEISS UPMC 850 CARAT.....	26
Obr. 4.2 Měřená součást (hřídel)	27
Obr. 4.3 Elementy na součásti (hřídel)	27
Obr. 4.4 Naměřené elementy v prostředí SW Calypso (hřídel).....	27
Obr. 4.5 Výběr elementu z horního menu.....	28
Obr. 4.6 Definice 3D přímky pomocí zpětného vyvolání.....	28
Obr. 4.7 Zpětné vyvolání ze dvou kružnic.....	28
Obr. 4.8 Vyrovnání (hřídel)	28

Obr. 4.9 Zadání tolerancí kružnice (hřídel)	29
Obr. 4.10 Výběr charakteristiky.....	29
Obr. 4.11 Zadání charakteristiky (soustřednost).....	29
Obr. 4.12 Údaje z protokolu (hřídel)	30
Obr. 4.13 Hřídel s nálepkou	30
Obr. 4.14 Graf kruhovitosti kružnice k_2	31
Obr. 4.15 Údaje z protokolu (hřídel s nálepkou)	31
Obr. 4.16 Měřená součást (deska).....	32
Obr. 4.17 Elementy na součásti (deska).....	32
Obr. 4.18 Naměřené elementy v prostředí SW Calypso (deska)	32
Obr. 4.19 Vyrovnání (deska)	33
Obr. 4.20 Zadání tolerancí kružnice (deska).....	33
Obr. 4.21 Zadání charakteristiky (vzdálenost).....	34
Obr. 4.22 Zadání charakteristiky (přímost).....	34
Obr. 4.23 Údaje z protokolu (deska).....	35
Obr. 4.24 Deska s nálepkou	35
Obr. 4.25 Graf přímosti přímky	36
Obr. 4.26 Údaje z protokolu (deska s nálepkou)	36
Obr. 4.27 Měřená součást (příruba)	37
Obr. 4.28 Elementy na součásti (příruba – čelo)	38
Obr. 4.29 Naměřené elementy v prostředí SW Calypso (příruba – čelo)	38
Obr. 4.30 Vyrovnání (příruba – čelo)	39
Obr. 4.31 Zadání charakteristiky (poloha).....	39
Obr. 4.32 Teoretická rovina	39
Obr. 4.33 Zadání charakteristiky (rovnoběžnost)	40
Obr. 4.34 Zadání charakteristiky (rovinnost).....	40
Obr. 4.35 Údaje z protokolu (příruba – čelo).....	40
Obr. 4.36 Příruba s nálepkou na čele	41
Obr. 4.37 Graf rovinnosti roviny ρ_1	41
Obr. 4.38 Údaje z protokolu (příruba s nálepkou na čele).....	42
Obr. 4.39 Elementy na součásti (příruba – válec).....	42
Obr. 4.40 Naměřené elementy v prostředí SW Calypso (příruba – válec)	43
Obr. 4.41 Vyrovnání (příruba – válec).....	43
Obr. 4.42 Zadání charakteristiky (válcovitost)	44

Obr. 4.43 Údaje z protokolu (příruba – válec).....	44
Obr. 4.44 Příruba s nálepkou na vnějším průměru	44
Obr. 4.45 Znázornění válcovitosti	45
Obr. 4.46 Údaje z protokolu (příruba s nálepkou na vnějším průměru)	45
Obr. 4.47 Deska	46
Obr. 4.48 Výkres součásti (výřez)	46
Obr. 4.49 První způsob vyrovnání	47
Obr. 4.50 Druhý způsob vyrovnání.....	47

Seznam rovnic

Rovnice (2.1) Převod cylindrických souřadnic na kartézské	15
Rovnice (2.2) Převod cylindrických souřadnic na kartézské	15
Rovnice (2.3) Převod cylindrických souřadnic na kartézské	15
Rovnice (2.4) Převod kartézských souřadnic na cylindrické	15
Rovnice (2.5) Převod kartézských souřadnic na cylindrické	15
Rovnice (2.6) Převod kartézských souřadnic na cylindrické	15
Rovnice (2.7) Převod kartézských souřadnic na sférické.....	17
Rovnice (2.8) Převod kartézských souřadnic na sférické.....	17
Rovnice (2.9) Převod kartézských souřadnic na sférické.....	17
Rovnice (2.10) Převod sférických souřadnic na kartézské.....	17
Rovnice (2.11) Převod sférických souřadnic na kartézské.....	17
Rovnice (2.12) Převod sférických souřadnic na kartézské.....	17

Seznam tabulek

Tab. 1 Srovnání měření součásti typ hřidel.....	32
Tab. 2 Srovnání měření součásti typ deska	37
Tab. 3 Srovnání měření součásti typ příruba s vyrovnáním na čelo	42
Tab. 4 Srovnání měření součásti typ příruba s vyrovnáním na válec	45
Tab. 5 Srovnání naměřených hodnot obou způsobů vyrovnání.....	48