

Univerzita Hradec Králové

Přírodovědecká fakulta

Katedra fyziky

**Měření délkových rozměrů v automobilovém
průmyslu. Souřadnicová měřicí technika.**

Bakalářská práce

Autor:	Daniel Tryzna
Studijní program:	B 1701 Fyzika
Studijní obor:	Fyzikálně-technická měření a výpočetní technika
Vedoucí práce:	doc. RNDr. Jan Kříž, Ph.D.

Univerzita Hradec Králové

Přírodovědecká fakulta

Zadání bakalářské práce

Autor:	Daniel Tryzna
Studijní program:	B1701 Fyzika
Studijní obor:	Fyzikálně-technická měření a výpočetní technika
Název závěrečné práce:	Měření délkových rozměrů v automobilovém průmyslu. Souřadnicová měřicí technika
Cíl a metody práce:	Cílem práce je zhodnotit možnosti využití souřadnicové měřicí techniky v automobilovém průmyslu. Kromě teoretického popisu je požadováno i navržení a zpracování vybraného měření pomocí souřadnicového měřicího přístroje.
Doporučená osnova:	Druhy souřadnicových měřicích přístrojů, jejich konstrukce a přesnost měření, Používané snímací systémy, Kalibrace souřadnicové měřicí techniky, Měření v souřadnicovém systému, Měření tolerancí tvaru a polohy, Funkce a druhy měřicího softwaru, Vytváření a použití automatických měřicích úloh v režimu CNC, Zpracování vybraného měření, Výhody a nevýhody souřadnicové měřicí techniky.
Garantující pracoviště:	katedra fyziky Přírodovědecké fakulty UHK
Vedoucí práce:	doc. RNDr. Jan Kříž, Ph.D.
Konzultant:	
Oponent:	RNDr. Daniel Jezbera
Datum zadání práce:	30. 10. 2012
Datum odevzdání práce:	

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a v seznamu použité literatury jsem uvedl všechny prameny, ze kterých jsem vycházel.

V Hradci Králové dne: 12.6.2015

Anotace

TRYZNA, D. *Měření délkových rozměrů v automobilovém průmyslu. Souřadnicová měřicí technika*. Hradec Králové, 2015. Bakalářská práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Hradec Králové. Vedoucí bakalářské práce doc. RNDr. Jan Kříž, Ph.D. 73 s.

Cílem práce je zhodnotit možnosti využití souřadnicové měřicí techniky v automobilovém průmyslu.

Teoretická část se nejprve zabývá historií automobilového průmyslu v Čechách, historií a vývojem metru a systémem kvality v automobilovém průmyslu. Dále jsou popsány druhy souřadnicových měřicích strojů, jejich konstrukce a přesnost měření. Práce čtenáře seznámí také s kalibrací souřadnicové měřicí techniky, měření v souřadném systému, druhy a funkcemi měřicího softwaru, měřením tolerancí tvaru a polohy a s vytvářením automatických měřicích úloh.

Praktická část obsahuje návrh a zpracování automatické měřicí úlohy na souřadnicovém měřicím stroji Zeiss Prismo 7 Navigator v měřicím softwaru Calypso, včetně statistického zpracování výsledků měření.

V závěru práce jsou shrnuty a zhodnoceny výsledky měření a uvedeny výhody a nevýhody souřadnicové měřicí techniky.

Klíčová slova

automobilový průmysl, souřadnicový měřicí stroj, měřicí software, plán měření.

Annotation

TRYZNA, D. *Measuring of lenght dimensions in the automotive industry. Coordinate measuring technology*. Hradec Králové, 2015. Bachelor Thesis at the Faculty of Science of the University of Hradec Králové. Supervisor doc. RNDr. Jan Kříž, Ph.D. 73 p.

The goal of the Bachelor Thesis is to evaluate possibilities of coordinate measuring technology in the automotive industry.

The theoretical part first deals with the history of automotive industry in Bohemia, the history and development of the unit meter and with the quality system in automotive industry. The types of coordinate measuring machines, their construction and measurement accuracy are described. The calibration of coordinate measuring technology, the measurement in coordinate system, types and functions of measurement software, measurement of form and position tolerances and creating automatic measurement tasks are presented.

The practical part includes the proposal and processing of automatic measurement task on the coordinate measuring machine Zeiss Prismo Navigator 7 with measurement software Calypso, including statistical processing of the measurement results.

In the conclusion of the thesis, the results and the andvantages and disadvantages of coordinate measuring technology are summarized and the measurement is evaluated.

Keywords

automotive industry, coordinate measuring machine, measurement software, measurement plan.

OBSAH

Seznam ilustrací a tabulek.....	9
Seznam použitých zkratk.....	11
Úvod	12
1 Historie automobilového průmyslu v Čechách.....	13
1.1 Rozvoj před rokem 1945	13
1.2 Organizace mezi lety 1945 a 1989.....	14
1.3 Současnost českého automobilového průmyslu	14
2 Historie a vývoj metru	15
2.1 První definice metru.....	15
2.2 Metrická konvence	16
2.3 Vývoj definice metru v čase	16
3 Kvalita v automobilovém průmyslu	17
3.1 Hlavní normy automobilového průmyslu.....	17
3.2 Typy laboratoří v automobilovém průmyslu.....	18
3.2.1 Laboratoře dle typu vykonávané činnosti.....	18
3.2.2 Laboratoře dle lokace umístění.....	19
4 Měření délkových rozměrů.....	19
4.1 Metrologický systém v ČR	19
4.1.1 Metrologická návaznost	20
4.2 Nejistota měření.....	20
4.3 Chyby měření	21
4.3.1 Rozdělení chyb měření podle vlivu na výsledek měření	21
4.3.2 Zdroje chyb měření	22
5 Souřadnicové měřicí stroje.....	22
5.1 Princip a funkce souřadnicových měřicích strojů.....	23
5.2 Konstrukce souřadnicových měřicích strojů	23
5.2.1 Konstrukce SMS dle provedení.....	23
5.2.2 Základní části souřadnicových měřicích strojů.....	25
5.3 Přesnost souřadnicových měřicích strojů.....	27
5.4 Kalibrace souřadnicových měřicích strojů	28
5.4.1 Kalibrace při instalaci stroje.....	28

5.4.2	Periodická kalibrace	29
5.4.3	Kalibrace konfigurace snímače.....	29
5.5	Snímací systémy.....	30
5.5.1	Kontaktní snímací systémy	30
5.5.2	Optické snímací systémy.....	30
5.5.3	Laserové snímací systémy.....	31
6	Funkce měřicího softwaru	32
6.1	Základní funkce měřicího softwaru.....	32
6.2	Doplňkové funkce měřicího softwaru	34
6.3	Souřadné měřicí systémy (CMS).....	34
6.3.1	Souřadný systém stroje	35
6.3.2	Souřadné systémy součásti	35
7	Tolerance tvaru a polohy.....	37
7.1	Všeobecně k tolerancím tvaru a polohy.....	37
7.2	Označování tolerancí tvaru a polohy	38
7.3	Definování tolerancí tvaru a polohy.....	39
8	Zpracování vybrané měřicí úlohy (praktická část)	45
8.1	Příprava před plánem měření	46
8.1.1	Měřená součást a výkres	46
8.1.2	CAD model součásti.....	47
8.1.3	Upínací přípravek	47
8.1.4	Konfigurace snímače.....	47
8.2	Programování plánu měření	48
8.2.1	Potřebné souřadné systémy	48
8.2.2	Měřené a vztažné elementy	49
8.2.3	Vyhodnocované charakteristiky	51
8.3	Odladění programu	52
8.3.1	Odladění na offline stanici	52
8.3.2	Dokončení na stroji	53
8.4	Validace měřicí metody	53
8.4.1	Analýza měřicího systému.....	53
8.4.2	Zpracování výsledků měření	54
8.4.3	Výpočet směrodatných odchylek.....	55

8.4.4	Intervaly spolehlivosti	56
8.4.5	Porovnání výsledků a kalkulace provozních úspor	57
8.5	Zavedení plánu měření do sériového používání.....	58
Závěr.....		59
Seznam použité literatury.....		61
Seznam příloh		63

Seznam ilustrací a tabulek

Obrázek 2.1 – Etalon metru z roku 1889	17
Obrázek 4.1 – Schéma metrologické návaznosti.....	20
Obrázek 5.1 – Schéma a příklad portálového SMS.....	23
Obrázek 5.2 – Schéma a příklad mostového SMS	24
Obrázek 5.3 – Schéma a příklad výložníkového SMS.....	24
Obrázek 5.4 – Schéma a příklad sloupového SMS	25
Obrázek 5.5 – Portálový SMS s popisem jednotlivých částí.....	25
Obrázek 5.6 – Vzduchové ložisko pojezdu ve směru Y	26
Obrázek 5.7 – Měřicí hlava s konfigurací snímače	27
Obrázek 5.8 – Kalibrační etalon a referenční snímač.....	30
Obrázek 5.9 – Optický snímací systém ViScan od firmy Carl Zeiss.....	31
Obrázek 5.10 – Laserový snímací systém LineScan od firmy Carl Zeiss.....	32
Obrázek 6.1 – Libovolné umístění měření součásti v pracovním prostoru SMS.....	36
Obrázek 6.2 – Vyrovnání v prostoru podle horní roviny součásti (primární reference).....	36
Obrázek 6.3 – Natočení v rovině podle boční stěny součásti (sekundární reference)	37
Obrázek 6.4 – Umístění nulového bodu součásti (terciární reference)	37
Obrázek 7.1 – Přehled tolerancí tvaru a polohy.....	38
Obrázek 7.2 – Označení odchylek tvaru a polohy	39
Obrázek 7.3 – Tolerance rovinnosti.....	40
Obrázek 7.4 – Tolerance kruhovitosti.....	41
Obrázek 7.5 – Tolerance válcovitosti	42
Obrázek 7.6 – Tolerance kolmosti	43
Obrázek 7.7 – Tolerance soustřednosti	44
Obrázek 7.8 – Tolerance souososti.....	45
Obrázek 8.1 – Základní souřadný systém	49
Obrázek 8.2 – Seznam měřených elementů pro plán měření	50
Obrázek 8.3 – Zjednodušená výkresová dokumentace pro vzorovou měřicí úlohu.....	64
Obrázek 8.4 – Uživatelské prostředí měřicího softwaru Calypso s popisy jednotlivých částí.....	65
Obrázek 8.5 – Výkresová dokumentace upínacího přípravku pro vzorovou měřicí úlohu s popisy jednotlivých částí	66
Obrázek 8.6 – Dokumentace ke konfiguraci snímače použitého pro měření ve vzorové měřicí úloze.....	67
Obrázek 8.7 – Výstupní vzorový protokol s naměřenými hodnotami ze softwaru Calypso s popisem jednotlivých částí.....	68
Obrázek 8.8 – Výstupní vzorový protokol grafického znázornění odchylky rovinnosti	69
Obrázek 8.9 – Výstupní vzorový protokol grafického znázornění odchylky kruhovitosti	70

Obrázek 8.10 – Výstupní vzorový protokol ze statistického softwaru qs-Stat pro MSA TYPE 1	71
Obrázek 8.11 – Výstupní vzorový protokol ze statistického softwaru qs-Stat pro MSA R&R.....	72
Obrázek 8.12 – Vyplněná a podepsaná pracovní návodka ke vzorovému plánu měření.....	73
Tabulka 8.1 – Výsledky deseti opakovaných měření válce OP1 – část 1	54
Tabulka 8.2 – Výsledky deseti opakovaných měření válce OP1 – část 2	55
Tabulka 8.3 – Výběrové směrodatné odchylky – část 1	56
Tabulka 8.4 – Výběrové směrodatné odchylky – část 2	56
Tabulka 8.5 – Intervaly spolehlivosti a jejich poměr k tolerančním pásmům – část 1	57
Tabulka 8.6 – Intervaly spolehlivosti a jejich poměr k tolerančním pásmům – část 2	57
Tabulka 8.7 – Rozdíly průměrných hodnot a jejich poměry k tolerančním pásmům – část 1	58
Tabulka 8.8 – Rozdíly průměrných hodnot a jejich poměry k tolerančním pásmům – část 2	58

Seznam použitých zkratek

AIK – Automobile Industry – Kombinát

BIPM – Bureau International des Poids et Mesures – Mezinárodní úřad pro váhy a míry

CAD – Computer Aided Design – Počítačem podporované projektování

CAW – Czechslovak Automobile Works

CGPM – Conférence Générale des Poids et Mesures – Všeobecná konference pro váhy a míry

CIPM – Comité International des Poids et Mesures – Mezinárodní výbor pro míry a váhy

CMM – Coordinate Measuring Machine

CMS – Coordinate Measuring System – Souřadný měřicí systém

CNC – Computer Numerical Control – Číslicové řízení počítačem

ČIA – Český institut pro akreditaci

ČMI – Český metrologický institut

ČSN – Česká technická norma

ČSNI – Český normalizační institut

DTH – Dolní toleranční hranice

GPS – Geometrical Product Specifications – Geometrické požadavky na výrobky

GUM – Guide to the expression of Uncertainty in Measurement – Pokyn pro vyjádření nejistoty měření

HTH – Horní toleranční hranice

ISO – International Organization for Standardization – Mezinárodní organizace pro normalizaci

JH – Jmenovitá hodnota

LED – Light Emitting Diode – Dioda emitující světlo

MSA – Measurement System Analysis – Analýza měřicího systému

SMS – Souřadnicový měřicí stroj

Úvod

Závěrečnou bakalářskou práci ke studijnímu oboru Fyzikálně-technická měření a výpočetní technika na téma měření délkových rozměrů v automobilovém průmyslu s využitím souřadnicových měřicích strojů jsem si vybral proto, že posledních osm let pracuji jako technik měrové laboratoře v mezinárodní společnosti, která je významným dodavatelem produktů uznávaným zákazníkům ve světě automobilového průmyslu.

Strojírenský průmysl, jehož nejdůležitější součástí je automobilový průmysl, patří v České republice k nejtradičnějším průmyslovým odvětvím. Automobilový průmysl zaměstnává přes 120 tisíc lidí, což představuje jedno z nejrozvinutějších automobilových odvětví v regionu střední a východní Evropy. Díky své dlouholeté tradici, robustní dodavatelské základně a technickému know-how se českému automobilovému průmyslu podařilo vyvinout vyspělý sektor, jehož hlavním předpokladem je udržení si svého atraktivního poměru ceny a kvality. Důkazem toho je, že od roku 2010 se ročně vyrobí v České republice přes jeden milion motorových vozidel, z toho 90% jde na zahraniční export. Nejvýznamnějšími dodavateli českého automobilového průmyslu jsou Škoda Auto v Mladé Boleslavi, kolínská TPCA a Hyundai v Nošovicích.

V této práci se chci zaměřit na systém měření délkových rozměrů v automobilovém průmyslu za využití moderní souřadnicové techniky, protože je to zásadní aspekt pro kontrolu kvality vyráběných produktů. Toto téma je velice aktuální, protože se jedná o moderní a velice účinnou metodiku měření. Automatika souřadnicových měřicích strojů představuje významný nástroj k efektivnímu měření s minimalizací zdrojů chyb měření.

Teoretická část je zaměřena na historii automobilového průmyslu, historii měření a hlavně na souřadnicovou měřicí techniku z pohledu konstrukce a principů měření. Praktická část popisuje systém vytvoření automatické měřicí úlohy na souřadnicovém měřicím stroji a zavedení této úlohy do sériového používání dle standardů automobilového průmyslu.

1 Historie automobilového průmyslu v Čechách

„Na počátku bylo kolo. Pak se k němu přikulilo druhé, třetí, čtvrté a ejhle – narodil se automobil“. Logicky nezůstalo u jednoho, ale spolu se vznikem automobilu vznikl i automobilový průmysl, který brzy zapustil kořeny i u nás, v Čechách. Historie automobilu je vlastně docela mladá [1].

1.1 Rozvoj před rokem 1945

Český automobilový průmysl je jedním z nejstarších v Evropě. Konkrétně třetím nejstarším, a to za německou automobilkou Daimler Benz a za francouzskou automobilkou Peugeot. Český automobilový průmysl se zrodil roku 1895 ve středních Čechách [2, s. 34]. V městě Mladá Boleslav došlo k založení manufaktury na jízdní kola pány Václavem Klementem a Václavem Laurinem. Firma Laurin&Klement (v současnosti Škoda Auto a.s.) vylepšuje „motocykly“ bratří Wernerů a v roce 1898 zahajuje produkci motorizovaných dvoukolek. Jsou to první motocykly vyráběné v Rakousku-Uhersku). V roce 1905 Laurin&Klement začíná s výrobou prvních automobilů pod jménem „Voiturette“ [3, s. 2].

Následující automobilkou, která započala působení v automobilovém průmyslu, byla Tatra v roce 1897 v severomoravském městě Kopřivnice. Jednalo se o automobilku, která vyráběla jak osobní, tak nákladní automobily. První automobil zde byl vyroben v roce 1898. Dále následovala Pražská továrna na automobily, která v roce 1907 vyrobila první automobil značky Praga. V dalších letech došlo k rozvoji dalších automobilek např. Walter (1913), Aero (1929), Jawa (1934). Čechy byly v tomto ohledu jedním z pouze šesti států, které začaly s rozvojem automobilového průmyslu v poslední dekádě 19. století. Dalšími z těchto států bylo Německo, Francie, Itálie, Velká Británie a Spojené státy americké [2, s. 34].

Výrobní trendy před rokem 1945 byly ovlivněny významnými historickými událostmi, konkrétně Velkou hospodářskou krizí v 30. letech 20. století, ale hlavně Druhou světovou válkou. V roce 1939 bylo produkováno 13 900 osobních a 4800 nákladních automobilů. Kvůli Druhé světové válce byl československý automobilový průmysl naprosto podřízen vojenským účelům a došlo tím pádem k rapidnímu poklesu produkce československých automobilek. V roce 1944 činila produkce osobních automobilů pouze 1700 kusů a v roce 1945 pouhých 300 kusů za rok. Podobný propad zažívala i produkce nákladních automobilů. V roce 1944 to bylo pouze 1400 kusů z původních 4800 a v roce 1945 již pouze 1000 kusů za rok. Některé automobilky byly bombardovány a téměř zničeny (Praga), jiné byly poškozené (Škoda, Aero), ale některé zůstaly válkou neporušené (Tatra, Jawa) [2, s. 35].

1.2 Organizace mezi lety 1945 a 1989

Vývoj po Druhé světové válce měl hluboký dopad na československý automobilový průmysl, a to po celé socialistické období. V říjnu roku 1945 byly znárodněny velké automobilové továrny a byly postupně zaváděny metody centrálního plánování. Automobilový průmysl byl kompletně přeorganizován. Také v roce 1945 rozhodlo Ministerstvo průmyslu o tom (bez jakéhokoli výběrového řízení), že v Československu budou vyráběny pouze dva základní typy osobních automobilů – Tatra 87 a Škoda 1101. Dále také ministerstvo rozhodlo o dělbě práce v automobilovém průmyslu, a to tak, že pouze Škoda bude vyrábět auta osobní, Aero, Praga a Avia budou vyrábět auta nákladní a Jawa bude vyrábět motocykly. V roce 1946 byly založeny nové továrny zaměřené na nové typy přepravních zařízení, například Zetor Brno, kde začala probíhat výroba traktorů [2, s. 36-37].

V padesátých letech 20. století dochází k dalšímu rozvoji výroby nákladních automobilů Libereckými automobilovými závody a také k rozvoji výroby autobusů (Liaz, Avia). Docházelo však k častým přesunům výroby z důvodu politické situace v těchto letech a toto období bylo také ovlivněno Studenou válkou. Nicméně v roce 1955 zaměstnával československý automobilový průmysl 17 000 lidí [2, s. 37].

V dalších letech se československý automobilový průmysl rozvíjel a rostl. V roce 1965 byly založeny Československé automobilové závody (CAW – Czechslovak Automobile Works), nová výrobní hospodářská jednotka. CAW zahrnovaly automobilové produkce, které obsahovaly oddělení výzkumu a vývoje, oddělení odbytu a oddělení poodbytových služeb. CAW zahrnovaly 27 národních podniků. Z toho 24 těchto podniků se skládalo ze 101 továren a 80 oddělených dílen. V Čechách bylo 93 továren a 73 oddělených dílen, zbytek se nacházel na Slovensku. V roce 1968 zaměstnávaly CAW 134 678 lidí [2, s. 41].

Ekonomické reformy z druhé poloviny osmdesátých let 20. století znamenaly organizační změny. V roce 1986 byly Československé automobilové závody (CAW) přeorganizovány z kartelu na kombinát (AIK – Automobile Industry). Automobilový průmysl byl po této změně nově řízen Ministerstvem všeobecného strojírenství. Nově se AIK skládal z šesti oborových podniků. Hlavní sídlo bylo v Bratislavských automobilových závodech. Další sídla byla ve Škodě, Tatře, Avii, Liazu a Karose. V roce 1989 došlo k založení Asociace automobilového průmyslu, organizované jako zájmová skupina [2, s. 42-43].

1.3 Současnost českého automobilového průmyslu

Dnes mezi nejvýznamnější výrobce v oblasti osobních automobilů patří mladoboleslavská Škoda Auto, která je vlastněná koncernem Volkswagen, dále od roku 2005 kolínská společnost Toyota Peugeot Citroën Automobile Czech (TPCA) a od roku 2008 nošovický Hyundai. Nákladní automobily se nadále vyrábí

v kopřivnické Tatře a také v pražské společnosti Avia. Autobusy jsou v současnosti vyráběny ve společnosti Iveco Czech Republic (do roku 2007 Karosa), SOR Libchavy a Tedom. Brněnský Zetor je více než půl století spojen s výrobou českých traktorů [4].

2 Historie a vývoj metru

Metr (značí se m) je základní jednotkou délky, což je fyzikální veličina, která se obvykle značí l . Definice metru se historicky vyvíjela až do podoby dnešní poslední definice.

2.1 První definice metru

První definice metru sahá až do konce 18. století, a to do Francie. V této době docházelo k rozvoji obchodu, průmyslu a zemědělství vlivem hospodářského liberalismu. Zejména ve Francii panoval v těchto oblastech chaos, protože každý feudál si mohl na svém panství určit své vlastní míry. A to bez ohledu na existenci královských měr, kterými byly sáh (francouzsky „toise“, roven 1,95 m) a libra (francouzsky „livre“, rovna 367,1 g). Rozvoj obchodu a výroby tedy vyžadoval sjednocení vah a měr. Sjednocení dostal na starosti princ Charles-Maurice de Talleyrand-Périgord, který roku 1790 navrhl komisi, která se sjednocením vah a měr bude zabývat. Členy této komise byly Jean Charles rytíř de Borda (matematik, člen Akademie věd), Pierre Simon markýz de Laplace (astronom, matematik, člen Akademie věd), Gaspard Monge hrabě de Péluse (matematik, člen Akademie věd), Antoine Nicolas Caritat markýz de Condorcet (filosof, spisovatel, politik, matematik, člen Akademie věd) a Joseph-Louis hrabě de Lagrange (geometr, člen Akademie věd) [5, s. 16-17].

Komise navrhla změnu dosavadních měr a vah na základě desítkové soustavy. Návrh zněl tak, aby se jednotka míry dělila vždy na deset jednotek menších nebo se násobila deseti na jednotku větší. Podle toho měl být také kvadrant kruhu rozdělen z původních 90° na 100°. Každý stupeň rozdělen na 100 minut, každá minuta na 100 obloukových vteřin. Kvadrant kruhu by měl tedy milión vteřin. Nová jednotka délky byla nazvána metrem a definována jako 1/10 000 000 poledníkového kvadrantu nebo též délka desetiny vteřinového oblouku kvadrantu zemského poledníku [5, s. 17].

Nová definice délkové jednotky musela být samozřejmě podložena měřeními, která nařídilo Ústavodárné shromáždění v roce 1791. Měřeními byli pověřeni francouzští astronomové Jean Baptiste Joseph rytíř Delambre a Pierre Francois Adnre Mechain. Měření probíhala na pařížském poledníku mezi Dunkerque a Barcelonou a trvala do roku 1799 [5, s. 17].

2.2 Metrická konvence

Jelikož se věda, výroba a obchod stále rozvíjely, bylo potřeba nastavit jasný standard, který se bude zabývat mírami a váhami. Tímto standardem byla Metrická konvence (Convention du Metre), která byla podepsána 20. května 1875. Jednalo se o mezinárodní mezivládní smlouvu, kterou podepsali zástupci vlád 17-ti zemí (včetně Rakouska-Uherska). Cílem Metrické konvence bylo vytvoření univerzální dekadické soustavy jednotek. Podpis této smlouvy dal základ pro vznik orgánů, které fungují dodnes. Těmito orgány jsou Mezinárodní úřad pro váhy a míry (BIPM – Bureau International des Poids et Mesures), Všeobecná konference pro váhy a míry (CGPM – Conférence Générale des Poids et Mesures) a Mezinárodní výbor pro míry a váhy (CIPM – Comité International des Poids et Mesures) [6].

Metrická konvence je dodnes, ačkoli byla roku 1921 mírně upravena, stálou základnou mezinárodního sjednocování měřicích jednotek, vývoje etalonů a také spravuje mezinárodní systém jednotek měření SI (Le Systeme International d'unités). K červenci 2014 měla organizace 56 plných členů a 41 přidružených [6].

2.3 Vývoj definice metru v čase

Roku 1791 byl metr definován tak, jak je uvedeno v kapitole 2.1.

Roku 1793 bylo schváleno Národním konventem zavedení tzv. prozatímního metru. Jednalo se o definici metru, která vycházela ze staršího měření poledníku z roku 1740, které provedli Cassini de Thury a Abbé de Lacaille. Tzv. prozatímní metr byl stanoven z francouzského sáhu (toise de Pérou) při 13 °R (tj. 16,5 °C), který měřil 1,949 036 m, a to jako 36 pařížských palců (= 3 pařížské stopy) a 11,44 pařížské čárky při 10 °C. Prozatímní metr byl vyroben z mosazi jako koncové měřítko obdélníkového průřezu [5, s. 18].

Na francouzském národním shromáždění roku 1799 bylo určeno, že metrová tyč (etalon) obdélníkového průřezu vyrobená z platiny bude uložena v národním archívu jako finální podoba metru.

V roce 1889 proběhlo první jednání o váhách a mírách (CGPM), které definovalo délku jednoho metru jako vzdálenost mezi dvěma linkami na standardizovaném etalonu (viz obrázek 2.1, převzatý z [7]) ze slitiny 90% platiny a 10% iridia, který byl měřen při teplotě tání ledu.

Roku 1927 proběhlo sedmé CGPM, které upřesnilo definici metru jako délku měřenou při teplotě 0 °C, a to na prototypu metru ze slitiny platiny (90% podíl) a iridia (10% podíl) za normálního atmosférického tlaku. Prototyp metru musel být při měření podepřen dvěma válci o průměru minimálně 1 centimetr, umístěnými symetricky ve stejné výšce a ve vzdálenosti 571 mm jeden od druhého.

Předposlední definice metru byla stanovena v roce 1960 na jedenácté CGPM. Metr zde byl definován jako 1 650 763,73 násobku vlnové délky radiace ve vakuu, která odpovídá přechodu mezi energetickými hladinami $2p^{10}$ a $5d^5$ kvantové úrovně atomu kryptonu 86.

Poslední a tedy současná platná definice metru byla definována 20. října 1983 na sedmnácté CGPM. Tato definice říká, že „Metr je vzdálenost, kterou urazí světlo ve vakuu během časového intervalu $1/299\,792\,458$ sekundy“. To jinými slovy znamená, že světlo urazí za jednu sekundu ve vakuu přesně 299 792 458 metrů [7].



Obrázek 2.1 – Etalon metru z roku 1889

3 Kvalita v automobilovém průmyslu

Kvalita neboli jakost je v dnešní době nedílnou součástí systému u firem, které působí na trhu automobilového průmyslu a chtějí být úspěšné. Systém kvality v automobilovém průmyslu je řízen normami, a to mezinárodními normami ISO, národními normami (ČSN), případně interními výrobními předpisy či nařízeními. Důležitým faktorem pro fungující systém kvality je také plnění zákaznických kvalitativních požadavků. Norem, které se zabývají systémem kvality, je mnoho, proto tato část bude zaměřena pouze na hlavní normy, které se týkají systému kvality a zároveň měření délkových rozměrů.

3.1 Hlavní normy automobilového průmyslu

Hlavní normou, která stanovuje řízení systému kvality v automobilovém průmyslu, je ISO/TS 16949. Tato norma popisuje požadavky na systémy managementu

kvality, a to jak všeobecná ustanovení a požadavky, tak konkrétní požadavky. Konkrétními požadavky jsou například příručka jakosti, účinnosti procesů, cíle jakosti, zaměření na zákazníka, odpovědnosti za kvalitu, pracovní prostředí, infrastruktura, interní audity a v neposlední řadě také požadavky na systém kalibrací, měření a laboratoří, ve kterých se tato měření provádí [8].

Další významnou normou, která je spjata s kvalitou v automobilovém průmyslu, je norma ISO/IEC 17025, která popisuje všeobecné požadavky na způsobilosti měřicích, zkušebních a kalibračních laboratoří. V této normě jsou popsány postupy a nařízení, které by měly laboratoře v automobilovém průmyslu splňovat. Jedná se například o řízení záznamů, technické požadavky, osoby pracující v laboratořích, zkušební, měřicí a kalibrační metody a jejich validace, návaznost měření, prezentování výsledků měření, apod. [9].

Poslední hlavní normou, která se zabývá kvalitou a měřením v automobilovém průmyslu je ISO 10012, která popisuje požadavky na systém managementu měření neboli požadavky na procesy měření a měřicí vybavení. V této normě nalezneme například termíny a definice týkající se měření, požadavky na cíle jakosti, lidské zdroje, procesy měření, nejistoty měření, řízení neshod, apod. [10].

3.2 Typy laboratoří v automobilovém průmyslu

Typy laboratoří se hlavně zabývají výše uvedené normy ISO 16949 a ISO 17025. Laboratoře v automobilovém průmyslu se dají dělit dle dvou základních hledisek.

3.2.1 Laboratoře dle typu vykonávané činnosti

Prvním typem jsou měrové laboratoře, které se zabývají měřením délkových rozměrů, odchylek tvarů a polohy na jednotlivých součástech, jejich sestavách a finálních produktech. Měření jednotlivých součástí je obvykle nazýváno vstupní kontrolou. Měření sestav se nazývá procesním auditem a měření finálních produktů se nazývá produktovým auditem. Měrové laboratoře nemusí být vybaveny pouze pro měření délkových rozměrů, někdy bývají vybaveny i pro měření dalších fyzikálních veličin. V měrových laboratořích se nejvíce využívá souřadnicové měřicí techniky [9, s. 24-33].

Dalším typem jsou kalibrační laboratoře, které provádějí kalibrace měřicích a zkušebních laboratoří, jsou druhým typem laboratoří dle typu vykonávané činnosti. Slovo kalibrace znamená, že provádějí porovnávání přesností kalibrovaných zařízení s tzv. etalony. Etalon má lepší metrologickou vlastnost než kalibrované zařízení. To je důležité proto, aby laboratoře věděly, že měřidla, která používají, ukazují při měření správné hodnoty [9, s. 34-35].

Zkušební laboratoře jsou posledním typem. Jejich náplní práce jsou testy fyzikálních a chemických vlastností materiálů, jednotlivých součástí, sestav a finálních produktů. Jedná se například o zkoušky statické a dynamické pevnosti, chemické složení látek, zkoušky čistoty materiálů, měření tvrdosti materiálů, zkoušky elektrických vlastností, apod. [9, s. 35-38].

3.2.2 Laboratoře dle lokace umístění

Prvním typem laboratoří dle lokace umístění jsou laboratoře interní, které jsou přímo součástí organizace, která působí v automobilovém průmyslu. Požadavky na interní laboratoře jsou celkem jednoduché *„Interní laboratoř organizace musí mít stanovenou oblast působnosti, která zahrnuje její způsobilost provádět požadované kontrolní, zkušební nebo kalibrační služby.“* Dále musí laboratoř specifikovat a uplatňovat aspoň technické požadavky. Těmito technickými požadavky jsou přiměřenost laboratorních postupů, odborná způsobilost zaměstnanců laboratoře, zkoušení produktu, způsobilost provádět tyto zkoušky správně (v návaznosti na příslušné normy procesu) a přezkoumání příslušných záznamů [8, s. 53].

Druhým typem jsou laboratoře externí. Požadavky na externí laboratoře definuje norma ISO/TS 16949 *„Externí laboratoř, kterou organizace použije k provedení kontrolních, zkušebních nebo kalibračních služeb, musí mít stanovenou oblast působnosti, která zahrnuje její způsobilost provádět požadované kontrolní, zkušební nebo kalibrační služby.“* Aby organizace mohla externí laboratoře využívat, musí laboratoře prokázat, že jsou přijatelné pro požadavky zákazníka organizace nebo musí být laboratoř akreditována podle normy ISO/IEC 17025 nebo dle ekvivalentních národních norem. Akreditaci pro poskytování externích služeb v oblasti zkoušení, kalibrací a měření v ČR provádí Český institut pro akreditaci (ČIA) [8, s. 53].

4 Měření délkových rozměrů

Měření je proces (experimentálního) získávání informace o hodnotě veličiny, kterou měříme (délky) vzhledem k danému standardu, tedy jednotce měření (metr). Takto získaná hodnota, která je výsledkem procesu měření, se musí řádně označit. Věda, která se zabývá měřením, se nazývá metrologie [11, s. 13].

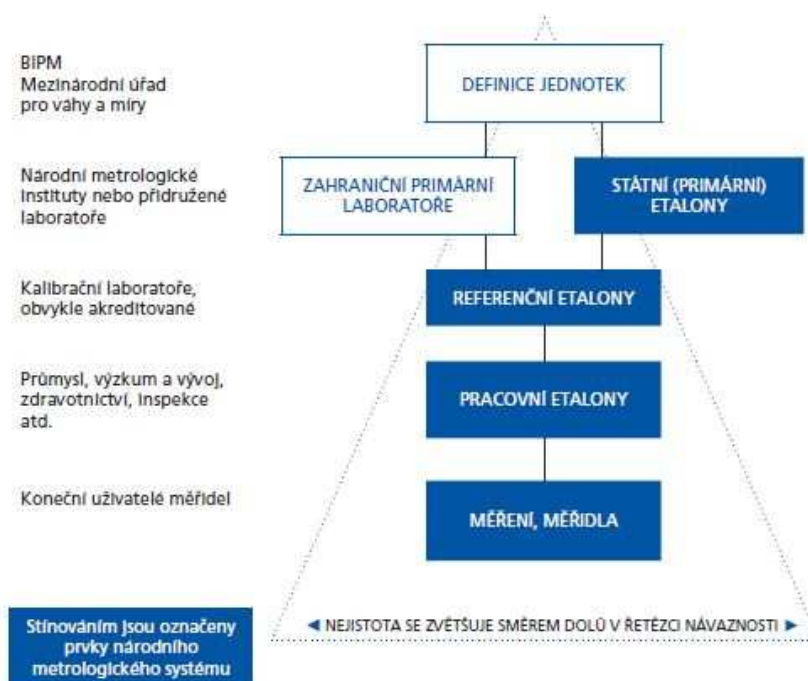
4.1 Metrologický systém v ČR

Technická normalizace, metrologie a státní zkušebnictví jsou v současné době řízeny Ministerstvem průmyslu a obchodu České republiky. Ministerstvo řídí Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Český metrologický institut (ČMI), Český institut pro akreditaci (ČIA) a Český normalizační institut (ČSNI). Metrologický systém v ČR je tvořen souhrnem právních a technických předpisů, upravujících postavení mezi orgány státní správy a dalšími subjekty, které vyrábějí, opravují nebo montují měřidla a dále mezi uživateli měřidel.

Součástí metrologického systému v ČR jsou státní metrologická střediska, střediska kalibračních služeb, organizace autorizované pro úřední měření, výrobci měřidel, uživatelé měřidel a organizace opravující měřidla. Metrologie v ČR se řídí zákonem č. 505/1990 Sb. o metrologii ve znění zákona č. 119/2000 Sb. a pozdějších předpisů [11, s. 14].

4.1.1 Metrologická návaznost

Metrologická návaznost (viz obrázek 4.1, převzatý z [12]) je neporušený řetězec porovnání, pro který jsou udány nejistoty. Tím je zajištěno, že výsledek měření nebo hodnota etalonu jsou vztaženy k referenci vyšší úrovně, až nakonec k primárnímu etalonu. Primární etalon je všeobecně uznávaný etalon s nejvyššími metrologickými charakteristikami, jehož hodnota je bez odvození přijímána z jiného etalonu téže veličiny. V ČR není k dispozici žádný primární etalon, takže metrologická návaznost je zajišťována národními etalony. Národní etalony jsou uznávány vnitrostátním rozhodnutím za základ pro ověřování jiných etalonů téže veličiny. Národní etalony ČR jsou uchovávány a rozvíjeny Českým metrologickým institutem (výjimku tvoří pouze etalony času a frekvence, které uchovává Akademie věd ČR) [11, s. 14; 12, s. 22].



Obrázek 4.1 – Schéma metrologické návaznosti

4.2 Nejistota měření

Nejistota měření je kvantitativní mírou kvality výsledku měření, který umožňuje porovnat výsledky měření s jinými výsledky, referencemi, specifikacemi nebo etalony. Je to nezaporný parametr, který charakterizuje rozptýlení hodnot měřené

veličiny, který je na základě užité informace přidružen k měřené veličině. Všechna měření jsou zatížena chybami měření, žádný měřicí přístroj ani metoda nejsou absolutně přesné, proto se výsledek měření liší od pravé hodnoty měřené veličiny. Většina zdrojů chyb může být zjištěna, ale stojí to čas a prostředky. I samotné chyby měření mohou být kvantifikovány a opraveny, například prostřednictvím kalibrace. Nicméně, zřídka kdy jsou k dispozici čas a prostředky, aby se chyby stanovily a opravily kompletně [12, s. 26].

4.3 Chyby měření

Chyby měření vznikají v reálném měřicím procesu vlivem různých negativních vlivů a projevují se jako odchylky mezi naměřenými a skutečnými hodnotami měřené veličiny. Výsledky měření se tedy pohybují v jistém „tolerančním poli“ kolem skutečné hodnoty. Chyby se vyjadřují v absolutních nebo relativních hodnotách [11, s. 23].

Chyba absolutní $\Delta(x)$ se vyjadřuje jako rozdíl mezi naměřenou hodnotou x_m a skutečnou hodnotou x_s , tedy:

$$\Delta(x) = x_m - x_s$$

Chyba relativní se vyjadřuje jako absolutní chyba dělená skutečnou hodnotou (poměrné vyjádření chyby), tedy:

$$\delta(x) = \frac{\Delta x}{x_s} = \frac{x_m - x_s}{x_s}$$

4.3.1 Rozdělení chyb měření podle vlivu na výsledek měření

Systematické chyby jsou chyby, jejichž hodnota se nemění při stejných podmínkách, je tedy konstantní velikostí i znaménkem, nebo se při změně podmínek mění dle určité známé závislosti a systematicky tak ovlivňují výsledek měření. Nedají se zjistit na základě opakování měření, pro výpočet ale obvykle postačí vztah pro výpočet absolutní chyby. Tyto chyby se dají většinou určit a zmenšit vhodnou kompenzací, použitím vhodných korekcí, odstraněním jejich příčin. Rozpoznání systematických chyb je omezené, protože se odstraňují vždy pouze jejich odhady (skutečné hodnoty nejsou známy) a nevylučitelné části (jejich hodnoty nejsou známy) zůstávají. Zjišťování a odstraňování systematických chyb je velice náročné a nákladné, proto se provádí pouze v nezbytně nutných případech [11, s. 23].

Druhým typem chyb jsou chyby hrubé. Hrubé chyby vznikají vlivem lidského faktoru, vadnými funkcemi měřidel, nesprávnými postupy samotných měření, apod. Měření, která jsou zatížena hrubými chybami, jsou nerelevantní. Proto se výsledky takových měření, které zřetelně vybočují z posloupnosti naměřených hodnot, vylučují z následných zpracování hodnot měření [11, s. 23].

Posledním typem chyb jsou chyby náhodné. Tyto chyby vznikají zcela náhodně, jsou velice těžko předvídatelné a nelze je vyloučit. Při měření se vyskytují nejčastěji a jejich charakteristickou vlastností je nesoustavnost (při opakovaných měřeních nemají stejnou velikost ani znaménko). Jejich velikost se určuje ze statistických metod, které odpovídají příslušnému statistickému modelu. V praxi se nejčastěji používá *normální (Gaussovo) rozdělení* [11, s. 23-24].

4.3.2 Zdroje chyb měření

Při měření se setkáváme s celou řadou problémů a nedokonalostí, které se projevují a ovlivňují výsledky měření a jejich chyby. Podle zdroje vzniku chyb je můžeme rozdělit na:

- Chyby přístroje – tyto chyby vznikají při výrobě, montáží, opotřebení, apod. a způsobují tedy jistou nedokonalost přístrojů. Můžou vzniknout i vlivem stárnutí. Výrobci přístrojů obvykle udávají tyto chyby ve formě korekčních křivek, případně jako maximální dovolené chyby přístrojů
- Chyby instalace – jedná se o chyby, které vyplývají z nedostatků zapojení, uložení či nastavení měřidel. Může se jednat také o chyby ze vzájemného ovlivňování měřidel, která jsou zapojena paralelně nebo sériově, nebo chyby z ovlivnění hodnot měřené veličiny měřidlem
- Chyby metody – tj. chyby vzniklé použitím nedokonalé měřicí metody, nepřesných hodnot konstant, nepřesných závislostí, atd.
- Chyby pozorování – vzniklé lidským faktorem (nedokonalost pozorovatele, nesoustředěnost, apod.)
- Chyby vyhodnocení – vznikající při vyhodnocování výsledků měření. Například vlivem zaokrouhlování, chybami interpolace, linearizací, apod.
- Vlivy prostředí – vznikají vlivem prostředí, ve kterém jsou prováděna samotná měření a závisí na druhu měřené veličiny (kolísání teploty, vlhkost, vibrace, apod.) [11, s. 25].

5 Souřadnicové měřicí stroje

Souřadnicové měřicí stroje (SMS nebo CMM z angl.) jsou jednou z nejvýznamnějších inovací v oblasti nejen automobilového průmyslu. Konstrukce a vývoj SMS byly vynuceny potřebami měření karoserií v automobilovém a leteckém průmyslu, ale také potřebou měření přímo u výrobních strojů přímo ve výrobních (hlavně strojírenských). Jedná se o rychlé a komplexní řešení měřicích úloh. Souřadnicové měřicí stroje ve spojení s počítačovou technikou představují dokonalý prostředek pro účinné zvyšování kvality vyráběných či obráběných součástí [13].

5.1 Princip a funkce souřadnicových měřicích strojů

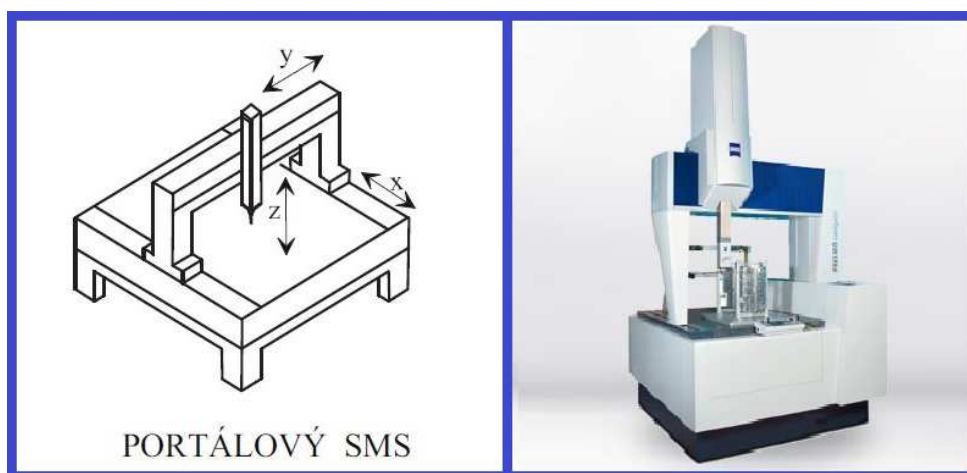
Na souřadnicových měřicích strojích jsou určovány geometrické veličiny měřených součástí. Samotné měřené součásti mohou být z různých materiálů. Nejrozšířenější materiály součástí, které se měří na SMS, jsou kovy a plasty. Souřadnicové měřicí stroje mají pohyblivé osy a mohou snímat měřené součásti v souřadných směrech $\pm X$, $\pm Y$ a $\pm Z$, celkem tedy ze šesti směrů. U některých typů těchto strojů lze používat též otočný stůl, který stroji dodá osu otáčení jako další osu měření. Geometrické veličiny, které se měří pomocí souřadnicových měřicích strojů, jsou např. šířka, výška, délka, průměr, apod. [16].

5.2 Konstrukce souřadnicových měřicích strojů

5.2.1 Konstrukce SMS dle provedení

Souřadnicové měřicí stroje se dělí podle typu provedení konstrukce na 4 základní typy [13;14;15]:

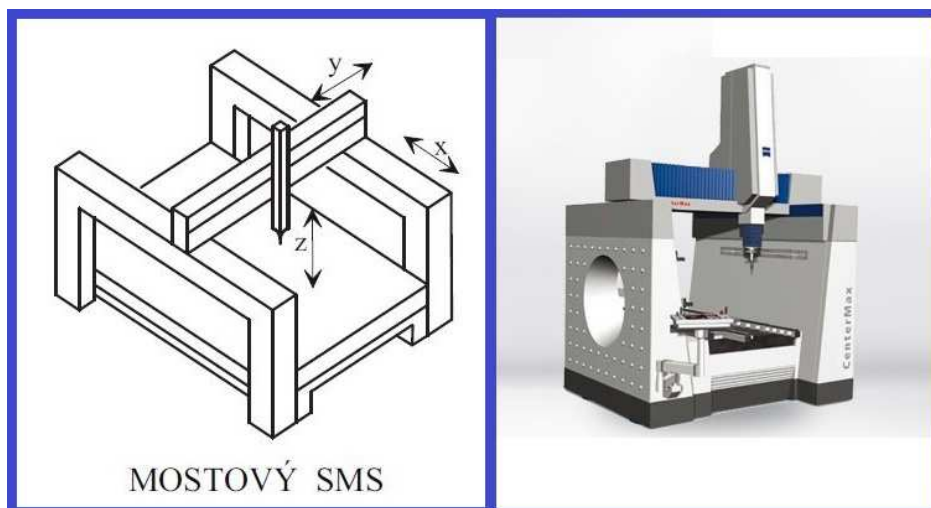
- Portálové SMS – Toto provedení konstrukce má v oblasti automobilového průmyslu největší zastoupení a uplatnění. Díky velmi tuhé a stabilní konstrukci portálového provedení jsou vhodné pro měření malých i velkých součástí. Samotný portál se při měření pohybuje po pracovní desce, obvykle pomocí vzduchových ložisek. Měřicí rozsahy těchto SMS se pohybují v rozmezí stovek mm ve všech měřicích osách X , Y a Z . Schéma i příklad portálového měřicího stroje je vidět na obrázku 5.1, který byl převzatý a upravený z [13;14].



Obrázek 5.1 – Schéma a příklad portálového SMS

- Mostové SMS – Konstrukčně i funkčně jsou podobné portálovým měřicím strojům (viz obrázek 5.2, převzatý z [13;14]). Pohyblivá část, tedy most, jezdí po vyvýšených ložích, a proto nemusí mít tyto stroje nutně pracovní desku. Stroje s mostovým provedením umožňují měřit mnohem větší

součásti, a to díky svým velkým měřicím rozsahům, které se pohybují v řádech metrů. Moderní mostová provedení obsahují odolné konstrukce, například kombinace polymerbetonu s prvky invarové oceli, čímž je zajištěna odolnost vůči kolísání teploty, a tím pádem větší přesnost měření.



Obrázek 5.2 – Schéma a příklad mostového SMS

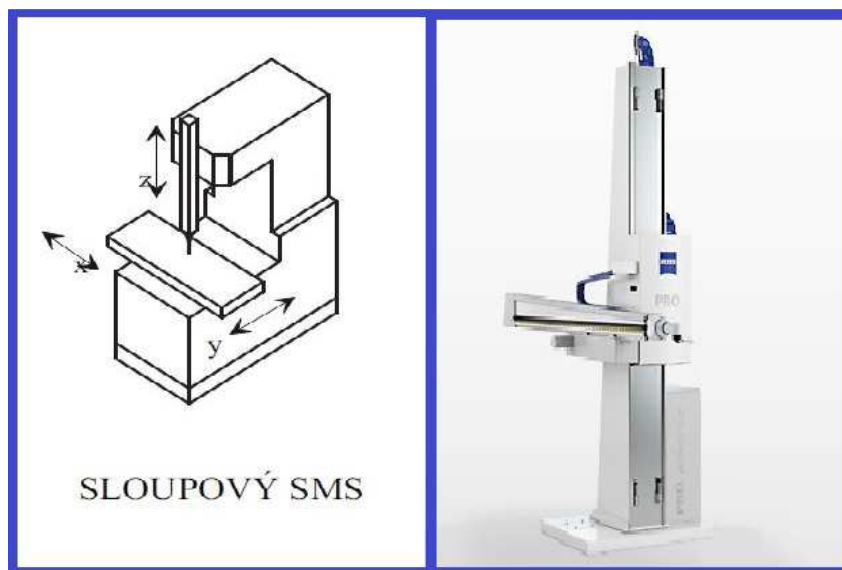
- Výložníkové SMS – Konstrukce výložníkového typu se nevyznačují tak velkými měřicími rozsahy, ale je u nich lepší přístup k měřeným součástem. Konstrukce je podobná malému mostovému provedení, ale s rozdílem, že výložníkový typ obsahuje pouze jedno vyvýšené lože, jak je vidět na obrázku 5.3 z [13;14]. Lože je pevně spojeno s pracovní deskou, na kterou se upínají měřené součásti. Moderní typy těchto strojů obsahují například integrované tlumicí systémy. Díky menším měřicím rozsahům se tento typ strojů používá pro měření menších součástí.



Obrázek 5.3 – Schéma a příklad výložníkového SMS

- Stojanové SMS – Jsou posledním typem konstrukce dle provedení a nazývají se také sloupové. Základem těchto strojů je stojan, na kterém je připevněno měřicí rameno (viz obrázek 5.4, který byl převzat a upraven z [13;14]). Toto

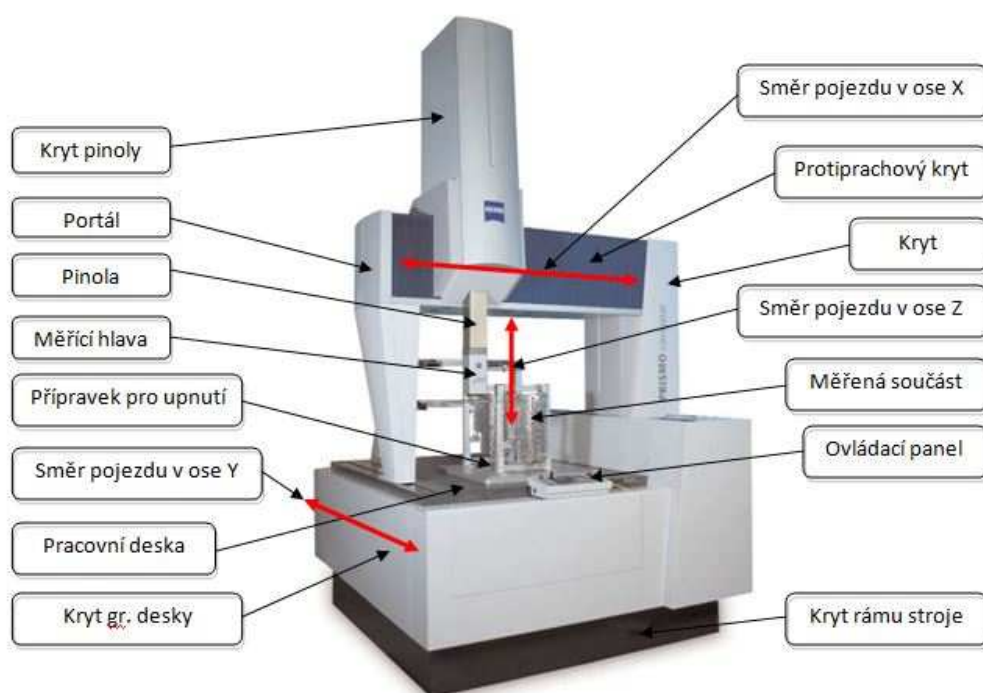
konstrukční provedení dodává možnost vyrábět stroje s velkými měřicími rozsahy, ale na úkor přesnosti měření.



Obrázek 5.4 – Schéma a příklad sloupového SMS

5.2.2 Základní části souřadnicových měřicích strojů

Samotný souřadnicový měřicí stroj se skládá z několika základních částí, které jsou transparentně popsány na obrázku 5.5 (převzatý z [14]) [16].



Obrázek 5.5 – Portálový SMS s popisem jednotlivých částí

Základní části souřadnicového měřicího stroje portálového provedení jsou:

- **Pracovní deska** – Nazývá se také pracovním stolem a tvoří základ souřadnicového měřicího stroje. Hlavním materiálem, který se používá pro výrobu pracovních desek, je granit. V některých případech bývá deska vyrobena z litiny nebo hliníkových slitin. Povrch pracovní desky je leštěný a obsahuje závitové otvory, které slouží k připevňování dalších částí SMS. Například zásobníku na snímače, kalibračních etalonů a upínacích přípravků pro samotné měřené součásti.
- **Portál** – Je další část, která zajišťuje samotný pohyb souřadnicového měřicího stroje. Skládá se z příčnicku a dvou vodících drah. Příčnick spočívá na podpěrách a umožňuje snímání a pojezd ve směru osy X . Dalšími částmi portálu jsou podpěry, které nesou příčnick a díky vzduchovému uložení (viz obrázek 5.6) umožňují pohyb bez tření v ose Y . Poslední částí portálu je pinola, která je vedena na příčnicku a umožňuje pojezd a snímání ve svislém směru osy Z . Na dolním konci pinoly se nachází systém snímací hlavy.



Obrázek 5.6 – Vzduchové ložisko pojezdu ve směru Y

- **Měřicí hlava** – Systém měřicí hlavy je vysoce technologický produkt, který je koncipován pro zjištění souřadnic měřené součásti. To se obvykle provádí dotykovým snímáním pomocí nakonfigurovaného snímače. V některých případech se používají optické metody měření. Měřicí hlava je nasazena na pinolu a do ní se nasazuje samotná konfigurace snímače, kterým se měří součást. To je znázorněno na obrázku 5.7, který byl převzatý z [14].



Obrázek 5.7 – Měřicí hlava s konfigurací snímače

- **Konfigurace snímače** – Skládá se z několika komponent: upínací talířek, snímač, konstrukční prvky konfigurace (např. prodloužení, otočné klouby, apod.). Na jedné konfiguraci může být jeden nebo více snímačů. Existují různé typy snímačů, např. kulové, válcové, talířové. A též se snímače vyrábějí z různých materiálů, nejčastějšími jsou syntetický rubín, diamant či nitrid křemíku. Pomocí upínacího talířku je konfigurace uchycena v měřicí hlavě a dochází k jejímu přesnému polohování.
- **Řízení** – Je důležitou částí souřadnicového měřicího stroje. Nachází se v řídicí skříni, která je obvykle umístěna samostatně vedle stroje. Skříň je kabeláží napojena přímo na souřadnicový měřicí stroj slouží k „řízení“ celého stroje. Řídí například elektrické napájení, pohony pojezdů, apod. Obsahuje také čítač provozních hodin a tlačítko nouzového vypnutí.
- **Ovládací panel** – Slouží k samotnému ovládaní souřadnicového měřicího stroje. Ovládacím panelem se dá regulovat rychlost měření a pojezdů mezi měřeními, a to pomocí potenciometru. Dále panel obsahuje joysticky, kterými se pojíždí v jednotlivých osách stroje, ikony, které hlásí případné poruchy stroje, informační ikony konfigurace snímačů, apod.

5.3 Přesnost souřadnicových měřicích strojů

Přesnost měření souřadnicového měřicího stroje je jednou z nejdůležitějších vlastností při rozhodování uživatele, který stroj koupit a používat. Výrobci souřadnicových měřicích strojů tuto přesnost měření uvádí pomocí „Maximální

dovolené chyby měření délky (MPE)“, která se uvádí v μm , například $\text{MPE} = 1,4 + L/350$, kde L je délka měřeného rozměru. Přesnost měření souřadnicových měřicích strojů stanovuje norma ISO 10360, která má šest částí a jedná se o velmi složitou a podrobnou normu o této oblasti. Celý název normy je „ISO 10360 – Geometrické požadavky na výrobky (GPV) – Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (SMS)“ a každá ze šesti částí této normy má svůj podtitul:

- ISO 10360-1: Slovník.
- ISO 10360-2: Souřadnicové měřicí stroje používané pro měření délkových rozměrů.
- ISO 10360-3: Souřadnicové měřicí stroje s osou otočného stolu jako čtvrtou osou.
- ISO 10360-4: Souřadnicové měřicí stroje používané v režimu měření skenováním.
- ISO 10360-5: Souřadnicové měřicí stroje používající snímací systém s několika doteky.
- ISO 10360-6: Odhad chyb při výpočtu prvků přiřazených metodou nejmenších čtverců.

Norma je rozsáhlá a složitá, proto si zde uvedeme pouze pár základních charakteristik z její druhé části, které ověřují přesnost samotného SMS [17].

- Chyba měření délky E_L ,
- Opakovatelnost rozsahu chyby měření délky R_0 ,
- Maximální přípustná chyba měření délky $E_{L, \text{MPE}}$,
- Maximální přípustný limit rozsahu opakovatelnosti $R_{0, \text{MPL}}$.

5.4 Kalibrace souřadnicových měřicích strojů

Kalibrace souřadnicových měřicích strojů je další důležitou součástí v oblasti souřadnicové měřicí techniky. Jedná se o časově, finančně i technicky náročnou činnost, která značně ovlivňuje přesnost měření SMS. Proto si zde uvedeme pouze 3 základní typy kalibrací souřadnicových měřicích strojů podle účelu, ke kterým slouží [15;16;18].

5.4.1 Kalibrace při instalaci stroje

Tento typ kalibrace se provádí vždy při instalaci nového stroje nebo po jeho stěhování. Před samotnou instalací a kalibrací stroje je důležité vybrat správné

místo, na kterém bude stroj instalován a provozován. Důležitými podmínkami jsou například vyhovující podlaha, na které bude stroj stát, analýza vibrací v okolí, klimatizovaná místnost, čisté prostředí, apod. Všechny tyto aspekty značně ovlivňují kalibraci SMS. Tato kalibrace slouží k tomu, aby se zjistilo, jestli metrologické parametry stroje odpovídají technickým specifikacím. Kalibraci provádí přímo výrobce stroje nebo jeho pověřené servisní zastoupení v dané lokalitě, a to podle stanovených předpisů. Výstupem kalibrace není klasický kalibrační protokol, ale soubor dokumentů, který musí obsahovat všechny parametry, které uvádí norma ISO 10360, jak je v základu uvedeno v kapitole 5.3.

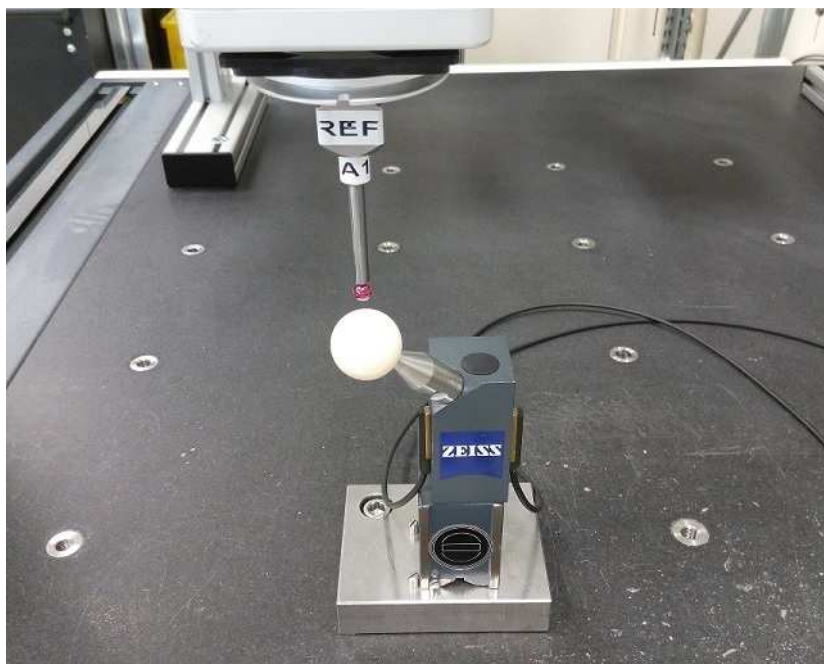
5.4.2 Periodická kalibrace

Periodická kalibrace se provádí v pravidelných periodách, které si stanovuje samotný uživatel stroje, ale na základě doporučení od výrobce. Nastavení tohoto intervalu závisí na provozních podmínkách a samotném využívání stroje. Obvykle je to 12 měsíců. Tato kalibrace se skládá z kompletní technické prohlídky, vyčištění, seřízení a ověření všech metrologických parametrů podle [17] a provádí ji opět samotný výrobce stroje nebo jeho servisní zastoupení. Výstupem je soubor dokumentů jako v 5.4.1.

5.4.3 Kalibrace konfigurace snímače

Tento typ kalibrace si již provádí sám uživatel souřadnicového měřicího stroje. Jedná se o provozní kalibraci, kterou dochází k ověření a hlavně nastavení konfigurací snímačů, kterými se pak provádí samotné měření dotykovým principem. Níže si popíšeme princip takovéto kalibrace na souřadnicovém měřicím stroji Zeiss Prismo Navigator s aktivní skenovací hlavou Vast Gold, který je předmětem praktické části této práce.

Ke kalibraci konfigurací snímačů je potřeba referenční snímač a kalibrační etalon (viz obrázek 5.8), které dodává výrobce stroje. Referenční snímač má určité vlastnosti týkající se délky a průměru. Kalibrační etalon je velice přesná keramická koule. Kalibrací se určuje vektor a průměr snímače, což jsou potřebná data pro určení souřadnic snímaného bodu. Princip kalibrace je ve změření polohy a průměru kalibrační koule pomocí referenčního snímače. Tyto hodnoty jsou pak nastaveny jako referenční (nulové). Následně se provede změření kalibrační koule konfigurací snímače, kterou chceme nakalibrovat. Software následně spočítá rozdíly vzdáleností mezi středy snímačů (referenční vs. kalibrovaný) ve všech osách, poloměr a tvarovou odchylku kalibrovaného snímače. Kalibrace lze provádět ručně, poloautomaticky či automaticky. Režimů kalibrace je také několik např. tenzor, dynamický tenzor, manuální, bodové, apod. Například v režimu tenzoru dojde ke 30-ti snímáním na 15-ti bodech koule, přičemž každý bod je snímán dvěma odlišnými silami a z rozdílů je určen statický tenzor.



Obrázek 5.8 – Kalibrační etalon a referenční snímač

Kalibraci je nutno provést, když dojde ke značné změně okolní teploty, kolizi nebo je nainstalován nový snímač. Předpoklady pro bezvadnou kalibraci jsou stabilita konfigurace snímače, pevné dotažení všech částí kalibrované konfigurace, čistota a nepoškození kalibrační koule, referenčního snímače a kalibrované konfigurace.

5.5 Snímací systémy

Souřadnicové měřicí stroje mohou, díky své komplexnosti, využívat tři typy snímacích systémů, kterými lze provádět měření.

5.5.1 Kontaktní snímací systémy

Principem tohoto typu snímacího systému je, že se snímač dotýká povrchu měřené součásti a zaznamenává data, která pak používá k výpočtům jednotlivých výsledků měření. Kontaktní snímací systém se skládá z měřicí hlavy (pevné či otočné) a konfigurace snímače, který provádí samotné kontaktní měření (viz obrázek 5.7 v kapitole 5.2.2). Konfigurace snímačů mohou být dlouhé až 800 mm a vážit až 600 g. Moderní kontaktní snímací systémy se vyznačují funkcí aktivního skenování a přizpůsobení snímací síly vzhledem ke geometrii konfigurace snímače. Snímací síla se dá nastavit v rozsahu 50 až 1000 mN, což hraje zásadní roli při měření různých typů materiálů (kovů, plastů, apod.) vzhledem k jejich deformaci při dotyku snímačem.

5.5.2 Optické snímací systémy

Ne všechna měření na souřadnicových měřicích strojích lze provádět dotykovým způsobem. Proto bylo nutné vyvinout bezkontaktní snímací systémy na optické

bázi. Optický snímací systém se skládá z otočné měřicí hlavy a optického senzoru (viz obrázek 5.9 [14]). Spojením s otočnou měřicí hlavou umožňuje měření ve všech prostorových směrech bez změny upnutí měřeného dílu. Pracovní vzdálenost je v podstatě nezávislá na použitém objektivu, což umožňuje měřit i hluboko ležící prvky. Použití technologií s LED osvětlením umožňuje měřit i málo kontrastní objekty, jako jsou například plechové výstřižky, desky plošných spojů, apod. Vysoké využití optických snímacích systémů je také při měření plastů či pryží.



Obrázek 5.9 – Optický snímací systém ViScan od firmy Carl Zeiss

5.5.3 Laserové snímací systémy

Tento typ bezkontaktních snímacích systémů dovede laserovým paprskem nasnímat, s vysokou přesností a rychlostí, celé povrchy měřených součástí (až 250 000 bodů za sekundu). Paprsky mohou být bodové nebo plošné. V tomto případě se nejedná o klasické měření délkových rozměrů, ale porovnávání odchylek tvarů měřených povrchů vůči CAD modelům. Laserové snímací systémy lze používat i opačným směrem, tedy skenovat součásti neznámých tvarů a na základě snímaných dat vytvářet CAD modely tzv. digitalizace. Hlavní využití je u dílů, které nelze měřit jiným způsobem. Například malé rozměry, složité tvary součástí, křehký či pružný materiál, apod. Příklad laserového snímacího systému je vidět na obrázku 5.10 [14].



Obrázek 5.10 – Laserový snímací systém LineScan od firmy Carl Zeiss

6 Funkce měřicího softwaru

Měřicí software bývá zpravidla nainstalován na PC, který je umístěn mimo samotný souřadnicový stroj. Tento PC komunikuje s řídicí jednotkou SMS a stará se tak o veškeré operace, které může se strojem provádět samotný uživatel. Pomocí měřicího softwaru je uživatel schopen uvést SMS do „pohybu“. Jedná se o složitý a důkladně propracovaný software, například software Calypso, který je výhradně součástí souřadnicových strojů Zeiss, má základní manuál, který obsahuje 922 stran. Dále dalších 19 menších manuálů k různým opcím o obsahu dalších cca 700 stran [18].

6.1 Základní funkce měřicího softwaru

- **Definování a měření geometrických elementů** – Funkce umožňuje definovat měřené elementy, které jsou pak využívány k výpočtům samotných výsledků měření. Jedná se o elementy přímky, kružnice, roviny, válce, koule, podélného otvoru, jednotlivých bodů, apod. Tyto elementy mohou být měřeny bodově nebo skenováním (pokud je SMS touto funkcí vybaven). Měření pomocí skenování vede ke zlepšení přesnosti měření.
- **Definování pomocných geometrických elementů** – Touto funkcí můžeme vytvořit pomocné (teoretické) geometrické elementy zadáním jejich jmenovitých hodnot a souřadnic. Teoretické elementy lze dále využít pro

konstrukce dalších elementů, případně k vytvoření pomocných souřadných systémů, apod.

- **Konstrukce geometrických elementů** – Tímto způsobem lze konstruovat elementy, které nelze fyzicky naměřit. Například řezy (válec vs. rovina), projekce (střed kružnice do roviny), apod.
- **Definování měřených charakteristik** – Měřené charakteristiky obsahují samotné výsledky měření, které se vypočítávají z naměřených či teoretických elementů nebo jejich kombinací. Jsou to jednoduché vzdálenosti (polární či kartézské), průměry, poloměry, úhly, tolerance tvaru a polohy, apod.
- **Definice a vytvoření souřadných systémů** – Tato funkce je nutná pro přesnou definici polohy měřené součásti (základní souřadný systém) na pracovní desce stroje vůči nulovému bodu stroje (souřadný systém stroje). Vůči základnímu souřadnému systému se pak, zejména u složitějších součástí, vytváří další pomocné souřadné systémy.
- **Vytváření automatických měřicích úloh** – Jedna z nejdůležitějších funkcí, která je jedním z hlavních smyslů SMS. Automatické měřicí úlohy v režimu CNC (měřicí programy) vytváří proškolení měroví technici nebo specializované firmy (obvykle aplikační oddělení samotného výrobce stroje). Programy jsou vytvářeny dle výkresových dokumentací, případně podle zákaznických požadavků. Automatizace odstraňuje z procesu měření chyby způsobené obsluhou stroje.
- **Definice a správa konfigurací snímačů** – Tato funkce umožňuje definovat, kontrolovat, kalibrovat konfigurace snímačů, které se používají k měření.
- **Automatická kompenzace teploty** – Pokud není stroj provozován v klimatizovaném prostředí, zaručí tato funkce dodržení přesnosti měření pomocí automatické kompenzace teploty, která je zajištěna teplotními senzory či snímači. Pro správnou kompenzaci je nutné znát a zadávat koeficienty roztažnosti jednotlivých materiálů.
- **Práce s CAD modely** – Velice užitečná a moderní funkce, která umožňuje načtení, editace a ukládání CAD modelů, které usnadňují práci při vytváření složitějších měřicích programů. CAD modely obsahují veškeré potřebné informace o součásti vzhledem k výkresové dokumentaci a dalším specifikacím. Výhodou je též grafické 3D znázornění na monitoru PC, kde je možné pomocí kurzoru vybírat a definovat jednotlivé geometrické elementy.
- **Prezentace výsledků měření** – Umožňuje definovat a dále editovat protokolové výstupy naměřených výsledků s možností převodu do

elektronického formátu. Jsou k dispozici jak tabulkové protokoly s naměřenými výsledky, tak grafické protokoly (např. pro tolerance tvaru a polohy).

- **Správa programů a dat** – Funguje podobně jako v prostředí jiných SW (MS Windows, MS Office). Programy a data se dají načítat, editovat, ukládat, mazat či kopírovat.

6.2 Doplnkové funkce měřicího softwaru

Funkce uvedené v kapitole 6.1 jsou k dispozici v základním „balíčku“ při koupi souřadnicového měřicího stroje. Existují ale další funkce, které mohou zlepšit využití a práci se SMS. V praxi tyto doplňkové funkce fungují na principu speciálních opcí, za které se platí a jsou to:

- **Offline programovací stanice** – Vyžaduje samostatný počítač, na kterém je nainstalovaný stejný SW jako na SMS, avšak s opcí pro simulaci, aby nemusel být spojen přímo se strojem. Výhoda offline programování je v tom, že se při vytváření programu nemusí blokovat kapacita samotného stroje. Stroj může být tedy primárně využíván k měření, ke kterému je určen.
- **Konvertory CAD modelů** – V základu měřicí SW umožňuje většinou práci pouze s jedním určitým formátem CAD modelů, což je určité omezení. Lze ovšem dokoupit licence pro další typy formátů CAD modelů a stroj se tím stává komplexnějším.
- **Export dat** – Výsledky měření lze ukládat pouze ve formátu, který umožňuje základní software. Pokud chce uživatel stroje provádět např. statistická vyhodnocení naměřených dat, tak je výhodné dokoupit konvertory dat do jiných formátů – textové soubory, Qs-Stat, Excel.

6.3 Souřadné měřicí systémy (CMS)

Jak již napovídá samotný název souřadnicového měřicího stroje, tak souřadnicový nebo též souřadný systém je důležitým aspektem pro práci s těmito stroji a patří k základním funkcím softwaru. Souřadné systémy musí být přesně definované a vzájemně přepočitatelné.

Základem souřadných systémů jsou tři osy X , Y , Z , které jsou na sebe navzájem kolmé a stýkají se v jednom bodě. Tento bod se nazývá počátek souřadného systému nebo též nulový bod. Body měřené v souřadném systému lze zadávat dvěma základními způsoby:

- **Kartézský způsob** – Zadání probíhá pomocí kolmých vzdáleností bodu od tří rovin definovaných třemi osami X , Y , Z souřadného systému, například $x = 10 \text{ mm}$, $y = 15 \text{ mm}$, $z = 20 \text{ mm}$.
- **Polární způsob** – Ve fyzice se též používá název cylindrický, kde se daný bod zadává pomocí přímé vzdálenosti r od nulového bodu, úhlu natočení α od jedné z os (proti směru hodinových ručiček) a výšky h od nulového bodu ve směru další osy, například $r = 8 \text{ mm}$, $\alpha = 45^\circ$, $h = 16 \text{ mm}$.

Oběma způsoby se dojde ke stejným výsledkům a měřicí software provádí i vzájemné přepočty mezi těmito dvěma způsoby. V praxi se mnohem více využívá kartézský způsob zadávání bodů, který je hlavním pro měření na souřadnicových měřicích strojích. Polární systém se používá pouze ve speciálních případech, udává-li to výkresová dokumentace.

6.3.1 Souřadný systém stroje

Tento typ souřadného systému slouží jako základ pro samotný pohyb SMS, pro určování polohy měřicí hlavy a také pro definování dalších souřadných systémů, které se pak využívají při samotném měření měřených součástí. Osy souřadného systému stroje jsou rovnoběžné s osami pojezdů, které jsou znázorněny a popsány na obrázku 5.5 v kapitole 5.2.2. Nulový bod stroje je umístěn v pracovním prostoru stroje. Zpravidla v jednom z rohů nad pracovní deskou a říká se mu referenční bod. Do tohoto bodu si stroj najede vždy po zapnutí a tím je připraven k měření. Pro samotné měření součástí je tento souřadný systém nepraktický, protože měřené součásti mohou být upnuté kdekoliv v pracovním prostoru a otočené do různých směrů, proto software umožňuje tvorbu dalších CMS vztažených přímo na měřenou součást, na které jsou pak umístěny orientační elementy a nulový bod.

6.3.2 Souřadné systémy součástí

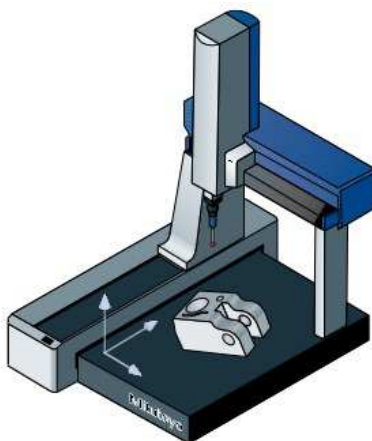
Souřadný systém je vázán přímo na měřenou součást a lokalizuje polohu a orientaci součásti v měřicím prostoru souřadnicového měřicího stroje. Pro jednu měřenou součást může existovat i několik souřadných systémů. Nejdůležitější z těchto systémů je základní souřadný systém, který v ideálním případě bývá definován výkresovou dokumentací. Další souřadné systémy měřené součásti (nazývají se pomocné CMS) jsou pak vztaženy právě k systému základnímu.

Každý souřadný systém součásti musí být definován. To se provádí z měřených elementů a je k tomu nutno zadat celkem pět referencí:

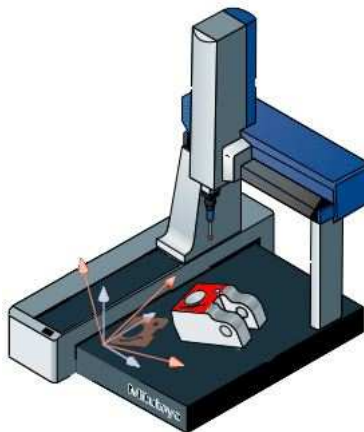
- **Primární reference** – Nazývá se též vyrovnaním v prostoru. Definuje hlavní osu (například Z), podle které bude součást vyrovnána. To znamená, že osa naměřená na součásti bude ztotožněna s osou Z souřadného systému. Jako primární reference se musí použít prostorově orientovaný prvek (normála roviny, osa válce, osa kuželu, apod.).

- **Sekundární reference** – Definuje natočení v rovině vedlejší osy (například X), tedy směr, kterým bude prostorově natočena osa X měřené součásti. Pro toto natočení lze použít prakticky jakýkoliv element. Zbývající osa (pro tento případ Y) je kolmá na obě ostatní a orientovaná tak, aby osy tvořily pravotočivý systém.
- **Terciární reference** – Tato reference definuje nulový bod souřadného systému v osách X, Y, Z . Lze použít jakýkoliv element z měřené součásti.

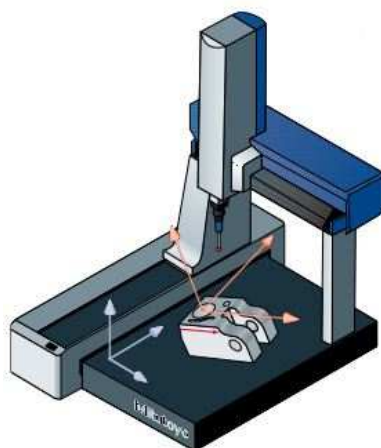
Názorné ukázky definování souřadného systému součásti jsou vidět na obrázcích 6.1 až 6.4, které byly převzaty z [15].



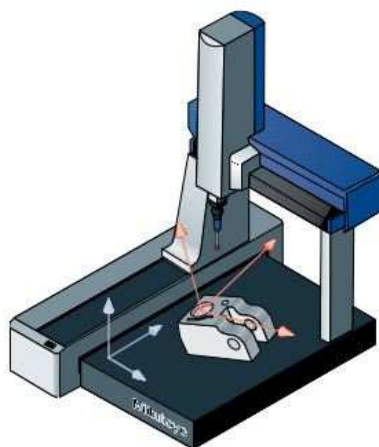
Obrázek 6.1 – Libovolné umístění měření součásti v pracovním prostoru SMS



Obrázek 6.2 – Vyrovnání v prostoru podle horní roviny součásti (primární reference)



Obrázek 6.3 – Natočení v rovině podle boční stěny součásti (sekundární reference)



Obrázek 6.4 – Umístění nulového bodu součásti (terciární reference)

7 Tolerance tvaru a polohy

Měření tolerancí tvarů a polohy je nedílnou součástí oblasti souřadnicových měřicích strojů. Tolerancemi tvaru a polohy se podobně zabývá norma ISO 1101 [19].

7.1 Všeobecně k tolerancím tvaru a polohy

Tolerance tvaru a polohy prvku (plochy, osy, bodu nebo středové roviny) definuje oblast, v níž musí ležet každý bod tohoto prvku. Podle tolerované vlastnosti a podle způsobu jejího kótování je toleranční pole jedno z následujících:

- Plocha uvnitř kruhu,
- Plocha mezi dvěma soustřednými kruhy,
- Plocha mezi dvěma rovnoběžkami,

- Prostor mezi dvěma paralelními plochami,
- Prostor uvnitř válce,
- Prostor mezi dvěma koaxiálními válci.

Pro tolerance polohy je potřeba uvést základnu (referenci) udávající přesnou polohu tolerančního pole, nikoli však pro tolerance tvaru (viz obrázek 6.1). Základnou je ideálně přesný geometrický prvek (např. osa, rovina, apod.). Základny mohou být určeny jedním nebo více základními prvky. Uvnitř tolerančního pole může mít tolerovaný prvek libovolný tvar, místo a směr, pokud nejsou uvedeny dodatečné omezující podmínky. Pro toleranční hodnoty t platí stejné jednotky jako pro délkové míry. Pokud není udáno jinak, platí tolerance pro celou délku nebo plochu tolerovaného prvku.

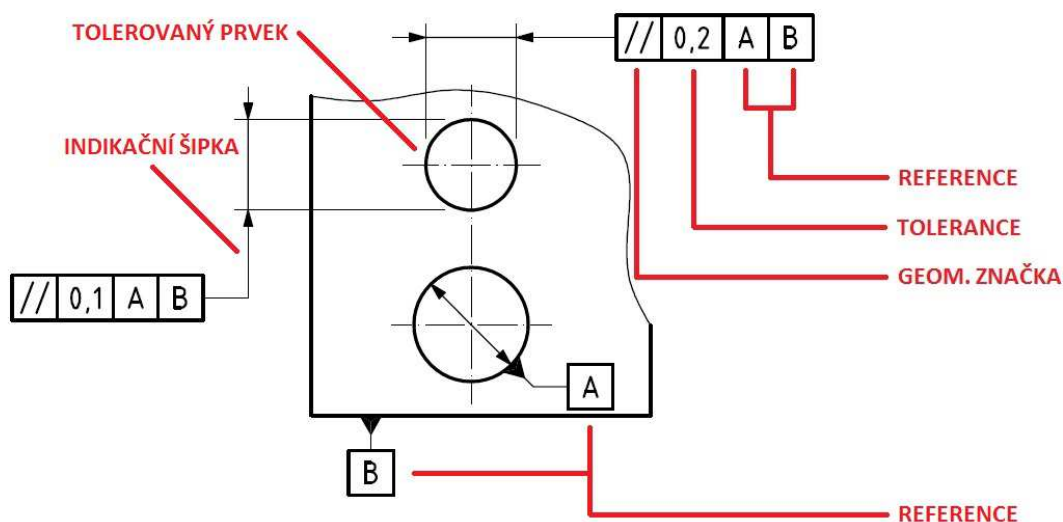
Tolerance	Charakteristika	Symbol	Reference	Poznámka
Tvar	Príměst	—	ne	
	Rovinnost		ne	
	Kruhovitost		ne	
	Valcovitost		ne	
	Tvar profilu		ne	
	Profil plochy		ne	
Orientace	Rovnoběžnost	//	ano	
	Kolmost		ano	
	Sklon		ano	
	Tvar profilu		ano	
	Profil plochy		ano	
Pozice	Pozice		ano / ne	
	Soustřednost		ano	
	Souosost		ano	
	Symetrie		ano	
	Tvar profilu		ano	
	Profil plochy		ano	
Hazení	Obvodové/celní hazení		ano	
	Celkové obvodové/celní hazení		ano	

Obrázek 7.1 – Přehled tolerancí tvaru a polohy

7.2 Označování tolerancí tvaru a polohy

Druh tolerance tvaru nebo polohy se na výkresové dokumentaci znázorňuje příslušnou značkou. Údaje se zapisují do tolerančního rámečku rozděleného na dvě nebo tři pole, jak je vidět na obrázku 7.2. Toleranční rámeček se kreslí přednostně

ve vodorovné poloze a nesmí být protnut jinými čarami. Reference se označují plným trojúhelníkem, který se spojí spojovací čarou s referenčním prvkem.

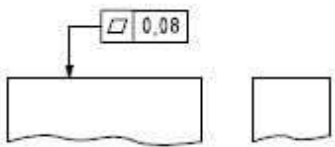
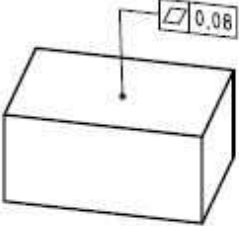
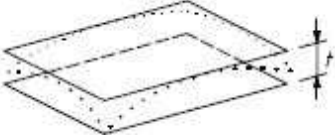


Obrázek 7.2 – Označení odchylek tvaru a polohy

7.3 Definování tolerancí tvaru a polohy

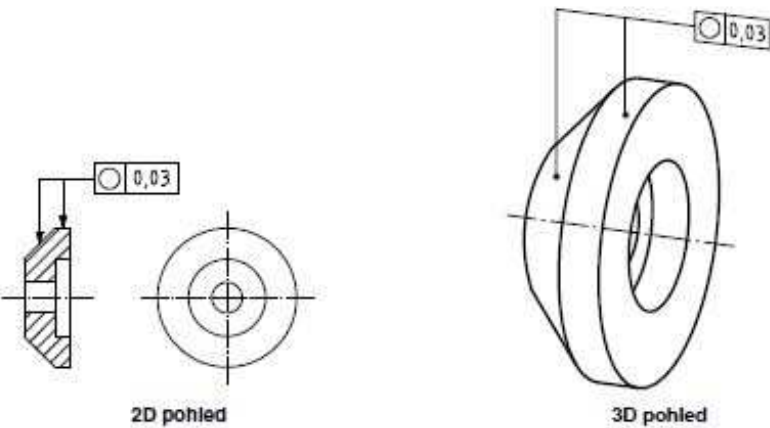
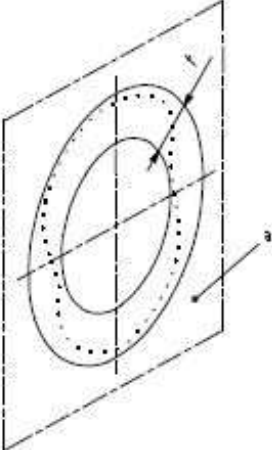
Definování tolerancí tvaru a polohy podrobně popisuje norma ISO 1101 [19]. Tato kapitola je zaměřena na samotné definice základních charakteristik tvarů a polohy, které jsou měřeny v praktické části této práce a praktické ukázky zakreslování a zobrazování ve výkresové dokumentaci, což je stěžejní dokument pro provádění samotného měření pomocí souřadnicových měřicích strojů. Těmito základními charakteristikami jsou:

- **Rovinnost** – Toleranční prostor je ohraničen dvěma rovnoběžnými rovinami vzdálenými od sebe o hodnotu tolerance t . Jak je vidět na obrázku 7.3, aby byla splněna podmínka rovinnosti 0,08 mm, musí skutečný tvar roviny ležet mezi rovnoběžnými rovinami vzdálenými právě o 0,08 mm.

Symbol	Oznaceni
	 2D pohled
	 3D pohled
	Definice toleranční zony
	

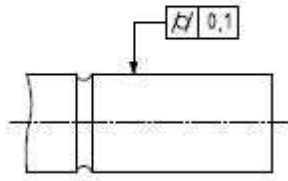
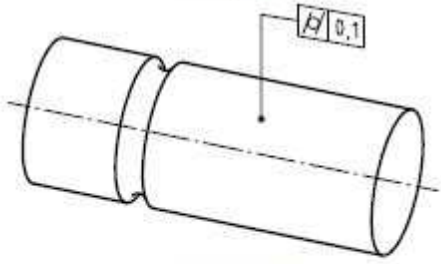
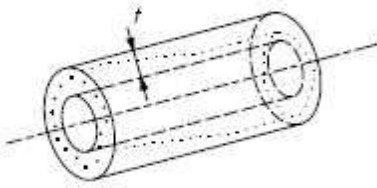
Obrázek 7.3 – Tolerance rovinnosti

- **Kruhovitost** – Toleranční pole je v rovině měření kolmé k ose ohraničeno dvěma soustřednými kružnicemi s šířkou mezikruží t . Prakticky zobrazeno na obrázku 7.4 pro toleranční pásmo 0,03 mm.

Symbol	Oznaceni
	 2D pohled 3D pohled Figure 80
	Definice tolerancni zony 

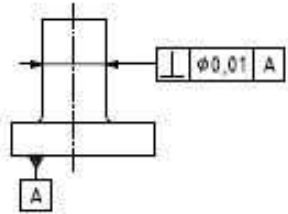
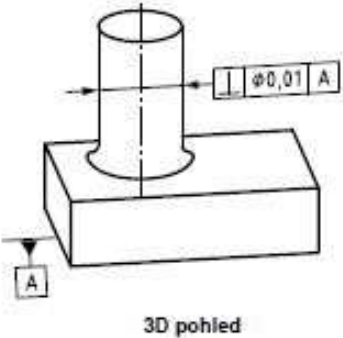
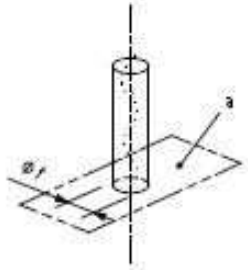
Obrázek 7.4 – Tolerance kruhovistosti

- **Válcovitost** – Toleranční prostor je ohraničen dvěma souosými válci vzdálenými od sebe o hodnotu tolerance t . Jak názorně ukazuje obrázek 7.5, na kterém musím tolerovaná plocha ležet mezi dvěma souosými válci o vzdálenosti maximálně 0,1 mm.

Symbol	Oznaceni
	 2D pohled  3D pohled Figure 83
	Definice tolerancni zony 

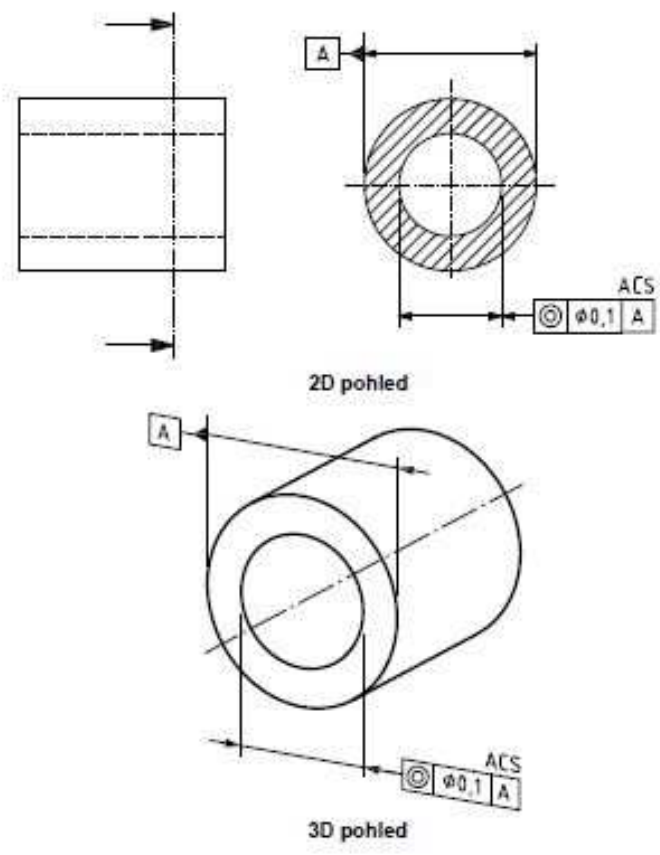
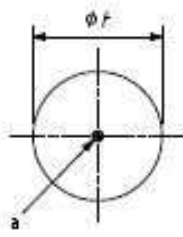
Obrázek 7.5 – Tolerance válcovitosti

- Kolmost** – Toleranční pole kolmosti je v rovině měření ohraničeného dvěma rovnoběžkami, které jsou kolmé ke vztažné základně (referenci), a jejichž vzdálenost je t . Prakticky znázorněno na obrázku 7.6 s tolerancí 0,1 mm.

Symbol	Oznaceni
	 2D pohled  3D pohled
	Definice tolerancni zony ϕ  Ref. A Figure 117

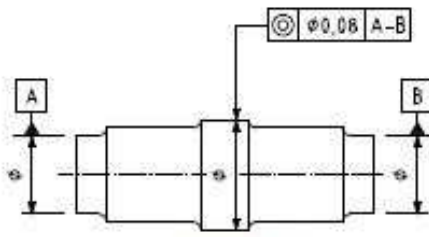
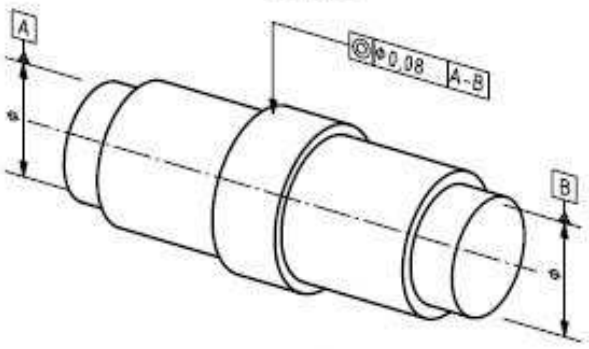
Obrázek 7.6 – Tolerance kolmosti

- Soustřednost** – Toleranční pole, v němž může ležet střed tolerovaného prvku, je kruhové pole o průměru rovném předepsané toleranci t . Střed kruhu je přitom ve středu základního (referenčního) prvku. Prakticky zakresleno na obrázku 7.7.

Symbol	Oznaceni
	 2D pohled 3D pohled
	Definice tolerancni zony  a Ref. bod A.

Obrázek 7.7 – Tolerance soustřednosti

- **Souosost** – Je-li před toleranční hodnotou znak průměru, je toleranční prostor ohraničen válcem o průměru t , jehož osa je totožná se základní osou. Jak je vidět na obrázku 7.8, kde osa tolerovaného válce musí ležet uvnitř válce o průměru 0,08, jehož osa je totožná se základnou A.

Symbol	Oznaceni
	 2D pohled
	 3D pohled
	Definice tolerancni zony  Ref. A-B

Obrázek 7.8 – Tolerance souososti

Ostatní charakteristiky, jako například tvar profilu, profil plochy, poloha, atd., jsou podrobně definovány v normě ISO 1101 [19].

8 Zpracování vybrané měřicí úlohy (praktická část)

Měřicí úlohu jsem zpracoval s pomocí vysoce přesného souřadnicového měřicího stroje Zeiss Prismo 7 Navigator S-ACC (viz. obrázek 5.5 v sekci 5.2.2), který k měření využívá pevnou měřicí hlavu Vast Gold s aktivním skenováním. Měřicí software, který využívá tento SMS, má název Calypso, číslo revize softwaru je 5.4. Software Calypso je velmi dobře graficky propracovaný a je kompatibilní s MS

Windows 7. Měřicí software Calypso funguje na principu objektového programování, což mu dává významnou výhodu oproti softwarům, které využívají klasické programování pomocí příkazových řádků a složitých syntaxí. Jako podpora při programování mi sloužila programovací offline stanice od firmy Carl Zeiss, na které jsem mohl vytvořit měřicí program nezávisle na měřicím stroji. Na této offline stanici, která funguje na principu simulace, se dá měřicí program vytvořit, ale také odzkoušet a případně odladit od případných kolizí, které by mohly nastat přímo na samotném SMS. V softwaru Calypso se měřicí program (úloha) nazývá „plán měření“. Níže pro názornost uvedu základní technické údaje souřadnicového stroje Zeiss Prismo 7.

Základní technické údaje SMS Zeiss Prismo 7:

- **Chyba měření (MPE)** – $0,9+L/350 \text{ } \mu\text{m}$ v rozsahu teplot 18 až 22 °C,
- **Rozměry stroje** – šířka = 1700 mm, délka = 2040 mm, výška = 3030 mm,
- **Měřicí rozsah** – $X = 900 \text{ mm}$, $Y = 1200 \text{ mm}$, $Z = 650 \text{ mm}$,
- **Měřicí hlava** – Vast Gold s funkcí aktivního skenování,
- **Hmotnost** – 2250 kg stoj, max. 1300 kg měřená součást,
- **Rychlost pojezdu** – až 300 mm/s ve všech osách.

8.1 Příprava před plánem měření

Před začátkem samotného programování plánu měření je nutné promyslet a připravit několik věcí. Zadavatel měření poskytne díl, pro který má být plán měření naprogramován. K tomuto dílu musí zadavatel dodat řádnou výkresovou dokumentaci s označenými charakteristikami, které mají být měřeny, případně ještě jinou technickou specifikaci, ve které mohou být uvedeny například přesněji definovaná vyhodnocení pro měřené charakteristiky. Dále by měl zadavatel dodat CAD model měřené součásti. Není to nezbytnou nutností, ale urychluje to přípravu plánu měření. Pokud se jedná o opakovaná a častá měření stejného dílu, tak je vhodné nechat navrhnout a vyrobit upínací přípravek, který zajistí opakované stejné a stabilní upnutí měřené součásti. Nakonec je nutné navrhnout a sestavit konfiguraci snímače, kterou se bude provádět měření.

8.1.1 Měřená součást a výkres

Pro svoji měřicí úlohu jsem si vybral součást válce pro píst, který se ve finálním stavu používá do vysokotlakých naftových čerpadel. Konkrétně měření po obráběcí operaci s označením OP1 tohoto válce v sériové CNC výrobě. Kompletní konstrukční výkres nelze zveřejnit kvůli interním předpisům a případnému vyzrazení know-how výrobce, takže jsem si vytvořil vlastní zjednodušený výkres, který bude sloužit jako podklad pro zpracování této měřicí úlohy (viz obrázek 8.3

v příloze 1). I samotné označení obráběcí operace OP1 je smyšlené, ale názorné pro měřicí úlohu.

8.1.2 CAD model součásti

Software Calypso umožňuje programování plánu měření pomocí CAD modelů, které si po načtení do plánu automaticky převádí do formátu SAB, se kterým Calypso nadále pracuje. Pro vytvoření plánu měření, který jsem vytvářel na programovací offline stanici, jsem měl k dispozici CAD model ve formátu STEP. Grafické znázornění CAD modelu v prostředí softwaru Calypso je vidět na obrázku 8.4 v příloze 2 (převzato z [20]). Po načtení modelu do plánu měření je nutné provést transformaci CAD modelu. To znamená, že jsem musel pomocí příslušných speciálních funkcí upravit základní souřadný systém na modelu tak, aby odpovídal výkresové dokumentaci a také samotnému reálnému upnutí na pracovní desce stroje, což znamená, že směry os základního souřadného systému jsou stejné jako směry os souřadného systému samotného stroje, je to nejpraktičtější pro samotné programování.

8.1.3 Upínací přípravek

Jelikož má tento plán měření sloužit k opakovanému měření sériové CNC výroby, tak bylo nutné vymyslet a nechat vyrobit speciální upínací přípravek. Výkres tohoto přípravku je vidět na obrázku 8.5 v příloze 3. Upnutí v tomto přípravku musí být pevné a stabilní, a tím by měly být zajištěny kvalitní a opakované výsledky měření. Pro opakované umístění upínacího přípravku do stejné pozice na pracovní desce stroje je deska vybavena přesným pravoúhlým rastrem se zapuštěnými závitovými otvory M6, což umožňuje opakované připevnění přípravku do stejné pozice. Svislou polohu dílu zajišťuje konstrukce upínacího přípravku, stejně jako směr upnutí v ose X.

8.1.4 Konfigurace snímače

U tohoto dílu bylo nutné vymyslet a vytvořit speciální konfiguraci snímače. Konfiguraci jsem nazval H1 a je zobrazena i s popisy jednotlivých částí na obrázku 8.6 v příloze 4. Konfigurace H1 se skládá upínacího talířku, několika titanových prodloužení různé délky, speciálního kvádru se závity M5 a celkem 7 snímačů o různých délkách dřívků a průměrech kuliček. Jelikož je měřený díl ze železa, tak jsem zvolil snímače, které mají kuličky ze syntetického rubínu. Takto navržená konfigurace snímače H1 mi umožnila změřit všechny požadované charakteristiky pouze s touto jednou konfigurací, což je výhodné pro časovou úsporu u délky průběhu plánu měření.

8.2 Programování plánu měření

Po skončení přípravných akcí, které hlavně z důvodu návrhu a výroby upínacího přípravku zabraly několik týdnů, jsem mohl konečně začít s vytvářením samotného plánu měření na offline stanici. Prakticky se jedná o vytváření počítačového programu pomocí objektového programování, takže tato činnost má svá pravidla a postupy, které musí každý programátor dodržovat. Výsledkem tohoto souboru činností je pak tížený plán měření. Podle názvu dílu, čísla výkresu a indexu výkresu jsem tedy nejdříve založil nový plán měření a uložil ho pod názvem „VALEC_OBRABENI_OP1_102030_AA“.

8.2.1 Potřebné souřadné systémy

V tomto plánu měření jsou potřeba celkem tři souřadné systémy. Jeden základní souřadný systém a dva systémy pomocné. Definováním základního souřadného systému začíná tvorba každého plánu měření, protože od tohoto systému se pak odvíjí celý plán měření. Pro názornost popíšu pouze definici a nastavení základního souřadného systému, definice pomocných souřadných systémů jsou pak principiálně stejné.

Na základě výkresu v příloze A jsem zjistil, že prostorová osa (primární reference) je definována vnitřním průměrem součásti s označením C2. Zvolil jsem tedy element válce, nazval ho „VALEC_A_ZSS“ a nastavil tento element jako primární referenci pro osu +X (viz obrázek 8.1 [20]). Tento element válce sloučí také jako nulový bod pro osy Y a Z. Zbývalo tedy ještě určit sekundární referenci a nulový bod v ose X. Jelikož tyto reference nedefinuje výkres, tak jsem měl v tomto směru „volné ruce“. Jako nulový bod v ose X jsem zvolil čelní rovinu dílu, element roviny jsem nazval „ROVINA_ZSS“ a nastavil jej jako nulový bod v ose X. Sekundární referenci, tedy natočení druhé osy souřadného systému jsem nastavil na boční stěnu měřené součásti, a to pomocí 3D přímky, kterou jsem definoval dvěma body a nazval „3D_PRIMKA_ZSS“. Definováním těchto tří elementů z CAD modelu a jejich nastavením je definován základní souřadný systém součásti.

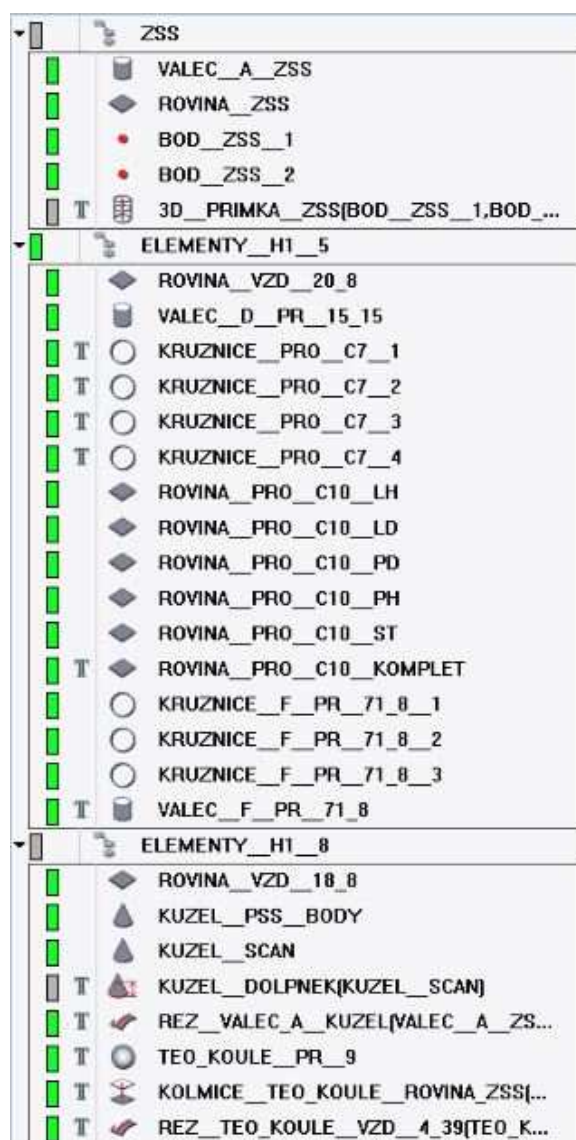
Dalším důležitým krokem bylo nastavit název základního souřadného systému. Z praktických důvodů jsem tento název zvolil stejný jako název samotného plánu měření, tedy „VALEC_OBRABENI_OP1_102030_AA“. Dále bylo nutné, před prvním spuštěním plánu měření, manuálně nastavit základní systém (viz ikona vpravo dole na obrázku 8.1). Ručním změřením elementů tak dojde k fyzickému přenesení souřadného systému na měřenou součást.



Obrázek 8.1 – Základní souřadný systém

8.2.2 Měřené a vztažné elementy

Měřené elementy je nutné definovat v každém plánu měření, protože z těchto elementů jsou poté vyhodnocovány samotné výsledky měření – měřené charakteristiky. Vztažné (referenční) elementy jsou definovány výkresem a slouží jako reference pro vyhodnocování odchylek tvaru a polohy. V tomto plánu měření bylo nutné definovat tři vztažné elementy – válec A, válec D a válec F. Celkem bylo nutné v plánu měření definovat a nastavit 29 měřených elementů (viz obrázek 8.2 [20]), aby ve výsledku mohly být vyhodnocovány charakteristiky, které jsou popsány v části 8.2.3. Elementy s označením „T“ jsou teoretické, tedy zpětně vyvolané z ostatních měřených či referenčních elementů, ručně nebo vzorcem definované programátorem a slouží jako pomocné. Níže uvádím detailnější popis, které elementy slouží pro vyhodnocení jednotlivých charakteristik.



Obrázek 8.2 – Seznam měřených elementů pro plán měření

Elementy potřebné pro vyhodnocení charakteristik v plánu měření:

- Referenční element válce „VALEC_A_ZSS“ – C1, C2, C6, C10,
- Referenční element válce „VALEC_D_PR_15_15“ – C3, C4, C6, C10,
- Referenční element válce „VALEC_F_PR_71_8“ – C5, C8,
- Měřený element roviny „ROVINA_VZD_18_8“ – Rozměr $18,8 \pm 0,05$,
- Měřený element roviny „ROVINA_VZD_20_8“ – Rozměr $20,8 - 0,06$,
- Teoretický element roviny „ROVINA_PRO_C10_KOMPLET“ – C9, C10,
- Teoretické elementy kružnice „KRUZNICE_PRO_C7_1-4“ – C7,

- **Teoretický element řezu „REZ_TEO_KOULE_VZD_4_39“** – Rozměr 4,39-0,2.

Ačkoli jsem na začátku této kapitoly psal, že plán měření obsahuje 29 elementů, tak ze seznamu výše fakticky vidíme, že pro samotná vyhodnocení je potřeba pouze elementů 8. Ostatní elementy tedy slouží pouze jako pomocné, ovšem nutné pro průběh plánu měření a dosažení požadovaných výsledků. Vzhledem k požadavkům na přesnost měření (setiny milimetru) jsem nastavil skenovací rychlosti elementů na nižší rychlosti měření 7 mm/s a krok měření (hustotu měřených bodů) na 150 bodů/mm. Tím byly definovány všechny potřebné elementy v plánu měření.

8.2.3 Vyhodnocované charakteristiky

Dalším krokem při tvorbě plánu měření je nastavení vyhodnocení požadovaných měřených charakteristik. V našem vzorovém plánu měření je vyhodnocováno celkem 17 charakteristik:

- **C1, C3** – vyhodnocení odchylky válcovitosti z elementu válce,
- **C2, C4, C8** – vyhodnocení průměru z elementu válce,
- **C5, C6** – vyhodnocení odchylky souososti mezi vztažnými a měřenými elementy,
- **C7-1-4** – vyhodnocení odchylky kruhovitosti kružnicemi ve 4 měřených rovinách,
- **C9** – vyhodnocení odchylky rovinnosti z měřené roviny,
- **C10a, b** – vyhodnocení odchylky kolmosti mezi vztažnými a měřenými elementy,
- **Rozměry 4,39; 18,8; 20,8** – vyhodnocení vzdálenosti ve směru osy X.

Požadované výsledky měření se po skončení plánu měření objeví v tzv. prezentačním protokolu. Vzorový prezentační protokol, s popisy jednotlivých částí, pro tento plán měření je na obrázku 8.7 v příloze 5. Dále je na obrázku 8.8 v příloze 6 vidět prezentační protokol grafického znázornění rovinnosti C9 a na obrázku 8.9 v příloze 7 je vidět prezentační protokol grafického znázornění kruhovitosti C7. Prezentační protokoly se objeví automaticky po skončení průběhu plánu měření a obsluha je poté ukládá ve formátu *.pdf do předepsaného adresáře. Pokud jsou výsledky mimo toleranční meze (jako v příloze 5), jsou protokoly kontrolovány a měření analyzováno a až poté je kontaktován zadavatel měření, že jeho zakázka byla dokončena a obdrží výsledky měření. Obrázky převzaty z [20].

8.3 Odladění programu

Po dokončení tvoření plánu měření, které jsem popisoval v předchozí části (nastavení souřadných systému, definování elementů, apod.), je nutné plán měření odladit, což znamená ještě udělat soubor důležitých kroků a akcí, aby po skončení plánu měření došlo k vygenerování přehledného prezentačního protokolu, časový průběh byl co nejkratší a měření elementů probíhalo systematicky.

8.3.1 Odladění na offline stanici

Předběžné odladění programu jsem provedl přímo na offline stanici. Jelikož se v našem případě jedná o program pro měření sériové výroby, tak základním předpokladem bylo, aby čas průběhu programu byl co nejkratší, nikoli ovšem na úkor kvality. Tento požadavek je pochopitelný, protože v praxi se cena provozu za hodinu, souřadnicového měřicího stroje Zeiss Prismo 7, pohybuje v rozmezí 1100 až 1500 Kč. V plánu měření jsem použil minimální počet elementů a nastavil maximálně povolené rychlosti měření, takže v tomto ohledu jsem udělal maximum pro časovou úsporu. Další časové rezervy jsou ve vzdálenostech, které při měření urazí měřicí hlava, které se mi podařilo minimalizovat díky níže uvedeným krokům:

- **Minimální počet konfigurací snímačů** – Jelikož byla navržena a sestavena pouze jedna konfigurace snímače, došlo tím ke zkrácení průběhu měření. Kdybychom používali více konfigurací, tak by si je stroj musel v průběhu měření měnit. Výměna konfigurace snímače trvá v rozmezí 30 až 50 vteřin.
- **Minimální počet výměn** – Tento krok souvisí s výše uvedeným, protože používáme pouze jednu konfiguraci snímače a nedochází tak k prodlužování průběhu měření z důvodu výměn konfigurací snímačů.
- **Systematický průběh měření** – Jak je vidět na obrázku 8.2 v kapitole 8.2.2, seřadil jsem měřené elementy systematicky tak, aby nejprve proběhlo měření elementů pro základní souřadný systém. Poté měření všech elementů, které lze změřit snímačem číslo 5 (skupina s označením „ELEMENTY_H1_5“). Nakonec měření všech elementů, které lze měřit snímačem číslo („ELEMENTY_H1_8“). Tento systematický průběh měření zkrátil časový průběh plánu měření.
- **Dráha a rychlost pojezdů** – Pokud je zajištěna stále stejná pozice součásti, čehož bylo dosaženo speciálním upínacím přípravkem, tak je možné nastavit vzdálenosti, po kterých bude snímač objíždět kolem součásti v řádech milimetrů. Rychlosti pojezdů poté mohou být nastaveny na maximálních 300 mm/s. Důležitým předpokladem pro tento krok je, aby se měřená součást tvarově neměnila (nehlášené změny ve výkresové

dokumentaci, apod.) a aby byl plán měření zajištěn z pohledu systému používání (interní předpisy, řádně proškolená obsluha).

Tyto kroky se hlavně týkají souřadnicového měřicího stroje Zeiss Prismo 7, který je vybaven pevnou měřicí hlavou s aktivním skenováním.

8.3.2 Dokončení na stroji

I když v podstatě celou přípravu plánu měření dokážeme zvládnout na offline stanici, tak pro závěrečné doladění a dokončení plánu měření je potřebný samotný souřadnicový měřicí stroj. Na něm jsem nejprve musel manuálně nastavit základní souřadný systém. Poté jsem spustil průběh plánu měření v pomalejším režimu. Jelikož mám již téměř osm let praxe v tvorbách plánů měření, tak nedošlo k žádné kolizní situaci, ale musel jsem ještě odladit některé objezdové dráhy, protože jejich nastavení z offline stanice nebylo úplně správné. Po těchto změnách jsem již mohl podruhé spustit program v plné rychlosti, protože v této rychlosti se bude plán měření používat v sériovém měření. Program proběhl v pořádku a jeho odladění bylo tak úspěšně dokončeno.

Dodržením kroků z části 8.3.1 se mi podařilo časový průběh zkrátit na 6 minut 30 vteřin. Původní časový průběh neodladěného program přitom činil 9 minut. To je zásadní časový rozdíl pro plán měření, který se má používat pro měření sériové výroby.

8.4 Validace měřicí metody

Tento krok je prakticky jedním z nejdůležitějších, které se musí provést při tvorbě měřicí úlohy. Součástí pro naši vzorovou úlohu postupuje na další kroky obrábění, až z ní vznikne finální výrobek. Znamená to, že se musí porovnání výsledků provést se zákazníkem, který odebírá finální produkt. Podle interních předpisů je považováno za shodu, když jsou rozdíly mezi měřeními (naše měření vs. zákaznické měření) a také intervalem spolehlivosti naší měřicí metody do 10% z předepsaných tolerancí dle výkresové dokumentace.

8.4.1 Analýza měřicího systému

Analýza měřicího systému neboli MSA (z anglického „Measurement System Analysis“) je první částí validace měřicí metody. Spočívá v opakovaných měřeních validovaných součástí. Počty těchto opakovaných měření určují interní předpisy firem nebo požadavky určené přímo zákazníkem. Naměřená data jsou zpracovávána ve speciálních statistických softwarech. MSA se skládá ze dvou základních kroků:

- **Metoda TYPE 1** – Spočívá v opakovaném měření jednoho kusu součásti, aby se zjistilo, jestli je měřicí stroj schopen opakovaně naměřit stejné výsledky vzhledem k toleranci z výkresu. Zákaznické požadavky, pro naši

součást, byly stanoveny na 50 měření téhož kusu. Kus musí být před každým následujícím měřením vyjmut a znovu upnut do upínacího přípravku. Výsledkem této metody jsou indexy C_g a C_{gk} , které jsou vidět na vzorovém protokolu na obrázku 8.10 v příloze 8, který byl převzat a upraven z [21].

- **Metoda R&R** – Neboli metoda opakovatelnosti a reprodukovatelnosti (z anglického „Repeatability and Reproducibility“) zkoumá, jaký vliv na měření součásti má obsluha a metoda upnutí dílu. Dle zákaznických požadavků bylo nutné vzít 10 ks dílů, 3 operátory a měření provést každým operátorem dvakrát, celkem tedy 60 měření. Výsledkem je celkový rozptyl mezi všemi operátory v % vzhledem k toleranci, jak je vidět na vzorovém protokolu na obrázku 8.11 v příloze 9 [21].

MSA prokazuje pouze stálost naměřených výsledků, nevypovídá ovšem o skutečnosti naměřených hodnot. Proto bylo ještě nutné provést výpočty chyb měření a následně porovnat naše výsledky s hodnotami, které naměřil zákazník.

8.4.2 Zpracování výsledků měření

Pro validaci měření je jako minimální počet požadováno 5 kusů, aby mohly být výsledky považovány za průkazné. Pro názornost a přehlednost uvedu pouze zpracování výsledků měření pro jeden válec po obrábění OP1. Měření jednoho kusu jsem provedl desetkrát.

Výsledky měření jsem nejprve zpracoval do přehledných tabulek 8.1 a 8.2 (všechny hodnoty jsou uvedeny v mm). Data byla zpracována v programu MS Excel.

Ozn.	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7-1	C7-2	C7-3
JH	0,0000	6,8000	0,0000	15,1500	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
HTH	0,0400	6,8700	0,0300	15,1500	0,0600	0,0400	0,0400	0,0400	0,0400
DTH	0,0000	6,8000	0,0000	15,1230	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
měř. 1	0,0757	6,8428	0,0078	15,1395	0,0649	0,0134	0,0045	0,0060	0,0047
měř. 2	0,0755	6,8429	0,0077	15,1394	0,0641	0,0134	0,0047	0,0059	0,0047
měř. 3	0,0753	6,8428	0,0078	15,1394	0,0640	0,0135	0,0045	0,0059	0,0047
měř. 4	0,0751	6,8429	0,0077	15,1393	0,0639	0,0133	0,0044	0,0060	0,0047
měř. 5	0,0748	6,8430	0,0078	15,1393	0,0634	0,0132	0,0045	0,0061	0,0048
měř. 6	0,0746	6,8430	0,0079	15,1393	0,0644	0,0134	0,0045	0,0060	0,0049
měř. 7	0,0748	6,8429	0,0077	15,1393	0,0649	0,0135	0,0045	0,0060	0,0048
měř. 8	0,0746	6,8430	0,0078	15,1393	0,0633	0,0132	0,0045	0,0060	0,0048
měř. 9	0,0740	6,8430	0,0078	15,1392	0,0638	0,0135	0,0042	0,0060	0,0049
měř. 10	0,0748	6,8430	0,0077	15,1392	0,0637	0,0135	0,0044	0,0061	0,0050
průměr X_0	0,0749	6,8429	0,0078	15,1393	0,0641	0,0134	0,0045	0,0060	0,0048

Tabulka 8.1 – Výsledky deseti opakovaných měření válce OP1 – část 1

Ozn.	C7-4	C8	C9	C10a	C10b	roz. 4,39	roz. 18,8	roz. 20,8
JH	0,0000	71,8000	0,0000	0,0000	0,0000	4,3900	18,8000	20,8000
HTH	0,0400	71,8000	0,0300	0,0400	0,0400	4,3900	18,8500	20,8000
DTH	0,0000	71,7000	0,0000	0,0000	0,0000	4,1900	18,7500	20,7400
měř. 1	0,0043	71,7638	0,0087	0,0150	0,0066	4,3051	18,7917	20,7718
měř. 2	0,0042	71,7635	0,0086	0,0151	0,0065	4,3051	18,7917	20,7718
měř. 3	0,0043	71,7636	0,0084	0,0154	0,0067	4,3050	18,7917	20,7719
měř. 4	0,0042	71,7636	0,0086	0,0150	0,0067	4,3051	18,7915	20,7718
měř. 5	0,0043	71,7634	0,0084	0,0149	0,0066	4,3051	18,7915	20,7718
měř. 6	0,0044	71,7634	0,0084	0,0152	0,0066	4,3052	18,7914	20,7718
měř. 7	0,0043	71,7634	0,0084	0,0154	0,0066	4,3052	18,7914	20,7718
měř. 8	0,0045	71,7633	0,0084	0,0149	0,0066	4,3053	18,7913	20,7718
měř. 9	0,0043	71,7634	0,0083	0,0155	0,0067	4,3053	18,7914	20,7718
měř. 10	0,0043	71,7633	0,0083	0,0154	0,0067	4,3056	18,7913	20,7718
průměr X₀	0,0043	71,7635	0,0084	0,0152	0,0066	4,3052	18,7915	20,7718

Tabulka 8.2 – Výsledky deseti opakovaných měření válce OP1 – část 2

8.4.3 Výpočet směrodatných odchylek

Podle vztahu (1) jsem provedl výpočet výběrových směrodatných odchylek aritmetického průměru (viz tabulky 8.3 a 8.4) ze součtu kvadrátů chyb jednotlivých hodnot, kde $n=10$ (počet provedených měření) a $\Delta^2 X_i$ jsou kvadráty chyb jednotlivých měření.

$$s_{(x)} = \sqrt{\frac{\sum \Delta^2 X_i}{n(n-1)}} \quad (1)$$

Ozn.	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7-1	C7-2	C7-3
$\Delta^2 X_{01}, \text{mm}^2$	$5,7 \cdot 10^{-7}$	$8,1 \cdot 10^{-9}$	$2,7 \cdot 10^{-10}$	$3,0 \cdot 10^{-8}$	$6,6 \cdot 10^{-7}$	$4,1 \cdot 10^{-11}$	$2,3 \cdot 10^{-10}$	$3,2 \cdot 10^{-9}$	$8,5 \cdot 10^{-9}$
$\Delta^2 X_{02}, \text{mm}^2$	$3,3 \cdot 10^{-7}$	$4,7 \cdot 10^{-9}$	$1,6 \cdot 10^{-9}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$2,7 \cdot 10^{-13}$	$1,2 \cdot 10^{-9}$	$5,1 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$8,9 \cdot 10^{-9}$
$\Delta^2 X_{03}, \text{mm}^2$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$5,6 \cdot 10^{-9}$	$2,1 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$	$1,1 \cdot 10^{-9}$	$1,1 \cdot 10^{-8}$	$3,4 \cdot 10^{-11}$	$5,5 \cdot 10^{-9}$	$2,5 \cdot 10^{-9}$
$\Delta^2 X_{04}, \text{mm}^2$	$3,5 \cdot 10^{-8}$	$4,3 \cdot 10^{-11}$	$4,1 \cdot 10^{-9}$	$3,7 \cdot 10^{-10}$	$2,1 \cdot 10^{-8}$	$4,5 \cdot 10^{-9}$	$4,6 \cdot 10^{-9}$	$2,7 \cdot 10^{-11}$	$9,7 \cdot 10^{-9}$
$\Delta^2 X_{05}, \text{mm}^2$	$2,0 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-9}$	$2,6 \cdot 10^{-10}$	$1,6 \cdot 10^{-10}$	$3,7 \cdot 10^{-7}$	$2,3 \cdot 10^{-8}$	$1,3 \cdot 10^{-11}$	$1,8 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-10}$
$\Delta^2 X_{06}, \text{mm}^2$	$8,5 \cdot 10^{-8}$	$2,3 \cdot 10^{-9}$	$1,9 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^{-9}$	$2,9 \cdot 10^{-10}$	$2,2 \cdot 10^{-9}$	$6,6 \cdot 10^{-9}$
$\Delta^2 X_{07}, \text{mm}^2$	$1,8 \cdot 10^{-8}$	$6,6 \cdot 10^{-12}$	$3,9 \cdot 10^{-9}$	$2,9 \cdot 10^{-9}$	$7,4 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-9}$	$3,1 \cdot 10^{-10}$	$9,3 \cdot 10^{-11}$
$\Delta^2 X_{08}, \text{mm}^2$	$9,3 \cdot 10^{-8}$	$5,2 \cdot 10^{-9}$	$4,2 \cdot 10^{-10}$	$4,6 \cdot 10^{-9}$	$5,1 \cdot 10^{-7}$	$2,8 \cdot 10^{-8}$	$3,4 \cdot 10^{-9}$	$6,2 \cdot 10^{-13}$	$9,3 \cdot 10^{-11}$
$\Delta^2 X_{09}, \text{mm}^2$	$8,0 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-9}$	$6,3 \cdot 10^{-11}$	$5,7 \cdot 10^{-9}$	$5,1 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$6,6 \cdot 10^{-8}$	$3,4 \cdot 10^{-11}$	$5,5 \cdot 10^{-9}$
$\Delta^2 X_{10}, \text{mm}^2$	$2,0 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-9}$	$9,6 \cdot 10^{-10}$	$9,2 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^{-9}$	$1,9 \cdot 10^{-8}$	$2,9 \cdot 10^{-8}$
$\Sigma \Delta^2 X_i, \text{mm}^2$	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-8}$	$3,3 \cdot 10^{-8}$	$6,8 \cdot 10^{-8}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$6,3 \cdot 10^{-8}$	$7,1 \cdot 10^{-8}$
$s(x), \text{mm}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$	$3,8 \cdot 10^{-5}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$

Tabulka 8.3 – Výběrové směrodatné odchylky – část 1

Ozn.	C7-4	C8	C9	C10a	C10b	roz. 4,39	roz. 18,8	roz. 20,8
$\Delta^2 X_{01}, \text{mm}^2$	$1,9 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$6,5 \cdot 10^{-8}$	$5,1 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-9}$	$6,3 \cdot 10^{-9}$	$3,9 \cdot 10^{-8}$	$8,3 \cdot 10^{-10}$
$\Delta^2 X_{02}, \text{mm}^2$	$9,7 \cdot 10^{-9}$	$5,7 \cdot 10^{-9}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$5,8 \cdot 10^{-9}$	$2,1 \cdot 10^{-8}$	$5,8 \cdot 10^{-9}$	$2,8 \cdot 10^{-8}$	$1,8 \cdot 10^{-10}$
$\Delta^2 X_{03}, \text{mm}^2$	$7,4 \cdot 10^{-11}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$4,9 \cdot 10^{-9}$	$4,8 \cdot 10^{-8}$	$1,7 \cdot 10^{-9}$	$4,2 \cdot 10^{-8}$	$3,3 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$
$\Delta^2 X_{04}, \text{mm}^2$	$7,4 \cdot 10^{-9}$	$9,7 \cdot 10^{-9}$	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$4,2 \cdot 10^{-8}$	$1,3 \cdot 10^{-9}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$2,0 \cdot 10^{-9}$	$4,3 \cdot 10^{-10}$
$\Delta^2 X_{05}, \text{mm}^2$	$1,6 \cdot 10^{-10}$	$7,4 \cdot 10^{-9}$	$1,3 \cdot 10^{-9}$	$6,5 \cdot 10^{-8}$	$1,7 \cdot 10^{-9}$	$9,1 \cdot 10^{-9}$	$3,0 \cdot 10^{-9}$	$6,7 \cdot 10^{-11}$
$\Delta^2 X_{06}, \text{mm}^2$	$2,6 \cdot 10^{-9}$	$6,4 \cdot 10^{-9}$	$5,3 \cdot 10^{-11}$	$1,1 \cdot 10^{-10}$	$1,5 \cdot 10^{-10}$	$2,1 \cdot 10^{-11}$	$6,5 \cdot 10^{-9}$	$1,4 \cdot 10^{-9}$
$\Delta^2 X_{07}, \text{mm}^2$	$3,5 \cdot 10^{-10}$	$6,6 \cdot 10^{-9}$	$4,5 \cdot 10^{-9}$	$6,9 \cdot 10^{-8}$	$7,1 \cdot 10^{-11}$	$3,4 \cdot 10^{-09}$	$3,3 \cdot 10^{-9}$	$5,0 \cdot 10^{-10}$
$\Delta^2 X_{08}, \text{mm}^2$	$1,9 \cdot 10^{-8}$	$2,2 \cdot 10^{-8}$	$7,6 \cdot 10^{-9}$	$9,4 \cdot 10^{-8}$	$1,3 \cdot 10^{-9}$	$1,1 \cdot 10^{-8}$	$3,6 \cdot 10^{-8}$	$1,7 \cdot 10^{-9}$
$\Delta^2 X_{09}, \text{mm}^2$	$3,6 \cdot 10^{-12}$	$7,5 \cdot 10^{-9}$	$9,6 \cdot 10^{-9}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$7,5 \cdot 10^{-9}$	$9,5 \cdot 10^{-10}$
$\Delta^2 X_{10}, \text{mm}^2$	$1,4 \cdot 10^{-11}$	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$1,8 \cdot 10^{-8}$	$6,5 \cdot 10^{-8}$	$4,9 \cdot 10^{-9}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$	$5,5 \cdot 10^{-8}$	$9,7 \cdot 10^{-11}$
$\Sigma \Delta^2 X_i, \text{mm}^2$	$4,2 \cdot 10^{-8}$	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$5,6 \cdot 10^{-7}$	$4,5 \cdot 10^{-8}$	$2,6 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$1,8 \cdot 10^{-8}$
$s(x), \text{mm}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$7,9 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$5,4 \cdot 10^{-5}$	$4,9 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$

Tabulka 8.4 – Výběrové směrodatné odchylky – část 2

8.4.4 Intervaly spolehlivosti

Z výběrových směrodatných odchylek jsem dále provedl výpočet intervalů spolehlivosti $\Delta_{(x)}$ – viz tabulky 8.5 a 8.6. Interval spolehlivosti je interval okolo

průměrných naměřených hodnot, ve kterém se surčitou pravděpodobností nachází skutečná hodnota měřené veličiny(viz vztah (2):

$$\langle X_0 - \Delta_{(X)}, X_0 + \Delta_{(X)} \rangle \quad (2)$$

Pro naši vzorovou úlohu byla požadována pravděpodobnost $P = 95\%$. Této hodnotě a počtu provedených měření odpovídá tzv. Studentův součinitel $t = 2,26$. Studentův součinitel modifikuje šířku intervalu spolehlivosti v závislosti na hladině pravděpodobnosti P , kterou zvolíme a počtu provedených měření n . Používá se proto, že v praxi se může provádět nekonečně mnoho měření a většinou také nestačí hladina pravděpodobnosti $P = 68,3\%$, která odpovídá vypočtené výběrové směrodatné odchylce [22, s. 16-19]. V tabulkách 8.5 a 8.6 jsou v posledních řádcích vidět procentuální poměry mezi intervaly spolehlivosti $\Delta_{(X)}$ a celkovými tolerančními pásmy T každé charakteristiky. Z tabulek je vidět, že každá charakteristika vyhovuje požadované desetiprocentní hranici.

Ozn.	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7-1	C7-2	C7-3
X_0 , mm	0,0749	6,8429	0,0078	15,1393	0,0641	0,0134	0,0045	0,0060	0,0048
T , mm	0,0400	0,0700	0,0300	0,0270	0,0600	0,0400	0,0400	0,0400	0,0400
$\Delta_{(X)}$, mm	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$
$\Delta_{(X)}/T$, %	0,8683	0,0589	0,1440	0,2299	0,6396	0,2001	0,2137	0,1498	0,1585

Tabulka 8.5 – Intervaly spolehlivosti a jejich poměr k tolerančním pásmům – část 1

Ozn.	C7-4	C8	C9	C10a	C10b	roz. 4,39	roz. 18,8	roz. 20,8
X_0 , mm	0,0043	71,7635	0,0084	0,0152	0,0066	4,3052	18,7915	20,7718
T , mm	0,0400	0,1000	0,0300	0,0400	0,0400	0,2000	0,1000	0,0600
$\Delta_{(X)}$, mm	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$
$\Delta_{(X)}/T$, %	0,1215	0,1051	0,2989	0,4445	0,1263	0,0611	0,1100	0,0531

Tabulka 8.6 – Intervaly spolehlivosti a jejich poměr k tolerančním pásmům – část 2

8.4.5 Porovnání výsledků a kalkulace provozních úspor

Jelikož se naše metoda jeví, podle zjištěných intervalů spolehlivosti a jejich poměrů k tolerancím, jako přesná a spolehlivá, mohl jsem konečně přistoupit k samotnému porovnání výsledků naměřených u zákazníka. Jednalo se o poslední krok validace a postačily k němu průměrné naměřené hodnoty. Z tabulek 8.7 a 8.8 je vidět, že procentuální poměr opět nikde nepřekročil desetiprocentní hranici, což je důkazem úspěšného konce validace.

Ozn.	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7-1	C7-2	C7-3
X _{0BC} , mm	0,0749	6,8429	0,0078	15,1393	0,0641	0,0134	0,0045	0,0060	0,0048
X _{0DO} , mm	0,0734	6,8437	0,0085	15,1375	0,0631	0,0148	0,0031	0,0074	0,0055
T, mm	0,0400	0,0700	0,0300	0,0270	0,0600	0,0400	0,0400	0,0400	0,0400
Δ _(0BC-0DO) , mm	0,0015	0,0008	0,0007	0,0018	0,0010	0,0014	0,0014	0,0014	0,0007
Δ _(0BC-0DO) /T, %	3,8502	1,1151	2,4096	6,7494	1,5976	3,4995	3,4355	3,4680	1,7629

Tabulka 8.7 – Rozdíly průměrných hodnot a jejich poměry k tolerančním pásmům
– část 1

Ozn.	C7-4	C8	C9	C10a	C10b	roz. 4,39	roz. 18,8	roz. 20,8
X _{0BC} , mm	0,0043	71,7635	0,0084	0,0152	0,0066	4,3052	18,7915	20,7718
X _{0DO} , mm	0,0032	71,7648	0,0093	0,0138	0,0079	4,3089	18,7893	20,7737
T, mm	0,0400	0,1000	0,0300	0,0400	0,0400	0,2000	0,1000	0,0600
Δ _(0BC-0DO) , mm	0,0011	0,0013	0,0009	0,0014	0,0013	0,0037	0,0022	0,0019
Δ _(0BC-0DO) /T, %	2,8040	1,3293	2,8554	3,4535	3,2147	1,8440	2,1887	3,1430

Tabulka 8.8 – Rozdíly průměrných hodnot a jejich poměry k tolerančním pásmům
– část 2

Pro zajímavost v této části ještě uvedu výpočet kalkulace na provozní úspory samotného měřicího stroje, které plynou z dodržení kroků pospaných v části 8.3.1. Jak jsem uvedl v části 8.3.2, podařilo se mi odladěním programu zkrátit dobu průběhu programu o 2 minuty a 30 vteřin. Vzhledem k tomu, že se v sériové výrobě vyrobí 40 000 kusů za týden, každý 276. kus se musí měřit a hodinové provozní náklady stroje jsou průměrně 1300 Kč, tak by přibližná roční úspora činila téměř 400 000 Kč.

8.5 Zavedení plánu měření do sériového používání

Po úspěšném dokončení validace měřicí metody zbývá poslední krok, a tím je zavedení plánu měření do sériového používání. K této činnosti je nutné vytvořit dokumentaci, která přesně definuje všechny potřebné části a postupy pro užívání měřicí úlohy. V praxi automobilového průmyslu se tato dokumentace nazývá pracovní návodka. Vzorová pracovní návodka, kterou je navrhl, je vidět na obrázku 8.12 v příloze 10. Takováto pracovní návodka slouží obsluze stroje, která v ní nalezne jaký program použít, potřebné konfigurace snímačů, fotku s upnutím dílu na stroji, cesty pro uložení výsledků měření a cesty pro nalezení dalších potřebných dokumentů k plánu měření (MSA, validace, apod.).

Na základě pracovní návodky, která může být uložena v elektronické podobě nebo vytisknutá přímo na pracovišti, provede úplně nakonec technik měření proškolení obsluhy a tím je vše připraveno pro zavedení do sériového používání.

Závěr

Tato práce se zabývala měřením délkových rozměrů v automobilovém průmyslu s využitím nejmodernější souřadnicové měřicí techniky. Souřadnicová měřicí technika je nedílnou součástí dnešního světa automobilového průmyslu, která slouží k efektivnímu zvyšování kvality vyráběných produktů.

V teoretické části jsem se nejprve krátce zabýval historií automobilového průmyslu a historií metru. Poté jsem se věnoval problematice souřadnicové měřicí techniky, hlavně konstrukcím souřadnicové měřicí techniky, principu a možnostem měření, funkcím měřicího softwaru. Tato problematika úzce souvisí s cílem práce, kterým bylo vytvořit a zpracovat automatickou úlohu měření a ukázat tím přínos v oblasti automobilového průmyslu.

V praktické části jsem popsal kompletní postup pro vytvoření a zavedení automatické měřicí úlohy do sériového používání, včetně validace měřicí metody a statistického zpracování výsledků měření. Důkladnou přípravou, promyšlením strategie měření a splněním všech požadovaných kroků jsem dospěl k velice přesným a stabilním výsledkům měření. To dokázaly intervaly spolehlivosti pro jednotlivé charakteristiky, kde procentuální poměr vzhledem tolerančním pásmům v řádech i desítek mikrometrů, vyšel u všech charakteristik menší než 1%.

Ve finálním porovnání výsledků měření s výsledky zákazníka jsem dospěl na první pokus k požadovaným rozdílům do 10% tolerančních pásem měřených charakteristik. Nejvyšší hodnota činila 6,75% u charakteristiky C4, která má ovšem nejmenší toleranční pásmo (27 mikrometrů), takže to byl pro mě očekávaný výsledek. Příčinou takto dobrých výsledků na první pokus, bylo předběžné vytvoření a schválení měřicí strategie přímo se zákazníkem. Dalším důležitým aspektem bylo, že zákazník používá souřadnicový měřicí stroj od stejného výrobce. V praxi k takto dobrým výsledkům na první pokus většinou nedochází, protože ne všichni výrobci či zákazníci používají souřadnicové měřicí stroje od stejného výrobce. Často tak dochází k několika opakovaným pokusům provedení validace bez tíženého výsledku. V tomto případě může rozhodovat až naměření a posouzení výsledků měření externí akreditovanou laboratoří.

Předběžnou kalkulací pro provozní úspory jsem ukázal, jak důležitá je příprava, důkladné promyšlení a volba strategie měření. Roční úspora téměř 400 000 Kč je, z ekonomického hlediska, velmi významné číslo. Vezmeme-li v úvahu, že se ve velkých firmách takovýchto plánů měření používají stovky, tak se dostaneme na roční úspory v řádech desítek milionů korun.

Výhodami souřadnicové měřicí techniky jsou hlavně přesná a rychlá měření bez vlivu obsluhy, rychlá měření složitých součástí, možnosti kombinací dotykových a optických snímačů a mnoho dalších.

Nevýhodami jsou hlavně vysoké pořizovací náklady, v případě stroje Zeiss Prismo Navigator 7 je jedná o cca 300 000 Euro. Dále vysoké náklady na údržbu a kalibrace (v řádech desítek tisíc korun) a vysoké nároky na technické znalosti specialistů, kteří vytvářejí automatické měřicí úlohy. Samotná obsluha souřadnicových měřicích strojů musí mít také větší odborné znalosti.

Z mého pohledu poskytuje obor Fyzikálně-technická měření a výpočetní technika velice kvalitní základ pro úspěšné proniknutí do problematiky souřadnicové měřicí techniky a měření s jejím využitím. To dává absolventům tohoto oboru možnost nastartovat svoji pracovní kariéru v některé z akreditovaných či firemních měrových laboratoří.

Seznam použité literatury

- [1] KUBA, A., *Automobil v srdci Evropy*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1986. ISBN neuvedeno.
- [2] PAVLÍNEK, P., *A Successful Transformation?: Restructuring of the Czech Automobile Industry*. Heidelberg: Physica, 2008. ISBN 978-3-7908-2039-3.
- [3] ŠKODA AUTO, *Škoda Auto: Historie* [online]. [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://museum.skoda-auto.cz/Documents/cs/sk-SKODA-AUTO-History.pdf>.
- [4] SDRUŽENÍ AUTOMOBILOVÉHO PRŮMYSLU. *Trochu z historie*. AutoSAP.cz [online]. ©2013 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.autosap.cz/trochu-z-historie>.
- [5] KOCIÁN, M., PROKOP, I. a J., SKÁKALA, *100 let metrické konvence*. 1. vyd. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1975. ISBN neuvedeno.
- [6] ČESKÝ METROLOGICKÝ INSTITUT. *Metrická konvence*. CMI.cz [online]. [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: <https://www.cmi.cz/metricka%20konvence>.
- [7] WIKIPEDIE OTEVŘENÁ ENCYKLOPEDIE, *Metr*. cs.wikipedia.org [online]. Poslední modifikace 23.2.2015 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Metr>.
- [8] ČSN ISO/TS 16949. *Systémy managementu jakosti - Zvláštní požadavky na používání ISO 9001:2000 v organizacích zajišťujících sériovou výrobu a výrobu náhradních dílů v automobilovém průmyslu*. Praha: Český normalizační institut, 2002.
- [9] ČSN ISO/IEC 17025. *Posuzování shody – Všeobecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [10] ČSN ISO 10012. *Systémy managementu měření – Požadavky na procesy měření a měřicí vybavení*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [11] SOUKUP, J. a J. SKOČILAS, *Technická měření*. Ústí nad Labem: Univerzita Jana Evangelisty Purkyně, 2014. ISBN 978-80-7414-730-2.
- [12] ČESKÝ METROLOGICKÝ INSTITUT, *Metrologie v kostce*. 3. vyd. Praha: ÚNMZ, 2009. ISBN neuvedeno. Dostupné z: https://www.cmi.cz/sites/all/files/public/download/2400-ID-C_ZVEŘEJNĚNO.pdf.
- [13] TECHNICKÁ UNIVERZITA LIBEREC. *Souřadnicové měřicí stroje*. Kvs.tul.cz [online]. Poslední modifikace 19.10.2011 [cit. 2015-04-25]. Dostupné z: http://www.kvs.tul.cz/download/rapid_prototyping/rp1_skripta.pdf.

- [14] ZEISS ČR, *Průmyslová měřicí technika* [online]. [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: http://www.zeiss.cz/industrial-metrology/cs_cz/home.html.
- [15] SMOLA, L. *Měření délkových rozměrů v automobilovém průmyslu. Souřadnicová měřicí technika*. Hradec Králové, 2009. Bakalářská práce. Pedagogická fakulta Univerzity Hradec Králové, Katedra fyziky a informatiky.
- [16] CARL ZEISS. *Prismo Navigator: Návod k obsluze*. Stav revize 2.0. Oberkochen, 2006, Obj. č.: 61211-1120212.
- [17] ČSN EN ISO 10360. *Geometrické požadavky na výrobky (GPV) – Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (SMS) – Části 1, 2, 3, 4, 5, 6*. Český normalizační institut, 2000–2010.
- [18] CARL ZEISS. *CALYPSO – Návod k obsluze*. Stav revize 5.4. Oberkochen, 2012, Obj. č.: 61212-2010912.
- [19] ISO 1101. *Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing - Tolerances of form, orientation, location and run-out*. Switzerland, 2012.
- [20] ČESKO. CARL ZEISS. *Měřicí software Calypso – revize 5.4, 2012* [CD]. Praha: Carl Zeiss, 2012.
- [21] ČESKO. Q-DAS. *Statistický software qs-Stat, 2014* [CD]. Beroun: Q-DAS, 2014.
- [22] VYBÍRAL, B. *Zpracování dat fyzikálních měření*. Knihovnička fyzikální olympiády č. 52. Hradec Králové: MAFY, 2002. ISBN 80-86148-54-8.

Seznam příloh

Příloha 1 – Výkresová dokumentace

Příloha 2 – Prostředí SW Calypso s CAD modelem

Příloha 3 – Výkresová dokumentace pro upínací přípravek

Příloha 4 – Dokumentace konfigurace snímače H1

Příloha 5 – Vzorový prezentační protokol

Příloha 6 – Grafický protokol rovinnosti

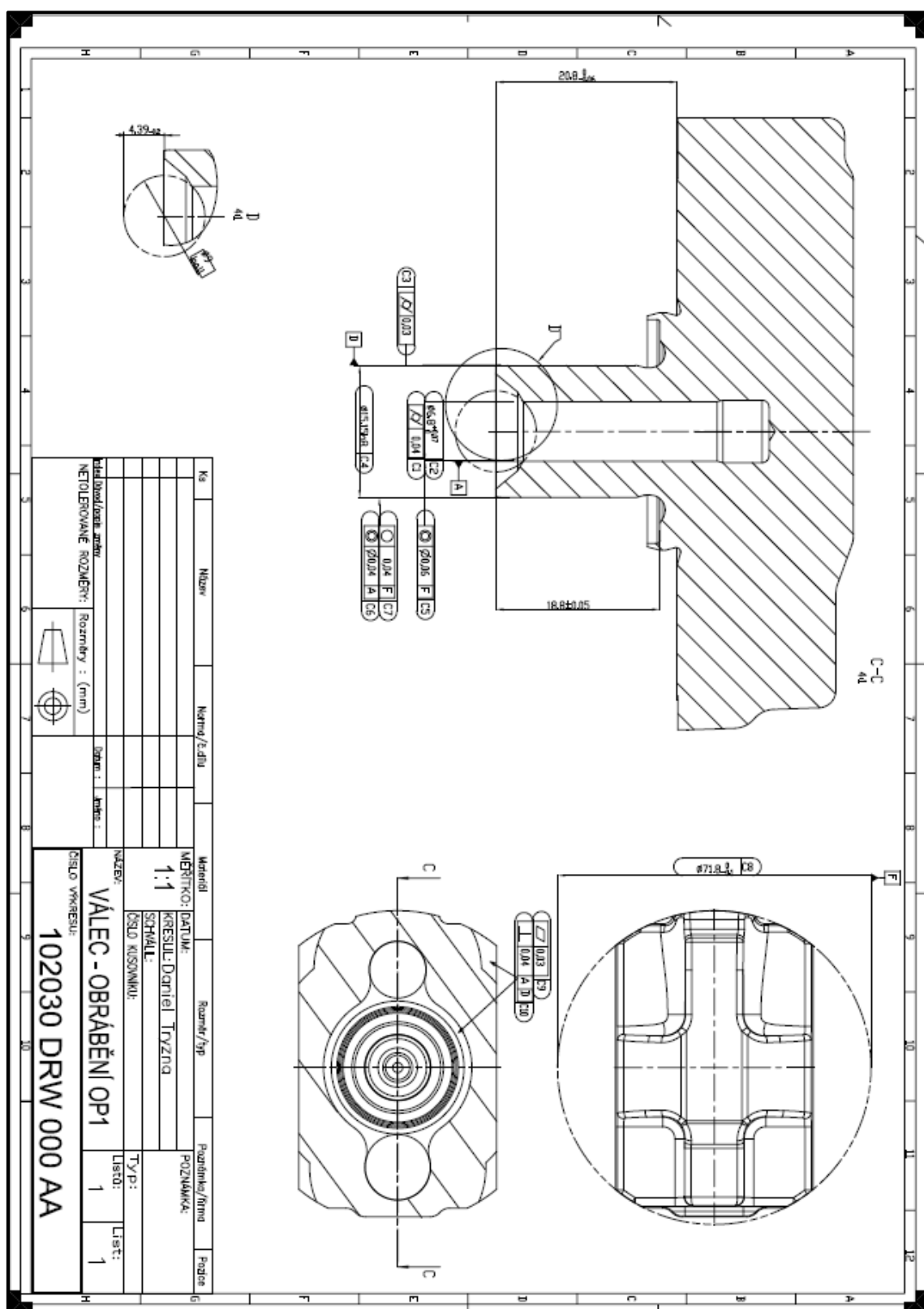
Příloha 7 – Grafický protokol kruhovitosti

Příloha 8 – Protokol vyhodnocení MSA TYPE 1

Příloha 9 – Protokol vyhodnocení MSA R&R

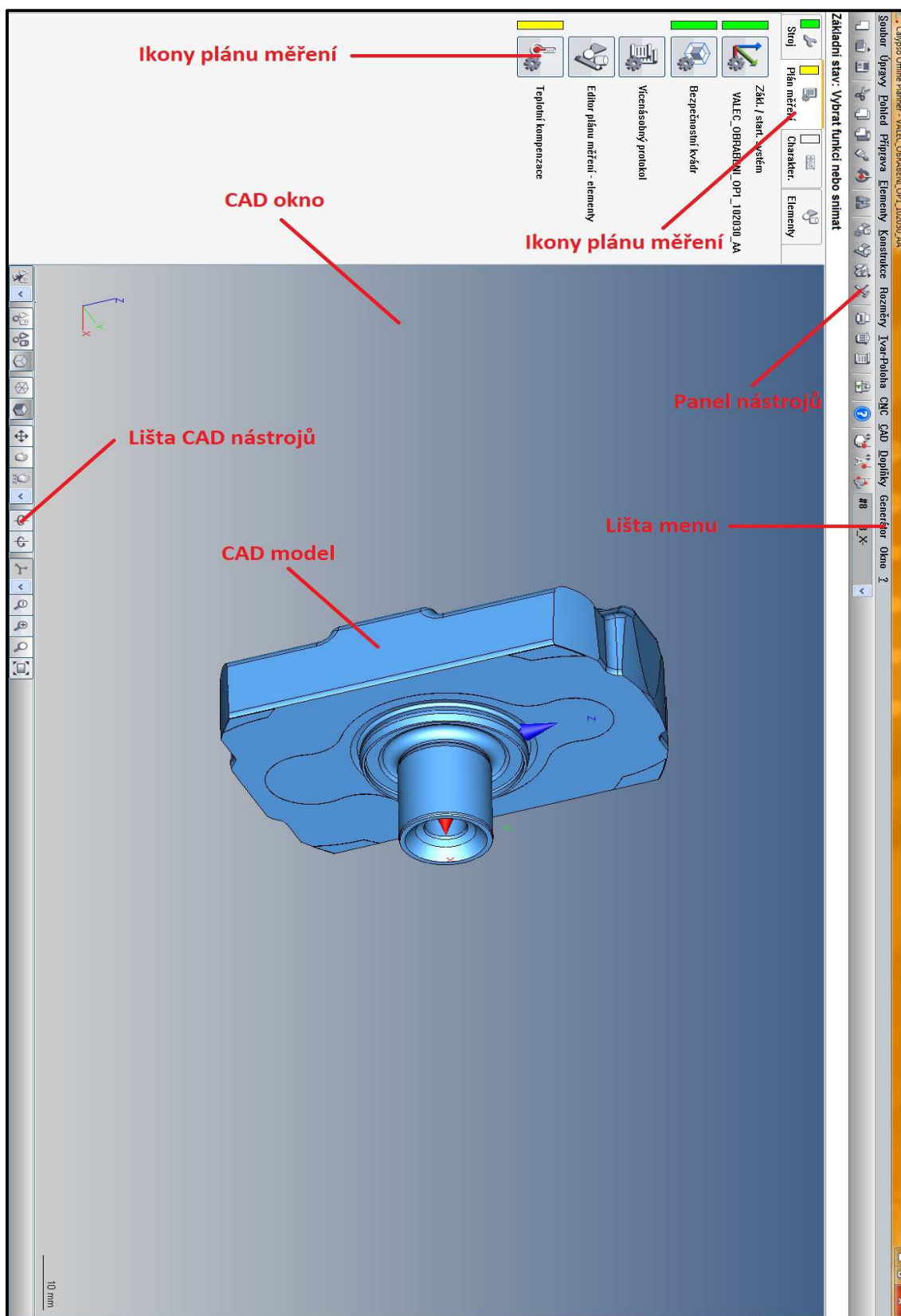
Příloha 10 – Pracovní návodka pro měřicí úlohu

Příloha 1 – Výkresová dokumentace



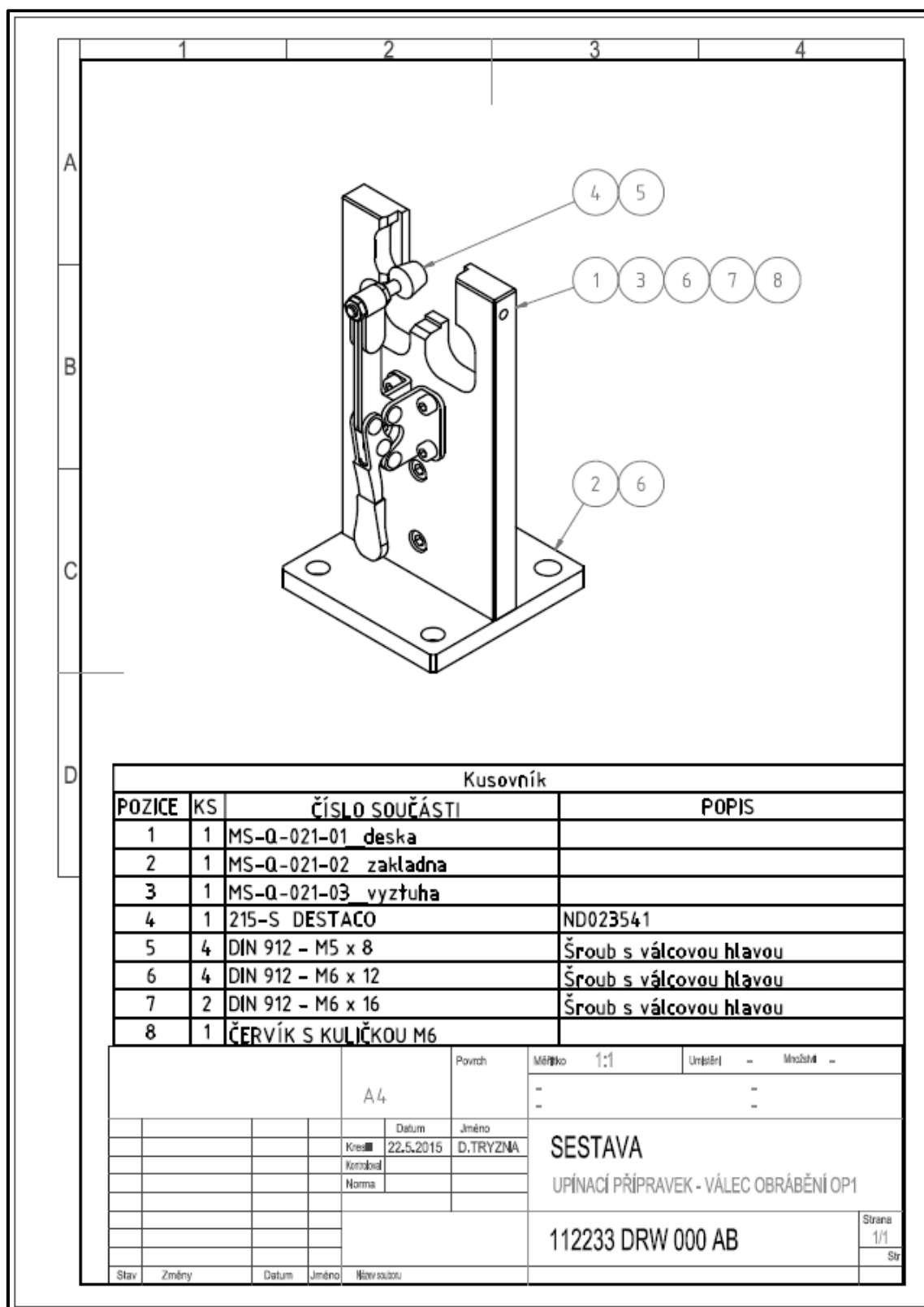
Obrázek 8.3 – Zjednodušená výkresová dokumentace pro vzorovou měřicí úlohu

Příloha 2 – Prostředí SW Calypso s CAD modelem



Obrázek 8.4 – Uživatelské prostředí měřicího softwaru Calypso s popisy jednotlivých částí

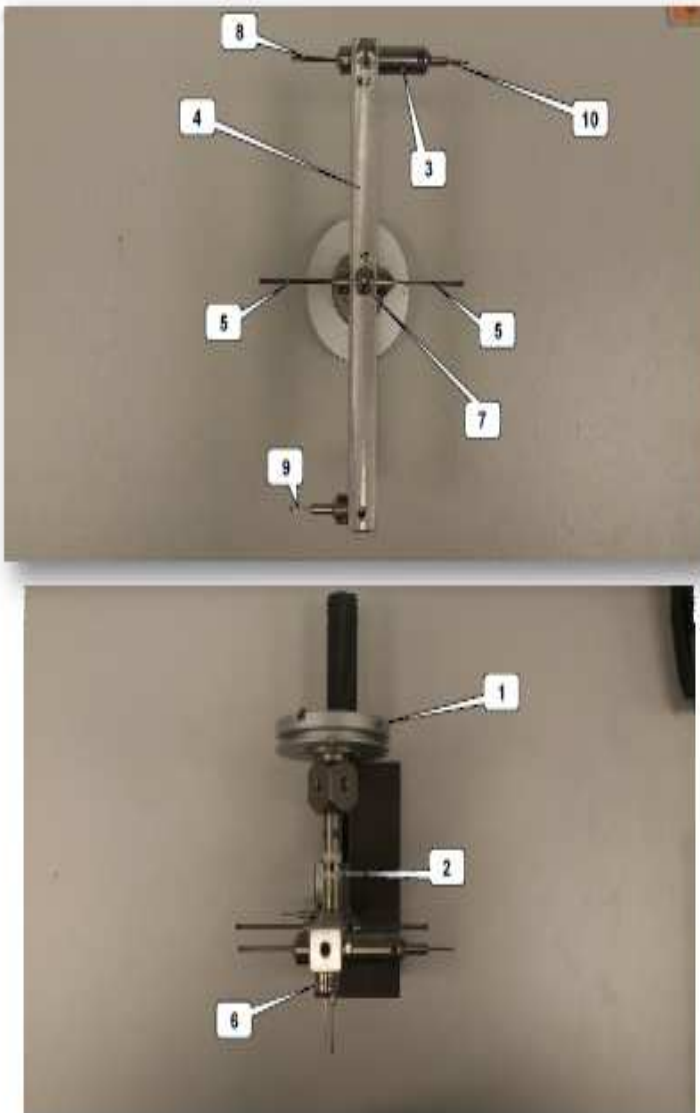
Příloha 3 – Výkresová dokumentace pro upínací přípravek



Obrázek 8.5 – Výkresová dokumentace upínacího přípravku pro vzorovou měřicí úlohu s popisy jednotlivých částí

Příloha 4 – Dokumentace konfigurace snímače H1

KONFIGURACE SNÍMAČE - H1												
Pos.	Jméno	Množství	Dod. Číslo	DK	L	DG	ML	MLE	DS	DSE	B	Váha
1	Upínací talířek	1	60067-9011-000									158
2	Prodloužení	1	626107-1040-100		40,0	11						9
3	Prodloužení	1	602030-9046-000		20,0	11						7
4	Spedáční kvádr	1										100
5	Snímač	2	602030-9011-000	3	50,0		40,0					10
6	Snímač	1	626115-0060-022	0,8	22,1		13,1	4,6	1	0,4		6
7	Snímač	1	602030-8067-000	2	44,0		19,0		1,5			5
8	Snímač	1	626115-0200-034	2	33,5		24,5		1,5			7
9	Snímač	1	602030-8064-000	1,5	32,0		12,0		1			4
10	Snímač	1	602030-8061-000	1	32,0		12,0	5,0	1	0,8		4
Celková váha (g)												310



Obrázek 8.6 – Dokumentace ke konfiguraci snímače použitého pro měření ve vzorové měřicí úloze

Příloha 5 – Vzorový prezentační protokol

MEROVÝ PROTOKOL - SMS ZEISS

Hlavička protokolu

Název planu měření
VALEC_OBRABENI_OP1_102030_AA

Název dílu
Valec - obrábění OP1

Číslo výkresu
102030 DRW 000 AA

Operator
Tryzna

Typ měření
Zakazkové měření

Označení dílu
1-1

Zakazka
Bakalarska prace

Datum
6.5.15

Zadatel/Zadavatel
Daniel Tryzna

Charakteristika	Ozn.	Mer. hod.	Nom. hod.	klad. tol.	zap. tol.	Odch.	<- ->
C1 - valcovitost 0,04 - E4	Vál	0.076	0.000	0.040		0.076	0.036
C2 - průměr 6,8±0,07 - E4	D	6.843	6.800	0.070	0.000	0.043	-
C3 - valcovitost 0,03 - E3	Vál	0.008	0.000	0.030		0.008	-
C4 - průměr 15,15h8 - E4	D	15.139	15.150	0.000	-0.027	-0.011	-
C5 - souosost 0,06 k F - E6	Sou	0.065	0.000	0.060		0.065	0.005
C6 - souosost 0,04 k A - E6	Sou	0.013	0.000	0.040		0.013	-
C7 - kruhovitost 0,04 - 1 - E5	Kruh	0.0045	0.0000	0.0400		0.0045	-
C7 - kruhovitost 0,04 - 2 - E5	Kruh	0.0060	0.0000	0.0400		0.0060	-
C7 - kruhovitost 0,04 - 3 - E5	Kruh	0.0047	0.0000	0.0400		0.0047	-
C7 - kruhovitost 0,04 - 4 - E5	Kruh	0.0043	0.0000	0.0400		0.0043	-
C8 - průměr 71,8-0,1 - B8	D	71.764	71.800	0.000	-0.100	-0.036	-
C9 - rovinnost 0,03 - D9	Rov	0.009	0.000	0.030		0.009	-
C10a - Kolmost 0,04 k A - D9	Kol	0.015	0.000	0.040		0.015	-
C10b - Kolmost 0,04 k D - D9	Kol	0.007	0.000	0.040		0.007	-
Rozměr 4,39-0,2 - H2	X	4.305	4.390	0.000	-0.200	-0.085	-
Rozměr 18,8±0,05 - D6	X	-18.792	-18.800	0.050	-0.050	-0.008	-
Rozměr 20,8-0,06 - D1	X	20.772	20.800	0.000	-0.060	-0.028	-

1
2
3
4
5
6
7
8

1 - Název měřené charakteristiky

2 - Zkratka podle SW Calypso

3 - Naměřená hodnota

4 - Jmenovitá hodnota

5 - Horní toleranční mez

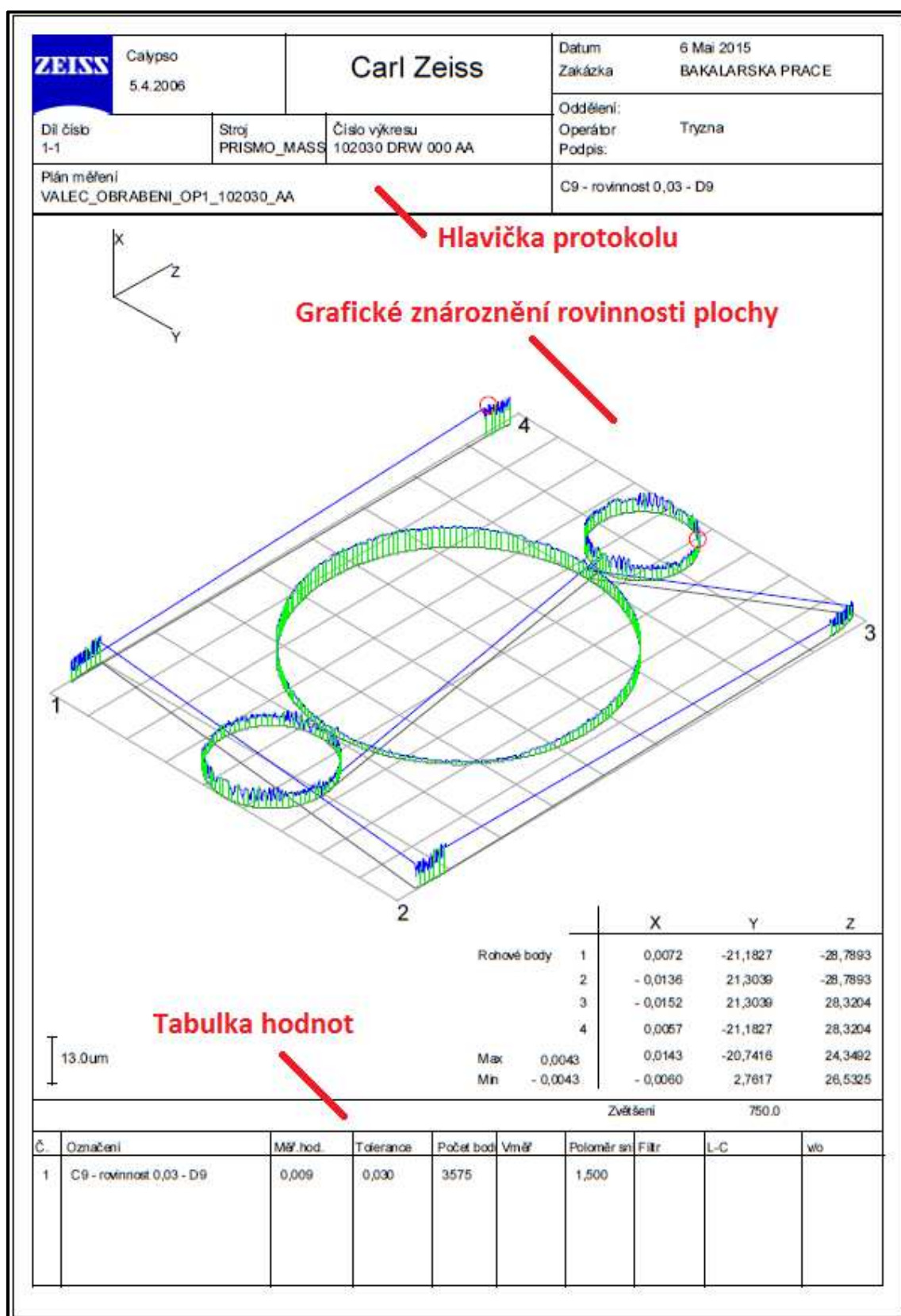
6 - Dolní toleranční mez

7 - Odchylka od jmenovité hodnoty

8 - Grafické znázornění odchylky od jmenovité hodnoty

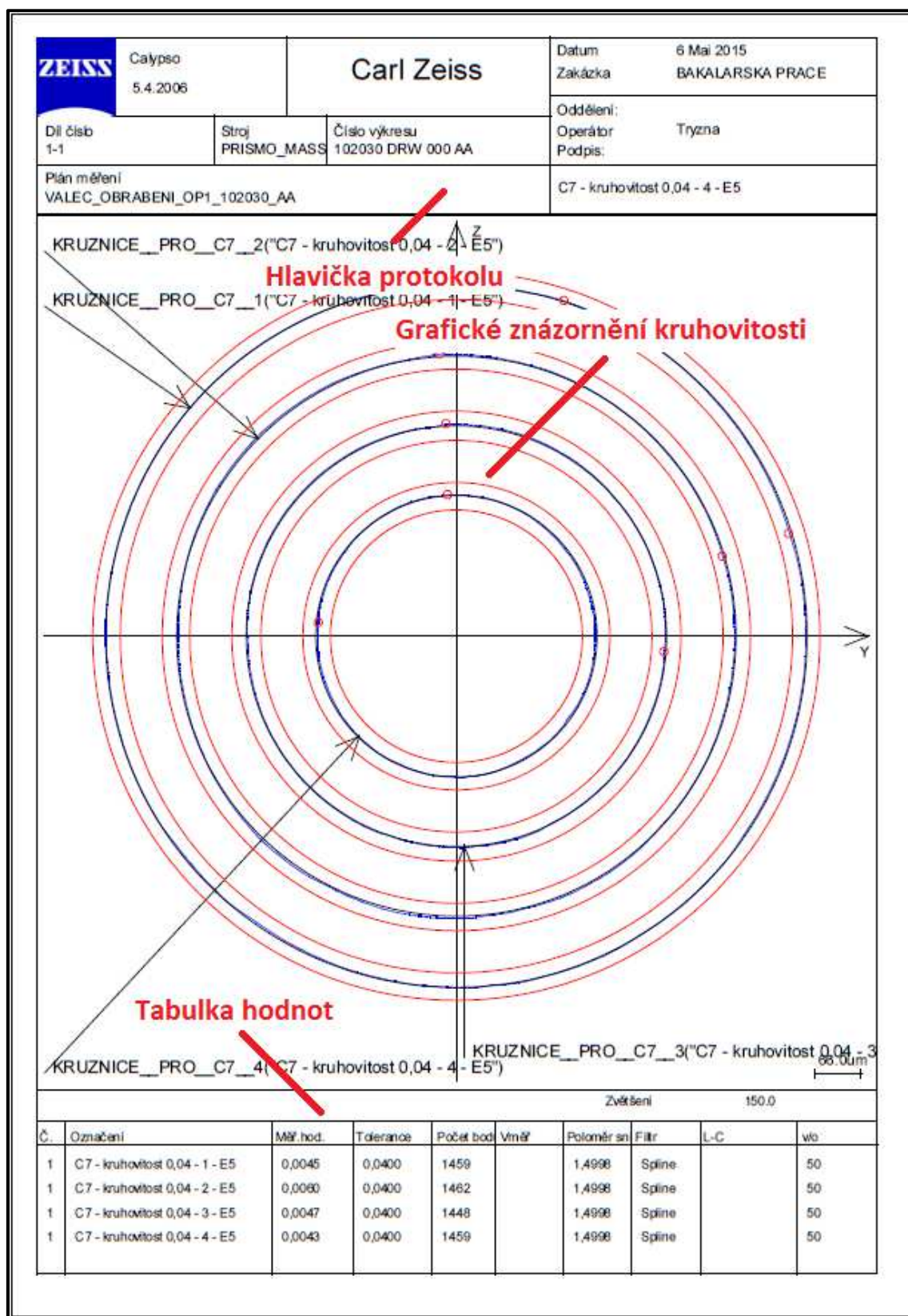
Obrázek 8.7 – Výstupní vzorový protokol s naměřenými hodnotami ze softwaru Calypso s popisem jednotlivých částí

Příloha 6 – Grafický protokol rovinnosti



Obrázek 8.8 – Výstupní vzorový protokol grafického znázornění odchylky rovinnosti

Příloha 7 – Grafický protokol kruhovitosti



Obrázek 8.9 – Výstupní vzorový protokol grafického znázornění odchylky kruhovitosti

Příloha 8 – Protokol vyhodnocení MSA TYPE 1

Analýza měřicích systémů					Strana 1 / 17	
Akt. dat. 28.5.2015		Zprac. jméno Daniel Tryzna		Odd./Nákl. střed./Vyr. NN	Zkuš. místo	Merova laborator
Zkušební prostředek		Etalon		Znak		
Zk. pr.: Ozn. SMS ZEISS PRISMO 7		Etalon ozn. Etalon		Znak ozn. C1 - valcovitost 0,04 - E4		
Zk. pr. čís. SMS 02		Etalon: čís. 1		Znak č. 1		
Zk. pr.: Rozlišení 0,0001		Etalon akt. hodn. 0,0138869		Jmen. hoc 0,0000 HTM 0,0400 $\Delta = 0,0400$		
Dův. zk. MSA - TYPE 1		Jedn. mm		Jedn. mm DTM 0,0000 $\Delta = 0,0000$		
Poznámka BAKALÁRSKÁ PRÁCE						

Hlavička protokolu

Grafické znázornění měřených hodnot

i	x _i	i	x _i	i	x _i	i	x _i	i	x _i
1	0,0139	6	0,0138	11	0,0140	16	0,0138	21	0,0140
2	0,0139	7	0,0139	12	0,0136	17	0,0138	22	0,0138
3	0,0138	8	0,0138	13	0,0138	18	0,0138	23	0,0137
4	0,0138	9	0,0137	14	0,0140	19	0,0139	24	0,0139
5	0,0140	10	0,0139	15	0,0139	20	0,0139	25	0,0138
26	0,0138	31	0,0138	36	0,0138	41	0,0139	46	0,0139
27	0,0139	32	0,0138	37	0,0138	42	0,0139	47	0,0139
28	0,0138	33	0,0139	38	0,0138	43	0,0139	48	0,0140
29	0,0138	34	0,0139	39	0,0140	44	0,0138	49	0,0139
30	0,0136	35	0,0139	40	0,0139	45	0,0139	50	0,0139

Údaje z výkresu		Naměřené hodnoty		Statistické hodnoty	
$\bar{x}_m$	= 0,013887	$\bar{x}_g$	= 0,01385	$\bar{x}_g$	= 0,013850
DTM*	= 0,0000	$x_{\min g}$	= 0,0136	s_g	= 0,0000777
HTM	= 0,0400	$x_{\max g}$	= 0,0140	$ B = \bar{x}_g - \bar{x}_m $	= 0,000036796
T*	= 0,0400	R_g	= 0,0004	n_{celk}	= 50
				n_{EP}	= 50

Minimální tolerance, pro kterou je měřicí proces ještě vhodný!

$C_g = \frac{0,1 \cdot T}{6 \cdot s_g} = 13,77 \leq 17,16 \leq 20$		$T_{\min}(C_g) = 0,00310$
$C_{gk} = \frac{0,1 \cdot T - \bar{x}_g - \bar{x}_m }{3 \cdot s_g} = 13,64 \leq 17,01 \leq 20$		$T_{\min}(C_{gk}) = 0,00347$
$\%RE = 0,25\%$		$T_{\min}(\%RE) = 0,00200$

Měřicí systém je způsobilý (RE, C_g, C_{gk})

Template: acc. MSA (4 Ed.) ANOVA (06/2011) tdi: process variation (V1)

Datum _____
28.5.2015

Vypočtené indexy způsobilosti

Oddělení _____
VALEC_OBRABENI_OP1_102030_AA.DFD

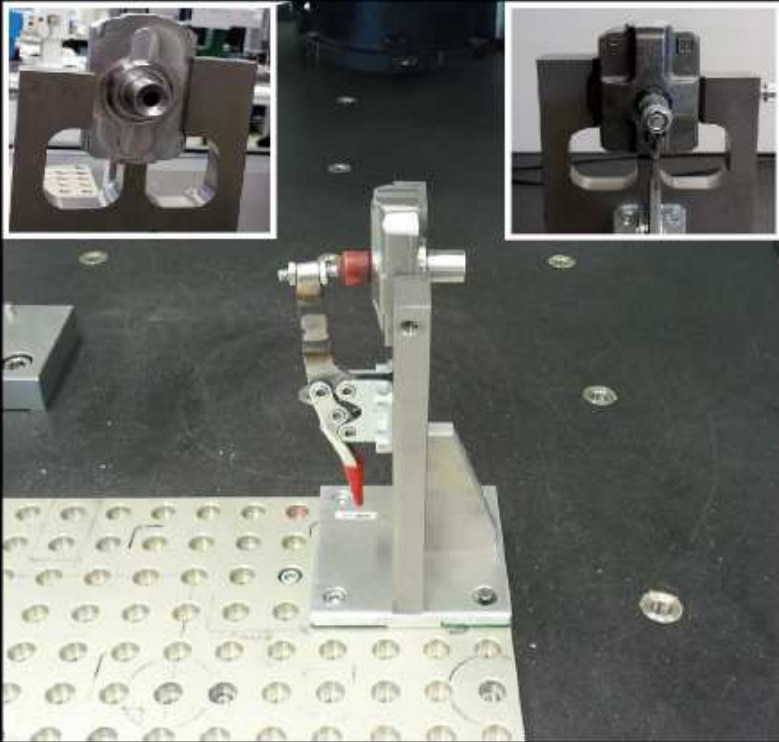
Obrázek 8.10 – Výstupní vzorový protokol ze statistického softwaru qs-Stat pro MSA TYPE 1

Příloha 9 – Protokol vyhodnocení MSA R&R

Analýza měřicích systémů						Strana 1 / 17						
Akt. dat.: 28.5.2015		Zprac. jméno: Daniel Tryzna		Odd./Náhl. střed./Výř.: NN		Zkuš. místo: Merova laborator						
Zkušební prostředek		Etalon		Znak								
Zk.pr.: Ozn. SMS ZEISS PRISMO 7		Etalon ozn. Etalon		Znak ozn. C1 - valcovitost 0,04 - E4								
Zk.pr.čís. SMS 02		Etalon: čís. 1		Znak č. 1								
Zk.pr.: Rozlišení 0,0001		Etalon akt. hodn. 0,0138658		Jmen.hoc 0,0000 HTM 0,0400 $\Delta = 0,0400$								
Dův.zk. MSA - R&R		Jedn. mm		Jedn. mm DTM 0,0000 $\Delta = 0,0000$								
Poznámka BAKALARSKA PRACE												
Hlavička protokolu												
Grafické znázornění průběhu měření												
$\bar{x}$	$s_{A,1}$	$s_{A,2}$	$\bar{x}_{g,1}$	$s_{g,1}$	$\bar{x}_{g,2}$	$\bar{x}_{g,3}$	$s_{g,3}$	$\bar{x}_{C,1}$	$\bar{x}_{C,2}$	$\bar{x}_{g,4}$	$s_{g,4}$	
1	0,0139	0,0139	0,01386	0,00001	0,0138	0,0139	0,01386	0,00008	0,0139	0,0139	0,01392	0,00000
2	0,0175	0,0178	0,01767	0,00021	0,0178	0,0177	0,01778	0,00010	0,0176	0,0173	0,01746	0,00024
3	0,0184	0,0185	0,01849	0,00006	0,0186	0,0187	0,01864	0,00009	0,0184	0,0183	0,01833	0,00005
4	0,0136	0,0135	0,01355	0,00010	0,0119	0,0140	0,01295	0,00148	0,0132	0,0133	0,01327	0,00003
5	0,0123	0,0117	0,01196	0,00042	0,0137	0,0114	0,01259	0,00162	0,0119	0,0116	0,01174	0,00022
6	0,0121	0,0122	0,01215	0,00004	0,0127	0,0128	0,01275	0,00005	0,0121	0,0120	0,01207	0,00007
7	0,0123	0,0122	0,01227	0,00003	0,0121	0,0120	0,01206	0,00007	0,0122	0,0120	0,01206	0,00014
8	0,0138	0,0136	0,01373	0,00013	0,0141	0,0147	0,01440	0,00048	0,0145	0,0146	0,01456	0,00012
9	0,0129	0,0125	0,01268	0,00024	0,0129	0,0127	0,01283	0,00016	0,0130	0,0135	0,01328	0,00038
10	0,0135	0,0130	0,01325	0,00037	0,0124	0,0126	0,01248	0,00013	0,0129	0,0129	0,01288	0,00002
Díl čís. 102030 DRW 000 AA		Díl ozn. 1		Valec - obrábění OP1								
Znak č. 1		Znak ozn. C1 - valcovitost 0,04 - E4										
Opakovatelnost		Rozptyl		Směrodatná odchylka		EVO = 0,0022225 ± 0,0026651 ± 0,0						
Reprodukovatelnost		0,00000		0,00044419		AV = 0,00000 ± 0,00000 ± 0,00151						
Interakce		Test nebyl proveden		Test nebyl proveden		IA =						
Celkové rozptýlení		0,00000019730		0,00044419		R&R = 0,0026012 ± 0,0026651 ± 0,0						
Tolerance		T* = 0,0400		Hodina spolehlivosti		1-α = 95,000%						
Rozlišení		%RE = 0,25%										
Celkové rozptýlení		%R&R = 6,66%										
Rozptýlení dílů		%PV = 33,91%										
Počet rozlišovacích tříd		ndc = 21										
Měřicí systém je způsobilý (RE,R&R,ndc)												
Template acc. MSA (4 Ed.) ANOVA (0,2011) tol: Template acc. MSA (4 Ed.) ANOVA (06/2011) tol												
T _{min(R&R)} = 0,0267		T _{min(R&R)} = 0,00888										
Datum 28.5.2015 10 / 121012 GQ_1_m... Vypočtený celkový rozptyl měřených hodnot Δ^2												

Obrázek 8.11 – Výstupní vzorový protokol ze statistického softwaru qs-Stat pro MSA R&R

Příloha 10 – Pracovní návodka pro měřicí úlohu

Pracovní návodka k plánu měření č. 1		Měrová laboratoř
Hlavička		
Název plánu měření:	Souřadný systém:	Zadavatel:
VALEC_OBRABENI_OP1_102030_AA	VALEC_OBRABENI_OP1_102030_AA	Sériová výroba CNC
Název součásti:	Upínací přípravek:	Typ zakázky:
VÁLEC - OBRÁBĚNÍ OP1	U.P. - VÁLEC OBRÁBĚNÍ OP1	Sériové měření pro uvolnění výroby
Číslo výkresu:	Konfigurace snímače:	Vytvořil:
102030 DRW 000 AA	H1	Daniel Tryzna
Upnutí součásti		
		Upnutí: 1) Upínací přípravek "VÁLEC OBRÁBĚNÍ OP1" 2) Upnout měřenou součást viz foto vlevo
Dokumentace		
Kontrolní plán:	C:\Laborator\Dokumenty\Kontrolni_plan\CNC\KP_VAL_OP1_1.pdf	
Plán měření:	D:\Zeiss\Plan_mereni\CNC\OP1\VALEC_OBRABENI_OP1_102030_AA	
Foto upnutí:	D:\Zeiss\Foto\CNC\OP1\VALEC_OBRABENI_OP1.jpg	
Protokoly:	N:\Laborator\Protokoly\CNC\OP1\OBR_OP1_MMDD_XX.pdf	
MSA:	C:\Laborator\Dokumenty\MSA\CNC\OP1\OBR_OP1_MSA.pdf	
Validace:	C:\Laborator\Dokumenty\Validace\CNC\OP1\OBR_OP1_VAL.pdf	
Datum: 21.5.2015	Podpis: 	

Obrázek 8.12 – Vyplněná a podepsaná pracovní návodka ke vzorovému plánu měření