



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**METROLOGICKÉ CHARAKTERISTIKY MĚŘÍCÍHO RAMENE
HEXAGON ABSOLUTE ARM 83**

METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE HEXAGON'S ABSOLUTE ARM 83

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Polášek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Marek, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Bc. Ondřej Polášek
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Vedoucí práce:	Ing. Tomáš Marek, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Metrologické charakteristiky měřicího ramene Hexagon Absolute Arm 83

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úkolem diplomové práce je komplexní posouzení metrologických charakteristik přenosného měřicího ramene.

Cíle diplomové práce:

Popis současného stavu hodnocení vhodnosti měřících ramen.

Systémový rozbor řešené problematiky pro zvolené rameno.

Návrh a zdůvodnění zvolených etalonů a výrobků a posouzení vhodnosti měřicího systému a procesu.

Vlastní závěry a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

GAO, Wei, ed. Metrology. Singapore: Springer, 2019. ISBN 978-981-10-4937-8.

RABINOVICH, Semyon G. Evaluating measurement accuracy. New York: Springer, 2013. ISBN 978-1-4614-6716-8.

MONTGOMERY, Douglas C. Introduction to statistical quality control. 5th ed. Hoboken: John Wiley, 2005. ISBN 0-471-66122-8.

SLADEK, Jerzy A. Coordinate Metrology. Poland: Springer, 2016. ISBN 978-3-662-48463-0.

COLOSIMO, Bianca M. Geometric Tolerances. Milan: Springer, 2011. ISBN 978-1-84996-310-7.

MEADOWS, James D. Measurement of geometric tolerances in manufacturing. New York: Marcel Dekker, 1998. ISBN 0-8247-0163-1.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá přehledem současných trendů v metrologii s ohledem na přenosné souřadnicové měřicí systémy a přehledem v současnosti používaných metodik pro určení způsobilosti měřících systémů a procesů. Získané poznatky jsou aplikovány pro určení způsobilosti měřícího systému skládajícího se z kloubového měřícího ramene a etalonu.

ABSTRACT

This study analyzes current trends in metrology in the field of portable coordinate measuring machines and describes current methods for measurement system and process evaluation. Obtained knowledge is applied, in order to evaluate the capability of measurement system, which consists of articulated measurement arm and measurement standard.

KLÍČOVÁ SLOVA

Přenosné souřadnicové měřicí systému, měřící kloubová ramena, způsobilost měřícího systému, způsobilost měřícího procesu, VDA 5.

KEYWORDS

Portable coordinate measurement machines, articulated measurement arms, capability of the measurement system, capability of the measurement process, VDA 5.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

POLÁŠEK, Ondřej. *Metrologické charakteristiky měřicího ramene Hexagon Absolute Arm 83*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132358>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Ing. Tomáš Marek, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval panu Ing. Tomáši Markovi, Ph.D. za odborné vedení mé práce, za cenné rady a připomínky, poskytnutí podkladů k vypracování teoretické části práce a za školení práce s měřicím ramenem. Také bych rád poděkoval své rodině a přítelkyni za jejich podporu během studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Tomáše Marka, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne

.....

Ondřej Polášek

OBSAH

1	ÚVOD	11
2	PŘENOSNÉ SOUŘADICOVÉ MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE	13
2.1	Válcový přenosný CMM	13
2.2	Optické CMM a laserové trackery	14
2.2.1	Optické CMM.....	14
2.2.2	Laserové trackery.....	16
2.3	Měřicí rameno.....	17
2.3.1	Hexagon Absolute Arm 83 Compact.....	19
2.3.2	Certifikace měřicího ramene.....	21
3	METODY VYHODNOCOVÁNÍ VHODNOSTI MĚŘÍCÍCH SYSTÉMŮ	27
3.1	Metody vyhodnocování způsobilosti a vhodnosti měřidel	28
3.1.1	MSA – Analýza systému měření	29
3.1.2	Norma ČSN ISO 22514-7.....	32
3.1.3	VDA 5 – Vhodnost kontrolních procesů	34
4	SYSTÉMOVÝ ROZBOR URČENÍ VHODNOSTI MĚŘÍCÍHO RAMENE ... 43	
4.1	Problémová situace	43
4.2	Formulace problému	43
4.3	Formulace cílů a řešení	44
4.4	Popis měřicího systému	44
4.5	Systém podstatných zdrojů nejistoty měření	45
5	NÁVRH MĚŘÍCÍHO PROCESU ETALONU	47
5.1	Určení geometrických prvků pro měření geometrických tolerancí	47
5.2	Příprava před měřením.....	48
5.3	Odebrání všech stupňů volnosti, návrh měřicí sekvence	48
5.4	Ověření správného fungování ramene	49
5.5	Měření.....	50
6	VÝSLEDKY MĚŘENÍ A STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ	51
6.1	Výpočet koeficientů způsobilosti.....	51
6.2	Výpočet vhodnosti měřicího systému.....	52
6.2.1	Výpočet dílčích složek kombinované nejistoty měřicího systému.....	53
6.2.2	Vyhodnocení vhodnosti měřicího systému.....	54
6.2.3	Vyhodnocení vhodnosti měřicího procesu	57
7	ZHODNOCENÍ A DISKUZE	59
8	ZÁVĚR	61
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	63
10	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK	67
10.1	Seznam tabulek.....	67
10.2	Nebyla nalezena položka obsahu.Seznam obrázků	67
11	SEZNAM PŘÍLOH	71

1 ÚVOD

Vyhodnocování rozměrových a geometrických tolerancí je denním chlebem metrologů v moderních výrobních podnicích. Zejména vyhodnocování geometrických tolerancí je oblast metrologie, na kterou běžná ruční měřidla nedostačují. V současné metrologii je jedním z nejběžnějších prostředků, jakými lze prověřit shodu s výkresovou specifikací, souřadnicový měřicí stroj (z anglického Coordinate measuring machine – dále jen CMM).

Měření CMM spočívá, jak napovídá název, v měření bodů na povrchu měřené součásti vůči souřadnému systému stroje, nebo měřené součásti. Klasické souřadnicové měřicí systémy měří souřadnice bodů (x, y a z) v kartézském souřadném systému, kde jsou souřadné osy reprezentovány pomocí tří lineárních vedení nebo pohyblivých os. Měření je získáváno pomocí odměřovacích pravítek ve vedeních a samotný fyzický kontakt mezi měřenou součástí a osami je realizován pomocí sondy. Tato klasická souřadnicová CMM jsou základem přesného měření v průmyslových podnicích, ovšem mají i své nevýhody. Jejich ovládání vyžaduje kvalifikovaného operátora a měření je většinou realizováno v metrologické laboratoři, aby měření neovlivnily rušivé vlivy výrobního procesu.

Tyto problémy se snaží řešit přenosné CMM, oproštěním se od konstrukce a principu odměřování klasických CMM. Optické CMM a laserové trackery vsází na odměřování pomocí sledování polohy sondy, ať už pomocí kamery, nebo laseru. Další variantou přenosných měřicích CMM je kloubové měřicí rameno. To se principem odměřování tolik neliší od klasického CMM, ovšem konstrukčně jde zcela jinou cestou. Namísto odměřování ve 3 osách je poloha sondy odměřována pomocí většinou 6 nebo 7 os. Kompaktní design ramen umožňuje jejich přenos a použití přímo ve výrobním procesu.

Velký počet os a přenosnost systému ovšem budí otázku, jestli tyto vlastnosti nejsou vykoupeny podstatným snížením přesnosti. Rameno by bylo možné s klasickým CMM porovnat na základě parametrů udávaným výrobcem, ovšem tyto parametry nemusejí brát v potaz měřicí systém jako celek. V dnešní době jsou používány metodiky, které mohou vyhodnotit způsobilost měřidla s ohledem na všechny zdroje nejistoty měření, a které by měly dát jasné odpovědi na otázku, k jakému účelu je vlastně měřicí rameno vhodné.

2 PŘENOSNÉ SOUŘADNICOVÉ MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE

Přenosné souřadnicové měřicí systémy nejsou omezeny na jeden konkrétní typ provedení. V praxi se lze setkat se čtyřmi variantami.

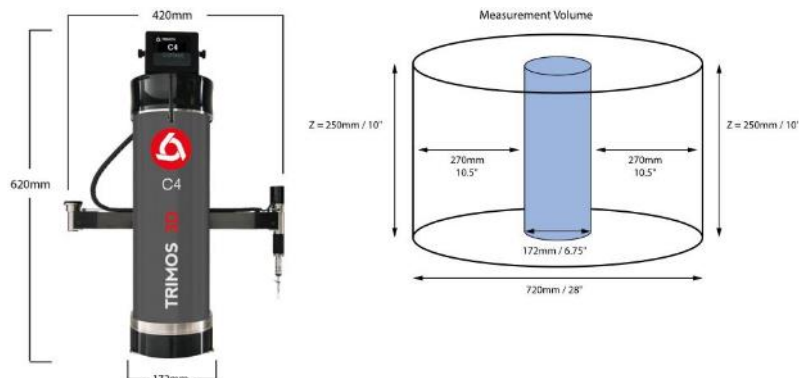
2.1 Válcový přenosný CMM

První variantou je přenosný CMM provedený jako malý souřadnicový měřicí stroj ve tvaru válce. Princip fungování je prakticky totožný jako u klasického souřadnicového měřicího stroje, ovšem jeho kompaktní design umožňuje jeho snadné přemístění bez nutnosti rozebrání stroje, nebo použití těžké techniky pro transport. Oproti klasickému CMM má navíc několik výhod. Na rozdíl od klasického CMM lze pohyb sondy při měření ovládat rukou (namísto ovládání joystickem) a kromě měření lze také rukou nastavit sekvenci pohybů sondy pro opakované měření stejných součástí v sérii. Díky tomu může měření provést i pracovník s nižší kvalifikací než operátor klasického CMM. Válcové CMM nabízejí výrobci zCat a Trimos (viz Obrázek 1) a oba stroje mají téměř totožné parametry. Nejlevnější varianta od společnosti zCat stojí 39 500 USD, tedy přibližně 850 000 Kč. [1]



Obrázek 1: Přenosná CMM od firmy zCat [26] a Trimos [27]

Měřicí objem obou válcových CMM je ohraničen kružnicí o průměru 720 mm a oba CMM jsou schopny měřit součásti o výšce 250 mm. Jelikož stroj stojí uprostřed měřicího objemu, je nutné od celkového objemu odečíst půdorys samotného stroje, tedy kružnici o průměru 172 mm (viz Obrázek 2). V tomto objemu výrobce zCat uvádí, že je lineární přesnost měření $5 + (L/100 \text{ mm}) [\mu\text{m}]$ a přesnost měř. průměru $3 + (D/100 \text{ mm}) [\mu\text{m}]$. Pro přesné měření není takový výběr ze sortimentu sond jako pro klasické CMM, ovšem díky čtyřem osám pro pohyb stroje je možné většinu měření zvládnout se sondou dodávanou se strojem. [1]



Obrázek 2: Velikost válcového CMM a jeho měřicího objemu [27]

Na rozdíl od jiných přenosných CMM není možné použít stroj se 3D skenerem a ze všech přenosných CMM má také nejmenší měřicí objem. Výhodou oproti ostatním přenosným CMM je zase vestavěný software, který eliminuje nutnost připojit počítač ke stroji a výsledek měření se objeví ihned po měření na dotekovém displeji stroje. Na rozdíl od ostatních přenosných CMM je také válcový stroj jediný, který může pracovat po správném nastavení automaticky. Při umístění na vhodný povrch jako například žulový stůl, lze kolem stroje rozmístit více výrobků pro měření (viz Obrázek 3) a po správném nastavení je stroj všechny změří automaticky. [1]



Obrázek 3: Přípravky pro měření více dílů v jedné operaci [27]

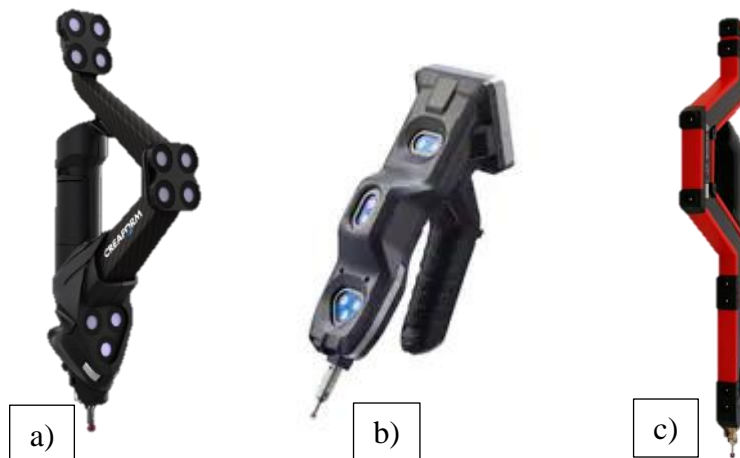
2.2 Optické CMM a laserové trackery

Druhou variantou přenosných CMM jsou stroje na bázi optického snímání polohy. Ty se dělí na optické CMM a laserové trackery. Oba tyto systémy mají obdobný princip určování polohy sondy a měřené součásti v prostoru. Sonda v obou případech není nijak mechanicky spojena se zbytkem měřicího systému, namísto toho je sonda součástí rukojeti, kterou operátor drží v ruce. [2]

2.2.1 Optické CMM

U optických CMM je rukojeť se sondou vybavena několika infračervenými LED diodami, jejichž polohu je schopna zachytit speciální kamera. Kamera, umístěná nejčastěji na trojnožce, zachytí IR záření a jelikož mají všechny diody na rukojeti se sondou svoji konkrétní konstelaci, dokáže systém z polohy zachycených bodů přesně určit, v jaké vzdálenosti a orientaci se rukojeť nachází (ukázky rukojetí viz Obrázek 4). Při požadavku na vyšší přesnost určení polohy je možné polohu rukojeti snímat dvěma kamerami současně a polohu poté určovat z dat nasbíraných oběma kamerami. Pro určení polohy v prostoru a vůči měřené součásti, je zapotřebí umístit IR diody také na pevné prvky v prostoru měření (např. nosné sloupky v hale) nebo přímo připevnit na měřenou součást. Díky tomu může kamera průběžně ověřovat, že nedošlo k jejímu nechtěnému posunu vůči měřené součásti. Zároveň ale diody na měřené součásti plní funkci referenčních bodů. Jejich poloha je snímána v řádu desítek Hz což umožňuje manipulaci s

kamerou během měření bez ztráty informace o poloze součásti. To umožňuje zvětšení měřicího objemu a možnost měřit z více úhlů. [2]



Obrázek 4: Rukojeť se sondou: a) Creaform [28], b) Keyence [29], c) Metronor [30]

Z toho vyplývá podstatná výhoda, kterou je snížení vlivu vibrací na přesnost měření. Vliv vibrací je pro přenosné CMM klíčový, jelikož se předpokládá s jejich použitím přímo ve výrobních halách, a ne v metrologických laboratořích. Neustálé sledování polohy měřené součásti vede k další výhodě, kterou je snížení možných chyb operátora při měření (např. nechtěné posunutí měřené součásti). Další výhodou, kterou mají optické systémy je menší vliv teplotní roztažnosti, jelikož jak bylo zmíněno není rukojeť se sondou nijak mechanicky spojena se zbytkem měřicího systému. [3]

Vlastnosti měřicího systému lze také rozšířit použitím různých sond a hrotů. Výrobci nabízejí speciální sondy a nástavce pro měření hůře dostupných míst jako jsou hluboké úzké díry (viz Obrázek 5). V dnešní době je standardem možnost koupit k různým hrotům také samotné tělo sondy. Díky tomu je možné všechny kalibrované sondy při měření rychle měnit bez nutnosti recalibrace. Tím je značně zkrácen čas měření, při kterém je nezbytná výměna typu sondy. [29]

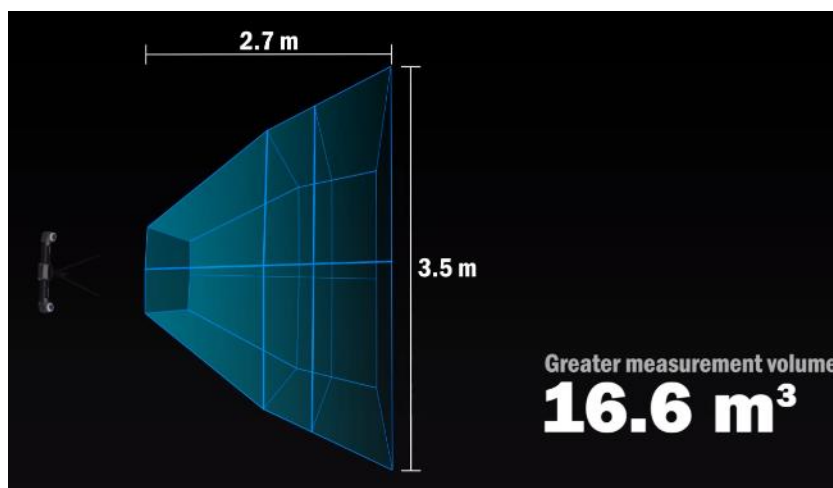


Obrázek 5: Sonda pro měření hlubokých úzkých děr (Metronor) [31]

Dalším rozšířením možnosti měření je poté použití 3D scanneru. Pokud je scanner opatřen IR diodami, může jeho polohu přesně zachytit kamera. Použití 3D scanneru umožňuje snímat nesrovnatelně větší množství bodů mnohem rychleji, než doteková sonda a díky tomu měřit součásti s komplikovanou geometrií. Toho je využíváno například při měření součástí

jako jsou lopatky turbín, části letadel, nebo aut a obecně součásti, které se neskládají ze základních geometrických prvků. [4]

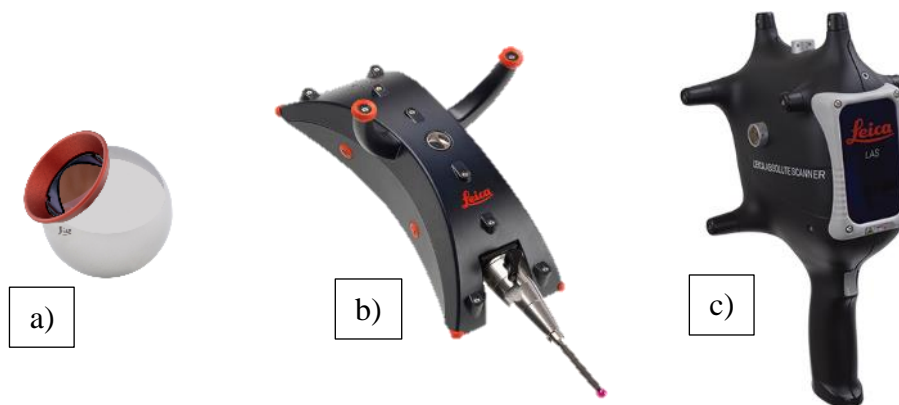
Díky výše zmíněným vlastnostem nacházejí optické CMM své uplatnění zvláště při měření velkých součástí. Jejich použití eliminuje dobu nutnou pro přepravu velkých měřených součástí do měřicího prostoru velkých CMM. Při měření velkých součástí také v efektivitě předčí měřicí ramena, jejichž měřicí rozsah je limitován délkou ramene a při měření větších součástí, než je rozsah ramene je nutné jejich přemístění v průběhu měření. Například optický přenosný CMM od společnosti Creaform je vhodný pro součásti o velikosti 0,2 – 6 m. Snímač dokáže zachytit referenční bod ve vzdálenosti 2,7 m od snímače, v této vzdálenosti dokáže zároveň zachytit body vzdálené až 3,5 m od sebe. (viz Obrázek 6) Měřicí objem tímto ovšem není omezen, jelikož se snímačem lze manipulovat během měření. Lineární přesnost měření je 0,025 mm, objemová přesnost se poté odvíjí od velikosti měřicího objemu a zdali je použito základní vybavení, nebo vybavení řady Elite. Ve druhém případě je objemová přesnost rovna 0,064 mm. Při použití sondy z řady Elite v kombinaci se 3D scannerem, je objemová přesnost vyjádřena jako 0,044 mm + 0,015 mm/m. Celý systém, včetně softwaru a 3D scanneru pak stojí až 85 000 €, tedy přibližně 2,2 mil Kč. [28]



Obrázek 6: Znáznornění měřicího objemu (Snímač od spol. Creaform) [32]

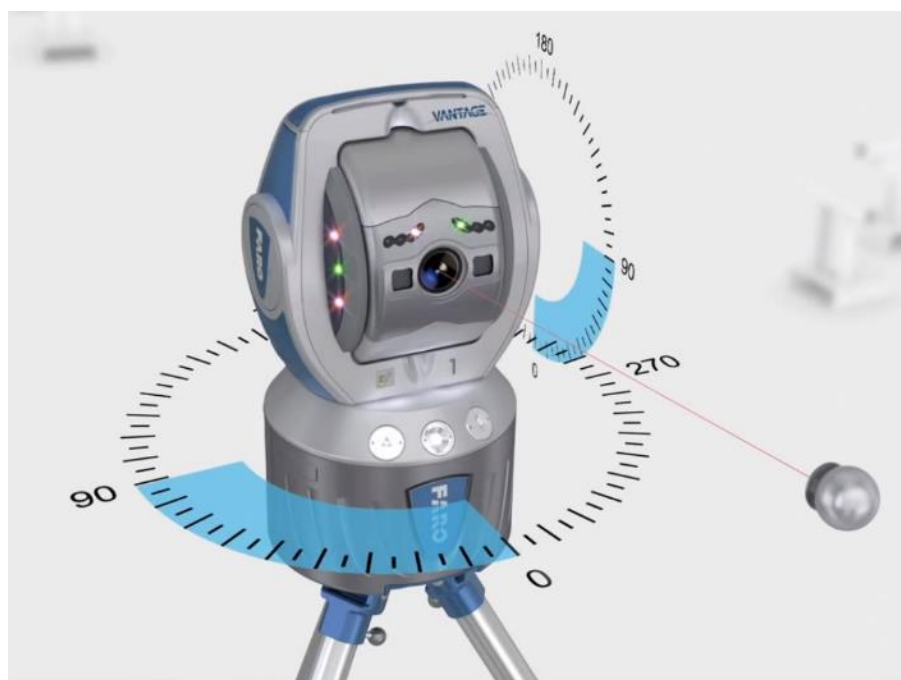
2.2.2 Laserové trackery

Laserový tracker je druhou variantou přenosného CMM, založený na principu sledování polohy odražeče. Pro laserový tracker je používán koutový odražeč, který může být ve tvaru koule (Spherically mounted Retro-reflector SMR), nebo je odražeč součástí rukojeti se sondou a pro účely 3D scannování může být také součástí samotného ručního scanneru (viz Obrázek 7). [6]



Obrázek 7: a) sférický koutový odražeč, b) doteková sonda s odražečem, c) 3D scanner s odražečem [5]

Ve všech třech případech je sledování polohy zajištěno právě díky použití koutového odražeče. Jelikož se odražeč skládá ze tří na sebe kolmých odrazivých ploch, je tím zaručeno, že dopadající laserový paprsek a odražený paprsek jsou rovnoběžné. Laserový paprsek vychází z laserové hlavičky a z koutového odražeče se může odrazit dvojím způsobem. Buďto se odrazí ze středu odražeče a putuje zpět po stejné trajektorii, anebo dopadne mimo střed a odrazí se po trajektorii paralelní. Ve druhém případě zachytí senzory v laserové hlavičce vychýlení paprsku a systém provede korekci, aby paprsek dopadal přímo do středu odražeče. Poloha odražeče je poté určena v 3D sférickém souřadném systému třemi parametry – vzdáleností a dvěma úhly (viz Obrázek 8). První úhel je měřen kolem svislé osy (azimut) a druhý kolem vodorovné osy (elevační úhel.) Určení třetího parametru – vzdálenosti funguje na principu interferometru. Vzdálenost je tedy určována velice přesně, ovšem při ztrátě informace o poloze je nutná reklaibrace. Ovšem pokud je laserová hlavička vybavena systémem ADM (Absolute distance measurement), je možné informaci o poloze opět získat z doby, za kterou se paprsek odrazí zpět. [7]



Obrázek 8: Znárodnění sférického souřadného systému (tracker spol. Faro) [7]

Kromě určení přesné vzdálenosti pomocí laseru je ještě nutné určit orientaci sondy. Přesnou orientaci lze určit podobným způsobem, jako u optických přenosných systémů, tedy umístěním IR diod na rukojeť. Kombinovaná přesnost vzdálenosti pomocí laseru a přesnost natočení pomocí diod činí laserový tracker ideálním měřicím systémem pro součásti velkých rozměrů. Například sonda T-probe z produktové řady Leica (společnost Hexagon) je schopna měřit v rozsahu 30 m od laserové hlavy s přesností měření délky $\pm 42 \mu\text{m} + 7,7 \mu\text{m}/\text{m}$. Ovšem při použití referenčních bodů umístěných na pevné prvky okolí, nebo na měřenou součást lze měřicí objem rozšířit obdobným způsobem, jako u optických systémů. V takovém případě je poté možné rozšířit měřicí rozsah na 320 m. [5]

2.3 Měřicí rameno

Třetí možností přenosného CMM je měřicí rameno. Svým kinematickým uspořádáním velmi připomíná robotické rameno, ovšem v jeho kloubech, resp. osách jsou místo elektrických

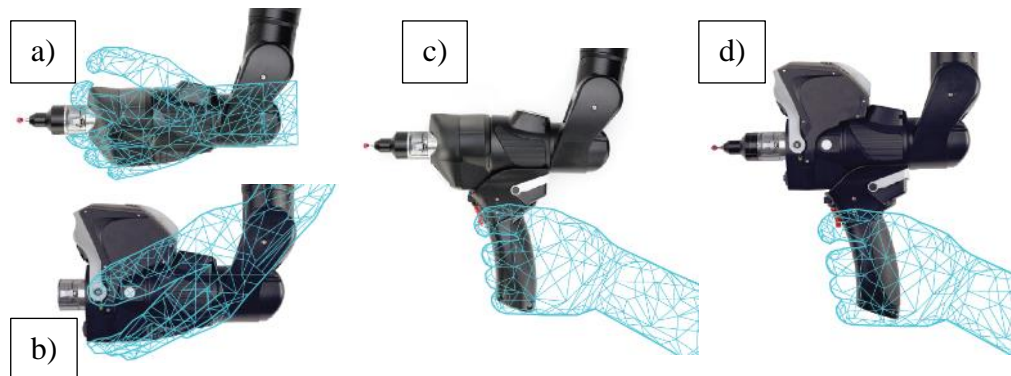
motorů přesné enkodéry (inkrementální – např. Faro Arm, API Arm, absolutní – např. Hexagon Absolute Arm), které z natočení jednotlivých os dokážou přesně určit, kde se nachází sonda, resp. 3D scanner. Pohyb ramene zajišťuje operátor, který přikládá sondu na měřenou součást a druhou rukou případně zajišťuje stabilitu ramene.



Obrázek 9: 7osé rameno spol. Faro s otočným stolem [33]

Na trhu se vyskytuje široká škála měřících ramen, od 5osých, až po 7osé, nabízená ramena mají také různou velikost (měřící dosah od 1 až po necelých 5 m). Zpravidla platí, že s rostoucím počtem os klesá přesnost měření dotekem, ovšem práce se scannerem je s větším počtem os jednodušší, více ergonomická a přesnější. Většina výrobců nabízí svá měřící ramena s možností použití jak scanneru, tak i sondy, mnohdy je dokonce obojí integrováno do společné rukojeti. Velikost ramene má také vliv na přesnost. Menší ramena mají větší přesnost než velká, takže je pro zákazníka ideální si vybrat nejmenší možné rameno, které dosahem pokryje jeho měřící potřeby. [8]

Největší výhodou měřících ramen je univerzálnost jejich použití, díky jejich modulárnímu designu. Díky široké škále dotekových i bezdotekových sond, scannerů, upínacích přípravků (jak pro rameno, tak i měřenou součást) a dalšímu příslušenství je snadné přizpůsobit rameno konkrétním potřebám zákazníka, který poté nemusí přizpůsobovat měřící proces parametrům ramene. Například společnost Hexagon má ve svém sortimentu téměř 100 různých dotekových a bezdotekových sond. Sondy lze navíc rychle měnit bez nutnosti recalibrace, obdobně jako u optických CMM. Na zápěstí ramene je možné umístit sondu, případně ergonomickou rukojet' (např. pistolovou rukojet') s držákem sondy, případně samotný scanner, nebo pistolovou rukojet' s držákem sondy a scannerem zároveň (viz Obrázek 10). [9]



Obrázek 10: Typy rukojeti spol. Hexagon: a) zápěstí se sondou, b) zápěstí se scannerem, c) pistolová rukojet' se sondou, d) pistolová rukojet' se sondou i scannerem [10]

Upínání ramene k pracovní ploše je provedeno pomocí upínacích základen, které mohou být upevněny k měřicímu stolu pomocí šroubů, magneticky, nebo vakuově. Případně je ovšem možné rozsah ramene upravit pomocí upínacích nástavců, nebo rameno upnout na stabilní trojnožku, nebo stojan. Pro upnutí měřené součásti jsou použity standartní upínací prvky a svorky, případně pro usnadnění 3D scannování je možné pro upnutí použít otočný stůl s monitorovanou polohou jeho natočení (viz Obrázek 9). V případě měření součásti o takové velikosti, že by pro její měření nestačil dosah ramene ani v kombinaci s otočným stolem, je možné rozšířit měřicí objem ramene tzv. přískokem. Během přískoku je nutné mít referenční body, které jsou nepohyblivé vůči měřené součásti. Například to mohou být speciální prohlubně zapuštěné v mřížkovém uspořádání do podlahy v prostoru, kde měření probíhá (viz Obrázek 11). U referenčních bodů musí být známa jejich přesná vzájemná poloha, většinou se po jejich instalaci měří laserovým trackerem se sféricky montovaným koutovým odražečem. Při samotném přískoku je nejprve zapotřebí určit, kde se rameno nachází vůči prohlubním. Poté může být rameno přemístěno a následným změřením polohy prohlubně je opět stanovena jeho poloha vůči součásti. [10]



Obrázek 11: Mřížka zapuštěných prohlubní pro určení polohy ramene po přískoku (spol. Hexagon) [10]

Jelikož bude v praktické části použito rameno Hexagon Absolute Arm 83, bude dále popsáno právě toto rameno.

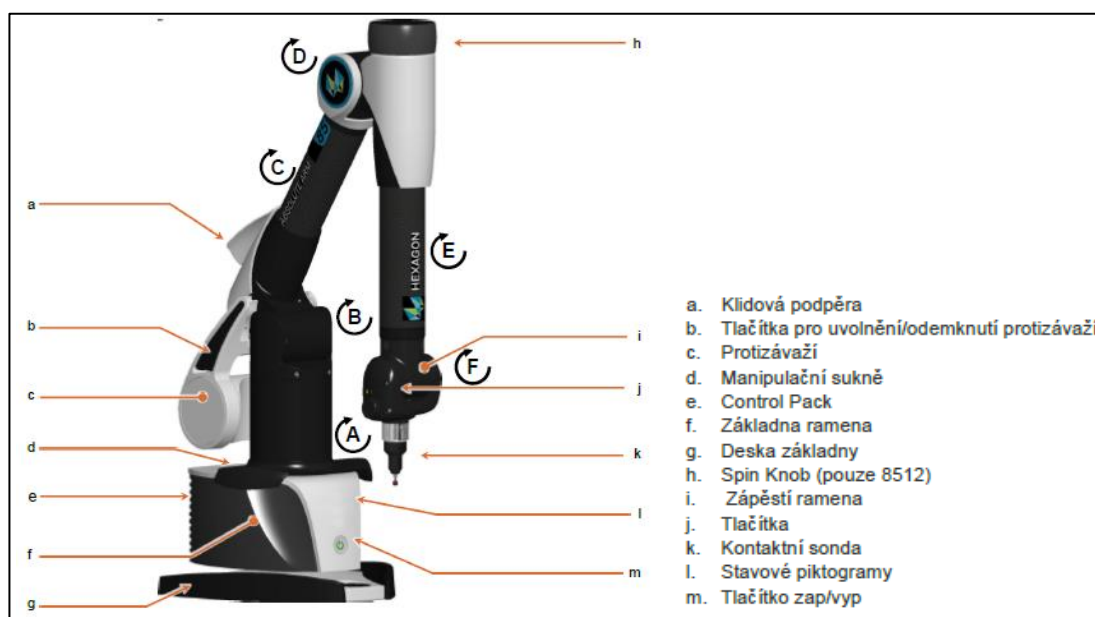
2.3.1 Hexagon Absolute Arm 83 Compact

Společnost Hexagon Manufacturing Intelligence se zabývá vývojem měřicí techniky napříč různými měřicími technologiemi. Její sortiment zahrnuje ruční měřicí náradí, souřadnicové měřicí systémy, přenosná měřicí ramena, laserové trackery, 3D optické scannery a softwarovou podporu pro metrologii. Samotná nabídka přenosných měřících ramen obsahuje ramena ve třech různých modelech, třech úrovních přesnosti (83, 85 a 87) a sedmi velikostech (viz Obrázek 12). [12]



Obrázek 12: Ukázka sortimentu ramen Hexagon Absolute Arm [8]

Ramena jsou dostupná v 6osém a 7osém modelu, nebo ve verzi Compact. Verze Compact je, jak napovídá název, nejmenším ramenem z nabídky. Zároveň jde o nejpřesnější rameno, které je nabízené ve úrovních přesnosti 83 (nižší úroveň) a 85 (střední úroveň). Stejně jako všechna ostatní ramena Absolute Arm má verze Compact konstrukci z uhlíkových vláken (viz Obrázek 13). Uhlíková vlákna mají velmi nízký koeficient teplotní roztažnosti a dobrou pevnost vůči jejich nízké hmotnosti. V kombinaci se protizávažím integrovaným v základně ramene je to ideální řešení pro snížení namáhavosti měřících operací. Přestože je verze Compact nejmenším modelem, je překvapivě ze všech ramen Absolute Arm nejtěžší (hmotnost 12,1 kg). To je způsobeno konstrukcí základny, která pro použití ramene nepotřebuje pevné uchycení k pracovnímu stolu, díky její hmotnosti stačí rameno na pracovní stůl pouze postavit. To má zásadní vliv na mobilitu ramene, jelikož hned po vyndání ramene z ochranného kufru může být rameno umístěno například dovnitř CNC obráběcího centra pro kontrolu vyrovnání dílu, bez nutnosti upínání jeho základny. Pro aplikace, které vyžadují pevnější uchycení lze rameno pevně uchytnout pomocí magnetů, nebo vakuové základny. [10]



Obrázek 13: Popis Absolute Arm Compact [11]

Předností všech ramen Absolute Arm jsou absolutní enkodéry odměřující natočení jednotlivých os. Použití absolutních enkodérů podstatně snižuje dobu přípravy na měření, jelikož oproti ramenům s inkrementálními enkodéry není zapotřebí nalezení referenční polohy pro jednotlivé osy (nutné po každém zapnutí). Ke snižování času přípravy a samotného měření také přispívá automatické rozpoznávání typu připojené sondy a možnost její výměny během měření bez nutnosti recalibrace. Místo sondy také verze Compact umožňuje připojení 3D laserového scanneru HP-L-8.9. [10]

Rameno může být napájeno pomocí baterie, dále také podporuje možnost WiFi a Bluetooth připojení. Díky tomu může být rameno zcela mobilní a je tedy ideální pro měření v celém prostoru např. výrobní haly. Měření v hale také pomáhá odezva ramene, která může být zvuková, optická, nebo hmatová (vibrace v zápěstí ramene). [10]

Jelikož je model Compact nejmenší z ramen Absolute Arm, hodí se nejvíce pro přesné měření malých a středně velkých dílů. Maximální dosah ramene je 1,49 m, měřící rozsah má průměr 1,2 m. V této oblasti je maximální přípustná chyba pro dotek MPE_p rovna 0,008 mm a maximální přípustná chyba pro měření délky MPE_e vyjádřena $5+L/40 < 0,018$ mm. (pro úroveň

přesnosti 83, dle ISO 10360-2). Díky takto vysoké přesnosti je rameno výrobcem doporučeno jako doplněk, nebo náhrada klasického CMM. [10]

Přesnost ramene je certifikována podle mezinárodně uznávaných norem řady 10360 které definují přijímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů. Jmenovitě jde o certifikaci dle ISO 10360-12 (Kloubové rameno souřadnicových měřicích strojů) a ISO 10360-2 (Souřadnicové měřicí stroje používané pro měření lineárních rozměrů). Certifikace pro přesnost 3D scannování dle normy ISO 10360-8, dodatku D (Souřadnicové měřicí stroje s optickými snímači vzdálenosti) je uplatňována při dodávání scannerů RS5, RS6 a RS-SQUARED pro 7osá ramena, ovšem rameno Absolute Arm Compact je kompatibilní pouze s laserem HP-L-8.9, který je dodáván bez této certifikace. [10]

2.3.2 Certifikace měřicího ramene

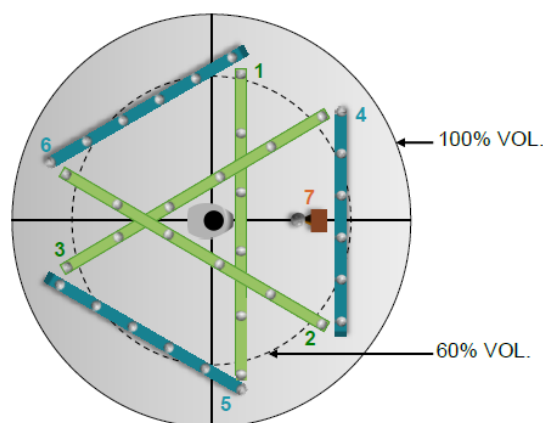
Norma ČSN EN ISO 10360-12

Tato část normy definuje přijímací a periodické zkoušky pro kloubová ramena souřadnicových měřicích strojů. Mimo jiné obsahuje definici měřicího ramene, uvádí znázornění sestavy kloubů ramene (angl. joint assembly), jak pro 6osá, tak i 7osá ramena. Norma také obsahuje vysvětlení terminologie měřicích ramen a uvádí testovací certifikační procedury pro přijetí (angl. acceptance), a následovně reverifikace. [13]

Certifikační postup ramen Absolute Arm dle ISO 10360-12 sestává ze 3 kroků [13]:

- Stanovení velikosti chyby měření 5ti vzdáleností na zkušebním artefaktu (Ball Bar, Cone Bar, nebo Step Bar)
- Stanovení velikosti chyby měření tvaru a velikosti zkušebního artefaktu (kalibrovaná koule o známém průměru)
- Stanovení velikosti chyby pro polohu sondy při různé orientaci zápěstí (artefakt opět kalibrovaná koule o známém průměru)

V první části procedury je měřeno 5 vzdáleností na zkušebním artefaktu. Měření vzdáleností je opakováno třikrát, poté je artefakt umístěn do jiné polohy v měřicím objemu a sekvence se opakuje. Tato sekvence je opakována pro 7 různých poloh artefaktu (polohy znázorňuje Obrázek 14, popis v Tabulce 1). Během měření platí pro orientaci ramene pravidlo o poloze lokte ramene. Během měření v 7 polohách artefaktu se musí průběžně střídát poloha lokte (loket nalevo, napravo, nebo nahoru), ovšem během 3 opakování měření stejného bodu musí zůstat i stejná orientace lokte. [15]

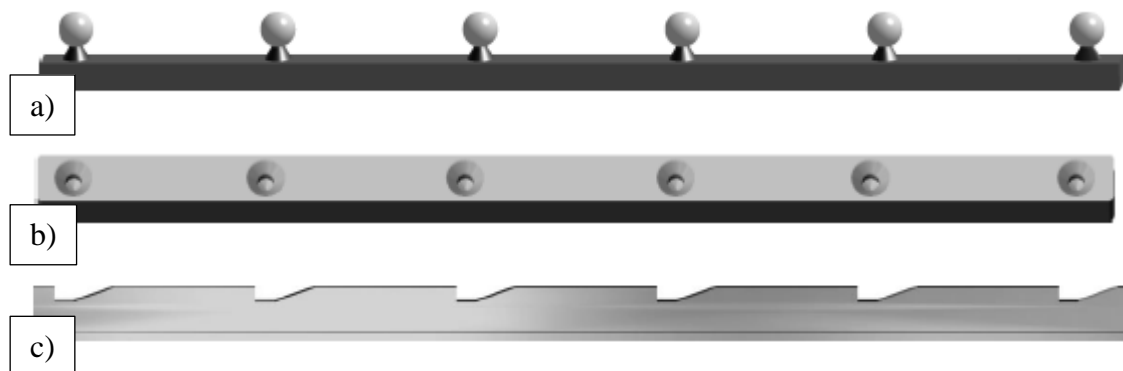


Obrázek 14: Příklad průběžného uspořádání sedmi poloh v měřicím objemu ramene [15]

Tabulka 1: 7 poloh pro nastavení artefaktu [15]

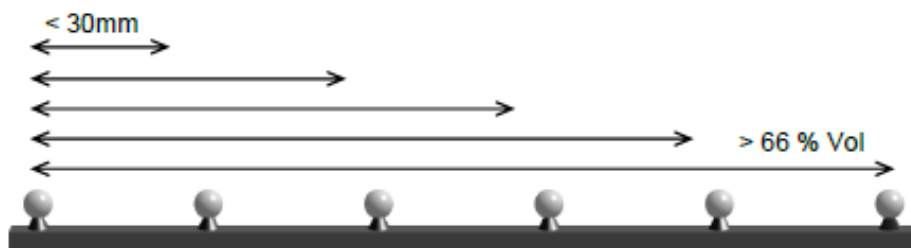
Schéma polohy	Pozice	Úhel sklonu	Vzdálenost od ramene	Výška
	1	vodorovně	malá	malá
	2	vodorovně	malá	malá
	3	vodorovně	malá	malá
	4	45 °	střední	střední
	5	45 °	střední	střední
	6	45 °	střední	střední
	7	svisle	střední	střední

Jako artefakt délky lze použít Ball Bar (artefakt s šesti kalibrovanými koulemi o známém průměru a vzdálenosti), Cone Bar (artefakt s šesti kalibrovanými kuželovými prohlubněmi o známém úhlu a hloubce kuželu, a vzdálenosti) nebo Step Bar (artefakt s šesti kalibrovanými stupni známého tvaru a vzdálenosti.) viz Obrázek 15. [13]



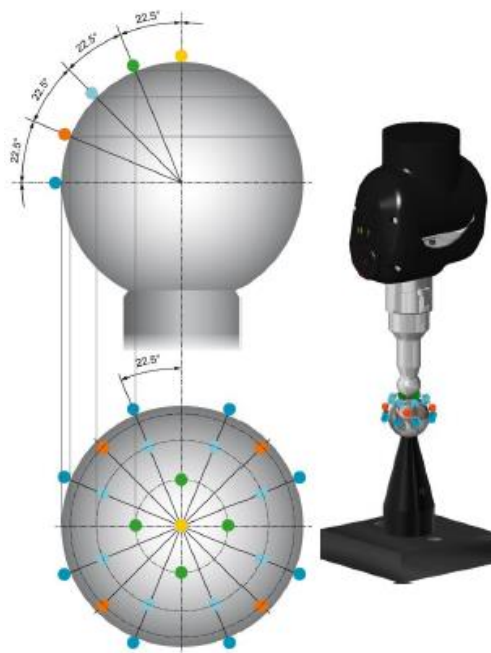
Obrázek 15: Artefakty pro měření vzdálenosti: a) Ball Bar, b) Cone Bar, c) Step Bar [15]

Pro všechny artefakty platí, že nejmenší vzdálenost mezi měřenými prvky musí být menší než 30 mm a největší vzdálenost musí být větší než 66 % měřicího rozsahu (viz Obrázek 16). Pro jednotlivé artefakty se liší postup měření vzdáleností. Pro Ball Bar je nutné určit polohu každé koule naměřením 5ti bodů, to znamená při třech opakováních celkem 150 bodů. Pro Cone Bar stačí pro každou kuželovou prohlubeň jeden měřený bod, při třech opakováních je měřeno dohromady 30 bodů. Pro Step Bar je nejprve nutné na artefaktu změřit horní rovinu (4 body) a jednu boční rovinu (4 body). Poté stačí pro každý stupeň naměřit jeden bod, dohromady při třech opakováních je tedy měřeno 54 bodů. Výstupem z testu chyby měření vzdálenosti je parametr E_{UNI} – maximální povolená chyba pro jednosměrné měření délky. [15]



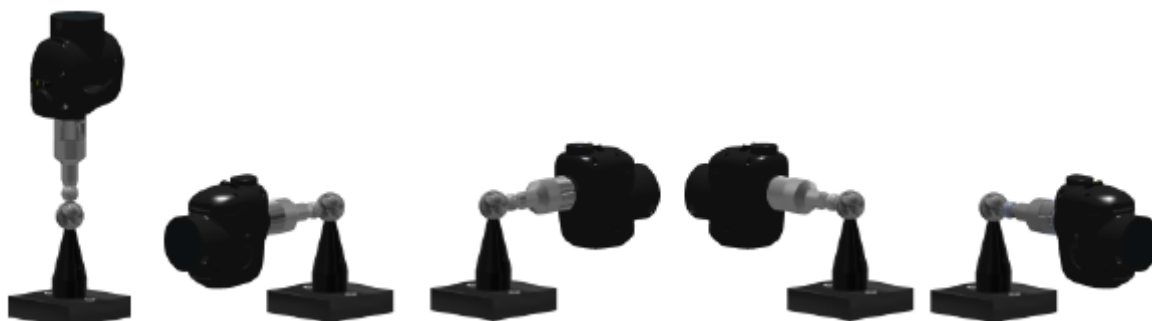
Obrázek 16: Znázornění 5ti měřených vzdáleností na artefaktu (Ball Bar) [15]

Ve druhé části je měřena kalibrovaná koule o známém průměru, a to ve dvou polohách (jedno měření blízko ramene a druhé daleko). Pro obě tyto polohy je na kouli naměřeno 25 bodů, konkrétní rozložení bodů na povrchu koule znázorňuje Obrázek 17. Výstupem z testu chyby měření vzdálenosti jsou parametry P_{SIZE} – maximální povolená chyba pro měření průměru kalibrované koule a P_{FORM} – maximální přípustná chyba pro tvar koule. [15]



Obrázek 17: Rozložení 25 bodů měřených na povrchu koule [15]

Třetí a poslední krok – stanovení velikosti chyby pro polohu sondy využívá stejný artefakt i stejné uspořádání, jako předchozí krok. Kalibrovaná koule je opět umístěna poprvé blízko ramene a podruhé ve větší vzdálenosti. Měření spočívá v změření pěti bodů na povrchu koule a to pětkrát, ovšem pokaždé s jinou orientací zápěstí (orientace shora, ve směru x , $-x$, y , $-y$), viz Obrázek 18. Po změření 5×5 bodů je stejným způsobem měřen artefakt ve větší vzdálenosti. Výstupem z testu chyby měření velikosti chyby pro polohu sondy je parametr L_{DIA} – maximální přípustná chyba pro polohu. [15]



Obrázek 18: 5 různých orientací zápěstí při měření [15]

Po naměření jsou všechny čtyři hodnoty zapsány do kalibračního listu. Kalibrační list také obsahuje informace o použitém zkušebním artefaktu a použité sondě. U ramene Absolute Arm 83 Compact nesmí přesáhnout hodnoty specifikované výrobcem dle Tabulky 2. [13]

Tabulka 2: Specifikace přesnosti Absolute Arm 83 Compact dle ČSN EN ISO 10360-12 [10]

E_{UNI}	P_{SIZE}	P_{FORM}	L_{DIA}
0,024 mm	0,010 mm	0,018 mm	0,021 mm

Norma ČSN EN ISO 10360-2

Tato část normy definuje přijímací a periodické zkoušky pro souřadnicové měřicí stroje používané pro měření lineárních rozměrů. Jelikož se zabývá spíše zkouškami pro klasické CMM, není pro měřicí ramena běžná. Rameno Absolute Arm Compact lze podle této části normy certifikovat, jelikož výrobce předpokládá, že bude rameno používáno ve spojení se portálovým, mostovým nebo optickým CMM, nebo s horizontálním ramenem. [14]

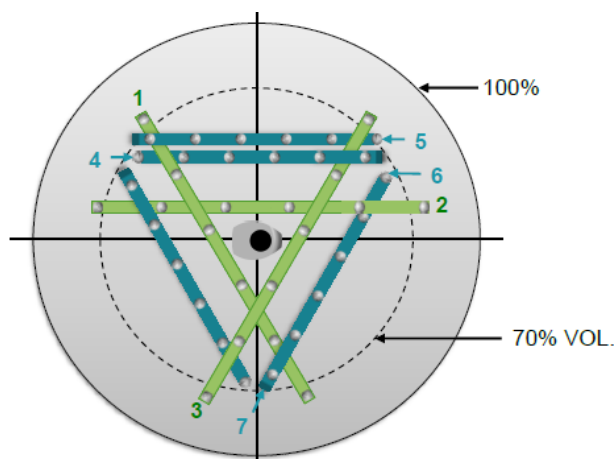
Postup certifikační procedury pro rameno Absolute Arm Compact využívá stejné artefakty, jako certifikační postup dle ISO 10360-12. Procedura se skládá ze dvou kroků [14]:

- Stanovení velikosti chyby měření 5ti vzdáleností na zkušebním artefaktu (Ball Bar, Cone Bar, nebo Step Bar)
- Stanovení velikosti chyby sondování dotykem (artefakt kalibrovaná koule o známém průměru)

První část procedury pro stanovení chyby měření vzdáleností je velmi podobná, jako procedura pro určení chyby měření vzdáleností (E_{UNI}) dle ISO 10360-12, popsané výše. Postup se liší v uspořádání artefaktů v prostoru a natočením lokte ramene při jednotlivých měřeních. Opět je provedeno měření pěti vzdáleností na artefaktu, třikrát opakovaných pro 7 poloh artefaktu. Zatímco dle ISO 10360-12 bylo nutné při třech opakovaných měření stejného bodu nutné dodržet stejnou polohu lokte, v tomto případě je poloha lokte pro 3 opakování popsána v Tabulce 3. Artefakty jsou uspořádány okolo ramene viz Obrázek 19 a Tabulka 4 [15].



Tabulka 3: Pozice lokte pro 3 opakování [15]

	1. strana	2. strana
1. měření	loket nalevo	loket napravo
2. měření	loket napravo	loket nalevo
3. měření	loket nalevo	loket nalevo



Obrázek 19: Uspořádání artefaktů okolo ramene [15]

Tabulka 4: 7 poloh pro nastavení artefaktu [15]

Schéma polohy	Pozice	Úhel sklonu	Vzdálenost od ramene	Výška
	1	vodorovně	malá	malá
	2	vodorovně	malá	malá
	3	vodorovně	malá	malá
	4	45 °	střední	střední
	5	45 °	střední	střední
	6	45 °	střední	střední
	7	45 °	střední	střední

Druhá část proceduru spočívá v měření 25 bodů na kalibrované kouli, umístěné ve střední vzdálenosti od ramene. Rozmístění bodů na povrchu koule je stejné, jako bylo při měření parametrů P_{FORM} a P_{SIZE} dle ISO 10360-12, viz Obrázek 17 [14].

V normě ISO 10360-2, která je zaměřena převážně na stanovení parametrů klasických CMM, je zohledněna také vzdálenost osy pinoly od odsazení hrotu snímacího doteku. Pro vzdálenosti $E_0 = 0$ mm a $E_{150} = 150$ mm norma stanovuje maximální přípustné chyby $E_{0,MPE}$ a $E_{150,MPE}$. Jelikož konstrukce ramene neobsahuje pinolu, uvádí výrobce Absolute Arm přesnost pomocí těchto dvou parametrů [10]:

- MPE_p - Maximální přípustná chyba, dotek
- MPE_e - Maximální přípustná chyba, měření délky

Tabulka 5: Specifikace přesnosti Absolute Arm 83 Compact dle ČSN EN ISO 10360-2 [10]

MPE_p	MPE_e
0,008 mm	$5+L/40 < 0,018$ mm

3 METODY VYHODNOCOVÁNÍ VHODNOSTI MĚŘÍCÍCH SYSTÉMŮ

Systém řízení kvality (QMS z angl. Quality Management Systém) je pro výrobní podniky jedním ze základních pilířů pro udržení konkurenceschopnosti na trhu. Slouží k zajišťování kvality ve výrobních podnicích a pomáhají jak plnění požadavků zákazníků, tak i tvorbě procesního řízení pro zvýšení efektivity výroby a služeb. Zahrnuje jak plánování, tak i řízení a udržování kvality, které napomáhají firmám v udržení silné pozice. K prokázání, že společnost klade nemalé úsilí na udržování kvality, napomáhá certifikace podle některého ze systémů řízení kvality. Mezi nejdůležitější normy, podle kterých lze certifikovat správné řízení kvality podniků, patří [16]:

- Normy řady ISO 9000
- QS 9000
- VDA 6.1

Normy řady ISO 9000:

Mezinárodně uznávané normy vznikly s cílem vytvořit jednotné mezinárodní normy, které by bylo možné uplatnit v široké škále průmyslových odvětví, nehledě na jejich povahu. Byly vytvořeny jako nástroj pro řízení kvality a uspokojování potřeb zákazníků. Nejdůležitější normy z řady ISO 9000 jsou [16]:

- ISO 9000:2015 - Systémy managementu kvality – Základy, zásady a slovník
- ISO 9001:2015 - Systémy managementu kvality – Požadavky
- ISO 9004:2018 - Řízení udržitelného úspěchu organizace
- ISO 19011:2018 - Směrnice pro auditování systémů managementu

Všechny tyto normy mají svůj český překlad, který většinou vzniknul rok po vydání původní normy. Charakteristické pro tyto normy je, že se nesnaží orientovat na určité průmyslové odvětví, ale naopak jsou považovány za univerzální. Proto také stanovuje norma ISO 9001 pouze minimální požadavky na systém managementu jakosti, kterých má být dosaženo, ale nestanoví, jakým konkrétním způsobem musí být tyto požadavky naplněny. Normy nejsou závazné, ovšem dnes tvoří prakticky standart na celosvětovém trhu [16].

Systém řízení kvality QS 9000:

V roce 1994 byla vytvořena norma QS 9000 jako referenční model pro nastavení základních řídicích procesů v automobilovém průmyslu. Na její tvorbě se podílely společnosti General Motors, Chrysler a Ford (tzv. Velká trojka), normu poté vydala AIAG (Automotive Industry Action Group). AIAG normu spravuje a také zajišťuje certifikační školení. Norma obsahuje normu ISO 9001 v plném znění, navíc ovšem obsahuje další požadavky - systémové požadavky definované “Velkou trojkou” pro jejich vlastní potřebu, a také zákaznické specifické požadavky, unikátní pro každého individuálního výrobce automobilů [17].

Norma QS 9000 je orientována hlavně pro americké výrobce automobilového průmyslu, v evropském automobilovém průmyslu je využívána norma VDA 6.1. Požadavky normy QS 9000 jsou naplňovány dalšími metodami v oblasti kvality, zejména [17]:

- APQP (Pokročilé plánování kvality produktů)
- DOE (Návrh experimentu)
- FMEA (Analýza možného výskytu a vlivu vad)
- MSA (Analýza systému měření)
- PPAP (Proces schvalování a uvolnění dílů ve výrobě)
- QSA (Hodnocení systému kvality)
- SPC (Statistické řízení procesů)

Konkrétně metodika MSA se zabývá určováním způsobilosti měřících procesů a bude později v práci rozebrána.

Systém řízení kvality VDA 6.1:

Jedná se prakticky o obdobu normy QS 9000, ovšem orientovanou na evropský automobilový průmysl. Normu vydává, zpracovává a distribuuje VDA QMC (Qualitäts Management Center im Verband der Automobilindustrie). Norma stejně jako QS 9000 obsahuje plné znění ISO 9001, obohacené o požadavky na zavádění nových výrobků, schvalování výrobků zákazníkem, požadavky na způsobilost procesů a požadavky na neustálé zlepšování. Po splnění požadavků normy je možné provést certifikaci, normou se také musí řídit celý dodavatelský řetězec, pokud má mít norma certifikát VDA 6.1. Mezi nástroje pro plánování kvality dle metodik VDA patří také např. [18]:

- VDA 2 - Zajišťování kvality před sériovou výrobou
- VDA 5 - Vhodnost kontrolních procesů
- VDA 6 - Základy auditů kvality
- VDA 6.3 - Audit procesu
- VDA 6.4 - Audit systému managementu kvality. Výrobní prostředky
- VDA 6.5 - Audit produktu

Konkrétně metodika VDA 5 se zabývá určováním vhodnosti měřících procesů a bude později v práci rozebrána. Do budoucna se předpokládá, že výrobci v automobilovém průmyslu postupně přejdou na normu IATF 16949, která sjednocuje celosvětové požadavky na systémy managementu kvality automobilového průmyslu. Norma nahradila předchozí normu ISO/TS 16949 a fakticky spojuje požadavky evropského a amerického automobilového průmyslu [18].

3.1 Metody vyhodnocování způsobilosti a vhodnosti měřidel

Jak slovo způsobilost, tak i slovo vhodnost je v souvislosti s měřidlem a metrologií překládáno do angličtiny jako Capability. Do metrologie se dvojí české pojmenování dostalo z německé normy VDA 5, kde je pro měřící systém, který splní požadavky normy použito německé slovo Geeignet – česky Vhodný. Proto používáme pro vyhodnocení výsledků VDA 5 termín vhodnost, ovšem v angličtině by mezi termíny vhodnost a způsobilost nebyl rozdíl.

Nejjednodušším způsobem, jak určit způsobilost měřidla je pomocí ukazatelů způsobilosti C_g a C_{gk} (angl. Type 1 Gauge Study). Metoda má obdobný způsob vyhodnocení způsobilosti měřidla jako vyhodnocení způsobilosti výrobního procesu. V případě výrobního procesu je porovnáván požadavek na variabilitu procesu (ve formě tolerančního pole) se skutečnou variabilitou procesu (ve formě směrodatné odchylky). V případě vyhodnocování způsobilosti měřícího systému pomocí ukazatelů c_g (ukazatel správnosti měřidla) a c_{gk} (ukazatel přesnosti měřidla, příp. vycentrování) je vzorec obdobný, jen jsou mnohem větší nároky na

variabilitu procesu. Proto je ve vzorcích (1) a (2) požadavek na variabilitu procesu (ve formě tolerančního pole měřeného prvku) vynásoben hodnotou 0,2 pro c_g a 0,1 pro c_{gk} [19].

$$c_g = \frac{0,2 * T}{6 * s_g} \quad (1)$$

$$c_{gk} = \frac{0,1 * T - |\bar{x} - x_e|}{3 * s_g} \quad (2)$$

Takto vypočítané hodnoty by měly přesáhnout hodnotu 1,33. V případě, že se ukazatel c_g rovná 1, leží 99,73 % naměřených hodnot v intervalu o velikosti 0,2 T. Pro hodnotu $c_g = 1,33$ leží 99,99 % naměřených hodnot v intervalu o velikosti 0,2 T. V případě, že i ukazatel c_{gk} vyjde větší nebo roven 1,33, je měřicí proces správně vycentrován a měřidlo je považováno za způsobilé [19].

Nedostatkem vyhodnocování způsobilosti pomocí ukazatelů c_g a c_{gk} je, že vůbec nepracuje s možnými nejistotami měření, zejména systematickými nejistotami typu B. Proto je vhodná pouze pro případy, kdy tyto vlivy lze skutečně zanedbat (např. neměnná teplota, jediný operátor, aj.) Pro komplexní určení způsobilosti měřícího systému je vhodné použít jinou metodiku. Zmíněné systémy řízení kvality mají pro určení způsobilosti, resp. vhodnosti měřícího systému vlastní metody a normy [19]:

- Metoda MSA (QS 9000)
- Metoda VDA 5 (VDA 6.1)
- ČSN ISO 22514-7 (návaznost na normy ISO)

3.1.1 MSA – Analýza systému měření

MSA je analytická technika pro posouzení systému měření, která bývá použita jako součást nějakého systému řízení kvality (QS 9000, TQM, SixSigma). Vychází z měření kvality v automobilovém průmyslu ale vzhledem ke své praktičnosti a univerzálnosti se používá také v dalších odvětvích. Metodu lze použít jak na hodnocení samostatného měřidla, tak i celého měřícího procesu. Kladen je důraz na opakovatelnost a reprodukovatelnost měření, proto se metoda zaměřuje na analýzu zdrojů nejistot v celém procesu měření. Hlavní postupy v rámci metody MSA jsou [20]:

- posouzení vhodnosti užití měřidel pro daný účel (produkt)
- posouzení vhodnosti užití měřidel pro dané prostředí (pracoviště, proces)
- posouzení postupů měření
- posouzení způsobilosti osob, které měření provádějí.

Studie způsobilosti systému měření:

Pro posuzování adekvátnosti a kvality měřícího systému bývá často používán soubor procedur známý jako studie způsobilosti systému měření. Účelem studie je posuzování způsobilosti měřidla, izolování zdrojů variability v systému a vyhodnocení, jaký podíl na celkové pozorované variabilitě je způsoben měřidlem. [21]

Metoda MSA může být chápána jako prostředek porozumění a řízení chyb měření. Všechny měření zahrnují určitou chybu, která může být popsána jednoduchou matematickou rovnicí (3),

$$y = X + \epsilon \quad (3)$$

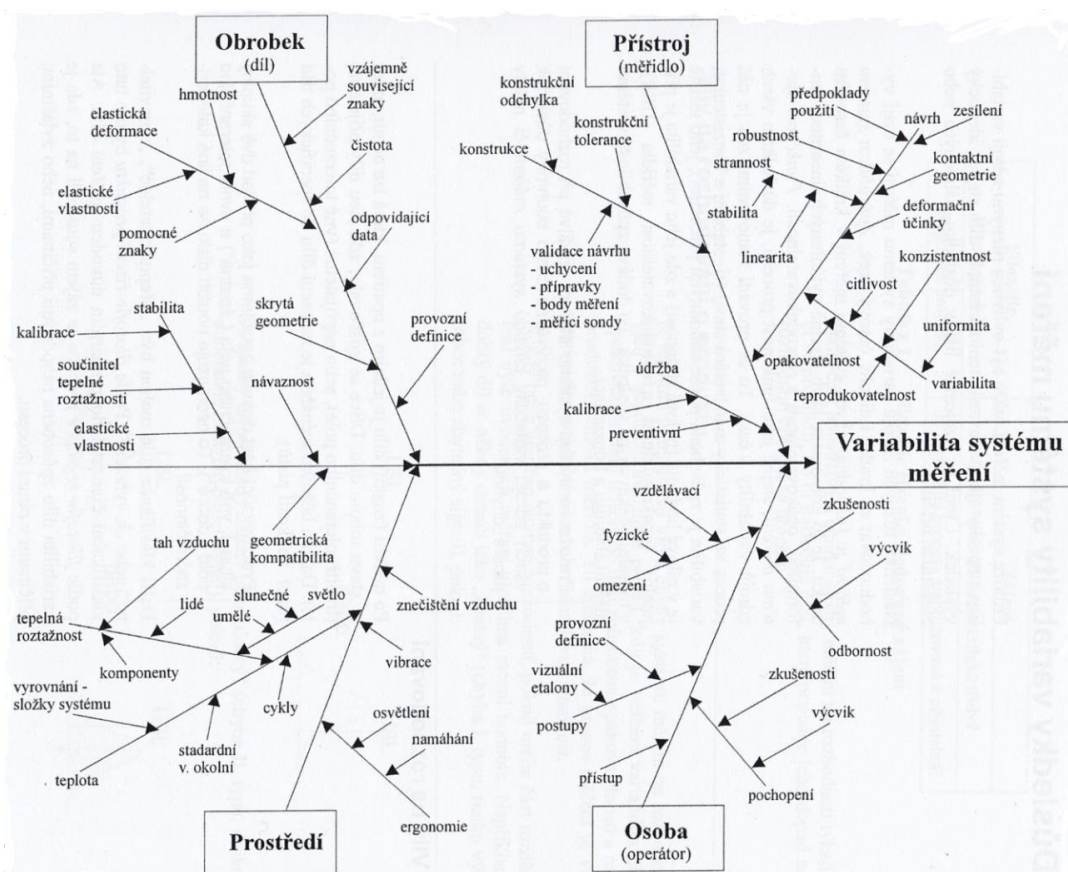
kde y představuje naměřenou hodnotu, X představuje skutečnou (referenční) hodnotu a ϵ představuje chybu měření. Jak proměnné X tak i ϵ se řídí normálními rozděleními, konkrétně $X \sim N(\mu; \sigma_p^2)$ a $\epsilon \sim N(0; \sigma_{gage}^2)$, kde μ a 0 jsou střední hodnoty a σ_p^2 a σ_{gage}^2 jsou rozptyly. Rozptyl celkové měřené hodnoty y je vypočten dle rovnice (4) [21]:

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_p^2 + \sigma_{gage}^2 \quad (4)$$

Celková variabilita se tedy skládá ze variability měřeného procesu (produktu) a variability měřícího procesu. Metoda MSA se soustředí na vyhodnocení a určení složek variability σ_{gage}^2 . MSA uvažuje čtyř základních složek variability [21]:

- Bias – lze popsat jako rozdíl naměřené a skutečné hodnoty)
- Stabilita – vychází z monitorování prostředí a jeho vlivem na variabilitu
- Opakovatelnost – vychází z vlastní inherentní přesnosti měřidla
- Reprodukovatelnost – variabilita způsobená proměnnými vlivy (např. rozdílná metoda měření různých operátorů)

Vlivy od těchto základních složek variability lze rozložit na jednotlivé složky, které MSA bere v úvahu, tyto složky jsou znázorněny v diagramu rybí kosti (Fishbone diagram, někdy také Ishikawa diagram), viz Obrázek 20 [22].



Obrázek 20: Znázornění jednotlivých složek variability [22]

Tabulka 6 ukazuje metody, použitelné pro vyhodnocování základních variabilit způsobilosti měření.

Tabulka 6: Prostředky vyhodnocování zdrojů variability MSA [21]

Variabilita	Zkoumané projevy	Aplik. statistická metoda
Stabilita	Různé úrovně variability pro různé operační režimy. Nesourodá výkonnost operátorů, neadekvátní procedura, warm-up a vlivy okolí.	Analýza rozpětí a průměru
Bias	Systematické chyby měření (rozdíl mezi sledovanou a referenční hodnotou)	Analýza rozpětí a průměru
Linearita	Rozdíl mezi sledovanou přesností a/nebo přesností sledovanou na několika měřeních v rozsahu měřidla. (problémy často souvisí s kalibračními problémy a údržbou).	Regresní analýza
Opakovatelnost Reprodukovatelnost	Opakovatelnost: variabilita jednoho operátora Reprodukovatelnost: variabilita více operátorů	ANOVA Analýza rozpětí a průměru

Je zřejmé, že způsobilostí samotného měřidla a s ním spojnou variabilitou se zabývá opakovatelnost. Pro účely vyjádření způsobilosti měřicího systému je použita studie opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měřidla (anglicky Gauge Repeatability and Reproducibility – Gauge R&R Studies). Nejdůležitější kritéria GR&R jsou kritérium přijatelnosti pro chybu polohy – vyhodnoceno na základě strannosti a linearity (nepřijatelné, pokud se chyba významně liší od nuly, nebo pokud překročí maximální povolenou chybu definovanou kalibrací), a kritérium přijatelnosti pro chybu šíře. Procentuální vyjádření chyby šíře je popsáno v rovnici (5) [21]:

$$\%GRR = \frac{\sqrt{EV^2 + AV^2}}{s_p} \quad (5)$$

kde EV představuje opakovatelnost (variabilitu) zařízení, AV představuje reprodukovatelnost operátora s s_p představuje směrodatnou odchylku procesu. Po vypočtení %GRR se posuzuje měřicí systém následovně [21]:

- chyba menší než 10 % - systém měření se obecně považuje za přijatelný
- chyba v rozmezí 10 % až 30 % - systém může být přijatelný podle důležitosti použití, nákladů vynaložených na měřicí zařízení a nákladů za opravu
- chyba větší než 30 % - systém měření se považuje za nepřijatelný, veškeré úsilí se má vynaložit na zlepšení systému měření.

Metoda MSA je v dnešní době pro svoji jednoduchost hojně využívána, předností je také její univerzálnost. Ovšem její podstatnou nevýhodou je že z výpočtu nejsou patrné vlivy nejistoty na výsledek měření (na rozdíl od VDA 5). Při nesplnění mezí je tedy nutné provést další analýzy pro odhalení zdroje vysoké variability [22].

3.1.2 Norma ČSN ISO 22514-7

Norma ČSN ISO 22514-7:2014 – Statistické metody v managementu procesu – Způsobilost a výkonnost – Část 7: Způsobilost procesů měření.

Norma byla vydána jako překlad normy ISO/WD 22514-7. Tato norma je zároveň jedna z norem, ze kterých se vyvinula i norma VDA 5, mezi normami je proto velmi málo rozdílů. Předmětem normy je postup validace měřicího systému a procesu měření a kritéria pro přijetí. Ta jsou definována jako ukazatel způsobilosti (C_{MS}) nebo jako reciproká hodnota ukazatele způsobilosti procesu (Q_{MS}). Pro vyhodnocování kritérií je uplatňován tzv. nejistotový přístup (vychází z ISO/IEC Guide 98-3 - Guide to the expression of the uncertainty in measurement (GUM) a ISO 14253-2 - Návod pro odhad nejistoty měření v GPS, při kalibraci měřicího vybavení a při ověřování výrobku), norma obsahuje zjednodušený návod pro vyjádření a kombinování složek nejistoty pro výpočet způsobilosti. [22]

Kvůli podobnosti s normou VDA 5 nebude tato norma v této práci rozebrána příliš do hloubky. Rozdíly mezi normami ovšem stojí za zmínění. Rozdíl je patrný již z rozsahu obou norem. Jelikož je Norma VDA 5 založena na hned několika normách a ČSN norma je pouhý překlad ISO normy, je norma VDA 5 mnohem obsáhlejší. ČSN norma může být považována za její zjednodušenou verzi. V ČSN normě je také uvedeno méně praktických příkladů pro demonstraci postupu. Také zde chybí seznam všech vnějších vlivů na nejistotu měření, který VDA obsahuje a jeho obdobu obsahuje i metoda MSA. V ČSN normě také chybí další kapitoly, například postupy pro speciální procesy měření (procesy s malými tolerancemi, malé geometrické prvky, třídění či validace měřicího software). Obě normy pracují s ukazateli způsobilosti, které mají podobný výpočet, ovšem pouze dle ČSN je možné vyhodnotit celkovou způsobilost systému měření na základě těchto ukazatelů. Mezi normami jsou také patrné rozdíly ve značení. U ČSN normy je za výhodu požadována návaznost na normy ISO a také její univerzálnost. Za podstatnou nevýhodu lze považovat její zaměření pouze na odhad způsobilosti systému, resp. procesu měření, bez praktických rad a širších souvislostí [22].

Jelikož je postup určení způsobilosti měřicího procesu velmi podobný, jako v metodice VDA 5, bude postup více rozepsán právě v souvislosti s podrobnější normou VDA 5. Následuje tedy pouze výčet základních principů z ČSN normy a definice ukazatelů způsobilosti.

Způsobilost procesu je posouzena buďto na základě reciprokého ukazatele způsobilosti procesu C_{MP} , nebo pomocí výkonnostních poměrů Q_{MS} a Q_{MP} . Výpočet ukazatelů způsobilosti C_{MS} a C_{MP} uvádí rovnice (6) a (7) [23]:

$$C_{MS} = \frac{0,3 * (U - L)}{6 * u_{MS}} \quad (6)$$

$$C_{MP} = \frac{0,3 * (U - L)}{3 * u_{MS}} \quad (7)$$

Oba koeficienty jsou závislé na kombinované nejistotě měřicího systému, která je zároveň nezbytná i pro vyjádření výkonnostního poměru Q_{MS} . Vypočte se podle rovnice (8). Pro výpočet výkonnostního poměru Q_{MP} je zapotřebí vypočítat také kombinovanou nejistotu měřicího procesu dle rovnice (9). Tabulka 7 popisuje dílčí nejistoty výpočtů [23].

Kombinovaná standartní nejistota měřicího systému:

$$u_{MS} = \sqrt{u_{CAL}^2 + u_{LIN}^2 + u_{BI}^2 + u_{EV}^2 + u_{MS-REST}^2} \quad (8)$$

Kde $u_{EV} = \min\{u_{EVR}; u_{RE}\}$.

Kombinovaná standartní nejistota měřicího procesu:

$$u_{MP} = \sqrt{u_{MS}^2 + u_{AV}^2 + u_{GV}^2 + u_{STAB}^2 + u_{OBJ}^2 + u_T^2 + u_{REST}^2 + \sum_i u_{[A]}^2} \quad (9)$$

Kde $u_{EV} = \min\{u_{EVO}; u_{EVR}; u_{RE}\}$.

Po rozšíření kombinovaných nejistot koeficientem rozšíření $k = 2$ (pro 95,45 % interval spolehlivosti) získáme rozšířené nejistoty U_{MS} a U_{MP} . Ty můžeme dosadit do rovnic pro výpočet výkonnostních poměrů (10) a (11) [23]:

$$Q_{MS} = \frac{2 * U_{MS}}{U - L} * 100 \% \quad (10)$$

$$Q_{MP} = \frac{2 * U_{MP}}{U - L} * 100 \% \quad (11)$$

Tabulka 7: Seznam složek nejistoty pro potřeby ČSN ISO 22514-7 [23]

Kombinovaná nejistota	Složka nejistoty	Značka
Měřicí systém	Kalibrace etalonu nebo součásti	u_{CAL}
	Odchylky pocházející z linearity	u_{LIN}
	Vychýlení	u_{BI}
	Opakovatelnost na etalonech	u_{EVR}
	Rozlišení	u_{RE}
	Jiné složky nejistoty (měřicí systém)	$u_{MS-REST}$
Měřicí proces	Opakovatelnost na součástech	u_{EVO}
	Reprodukovatelnost operátora	u_{AV}
	Reprodukovatelnost měřicího systému (různá umístění procesu měření)	u_{GV}
	Reprodukovatelnost v čase	u_{STAB}
	Interakce	$u_{[A]}$
	Homogenita měřené součásti	u_{OBJ}
	Teplota	u_T
	Jiné složky nejistoty (proces měření)	u_{REST}

Definice jednotlivých složek nejistot bude rozebrána v popisu metodiky VDA 5. Po vypočtení koeficientů způsobilosti, nebo výkonnostních poměrů je vyhodnocení způsobilosti měřicího procesu vyhodnoceno porovnáním s doporučenými hodnotami pro jednotlivé

parametry. Koeficienty způsobilosti by neměly přesáhnout hodnotu 1,33, Výkonnostní poměr měřicího systému Q_{MS} by neměl přesáhnout 15 % a poměr měřicího procesu Q_{MP} 30 %. Za dodržení těchto podmínek je proces způsobilý [23].

3.1.3 VDA 5 – Vhodnost kontrolních procesů

VDA 5 je německá automobilová příručka, která byla vypracována pracovní skupinou QMC (Qualitäts Management Center) v roce 2003 ve spolupráci s německými firmami (BMW, DAIMLER, MAN, BOSCH, VW atd.). Zatím poslední verze této příručky byla vydána v září 2010 (2. vydání). Tato verze představuje zcela zásadní přepracování prvního vydání a v češtině vydána pod názvem Vhodnost kontrolních procesů (Prüfprozesseignung). Příručka popisuje praktické přístupy k provádění analýzy systému měření na základě výpočtu nejistoty měření procesů kontroly [25].

Jak již bylo zmíněno, VDA 5 využívá znalosti z jiných oborových norem pro vyhodnocování nejistot, způsobilost, atd. Tabulka 8 uvádí seznam relevantních norem, ze kterých VDA 5 přejímá některé metody pro vyhodnocení.

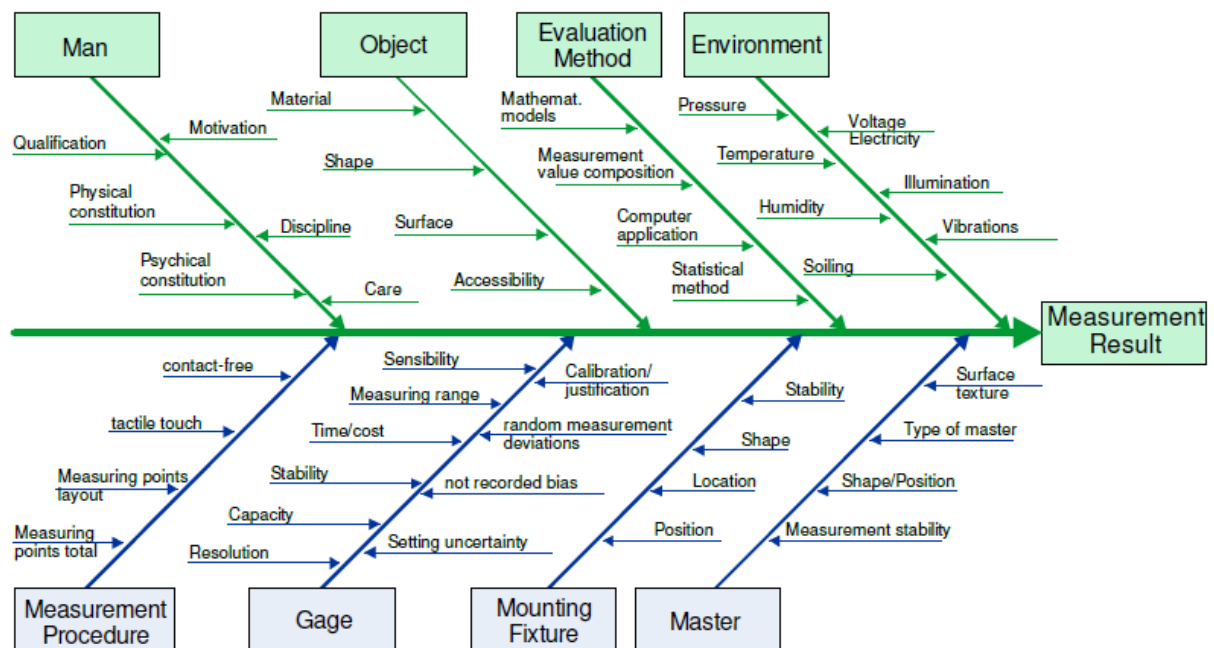
Tabulka 8: Relevantní normy a standardy pro VDA 5 [24]

Účel	Mezinárodní a národní standardy a dokumenty	Průmyslové standardy
Budování systému managementu kvality	<ul style="list-style-type: none"> • DIN EN ISO 9000ff • ISO 10012 • EN ISO/IEC 17025 • ISO/TS 16949 	<ul style="list-style-type: none"> • VDA 6.1
Určení nejistoty měření	<p><i>Obecná metrologie:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • DIN 1319 • ISO/IEC Guide 98-3 (GUM) <p><i>Měření rozměrů:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • ISO 14253-1 	<ul style="list-style-type: none"> • Normy oborových sdružení • DKD-3
Stanovení způsobilosti měřidlo / prostředku měření	<ul style="list-style-type: none"> • DIN 55319-3 • ISO/WD 22514-7 	<ul style="list-style-type: none"> • QS 9000/ MSA • Podnikové normy
Přihlédnutí k nejistotě měření	<ul style="list-style-type: none"> • ISO/TS 14253-1 	<ul style="list-style-type: none"> • QS 9000/ MSA • Podnikové normy

Pro určení celkové způsobilosti je dle metodiky VDA nejdříve nutné určit, jaké vlivy způsobují nárůst celkové nejistoty měření. Metodika rozlišuje 8 základních zdrojů nejistoty (MSA jen 4) které lze rozdělit na jednotlivé zdroje, dle diagramu rybí kosti, který je součástí metodiky (viz Obrázek 21). Základní nejistoty lze popsat následovně [24]:

- Master – Etalon: kvalita etalonu může vést ke vzniku nejistoty měření, proto bývá doložena kalibračním certifikátem.
- Mounting Fixture – Upínací přípravek: je nutné brát v potaz jak upnutí měřené součásti, tak i měřidla samotného.
- Gage – Měřidlo: vlivy na nejistotu měřidla jsou spjaty s rozlišením, přesnost jeho kalibrace, nastavení vůči měřeným součástem, odchylky od linearit měřidla, opakovatelnost měřidla

- Measurement procedure – Metoda měření: zvolený postup měření, výběr měřených vzorků i použitý matematický model pro vyhodnocení je nutné brát v úvahu.
- Man – Operátor: Různá kvalifikace operátorů se na nejistotu může projevat vlivem rozdílné síly vyvinuté při měření, chyby odečtení měřené hodnoty, fyzický a psychický stav operátora, motivace atd.
- Object – Měřený objekt: nejistoty měření vznikají např. měřením stejné součásti na různých místech. Rozdíly mohou vznikat vlivem rozdílné textury povrchu, materiálových charakteristik, nebo nestabilitou součásti
- Evaluation method – Metoda hodnocení: Zvolené matematické a statistické metody pro vyhodnocení mají vliv na výsledek
- Environment – Prostředí: Na nejistotu měření mají okolní podmínky významný vliv. Vlivy, které je běžně nutné vzít v potaz jsou teplota, osvětlení, vibrace, vlhkost vzduchu, případně čistota prostředí



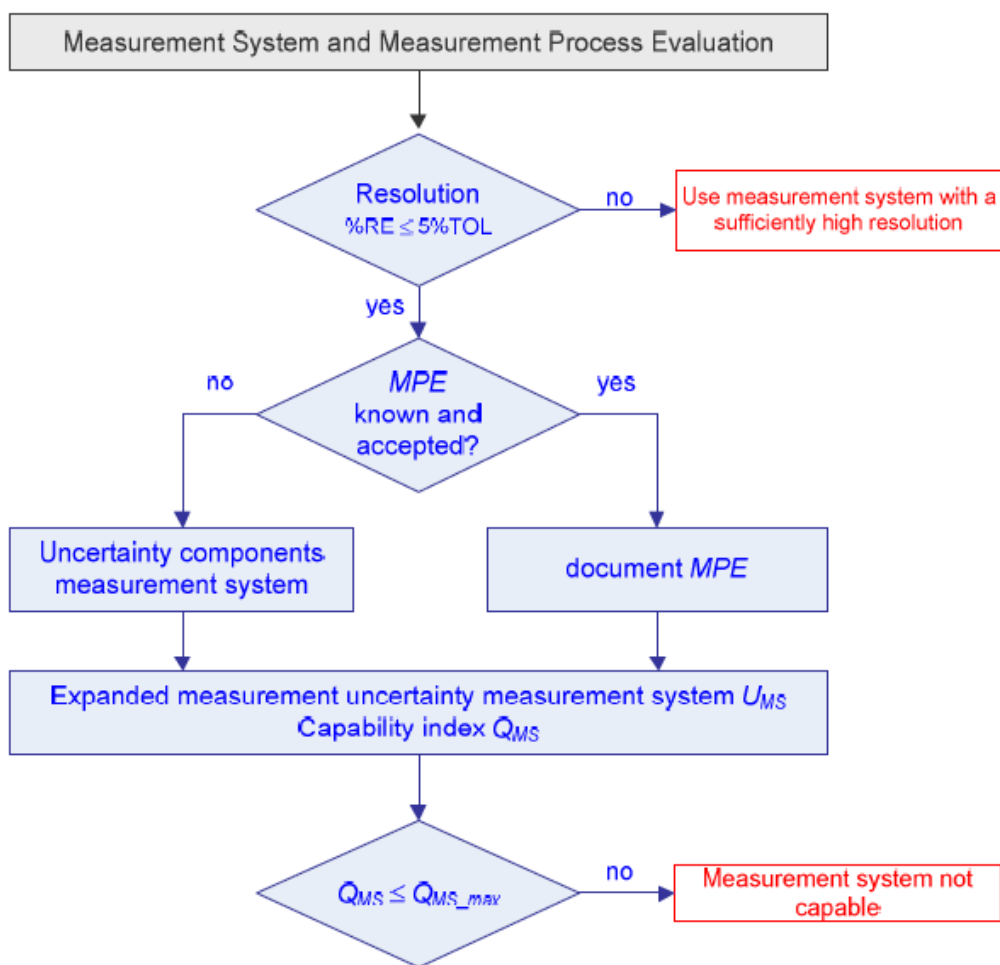
Obrázek 21: Diagram rybí kosti (Fishbone / Ishikawa) pro zdroje nejistoty měření [24]

Vyhodnocení měřících procesů probíhá s ohledem na relevantní nejistoty měření. Tyto nejistoty není nutné jen vzít v potaz, ale i vyčíslit, aby bylo možné určit celkovou nejistotu měření. Postup vyhodnocení způsobilosti procesu s určením složek nejistoty je znázorněn vývojovým diagramem (viz Obrázek 22). Obecné znázornění vyhodnocení měřících procesů znázorňuje Tabulka 9. Z vývojového diagramu jsou patrná rozhodovací kritéria pro vhodnost měřícího systému [24]:

- Kritérium rozlišení – rozlišení RE musí být menší než 5 % velikosti tolerančního pole měřeného prvku
- Kritérium ukazatele vhodnosti měřícího systému – Ukazatel vhodnosti Q_{MS} nesmí přesáhnout stanovenou hodnotu $Q_{MS-MAX} = 15 \%$, aby byl měřící systém považován za vhodný. Výpočet bude objasněn v postupu stanovování nejistot a vyhodnocování vhodnosti.

Tabulka 9: Obecný postup vyhodnocení měřících procesů dle VDA 5 [24]

Vstupní informace	Popis	Výsledek
Informace o měřícím systému, nebo o kontrolovaném znaku a etalonu	Analýza vhodnosti měřícího systému	rozšířená nejistota měřícího systému U_{MS} a ukazatel vhodnosti Q_{MS} .
Údaje k procesu měření včetně zohlednění všech druhů nejistot	Analýza vhodnosti měřícího procesu	rozšířená nejistota měřícího procesu U_{MP} a ukazatel vhodnosti Q_{MP} .
Údaje k procesu kontroly a příslušným rozšířeným nejistotám U_{MP}	Hodnocení shody s přihlédnutím k rozšířené nejistotě měření	Pole shody, případně pole přijetí (dle ISO 14253-1)
Údaje z měřícího systému procesu měření a o zkoušeném znaku	Průběžná prověrka vhodnosti procesu měření	Regulační diagramy s regulačními mezemi



Obrázek 22: Vývojový diagram pro určení vhodnosti procesu měření dle VDA 5 [24]

Vyhodnocování standartních nejistot – složky celkové nejistoty

ISO/IEC Guide 98-3 (GUM) poskytuje návod, jak určit nejistotu měření s ohledem na konkrétní měřicí proceduru. Složky nejistoty jsou podle tohoto návodu kvantifikovány jako standartní nejistoty. Podle způsobu, jakým jsou standartní nejistoty získávány je dělíme na dva druhy [24]:

- Nejistoty získané ze statistického vyhodnocení série měření (nejistoty typu A)
- Nejistoty získané z dostupných informací (nejistoty typu B)

Nejistoty získané odhadem z nejistot typu A a B jsou považovány za rovnocenné. Nejistotu typu A lze získat dvojím způsobem [24]:

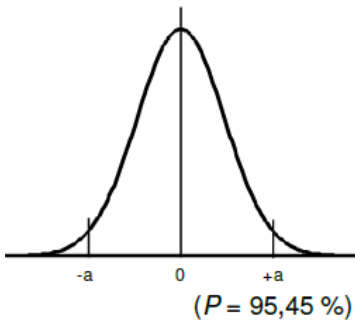
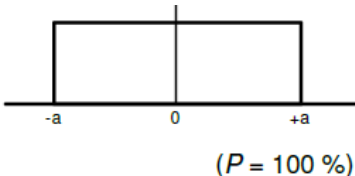
- Jako směrodatná odchylka s_g naměřená na etalonu (doporučený počet měření $n=25$)
- Pomocí metody ANOVA – obdobně jako v metoda MSA

Nejistotu typu B lze získat taktéž dvojím způsobem [24]:

- Ze známé rozšířené nejistoty měření (například rozšířená nejistota kalibrace U_{CAL} podělená koeficientem rozšíření k)
- Pokud není známá rozšířená nejistota z předchozích měření, je nutné nejistotu odhadnout. Odhad je proveden na základě předpokladu, jaké rozdělení daná nejistota má (většinou normální, nebo rovnoměrné). K výpočtu jsou poté použity meze vychýlení a , a faktor rozdělení b . Nejistota se poté vypočítá dle rovnice (12). Znázornění odhadu výpočtu je v tabulce

$$u(x_i) = a * b \quad (12)$$

Tabulka 10: Odhad nejistoty typu B dle rozdělení [24]

Typ rozdělení	Pravděpodobnostní funkce	Faktor rozdělení b	Standartní nejistota $u(x)$
Normální rozdělení		0,5	$u(x_i) = 0,5 * a$
Rovnoměrné rozdělení		$\frac{1}{\sqrt{3}}$	$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}}$

Návod pro určování typických standartních nejistot

Tabulka 11: Určování typických standartních nejistot [24]

Zdroj nejistoty	Poznámky	Typ A/B	Zdroj hodnoty
Rozlišení měřicího systému u_{RE}	RE je nejmenší krok, jakým může měřidlo rozlišit naměřenou hodnotu. Většinou bývá určeno nejmenším dílkem měřidla, nebo posledním digitem. Rozlišení má rovnoměrné rozdělení a vypočítá se podle vzorce: $u_{RE} = \frac{0,5 * RE}{\sqrt{3}}$	B	Odečet z měřidla, nebo specifikace od výrobce
Nejistota kalibrace u_{CAL}	V metrologii je běžně používán koeficient rozšíření $k=2$. Standartní nejistota kalibrace je získána podělením rozšířené nejistoty kalibrace U_{CAL} koeficientem rozšíření. Pozn.: předpokládá se, že nejistota kalibrace bude oproti tolerančnímu poli velmi nízká.	B	Kalibrační list / specifikace výrobce měřidla
Opakovatelnost u_{EVR}	Nejistota může být získána měřením na jednom, nebo dvou etalonech, vždy po 25 měřeních. Nejistota je vypočtena jako směrodatná odchylka výběru. V případě dvou etalonů jsou vyhodnoceny oba etalony zvlášť a použita je vyšší ze směrodatných odchylek výběru. Pokud jsou nejistoty opakovatelnosti známé, (uvedeny výrobcem měřidla) můžou se použít do výpočtu a jedná se poté o nejistotu typu B.	A/B	Statistický výpočet (např. nástroj Gauge Type 1 Study)
Nejistota vychýlení u_{BI}	Vychýlení BI (Bias) je vypočteno jako rozdíl referenční hodnoty a průměrné naměřené hodnoty. Průměrná hodnota je získána opakovaným měřením etalonu, podobně jako pro u_{EVR} . Standartní nejistota je z BI určena dle vztahu: $u_{BI} = \frac{BI}{\sqrt{3}}$	A	Statistický výpočet (např. nástroj Gauge Type 1 Study)
Nejistota z linearity u_{LIN}	1. možnost výpočtu – použití specifikace výrobce: hodnota je specifikována výrobcem, výpočet dle: $u_{LIN} = \frac{a}{\sqrt{3}}$ 2. možnost výpočtu – 10 měření na minimálně 3 etalonech (dohromady min. 30 hodnot). Etalony jsou pro každé měření upnuty a povoleny, vždy na stejném místě. Získaný soubor dat je vyhodnocen pomocí software podporující regresní analýzu. Z regresní	A	Specifikace od výrobce / regresní analýza

	analýzy je získána hodnota střední kvadratické odchylky linearity MSLF (Lacko f Fit Mean Square), Standartní nejistota linearity je odmocnina MSLF.		
Reprodukovatelnost operátorů (měření stejné součásti) u_{AV}	2 opakovaná měření na 10 měřených součástech, provedeno 2 nebo 3 operátory (při použití méně než 10 součástí jsou nutná 3 opakování) Pro vyhodnocení je využita analýza rozptylu ANOVA (obdobně jako v MSA pro GRR)	A	ANOVA
Opakovatelnost měřené součásti (bez vlivu operátora) u_{EVO}	2 opakovaná měření na 25 měřených součástech. Měřeno měřidlem, u kterého lze zanedbat vliv operátora (např. automat. MS) Pro opakovatelnost je opět použit obdobný výpočet jako v MSA, tedy analýza rozptylu.	A	ANOVA
Reprodukovatelnost měřicího systému (nejistota místa měř. sys.) u_{GV}	<p>Významné alespoň pro 2 měřicí systémy</p> <p><u>Hodnocení etalonů:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Posouzení podílu rozptýlení každého měřicího místa • srovnání měřené hodnoty \bar{x} s kalibrovanou hodnotou (Bias) • Max - Min porovnání měřené hodnoty x pro rozdílné měřicí systémy <p><u>Hodnocení sériových dílů:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Posouzení podílu rozptýlení každého měřicího místa, • Max - Min porovnání měřené hodnoty \bar{x} pro rozdílné měřicí systémy • Vzájemné působení dílu, měřicího systému atd. je obsaženo ve výsledku <p>Tyto složky nejistoty jsou zohledněny pomocí analýzy rozptylu (ANOVA)</p> <p>Provádět vždy se stejnými nastavovacími etalony a sériovými díly</p>	A	ANOVA
Reprodukovatelnost v čase u_{STAB}	<p><u>Krátkodobé posouzení:</u></p> <p>Zpravidla není stabilita předmětem zkoumání</p> <p><u>Dlouhodobá analýza stability:</u></p> <p>Pokud při základním šetření získáme podezření, že se výsledek měnil v čase, je doporučen vyšetřit nejistotu z definované řady měření</p> <p>Jako kontrolní díly mohou být použity jak etalony, tak sériové díly</p>	A	ANOVA, regulační diagram pro změnu stability v čase

<p>Nejistota tvaru, kvalita povrchu, materiálové vlastnosti objektu měření u_{OBJ}</p>	<p>Standartní nejistota může být určena více způsoby:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Z výkresové dokumentace (dovolená odchylka tvaru) • Z regulačního diagramu sériové výroby (odchylka tvaru) • Pomocí experimentálního měření skutečné odchylky tvaru) <p>Další vlastnosti musí být odhadnuta zvlášť, na základě materiálových listů, parametrů od výrobce, nebo provedením experimentu</p>	<p>A/B</p>	<p>Výkresová dokumentace, regulační diagramy, experimentální měření, tabulky a materiálové listy</p>
<p>Nejistota teploty u_T</p>	<p>Pro stanovení nejistoty vlivu teploty je k dispozici následující úvaha: existuje teplotní kompenzace?</p> <p>Nezávisle na kompenzaci, nebo pokud je k dispozici komplexní závislost na neznámých koeficientech tepelné roztažnosti, by mělo být skutečné chování roztažnosti stanoveno zkouškou. K tomu jsou objekty měření zahřívány a ve fázi chlazení zkoumány.</p> <p>Rozdíl mezi max. a min. hodnotou je použita pro odhad u_T</p>	<p>A/B</p>	<p>Experiment</p>
<p>Nejistota od dalších vlivů u_{REST}</p>	<p>Všechny možné vlivy, které působí na nejistotu měřicího systému, pokud je lze předpokládat nebo existují. Je třeba je posuzovat odděleně ze samostatného experimentu, tabulek nebo informací výrobce.</p>	<p>A/B</p>	<p>Experimenty dle příslušných dokumentů</p>
<p>Nejistota měřicího systému při známé maximální povolené chybě měření MPE</p>	<p>Pokud výrobce měřidla uvádí jeho maximální přípustnou chybu měření MPE, lze standartní nejistota měřicího systému u_{MS} zkráceně vypočítat ze vztahu:</p> $u_{MS} = \frac{MPE}{\sqrt{3}}$ <p>V případě, že má více dokumentovaných parametrů vliv na nejistotu měřicího systému, vypočítá se standartní nejistota dle vztahu:</p> $u_{MS} = \sqrt{\frac{MPE_1}{3} + \frac{MPE_2}{3} + \dots}$	<p>B</p>	<p>Kalibrační list / specifikace výrobce měřidla</p>

Po určení všech relevantních zdrojů nejistot lze určit standartní nejistoty měřicího systému a měřicího procesu. Jelikož v této části se VDA 5 prakticky neliší od normy ČSN ISO 22514-7, jsou tyto nejistoty zmíněny již v rovnicích (8) a (9). Jak bylo zmíněno, v metrologii je nejčastěji využíván koeficient rozšíření $k=2$, tudíž rozšířené nejistoty U_{MS} a U_{MP} získáme vynásobením standartních nejistot u_{MS} a u_{MP} . Z rozšířených nejistot lze přistoupit k výpočtu ukazatelů

vhodnosti Q_{MS} a Q_{MP} dle rovnic (12) a (13). Rovnice také obsahují kritéria Q_{MS-MAX} a Q_{MP-MAX} , která nesmí být překročena. TOL značí šířku tolerančního pole znaku [24].

$$Q_{MS} = \frac{2 * U_{MS}}{TOL} * 100 \% ; \quad Q_{MS} \leq Q_{MS-MAX} = 15 \% \quad (12)$$

$$Q_{MP} = \frac{2 * U_{MP}}{TOL} * 100 \% ; \quad Q_{MP} \leq Q_{MP-MAX} = 30 \% \quad (13)$$

Pro rozšíření monitorování procesu lze také vypočítat indexy způsobilosti měřidla C_g (14) a C_{gk} (15), ze kterých lze poté určit procentuální podíl hodnot, které se nacházejí v intervalu 0,2 TOL (pomocí transformace na studentovo rozdělení.) [24].

$$C_g = \frac{0,2 * TOL}{4 * s_g} \quad (12)$$

$$C_{gk} = \frac{0,1 * TOL - BI}{2 * s_g} \quad (13)$$

Zanedbá-li se u_{CAL} a u_{BI} ve výpočtu u_{MS} , může být potom $Q_{MS} = C_g$. Hodnota $C_g = 1,33$ odpovídá hodnotě $Q_{MS-MAX} = 15 \%$ [24].

Pozn.: V některých podnikových příručkách se lze setkat se výběrovou směrodatnou odchylkou $6*s_g$ resp. $3*s_g$ (pro konfidenční interval $P=99,73 \%$) namísto $4*s_g$ resp. $2*s_g$ (pro konfidenční interval $P=95,45 \%$). V takovém případě by hodnota indexu způsobilosti $C_g = 1,33$ odpovídala hodnotě $Q_{MS-MAX} = 10 \%$ [24].

Po vyhodnocení, zdali je měřicí systém a proces způsobilý, lze přejít k určení minimálních tolerancí, pro které bude měřicí systém, resp. proces stále ještě vhodný. Minimální tolerance měřicího systému $TOL_{MIN-UMS}$ a procesu $TOL_{MIN-UMP}$ jsou vypočteny dle rovnic (14) a (15) [24].

$$TOL_{MIN-UMS} = \frac{2 * U_{MS}}{Q_{MS-MAX}} * 100 \% \quad (14)$$

$$TOL_{MIN-UMP} = \frac{2 * U_{MP}}{Q_{MP-MAX}} * 100 \% \quad (15)$$

4 SYSTÉMOVÝ ROZBOR URČENÍ VHODNOSTI MĚŘÍČÍHO RAMENE

4.1 Problémová situace

Hlavním cílem této práce je posouzení způsobilosti / vhodnosti měřícího ramene Hexagon Absolute Arm 83 Compact. Pro tyto účely byly představeny tři přístupy, podle kterých lze danou problematiku řešit a podle kterých by se případně dalo i v případě reálného použití ve výrobě certifikovat. Metody byly popsány podle své podrobnosti a také v závislosti na dostupnosti potřebných dokumentů.

Pro určení způsobilosti / vhodnosti ramene byly jako etalony použity 2 kusy přesného obrobku, na kterých budou v rámci této práce pro vyhodnocení měřeny geometrické tolerance válcovitosti, kolmosti, rovnoběžnosti, rovinnosti, a polohy (pro 5 děr), navíc bude vyhodnocena rozměrová tolerance největšího rozměru součásti. Použitou součást (Spindle housing – domek vřetene CNC, viz Obrázek 23) bude nezbytné pro účely měření připravit, bude nezbytné navrhnout vhodné upnutí obrobku, navrhnout měřící sekvenci v programu kompatibilnímu s ramenem a naměřené hodnoty bude nutné vyhodnotit podle zvolené metodiky.



Obrázek 23: Etalon – Domek vřetene CNC

Pro účely této práce se jeví jako nejlepší varianta metody pro určení způsobilosti / vhodnosti měřidla metoda dle VDA 5. Ze zmíněných tří variant se nejpodrobněji zabývá nejistotami, které by mohly mít vliv na měření a je nejpodrobnější. Oproti normě MSA, která původně vznikla pro potřeby amerického automobilového průmyslu je VDA 5 v Evropě relevantnější. V neposlední řadě metoda VDA 5 lépe poukazuje, které dílčí zdroje nejistoty mají zásadní vliv na výslednou nejistotu měření.

4.2 Formulace problému

Pro měřící rameno je zapotřebí vyhodnotit jeho vhodnost pro měření jednotlivých prvků na etalonu. Měřené prvky jsou rozměrová tolerance a geometrické tolerance o různých velikostech tolerančního pole. Tolerance se pohybují v řádu jednotek i stovek mikrometrů a výstupem této práce bude posouzení, pro které z těchto tolerancí je rameno dle metodiky VDA 5 vhodné.

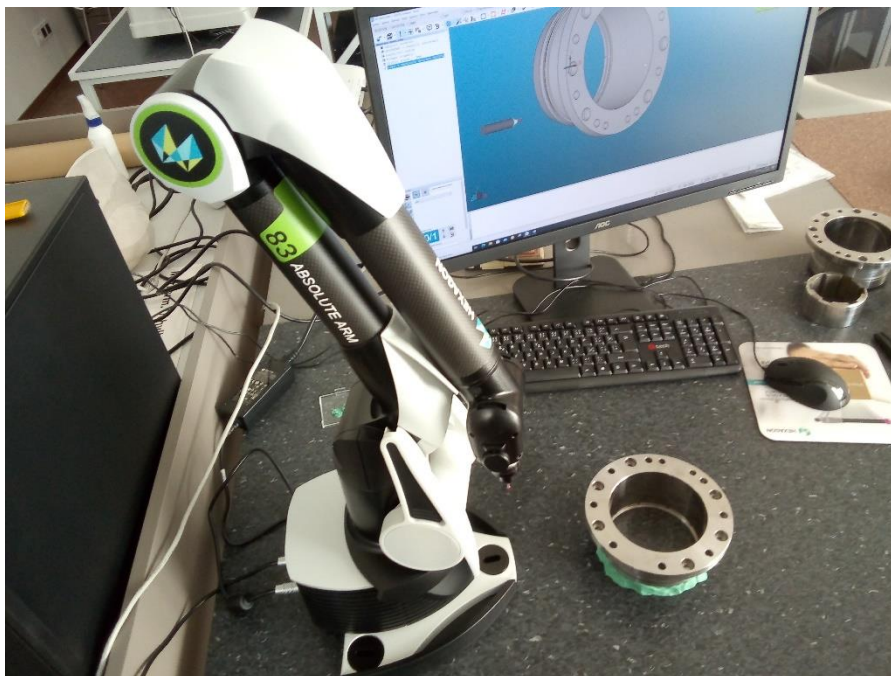
4.3 Formulace cílů a řešení

Během této práce bude nutné postupně splnit tyto dílčí body:

- Získání všech potřebných informací pro měření
- Příprava součásti a měřicího systému, volba upnutí součásti
- Návrh měřicí sekvence a podle ní provést měření
- Z naměřených výsledků a získaných informací určit hodnotu všech relevantních standartních nejistot měření
- Ze standartních nejistot určit celkovou nejistotu měření a pro jednotlivé měřené prvky stanovit, zda je pro ně měřicí systém a proces vhodný
- Stanovení, pro jaké nejmenší toleranční pole je měřidlo stále vhodné

4.4 Popis měřicího systému

Měření proběhlo v metrologické laboratoři na fakultě strojního inženýrství VUT v Brně. Samotné rameno bylo postaveno na stole a pro zajištění přenosu dat a napájení kabelově připojeno k PC a elektrické zásuvce. V počítači byl nainstalován software pro potřeby měření a ukládání dat. Součást byla pro potřeby měření umístěna do měřicího objemu ramene a připevněna ke stolu pomocí plastické hmoty. Laboratoř byla také vybavena teploměrem pro snímání teploty místnosti. Měřicí systém znázorňuje Obrázek 24.



Obrázek 24: Měřicí systém

4.5 Systém podstatných zdrojů nejistoty měření

Z diagramu rybí kosti (viz Obrázek 21) který znázorňuje zdroje nejistoty měření stručně rozebereme základní zdroje nejistoty:

Etalon

Jako etalon byl použit přesně obráběný díl. V příloze C je vložen výkres součásti se zakótovanými rozměry, které budou měřeny. Materiálem etalonu je ocel 12 050, která byla tepelně zpracována na pevnost 700 ± 50 MPa. Hmotnost etalonu je 2,2 kg.

Upínací přípravek

Etalon byl ke stolu připevněn pomocí plastické hmoty, která mu zabraňovala v pohybu. Vzhledem k vybavení laboratoře nebyl použit lepší upínací přípravek, navíc upnutí pomocí plastické hmoty usnadňovalo přístup k měřeným částem obrobku.

Měřidlo

Použité měřidlo a jeho parametry bylo podrobně rozebráno v rešeršní části. V laboratoři bylo umístěno na pracovním stole bez mechanického spojení (výrobce uvádí, že upnutí není nezbytně nutné). Rozlišení měřidla je $RE = 0,001$ mm. K ramenu byl také k dispozici kalibrační list. Měřidlo bylo vybaveno dotekovou sondou s hrotem o průměru 3 mm (viz Obrázek 25).



Obrázek 25: Použitá sonda s 3 mm hrotem

Metoda měření

Metoda spočívala v kontaktním měření jednotlivých bodů pro vyhodnocení geometrické charakteristiky. Počty a rozmístění jednotlivých bodů budou rozebrány v další kapitole.

Operátor

Měření jsem prováděl bez předchozí zkušenosti s kontaktním měřením pomocí ramene, ovšem po důkladném zaškolením mým vedoucím. Jelikož jsem byl jediným operátorem, který měření prováděl, nebyla do měření vnesena nejistota způsobená různou kvalifikací operátorů. Jelikož výsledek měření byl vypsán do protokolu měření (viz příloha B), byla tím podstatně snížena pravděpodobnost chyby z odečtení naměřené hodnoty.

Metoda hodnocení

Matematický model a statistické metody pro řešení práce byly dostatečně shrnuty v předchozí kapitole.

Prostředí

Z parametrů prostředí byla změřena teplota, která během měření měla hodnotu 25,3 °C. Vliv teploty by na měření neměl mít veliký dopad, jelikož výrobce uvádí, že rameno je navrženo pro použití mimo metrologickou laboratoř, tedy do výrobního procesu, kde není přesně regulovaná teplota.

5 NÁVRH MĚŘÍCÍHO PROCESU ETALONU

5.1 Určení geometrických prvků pro měření geometrických tolerancí

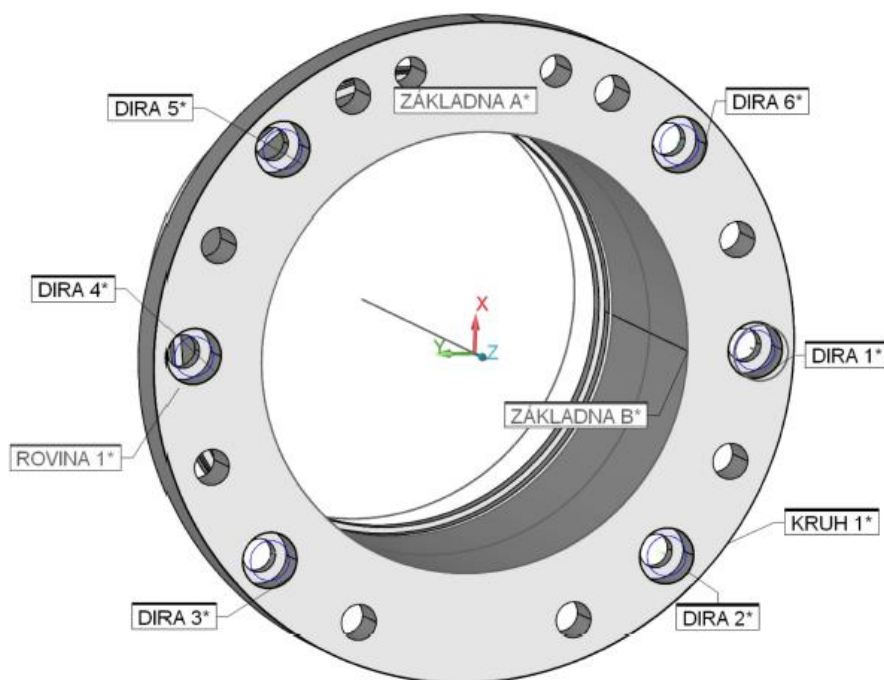
Měřicí rameno měří kontaktně snímáním bodů na povrchu měřené součásti. Aby mohla být určena rozměrová charakteristika měřených prvků, je nutné určit minimální počet potřebný pro přesné definování základních geometrických těles. Měřený etalon se v tomto případě skládá z rovin a válcových ploch. Pro určení geometrické tolerance polohy bude pro polohu osy děr použita také geometrická kružnice. Minimální počet prvků pro jejich definování ve 3D prostoru znázorňuje Tabulka 12.

Tabulka 12: Minimální počet bodů pro definování geometrických prvků v prostoru

Geometrický prvek	Minimální počet bodů
Kružnice	3
Válcová plocha	3
Rovina	3

Pozn.: Aby byla válcová plocha přesně definována 3 body, je nezbytné znát také směr osy tohoto válce.

Protože minimální počet bodů pro přesné měření geometrických prvků nedává prostor pro chyby při měření a odchylky tvaru, je v praxi počet bodů navýšen a naměřené body přesněji určí rozměrovou charakteristiku geometrického prvku. Na obrázku (Obrázek 26) jsou zobrazeny všechny měřené prvky, Tabulka 13 je výčtem jednotlivých prvků s počtem bodů, které byly měřeny k vyhodnocení jejich rozměru.



Obrázek 26: Geometrické prvky na etalonu.

Tabulka 13: Počty měřených bodů jednotlivých geom. prvků

Geometrický prvek	Vyhodnocovaná charakteristika	Počet měřených bodů
Základna A	Rovinnost	9
Základna B	Válcovitost, Kolmost vůči základně A	15 (5 bodů ve 3 výškách)
Kruh 1	Rozměrová tolerance průměru	5
Rovina 1	Rovnoběžnost se základnou A	9
Díra 1-6	Geom. Tolerance polohy vůči základnám A a B	5

Pozn.: Díra 1 byla použita také při odebrání vazeb etalonu v měřícím softwaru, proto byla měřena 2x, při měření pro odebrání vazem na ní bylo naměřeno 15 bodů.

5.2 Příprava před měřením

Pro potřeby byly etalony očištěny čistidlem na bázi alkoholu, které se po očištění rychle odpařilo a nezanechalo na etalonech film. Před měřením byla také očištěna plocha stolu, na které byl výrobek připevněn a také byl očištěn hrot sondy. Poté byla součást upnuta ke stolu pomocí plastické hmoty, viz Obrázek 27.



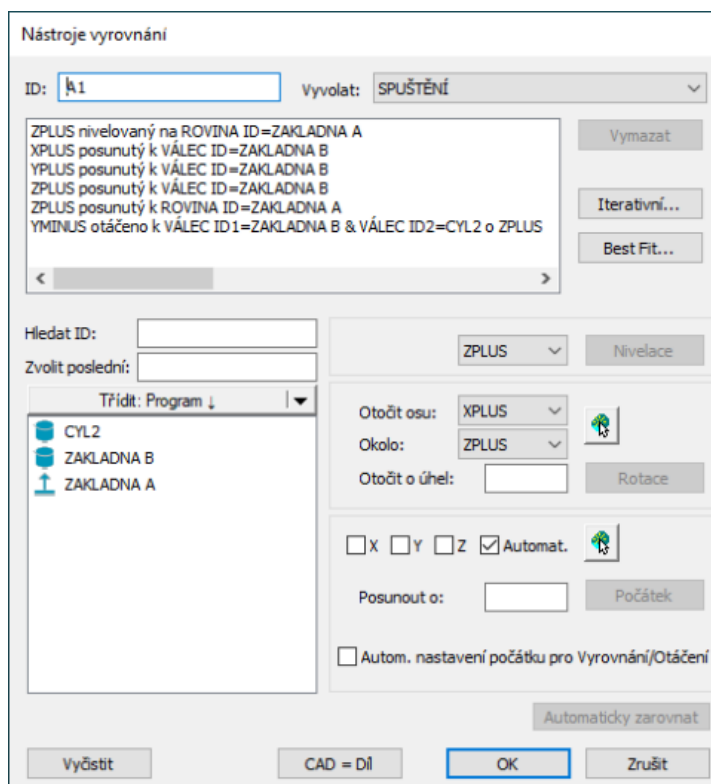
Obrázek 27: Upnutí součásti pomocí plastické hmoty

5.3 Odebrání všech stupňů volnosti, návrh měřící sekvence

V softwaru pro měření je nutné na začátku měření odebrat virtuálnímu modelu etalonu všechny stupně volnosti a měřením geometrických prvků sjednotit polohu virtuálního modelu se skutečnou polohou etalonu. Díky tomu je také souřadnicový systém virtuálního modelu sjednocen se souřadným systémem skutečného etalonu. K odebrání stupňů volnosti je v programu zapotřebí určit geometrické prvky, které budou po naměření definovat jeho polohu v prostoru. Obecně platí, že objekty v prostoru mohou mít 6 stupňů volnosti (posuv ve směru os x , y , z a rotace kolem těchto tří os). Obrázek 28 ukazuje softwarové prostředí pro definici

polohy etalonu odebráním stupňů volnosti. Pro odebrání těchto 6 stupňů volnosti byly zvoleny tyto geometrické prvky:

- Základna A – definicí jsou odebrány 3 stupně volnosti (poloha ve směru osy z, rotace kolem os x a y)
- Základna B – definicí jsou odebrány 2 stupně volnosti (poloha ve směru os x a y)
- Díra 1 – definicí je odebrán poslední stupeň volnosti (rotace kolem osy z)

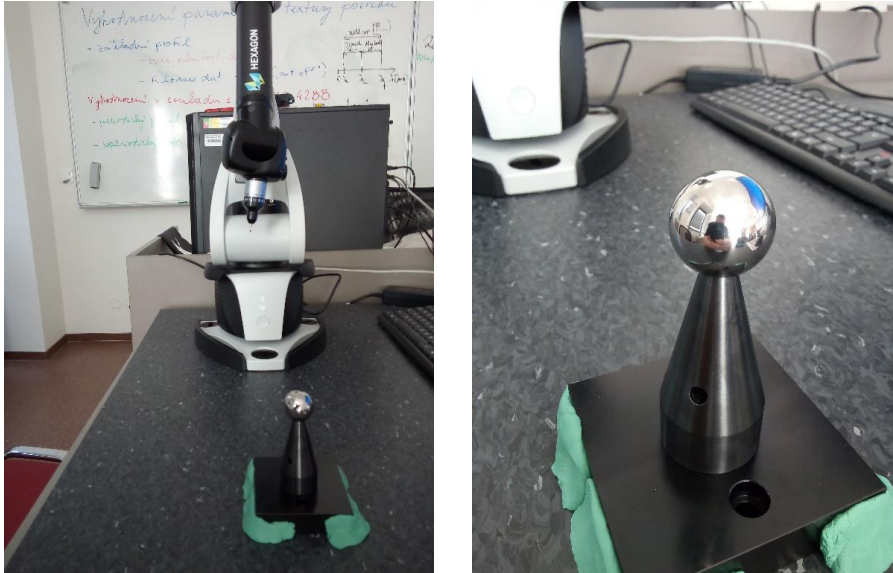


Obrázek 28: Softwarové prostředí pro odebrání stupňů volnosti etalonu

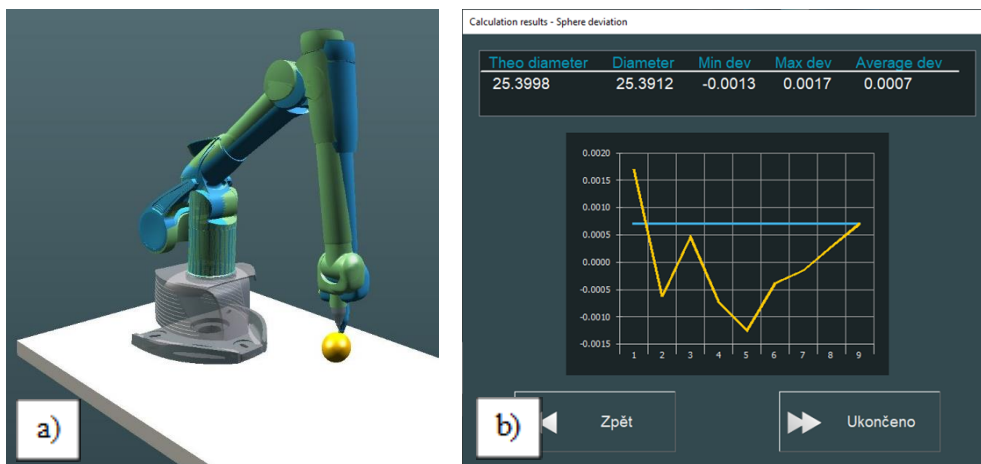
Měřicí sekvence poté byla provedena v pořadí jako je uvedeno v tabulce 13 s jediným rozdílem, že po změření základen byla změřena Díra 1 (pro definici polohy pojmenováno CYL2), aby mohlo měření pokračovat již s definovanou polohou etalonu.

5.4 Ověření správného fungování ramene

Výrobce s měřícím ramenem dodal taky kalibrovanou kouli (viz Obrázek 29) o známém průměru ($\varnothing d = 25,39975$ mm), která je běžně používána při kalibraci ramene (kalibrační postup na konce 2. kapitoly). Pro ověření, že je rameno správně nastaveno, byla tato kalibrovaná koule změřena pro ověření, že její rozměr bude vyhodnocen v mezích, daných specifikacemi ramene. Pro tyto účely byl software ramene vybaven předpřipravenou měřicí sekvencí, s podrobným znázorněním polohy, v jaké má být rameno během měření (Obrázek 30a). Na povrchu kalibrované koule bylo naměřeno dle návodu 9 bodů. Dle specifikace výrobce by odchylka ani jednoho z bodů neměla přesáhnout hodnotu 0,024 mm. Jak je patrné z výstupního grafu (Obrázek 30b), tato podmínka byla splněna, průměrná odchylka byla 0,0007 mm.



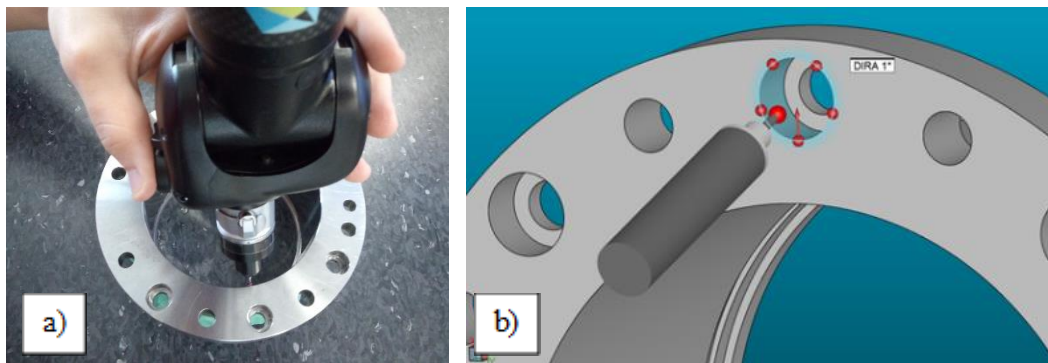
Obrázek 29: Sestava pro ověření rozměru kalibrované koule



Obrázek 30: a) zobrazení polohy pro měření, b) vyhodnocení ověření rozměru koule

5.5 Měření

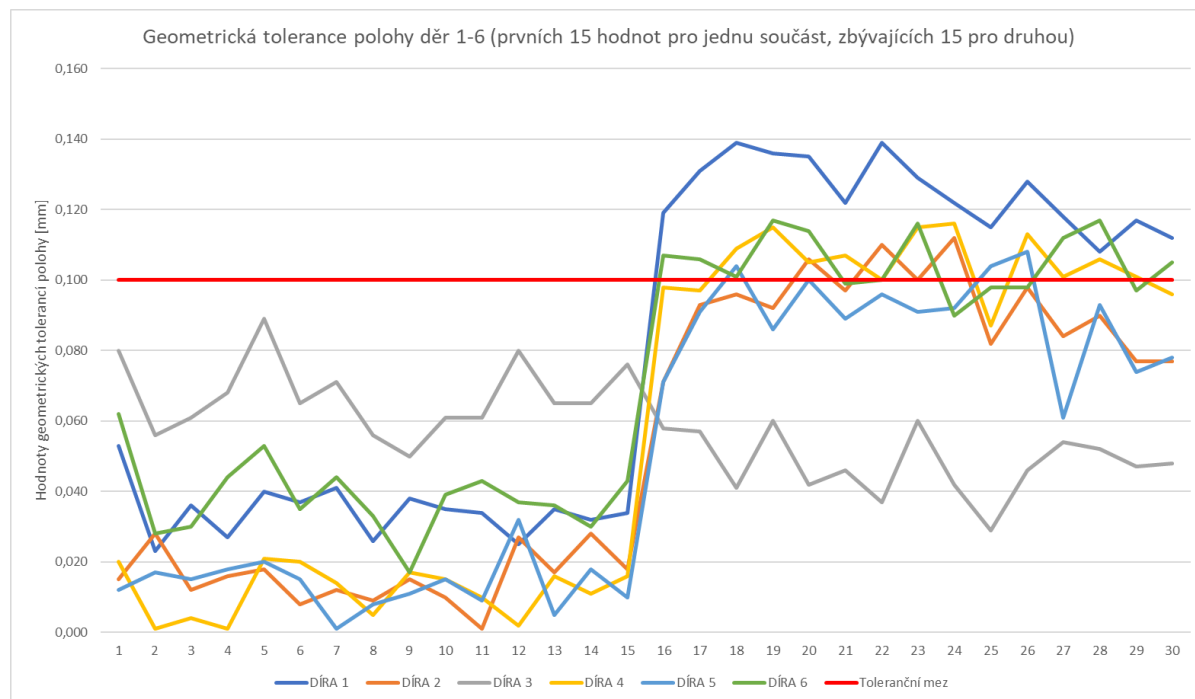
Během měření byla průběžně kontrolována poloha hrotu vzhledem k etalonu (Obrázek 31a), její poloha byla také znázorněna virtuálně v softwaru (Obrázek 31b).



Obrázek 31: Sledování hrotu při měření a) vůči etalonu, b) vůči virtuálnímu modelu

6 VÝSLEDKY MĚŘENÍ A STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ

V průběhu vyhodnocování byl zjištěn zásadní problém. Měřená součást byla pro vyhodnocování vhodnosti vybrána jako etalon proto, že v metrologické laboratoři nebyl jiný etalon, který by zhmotňoval hned několik geometrických tolerancí různých typů (válcovitost, kolmost, poloha atd.) o různých velikostech tolerančního pole (od 0,004 po 0,1 mm). Zvolen byl také proto, jelikož se v laboratoři nacházely hned dva kusy a byl k nim k dispozici i výrobní výkres. Základním předpokladem pro použití součásti jako etalon je, že byla vyrobena v souladu se specifikací na výkresu. Také by bylo vhodné, aby byly měřené charakteristiky etalonu doloženy nejen výrobním výkresem, ale také kalibračním listem etalonu (pro zajištění metrologické návaznosti). Z porovnání hodnot bylo okamžitě zřejmé, že jedna ze součástí není ve shodě se specifikací na výkresu (výkres viz Příloha C). Nejlépe to lze pozorovat při porovnání hodnot obou dílů v grafu, ve kterém byly porovnány geometrické tolerance polohy děr (Díra 1 až Díra 6). Z grafu je patrné, že pro první součást byly polohy všech děr v tolerančním poli, zatímco pro druhou součást toleranční mez několikrát překročily.



Obrázek 32: Porovnání geometrických tolerancí polohy obou součástí

Z toho důvodu byla druhá součást z experimentu vyřazena. Vyhodnocování vhodnosti měřicího systému je možné i s jedním etalonem, ovšem vyřazení druhého kusu značně komplikuje vyhodnocení vhodnosti měřicího procesu.

6.1 Výpočet koeficientů způsobilosti

V normě jsou uvedeny vzorce pro výpočet koeficientu způsobilosti (rovnice (12) a (13)). Jak bylo zmíněno, jde o jednoduchý výpočet, který nebere v úvahu systematické chyby, ale pouze porovnává variabilitu naměřených hodnot vůči tolerančnímu poli. Proto byly tyto koeficienty vyhodnoceny jako první. Výpočty byly vyhodnoceny v programu Microsoft Excel aplikováním

uvedených rovnic. Hodnoty tolerančního pole TOL byla odečtena z výkresu (Příloha C) Pro vzorový výpočet byly dosazeny hodnoty pro Díru 1.

Vzorový výpočet:

$$C_g = \frac{0,2 * TOL}{4 * s_g} = \frac{0,2 * 0,1 \text{ mm}}{4 * 0,003637 \text{ mm}} \doteq 1,375$$

$$C_{gk} = \frac{0,1 * TOL - BI}{2 * s_g} = \frac{0,1 * 0,1 \text{ mm} - 0,0306 \text{ mm}}{2 * 0,003637 \text{ mm}} \doteq 2,836$$

V případě Díry 1 byly oba koeficienty větší než 1,33, ovšem v ostatních případech tomu tak nebylo. V následující tabulce jsou výsledky hodnot pro všechny vyhodnocované měřené vlastnosti, červeně jsou ty, v jejichž případě značily koeficienty nezpůsobilost.

Tabulka 14: Hodnoty koeficientů způsobilosti

Měřený prvek	C_g	C_{gk}
VÁLCOVITOST	0,115	2,378
KOLMOST	0,065	1,185
ROVNOBĚŽNOST	0,172	2,524
ROVINNOST	0,872	1,511
VNĚ. PRŮMĚR	2,036	1,093
DÍRA 1	1,375	2,836
DÍRA 2	1,557	1,521
DÍRA 3	1,429	7,206
DÍRA 4	1,354	0,483
DÍRA 5	1,374	0,632
DÍRA 6	1,354	2,378

Z koeficientů způsobilosti je zřejmé, že některé prvky mají vůči svému tolerančnímu poli příliš velkou variabilitu. Jedná se zejména o geometrické tolerance válcovitost, kolmost rovnoběžnost a rovinnost, jelikož ty měly vůči ostatním měřeným vlastnostem podstatně menší toleranční pole. I přesto pro tyto prvky bude vyhodnocena vhodnost měřícího systému, aby bylo možné určit minimální velikost tolerančního pole, pro které by byl systém vhodný.

6.2 Výpočet vhodnosti měřícího systému

První podmínkou vhodného MS je, aby velikost rozlišení RE byla menší než 5% velikosti tolerančního pole. Z tohoto lze vypočítat minimální velikost tolerance, pro kterou je tato podmínka splněna dle vztahu:

$$\%RE = \frac{RE}{TOL} \leq 5 \% \Rightarrow TOL_{RE-MIN} \geq \frac{RE}{0,05} = \frac{0,001}{0,05} = 0,02 \text{ mm}$$

Z tohoto výpočtu je zřejmé, že pro tolerance válcovitosti, kolmosti rovinnosti a rovnoběžnosti bude systém nevhodný. I tak s nimi budeme počítat pro vyhodnocení minimální tolerance pro vhodnost. Pro určení vhodnosti měřícího systému je nutné vypočítat hodnotu všech relevantních standartních nejistot. Dle rovnice (8) je zapotřebí určit hodnotu nejistot u_{RE} , u_{EV} ,

u_{BI} , u_{CAL} , u_{LIN} a z nich vypočítat kombinovanou nejistotu měřicího systému u_{MS} . Pro určení jednotlivých nejistot je návod uveden v tabulce 11. Pro vzorový výpočet budou dosazovány hodnoty opět pro prvek Díra 1.

6.2.1 Výpočet dílčích složek kombinované nejistoty měřicího systému

Nejistota rozlišení:

Pozn.: tato hodnota bude pro všechny vyhodnocované prvky stejná. Rozlišení měřicího ramene bylo 0,001 mm.

$$u_{RE} = \frac{0,5 * RE}{\sqrt{3}} = \frac{0,5 * 0,001 \text{ mm}}{\sqrt{3}} = 0,000288675 \text{ mm}$$

Nejistota opakovatelnosti:

Pozn.: Nejistota je vypočtena jako směrodatná odchylka výběru. V našem případě má výběr velikost $n=30$. Pro zamezení chybám, které by nastaly při důsledném dosazení do uvedené rovnice byla hodnota ve skutečnosti vypočtena pomocí funkce SMODCH.VÝBĚR.S v programu excel.

$$u_{EVR} = s_g = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n (x_i - x_{bar})^2} = 0,003637612 \text{ mm}$$

Nejistota vychýlení (Bias):

Pozn.: vychýlení bylo vypočteno jako rozdíl referenční hodnoty z výkresu a aritmetického průměru naměřených hodnot. Ve vzorci je uveden jako BI.

$$u_{BI} = \frac{BI}{\sqrt{3}} = \frac{|x_e - \bar{x}|}{\sqrt{3}} = \frac{|0,0306 - 0|}{\sqrt{3}} = 0,017686163 \text{ mm}$$

Nejistota kalibrace:

Kalibrace (dle normy ISO 10360-12) měřicího ramene a z ní vycházející parametry byly popsány ve druhé kapitole této práce. Dle certifikačního listu proběhla kalibrace v listopadu roku 2019 a měřidlo bylo ve shodě se specifikací výrobce. Ze čtyř uvedených parametrů má největší vypovídající hodnotu parametr E_{UNI} – maximální povolená chyba pro měření délky. Jeho hodnota bude pro výpočet považována za rozšířenou nejistotu kalibrace (koeficient rozšíření $k=2$).

$$u_{CAL} = \frac{U_{CAL}}{2} = \frac{E_{UNI}}{2} = \frac{0,024}{2} = 0,012 \text{ mm}$$

Nejistota linearity:

Pozn.: Jak bylo v práci uvedeno, jako hlavní příčinu nelinearity jsou považovány kalibrační problémy, nebo špatná údržba měřidla. Jelikož rameno má platný certifikát dle ISO 10360-12, lze předpokládat, že je správně kalibrováno. Problémy s údržbou by taky neměly mít veliký vliv, jelikož rameno není z laboratoře nijak přemístováno (je neustále připojeno k PC a zdroji napětí) a v laboratoři má své stálé místo. Postup pro ověření linearity byl popsán v tabulce 8, ovšem pro měření je potřeba sada etalonů rovnoměrně pokrývajících měřicí rozsah ramene (např. etalony Ball Bar, Cone Bar nebo Step Bar používané pro certifikaci dle ISO 10360-12). Vhodný etalon ovšem v metrologické laboratoři nebyl dostupný. Proto bude v tomto vyhodnocení hodnota linearity zanedbána (rovna 0).

$$u_{LIN} = 0$$

Zbytková nejistota měřicího systému:

Žádný další vliv nebyl brán v rámci určování vhodnosti měřicího systému v potaz. Vliv teploty vstupuje do výpočtů až při určování vhodnosti měřicího procesu, a bude vysvětlen později.

Kombinovaná nejistota a rozšířená nejistota měřicího systému:

Po vypočtení všech relevantních složek nejistoty bylo dosazeno do rovnice (8), vypočítaná kombinovaná nejistota u_{MS} byla rozšířena koeficientem $k=2$ pro získání rozšířené nejistoty měřicího systému U_{MS} .

$$u_{MS} = \sqrt{u_{CAL}^2 + u_{LIN}^2 + u_{BI}^2 + \max\{u_{RE}^2; u_{EVR}^2\} + u_{MS-REST}^2}$$
$$= \sqrt{0,012^2 + 0^2 + 0,017686163^2 + 0,003637612^2 + 0^2} = 0,021680235 \text{ mm}$$

Rozšíření:

$$U_{MS} = u_{MS} * k = 0,021680235 * 2 = 0,04336047 \text{ mm}$$

6.2.2 Vyhodnocení vhodnosti měřicího systému

Vzorový výpočet vhodnosti měřicího systému:

Po vypočtení rozšířené nejistoty měřicího systému U_{MS} lze přejít k určení koeficientu vhodnosti měřicího systému Q_{MS} . Ukazatel je poté porovnán s kritériem ukazatele vhodnosti QMS-MAX, který má hodnotu 15 %.

$$Q_{MS} = \frac{2 * U_{MS}}{TOL} * 100 = \frac{2 * 0,04336047}{0,1} * 100 = 86,72094027 \%$$

$$Q_{MS} \not\leq Q_{MS-MAX}$$

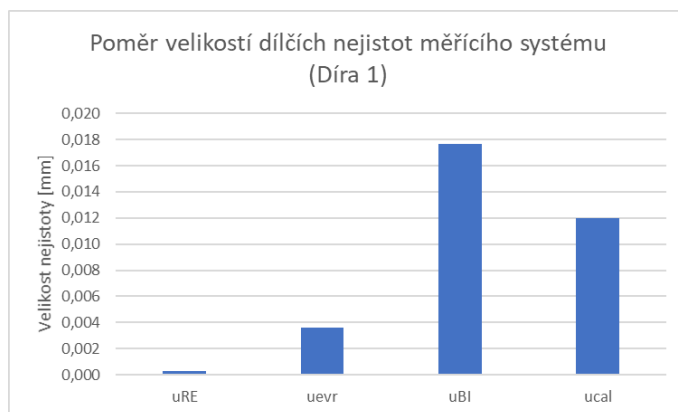
Dle výpočtu je měřicí systém za daných podmínek pro toleranci $TOL=0,1$ mm nevhodný.

Výpočet minimální tolerance, pro kterou by za stejných podmínek byl měřicí systém vhodný:

Pro určení minimální tolerance použijeme rovnici (14):

$$TOL_{MIN-UMS} = \frac{2 * U_{MS}}{Q_{MS_MAX}} * 100 = \frac{2 * 0,04336047}{15} * 100 = 0,578139602 \doteq 0,6 \text{ mm}$$

Pro díru 1 by byl za stejných podmínek dle VDA 5 měřicí systém vhodný, pokud by velikost tolerančního pole TOL měla velikost 0,6 mm. Již zmiňovanou výhodou metody VDA 5 je možnost určit z výpočtu vliv jednotlivých složek nejistoty na celkovou nejistotu měřicího systému. Poměr vlivu od jednotlivých složek nejistoty zobrazuje Obrázek 33.



Obrázek 33: Vliv dílčích složek nejistoty na celkovou nejistotu měřicího systému

Obdobný výpočet a grafické vyhodnocení bylo provedeno i pro ostatní měřené prvky, výsledné hodnoty dílčích nejistot jsou v tabulce 15. Výsledné hodnoty ukazatele vhodnosti a minimální tolerance pro vhodnost měřicího systému jsou v tabulce 16.

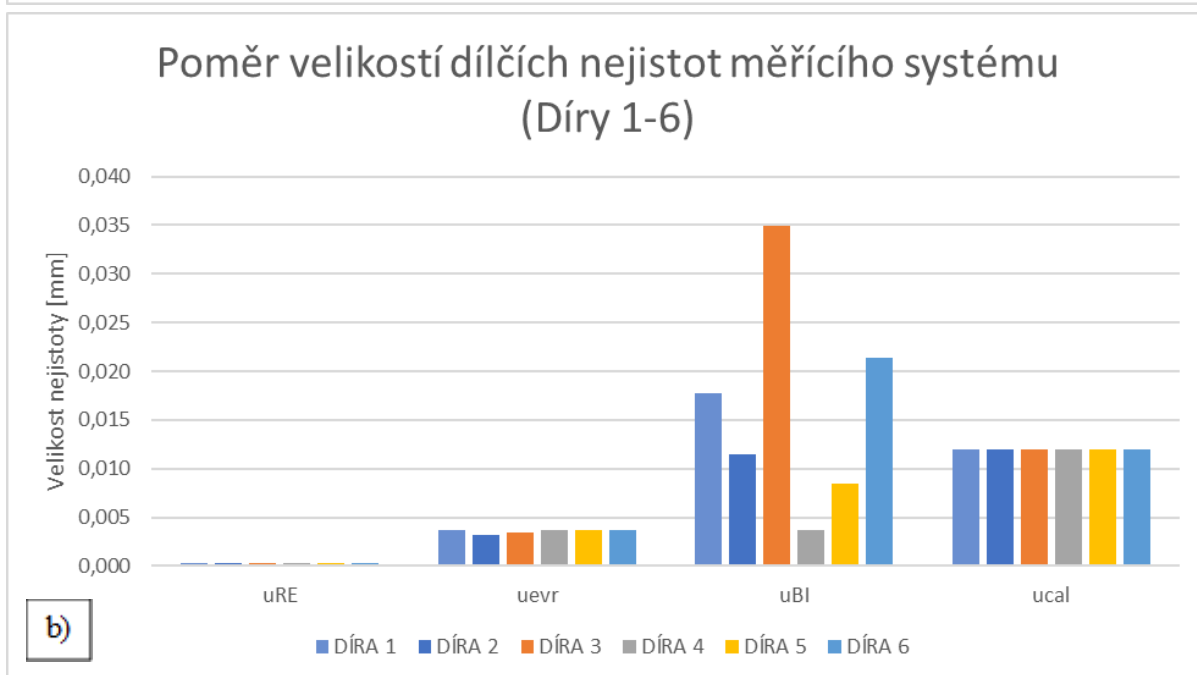
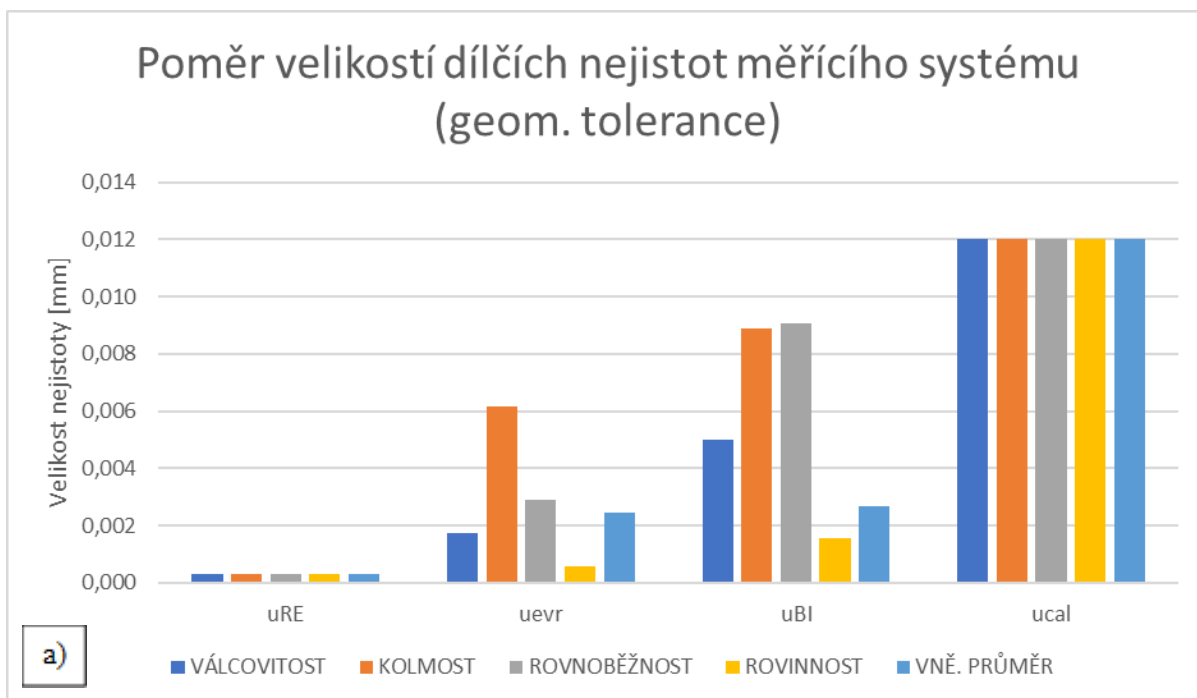
Tabulka 15: Hodnoty dílčích nejistot (rozměry v mm)

	u_{RE}	u_{EVR}	u_{BI}	u_{CAL}	u_{MS}
VÁLCOVITOST	0,000289	0,001738	0,005004	0,012	0,013117
KOLMOST	0,000289	0,006145	0,008872	0,012	0,016139
ROVNOBĚŽNOST	0,000289	0,002911	0,009064	0,012	0,015318
ROVINNOST	0,000289	0,000573	0,001578	0,012	0,012117
VNĚ. PRŮMĚR	0,000289	0,002456	0,002675	0,012	0,012537
DÍRA 1	0,000289	0,003638	0,017686	0,012	0,021680
DÍRA 2	0,000289	0,003211	0,011412	0,012	0,016869
DÍRA 3	0,000289	0,003499	0,034891	0,012	0,037063
DÍRA 4	0,000289	0,003694	0,003714	0,012	0,013094
DÍRA 5	0,000289	0,003639	0,008429	0,012	0,015109
DÍRA 6	0,000289	0,003692	0,021343	0,012	0,024762

Tabulka 16: Vyhodnocení ukazatelů vhodnosti měřicích systémů a minimální tolerance pro vhodný MS

	U_{MS}	Q_{MS}	$TOL_{MIN-UMS}$
VÁLCOVITOST	0,0262343	1311,71	0,350
KOLMOST	0,0322786	806,97	0,430
ROVNOBĚŽNOST	0,0306359	612,72	0,408
ROVINNOST	0,0242338	484,68	0,323
VNĚ. PRŮMĚR	0,0250749	50,15	0,334
DÍRA 1	0,0433605	86,72	0,578
DÍRA 2	0,0337374	67,47	0,450
DÍRA 3	0,0741253	148,25	0,988
DÍRA 4	0,0261871	52,37	0,349
DÍRA 5	0,0302188	60,44	0,403
DÍRA 6	0,0495235	99,05	0,660

Z ukazatelů Q_{MS} je patrné, že měřicí systém nebyl za daných podmínek vhodný ani pro jednu měřenou toleranci. Pro vypočítané minimální tolerance, pro které by byl MS stále ještě vhodný byl vytvořen výkres (Příloha D). V případě geometrických tolerancí válcovitosti ($TOL=0,004$ mm), kolmosti ($TOL=0,008$ mm), rovnoběžnosti a rovinnosti (u obou $TOL=0,01$ mm) vyšly hodnoty velmi vysoké. Z grafického vyhodnocení vlivu jednotlivých nejistot (viz Obrázek 34) je zřejmé že v jejich případě měla největší vliv nejistota kalibrace u_{CAL} . Z toho plyne, že měřidlo s maximální povolenou chybou pro měření délky, definovanou parametrem $E_{UNI} = 0,024$ mm je nutné vyměnit za přesnější měřicí systém, pokud by za daných podmínek měl být dle VDA 5 vhodný.



Obrázek 34: Vliv dílčích nejistot na a) geom. tolerance, b) geom. tol. polohy děr

Pokud použijeme vzorec z tabulky 11 pro zkrácený výpočet kombinované nejistoty měřicího systému pomocí parametru MPE, lze vypočítat, jakou by parameter MPE musel mít hodnotu, aby byl systém i pro nejmenší toleranční pole (pro válcovitost) vhodný.

$$u_{MS} = \frac{MPE}{\sqrt{3}}$$

$$Q_{MS} = \frac{2 * U_{MS}}{TOL} * 100 = \frac{4 * u_{MS}}{TOL} * 100 \Rightarrow u_{MS} = \frac{Q_{MS} * TOL}{4 * 100}$$

$$\frac{MPE}{\sqrt{3}} = \frac{Q_{MS} * TOL}{4 * 100} \Rightarrow MPE = \frac{\sqrt{3} * Q_{MS} * TOL}{4 * 100} = \frac{\sqrt{3} * 15 * 0,004}{4 * 100} = 0,000260 \text{ mm}$$

Z výpočtu je zřejmé, že měřicí systém by potřeboval mít parametr MPE (maximum permissible error) řádově nižší než parametry, kterými je popsána přesnost ramene. Vhodný měřicí systém dle VDA 5 by tedy musel být s největší pravděpodobností klasický souřadnicový měřicí stroj.

Z grafického znázornění vlivů dílčích nejistot, zejména z vyhodnocení pro toleranci polohy děr 1-6 (Obrázek 34b) je patrné, že klíčový vliv měla i nejistota vychýlení. To by znamenalo, že je vysoká pravděpodobnost, že ani druhá součást (ze původních dvou, použitých jako etalony) není ve shodě s výkresem součásti. Tím se opět potvrzuje, že pro správné vyhodnocení by byl zapotřebí etalon s kalibračním listem, dokládajícím jeho vlastnosti. Jak již bylo zmíněno, takový etalon, který by zhmotňoval tyto geometrické tolerance, nebyl v metrologické laboratoři k dispozici. Řešením této situace by mohlo být nechat rozměry součásti ověřit akreditovanou kalibrační laboratoří, nechat součást opatřit kalibračním listem etalonu a zajistit správu etalonu, aby byly zachovány jeho metrologické vlastnosti.

6.2.3 Vyhodnocení vhodnosti měřicího procesu

U vyhodnocení měřicího procesu narážíme hned na několik problémů. Nejdůležitější je ten, že stěžejním předpokladem pro výpočet vhodnosti měřicího procesu je prokázána vhodnost měřicího systému. V tomto případě ovšem měřicí systém není vhodný. Pro další řešení by tedy bylo nutné buďto použít přesnější měřicí systém, nebo podstatně snížit nároky na přesnost součástí, které budou v měřicím procesu měřeny.

Poté by se dalo přistoupit k vyhodnocení vhodnosti měřicího procesu. Bylo by nutné opět určit relevantní zdroje nejistoty a kvantifikovat je pomocí standartních nejistot. Postup získání těchto nejistot byl popsán v tabulce 8, ovšem jejich hodnoty nebylo možné pro potřeby této práce získat. Proto následuje pouze výčet potřebných relevantních nejistot, a podmínky, za jakých by byly v měřicím procesu vypočteny.

Nejistota reprodukovatelnosti operátorů u_{AV} :

Jak bylo popsáno dříve, pro výpočet je zapotřebí experiment, při kterém 2 nebo 3 operátoři provedou na minimálně 10 vzorcích součásti 2 opakovaná měření. Součásti, která byla uvažována jako etalon pro výpočet vhodnosti měřicího systému byly v metrologické laboratoři k dispozici pouze dvě. Mimo to by bylo nezbytné pro tyto měření domluvit a zaškolit jednoho až dva další operátory. V době vzniku této práce byla tato potřeba značně zkomplikována opatřeními proti probíhající pandemii Covid-19. Proto tato nejistota nemohla být vyhodnocena.

Nejistota opakovatelnosti měřené součásti (bez vlivu operátora) u_{EVO} :

Tato nejistota bývá dle VDA 5 nejčastěji vyhodnocována pro automatizované měřicí stroje, případně taková měření, kde lze zcela zanedbat vliv kvalifikace operátora. V tomto případě má operátor velký vliv na výsledné měření, jelikož polohu sondy zajišťuje ruční manipulací.

Navíc je pro experimentální měření zapotřebí vyhodnotit 25 kusů výrobku, každý dvakrát. Jak již bylo zmíněno, takové množství vzorků v metrologické laboratoři nebylo k dispozici.

Nejistota reprodukovatelnosti měřicího systému u_{GV}:

Vyhodnocení této nejistoty vyžaduje měření na minimálně 2 měřících systémech stejného typu. Pro experiment by tedy bylo zapotřebí druhé měřící rameno, které taktéž nebylo k dispozici.

Nejistota reprodukovatelnosti v čase u_{STAB}:

Pro tuto nejistotu nelze použít data z krátkodobé analýzy. Měření předpokládá s průběžnou změnou linearitu měřidla a vyžaduje dlouhodobé monitorování měřicího procesu. Jelikož vstup do metrologické laboratoře VUT FSI byl studentům umožněn (opět z důvodu pandemických opatření) přibližně měsíc před termínem odevzdáním, nebyl dostatek času pro dlouhodobé analýzy. Navíc je norma VDA 5 vytvořena pro průmysl a pro potřeby vyhodnocení změn linearitu v čase počítá s plným zatížením v reálném měřícím procesu. Reálné průmyslové nasazení v měřícím procesem nelze srovnat se sérií experimentů, která by byla provedena v metrologické laboratoři.

Nejistota tvaru, kvalita povrchu, materiálové vlastnosti objektu měření u_{OBJ}:

Zdroje, ze kterých lze čerpat potřebné informace pro výpočet jsou v tabulce 11 zmíněny 4. Údaj o odchylce tvaru z výkresové dokumentace, výrobní kontrolní diagram, data z experimentu na 5 vzorcích, nebo data z tabulek a materiálových listů mohou být použity pro výpočet. První tři zmíněné nejsou k dispozici, jediné informace, které by mohly jít do určení této nejistoty použít jsou informace o materiálu a tepelném zpracování na výrobním výkrese (ocel 12 050, tepelně zpracováno na 700 ± 50 MPA). Jelikož se jedná o součást domku vřetene CNC, lze předpokládat, že byla navržena tak, aby si uchovala svoji rozměrovou přesnost i při mechanickém zatížení. Síly vyvolané ručním sondováním by tedy na měření kvůli materiálovým charakteristikám neměly mít vliv.

Nejistota teploty u_T:

Pro výpočet nejistoty teploty VDA 5 uvádí experimentální postup, který vyžaduje měřenou součást a referenční materiál o známém koeficientu teplotní roztažnosti. Jak referenční materiál, tak i měřená součást jsou ohřáty na stejnou teplotu a změřeny, poté jsou podruhé změřeny po vychladnutí. Rozdíly naměřených teplot pro součást a referenční materiál je nutné podělit velikostí měřeného rozměru pro získání měrné tepelné roztažnosti. Z porovnání získaných hodnot lze přejít k odhadu nejistoty.

Zbytková nejistota měřicího procesu u_{MP-REST}:

Vzhledem k tomu, že nebylo možné vyhodnotit relevantní zdroje nejistoty měřicího procesu pomocí uvedených nejistot, není relevantní ani odhad zbytkové nejistoty měřicího procesu.

7 ZHODNOCENÍ A DISKUZE

Pro posouzení ramene byla zvolena jako etalon součást, na které bylo zhmotněno hned několik prvků s geometrickými tolerancemi. Důvodem bylo to, že díky rozdílným velikostem tolerančního pole pro jednotlivé tolerance bude možné snadno rozlišit, pro které je měřicí rameno jako měřicí systém vhodný a pro které ne. Již z vyhodnocování výsledku bylo zřejmé, že měření bylo zatíženo chybou, právě kvůli zvolenému etalonu. Jelikož k etalonu nebyl k dispozici kalibrační list, nebylo možné doložit jeho referenční rozměry, později se také ukázalo, že je velmi pravděpodobné, že ne všechny prvky etalonu byly vyrobeny v souladu s výkresovou dokumentací. Proto by bylo vhodné pro vyhodnocení použít kalibrovaný etalon s rozměry doloženými v kalibračním listu. To by snížilo nejistotu vychýlení (Bias).

Výpočet koeficientů způsobilosti ukázal, že pro geometrické tolerance s velikostí tolerančního pole 0,01 mm a menší je měřicí systém nezpůsobilý. Protože tyto koeficienty zohledňují pouze variabilitu hodnot a neberou v úvahu systematické chyby, následovalo vyhodnocování dílčích nejistot měření.

Podmínka metody VDA 5, která vyžaduje, aby bylo rozlišení měřicího systému menší než 5 % není splněna pro tolerance o velikosti 0,01 mm a menší. Je jisté, že bude nutné zmenšit velikost tolerančních polí, jestli má být měřicí systém dle VDA 5 vhodný. Pro určení minimální tolerance výpočet pokračoval. Dle metody VDA 5 byly vyhodnoceny dílčí nejistoty měření, kombinovaná a rozšířená nejistota měření a z ní byl vypočten ukazatel vhodnosti pro všechny prvky etalonu. Pro všechny prvky vyšel měřicí systém nevhodný. Předností metody VDA 5 je možnost určení vlivu dílčích nejistot, tento vliv byl graficky porovnán. Nejproblematictější byla nejistota vychýlení a nejistota kalibrace. Nejistota způsobená variabilitou hodnot měla nejmenší vliv.

Z těchto údajů lze vyvodit doporučení pro zlepšení vhodnosti měřicího systému. Použití kalibrovaného etalonu by podstatně snížilo nejistotu vychýlení, ovšem i poté by na tolerance o velikosti 0,01 mm a menší bylo nutné použít přesnější měřidlo s lepším rozlišením, aby pro ně byl systém dle metodiky VDA 5 vhodný. Jelikož je VDA 5 oborová norma automobilového průmyslu, který má přísnější nároky než jiná průmyslová odvětví. Proto se dá předpokládat, že při vyhodnocování pomocí jiné metodiky by bylo měřidlo způsobilé i pro menší toleranční pole.

Přestože měla nejistota způsobená variabilitou hodnot nejmenší vliv na výslednou vhodnost měřicího systému, stojí za zmínku kroky, kterými by bylo možné tuto variabilitu snížit. Měřicí systém bylo rameno, které bylo položeno na pracovním stole. Výrobce uvádí, že v případě ramene Absolute Arm Compact je to dostačující, doporučuji zajištění pevného spojení s pracovní plochou stolu pro zvýšení tuhosti systému. Samotný pracovní stůl by také bylo vhodné nahradit např. žulovým stolem, běžně používaným pro potřeby metrologických měřicích systémů. Žulový stůl by měl mnohem větší tuhost než pracovní stůl, u kterého musí operátor důsledně dbát na to, aby se stolem byl v co nejmenším fyzickém kontaktu. Jinou možností řešení by bylo využít přenosnosti ramene a měření provádět například v dílnách VUT např. na frézce, s měřenou součástí upnutou do svěráku. Tím by byla také zvýšena tuhost upnutí součásti, která by byla nesrovnatelně tužší, než upnutí pomocí plastické hmoty.

8 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo posouzení vhodnosti měřicího ramene pro měření konkrétního dílu. Pro tyto účely bylo v práci vytvořeno 7 kapitol. První kapitola po úvodu měla rozebrat současné trendy mezi přenosnými souřadnicovými měřicími přístroji. Ze zmíněných variant byla větší pozornost věnována kloubovým měřicím ramenům, jejich výhodám, nevýhodám a byl také zmíněn postup jejich certifikace dle normy ISO 10360-12 a ISO 10360-2.

Další kapitola spadala také do rešeršní části práce a zabývala se v současnosti používaným metodám a normám, které umožňují vyhodnocení vhodnosti měřicích systémů a procesů. Ze třech zmíněných metod byla nejvíce rozebrána metoda VDA 5, jelikož k metodě byla obsáhlejší než norma ČSN ISO 22514-7, a k metodě MSA jsem neměl k dispozici kompletní příručku.

Další kapitola již spadá do praktické části a obsahuje systematický rozbor problematiky měřicího procesu. Kromě definování dílčích cílů práce je zde věnována pozornost popisu systému podstatných veličin, které mají vliv na nejistotu měřicího procesu. Tyto podstatné veličiny se později v práci promítnou do relevantních dílčích nejistot měření.

Následující kapitola popisuje kroky, které bylo nutné provést před samotným měřením. Je zde popsán jak návrh měřicí sekvence, tak i ověření správného nastavení ramene. Příprava měřeného etalonu a upnutí je také popsáno v této části.

V 6. kapitole je proveden vzorový výpočet pro vhodnost měřicího ramene pro prvek Díra 1. V první části kapitoly jsou vypočteny složky nejistoty měření dle postupu VDA 5. Ve druhé části je z těchto nejistot stanovena kombinovaná nejistota měřicího systému, poté rozšířená nejistota měřicího systému a z ní je stanovena hodnota ukazatele vhodnosti měřicího procesu pro jednotlivé měřené prvky. Jelikož měřicí systém je dle výpočtu nevhodný, je ve třetí části pouze zmíněn postup, kterým by byla vyhodnocena vhodnost měřicího procesu.

Poslední kapitola shrnuje výsledky měření, jejich interpretaci do zhodnocení vlivů zdrojů dílčích nejistot a doporučení na základě kterých by bylo vhodné postupovat, aby byl měřicí systém dle metody VDA 5 vhodný.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Fowler zCat brochure*. Columbia, USA. Dostupné také z: <https://www.fowlerprecision.com/Products/zCAT-DCC-CMM/>
- [2] LARUE, Jean-François, Marc VIALA, Daniel BROWN a Charles MONY. *Dynamic Referencing in 3D Optical Metrology for Higher Accuracy in Shop Floor Conditions*. Francie: Creaform, 2016.
- [3] *21st Century Measuring Challenges*. Lévis, Canada: Creaform, 2013. Dostupné také z: https://www.creaform3d.com/en/resource-center?type=technical_document
- [4] *Metrascan - Speed and accuracy combined with versatility* [online]. Lévis, Canada: Creaform [cit. 2021-4-24]. Dostupné z: <https://www.creaform3d.com/en/optical-3d-scanner-metrascan>
- [5] *Řešení systémů Absolute Tracker brožura*. Stockholm, Sweden, 2020. Dostupné také z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/laser-tracker-systems/leica-probing-solutions/leica-tprobe>
- [6] PROKOP, Martin. Co je laserový tracker a jak se s ním měří? *Automa* [online]. 2009, **2009**(08), 2 [cit. 2021-4-24]. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/co-je-laserovy-tracker-a-jak-se-s-nim-meri-2009_08_39584_5371/
- [7] FARO Vantage Laser Trackers: Extremely accurate performance in a compact package. *Faro.com* [online]. Lake Mary, Florida: Faro Technologies, 2016 [cit. 2021-4-24]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=FgUkJXk1XI>
- [8] *Které rameno Absolute Arm?* [online]. Stockholm, Sweden: Hexagon Manufacturing Intelligence [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/portable-measuring-arms/about-portable-measuring-arms/which-absolute-arm>
- [9] *Absolute Arm: Univerzálnost* [online]. Stockholm, Sweden: Hexagon Manufacturing Intelligence [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/portable-measuring-arms/about-portable-measuring-arms/absolute-arm-versatility>
- [10] *Hexagon Absolute Arm brochure*. Stockholm, Sweden, 2020. Dostupné také z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/portable-measuring-arms/about-portable-measuring-arms/absolute-arm-versatility>
- [11] *User Manual, Absolute Arm: H00007091*. Verze 5.2.0. Stockholm, Sweden, 2019.
- [12] *Metrologie* [online]. Stockholm, Sweden: Hexagon Manufacturing Intelligence [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/about-us/about-hexagon-manufacturing-intelligence/what-we-do/metrology>
- [13] ČSN EN ISO 10360-12:2017. *Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMS): Kloubové rameno souřadnicových měřicích strojů*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [14] ČSN EN ISO 10360-2:2010. *Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM): Souřadnicové měřicí stroje používané pro měření lineárních rozměrů*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [15] *RDS Data Collector - User Manual: H000002008*. Verze 5.3. Stockholm, Sweden, 2019.

- [16] *ISO 9001 Systém managementu kvality*. In: *ManagementMania.com* [online]. Wilmington (DE) 2011-2021, 15.11.2018 [cit. 14.05.2021]. Dostupné z: <https://managementmania.com/cs/iso-9001>
- [17] *QS 9000*. In: *ManagementMania.com* [online]. Wilmington (DE) 2011-2021, 30.06.2015 [cit. 14.05.2021]. Dostupné z: <https://managementmania.com/cs/qs-9000>
- [18] *VDA 6.1*. In: *ManagementMania.com* [online]. Wilmington (DE) 2011-2021, 11.11.2016 [cit. 14.05.2021]. Dostupné z: <https://managementmania.com/cs/vda-61>
- [19] PERNIKÁŘ, Jiří, TYKAL, Miroslav. *Strojírenská metrologie II*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 180 s. : il. ISBN 8021433388.
- [20] *MSA (Measurement System Analysis) Analýza systému měření*. In: *ManagementMania.com* [online]. Wilmington (DE) 2011-2021, 30.08.2016 [cit. 14.05.2021]. Dostupné z: <https://managementmania.com/cs/measurement-system-analysis>
- [21] SENVAR, Ozlem. An overview of capability evaluation of Measurement Systems and Gauge Repeatability and Reproducibility Studies. *International Journal of Metrology and Quality Engineering* [online]. 2010, 2010, **2010**(2), 7 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1051/ijmqe/2010022](https://doi.org/10.1051/ijmqe/2010022)
- [22] BENEŠ, Pavel. *Porovnání způsobilosti systémů měření*. Plzeň, Česká republika, 2016. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta Elektrotechnická, Katedra technologií a měření. Vedoucí práce Doc. Ing. Olga Tůmová, CSc.
- [23] ČSN ISO 22514-7:2014. *Statistické metody v managementu procesu – Způsobilost a výkonnost: Část 7: Způsobilost procesů měření*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [24] *VDA 5. Capability of Measurement Processes*. 2nd completely revised edition. Berlin, Germany: Verband der Automobilindustrie e.V., 2010 (2011). ISSN 0943-9412.
- [25] JANKOVÝCH, Róbert. *Přednášky z předmětu XPT (Metrologie): Způsobilost / vhodnost měřidel dle VDA-5*. Brno, Česká republika, 2020.
- [26] *Fowler zCAT* [online]. Columbia, USA: The Fowler Company [cit. 2021-4-24]. Dostupné z: <https://www.fowlerprecision.com/Products/zCAT-DCC-CMM/zCat-54-950-001.html>
- [27] *PORTABLE CMM CNC - C-LINE* [online]. Renens, Švýcarsko: Trimos [cit. 2021-4-24]. Dostupné z: <https://www.trimos.com/3d-metrology/portable-cmm>
- [28] *Creaform Handyprobe Technical specifications* [online]. Lévis, Canada: Creaform [cit. 2021-4-24]. Dostupné z: <https://www.creaform3d.com/en/metrology-solutions/coordinate-measuring-machines-handyprobe/technical-specifications>
- [29] *Keyence Wide Area Coordinate Measuring Machine brochure*. Itasca, USA, 2021. Dostupné také z: <https://www.keyence.com/products/measure-sys/cmm/>
- [30] *Alwaid Metronor One* [online]. Nesbru, Norway: Metronor [cit. 2021-4-24]. Dostupné z: <https://www.alwaid.cz/metronor/>
- [31] How to do portable measurements of hidden features and deep probing. *Metronor.com* [online]. Nesbru, Norway: Metronor [cit. 2021-4-24]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=45vL924X7io>
- [32] *Optical Portable CMM: HandyPROBE Next*. *Creaform3D.com* [online]. Lévis, Canada: Creaform, 2016 [cit. 2021-4-24]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=KLFYsxHDW68>

[33] FaroArm 8-axis system. *Merici-pristroje.cz* [online]. Lake Mary, Florida: Faro Technologies, 2018 [cit. 2021-4-24]. Dostupné z: <https://www.merici-pristroje.cz/8-osy-system-faroarm/>

10 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

10.1 Seznam tabulek

<i>Tabulka 1: 7 poloh pro nastavení artefaktu [15].....</i>	22
<i>Tabulka 2: Specifikace přesnosti Absolute Arm 83 Compact dle ČSN EN ISO 10360-12 [10]</i>	24
<i>Tabulka 3: Pozice lokte pro 3 opakování [15]</i>	24
<i>Tabulka 4: 7 poloh pro nastavení artefaktu [15].....</i>	25
<i>Tabulka 5: Specifikace přesnosti Absolute Arm 83 Compact dle ČSN EN ISO 10360-2 [10]</i>	25
<i>Tabulka 6: Prostředky vyhodnocování zdrojů variability MSA [21].....</i>	31
<i>Tabulka 7: Seznam složek nejistoty pro potřeby ČSN ISO 22514-7 [23]</i>	33
<i>Tabulka 8: Relevantní normy a standardy pro VDA 5 [24]</i>	34
<i>Tabulka 9: Obecný postup vyhodnocení měřících procesů dle VDA 5 [24]</i>	36
<i>Tabulka 10: Odhad nejistoty typu B dle rozdělení [24].....</i>	37
<i>Tabulka 11: Určování typických standartních nejistot [24]</i>	38
<i>Tabulka 12: Minimální počet bodů pro definování geometrických prvků v prostoru</i>	47
<i>Tabulka 13: Počty měřených bodů jednotlivých geom. prvků</i>	48
<i>Tabulka 14: Hodnoty koeficientů způsobilosti</i>	52
<i>Tabulka 15: Hodnoty dílčích nejistot (rozměry v mm).....</i>	55
<i>Tabulka 16: Vyhodnocení ukazatelů vhodnosti měřících systémů a minimální tolerance pro vhodný MS.....</i>	55

10.2 Seznam obrázků

<i>Obrázek 1: Přenosná CMM od firmy zCat [26] a Trimos [27]</i>	13
<i>Obrázek 2: Velikost válcového CMM a jeho měřícího objemu [27].....</i>	13
<i>Obrázek 3: Přípravky pro měření více dílů v jedné operaci [27].....</i>	14
<i>Obrázek 4: Rukojeť se sondou: a) Creaform [28], b) Keyence [29], c) Metronor [30]</i>	15
<i>Obrázek 5: Sonda pro měření hlubokých úzkých děr (Metronor) [31]</i>	15
<i>Obrázek 6: Znázornění měřícího objemu (Snímač od spol. Creaform) [32]</i>	16
<i>Obrázek 7: a) sférický koutový odražeč, b) doteková sonda s odražečem, c) 3D scanner s odražečem [5].....</i>	16
<i>Obrázek 8: Znázornění sférického souřadného systému (tracker spol. Faro) [7].....</i>	17
<i>Obrázek 9: 7osé rameno spol. Faro s otočným stolem [33].....</i>	18
<i>Obrázek 10: Typy rukojetí spol. Hexagon: a) zápěstí se sondou, b) zápěstí se scannerem, c) pistolová rukojeť se sondou, d) pistolová rukojeť se sondou i scannerem [10]</i>	18
<i>Obrázek 11: Mřížka zapuštěných prohlubní pro určení polohy ramene po přískoku (spol. Hexagon) [10].....</i>	19
<i>Obrázek 12: Ukázka sortimentu ramen Hexagon Absolute Arm [8]</i>	19
<i>Obrázek 13: Popis Absolute Arm Compact [11]</i>	20
<i>Obrázek 14: Příklad průběžného uspořádání sedmi poloh v měřícím objemu ramene [15].....</i>	21
<i>Obrázek 15: Artefakty pro měření vzdálenosti: a) Ball Bar, b) Cone Bar, c) Step Bar [15].....</i>	22
<i>Obrázek 16: Znázornění 5ti měřených vzdáleností na artefaktu (Ball Bar) [15]</i>	22
<i>Obrázek 17: Rozložení 25 bodů měřených na povrchu koule [15]</i>	23
<i>Obrázek 18: 5 různých orientací zápěstí při měření [15]</i>	23
<i>Obrázek 19: Uspořádání artefaktů okolo ramene [15].....</i>	24
<i>Obrázek 20: Znázornění jednotlivých složek variability [22].....</i>	30
<i>Obrázek 21: Diagram rybí kosti (Fishbone / Ishikawa) pro zdroje nejistoty měření [24]</i>	35
<i>Obrázek 22: Vývojový diagram pro určení vhodnosti procesu měření dle VDA 5 [24].....</i>	36
<i>Obrázek 23: Etalon – Domek vřetene CNC.....</i>	43
<i>Obrázek 24: Měřící systém.....</i>	44

Obrázek 25: Použitá sonda s 3 mm hrotem.....	45
Obrázek 26: Geometrické prvky na etalonu.	47
Obrázek 27: Upnutí součásti pomocí plastické hmoty	48
Obrázek 28: Softwarové prostředí pro odebrání stupňů volnosti etalonu	49
Obrázek 29: Sestava pro ověření rozměru kalibrované koule	50
Obrázek 30: a) zobrazení polohy pro měření, b) vyhodnocení ověření rozměru koule.....	50
Obrázek 31: Sledování hrotu při měření a) vůči etalonu, b) vůči virtuálnímu modelu.....	50
Obrázek 32: Porovnání geometrických tolerancí polohy obou součástí	51
Obrázek 33: Vliv dílčích složek nejistoty na celkovou nejistotu měřicího systému	54
Obrázek 34: Vliv dílčích nejistot na a) geom. tolerance, b) geom. tol. polohy děr	56

10.3 Seznam symbolů a zkratek

<i>MSA</i>	– Measurement System Analysis
<i>VDA</i>	– Verband der Automobilindustrie
<i>GRR</i>	– Opakovatelnost a reprodukovatelnost měřidla
\bar{x}	– Aritmetický průměr naměřených hodnot
s_g	– Výběrová směrodatná odchylka
<i>USL</i>	– Horní toleranční mez
<i>LSL</i>	– Dolní toleranční mez
<i>n</i>	– Výběr ze základního souboru
u_{AV}	– reprodukovatelností operátorů
u_{EVO}	– opakovatelnost zkoušené součásti
u_{GV}	– reprodukovatelnost upínacích přípravků
u_{EV}	– nejistota vlivem rozptylu měřidla
u_{OBJ}	– nehomogenita dílu
u_{RE}	– nejistota vlivem rozlišení
u_{CAL}	– nejistota kalibrace
u_{STAB}	– reprodukovatelnost rozdílných časových bodů
u_T	– nejistota způsobená vlivem teploty
u_{EVR}	– opakovatelnost na etalonu
u_{BI}	– nejistota pocházející z vychýlení
u_{LIN}	– chyba linearity
u_{REST}	– nejistota způsobená dalšími vlivy působící na měřicí systém
u_{MS}	– kombinovaná nejistota měřicího systému
u_{MP}	– kombinovaná nejistota procesu měření
U_{MS}	– rozšířená nejistota měřicího systému
U_{MP}	– rozšířená nejistota procesu měření
c_g	– koeficient opakovatelnosti měřidla
c_{gk}	– koeficient strannosti měřidla

Q_{MS} – ukazatel vhodnosti měřicího systému

Q_{MP} – ukazatel vhodnosti procesu měření

Q_{MS_MAX} – limitní hodnota pro měřicí systém

Q_{MP_MAX} – limitní hodnota pro proces měření

MPE – největší přípustná chyba

$\%RE$ – Ukazatel rozlišení

RE – rozlišení měřicího systému

TOL_{RE-MIN} – Minimální možná tolerance proces měření (podm. rozlišení)

$ANOVA$ – metoda analýzy rozptylu

TOL_{MIN_UMS} – minimální možná tolerance pro měřicí systém

TOL_{MIN_UMP} – minimální možná tolerance pro proces měření

GUM – pokyn pro vyjadřování nejistot měření (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)

VIM – mezinárodním slovníku základních a všeobecných termínů v metrologii (International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology)

11 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – Grafy naměřených hodnot včetně toleranční meze

Příloha B – Ukázkové protokoly vygenerované softwarem po měření

Komprimovaný soubor:

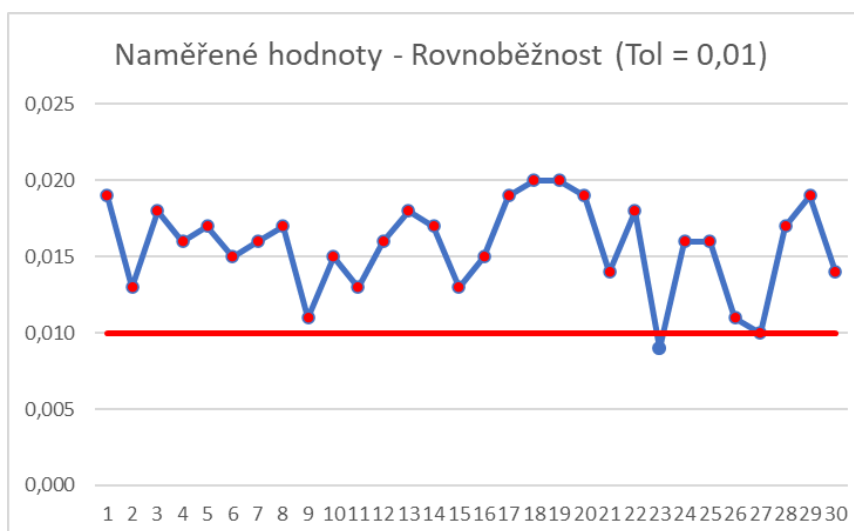
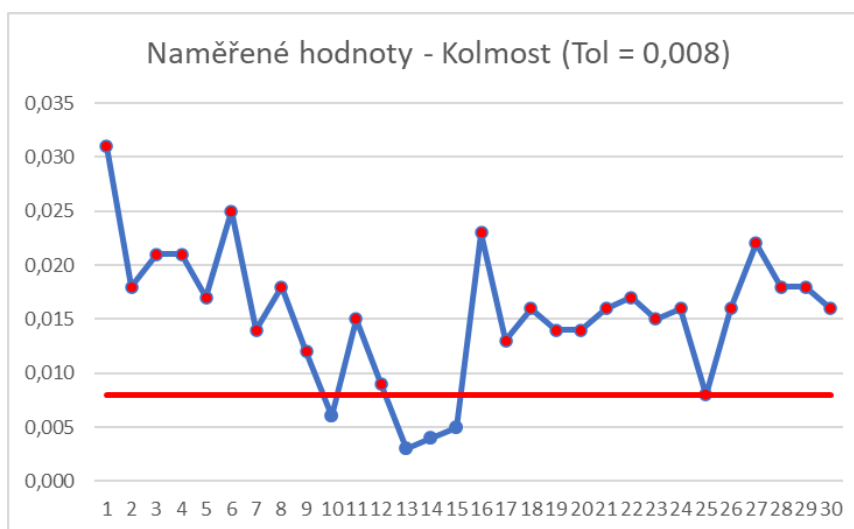
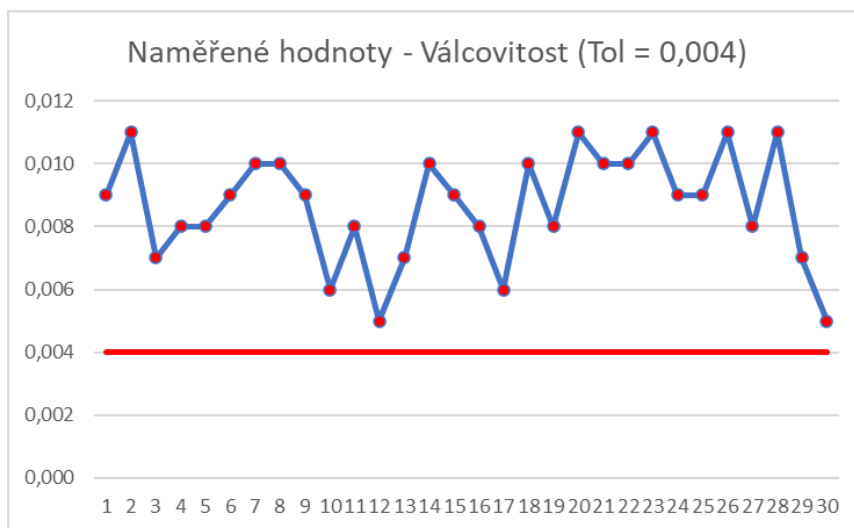
Příloha C – Výkres etalonu (kótovány jen vyhodnocované prvky)

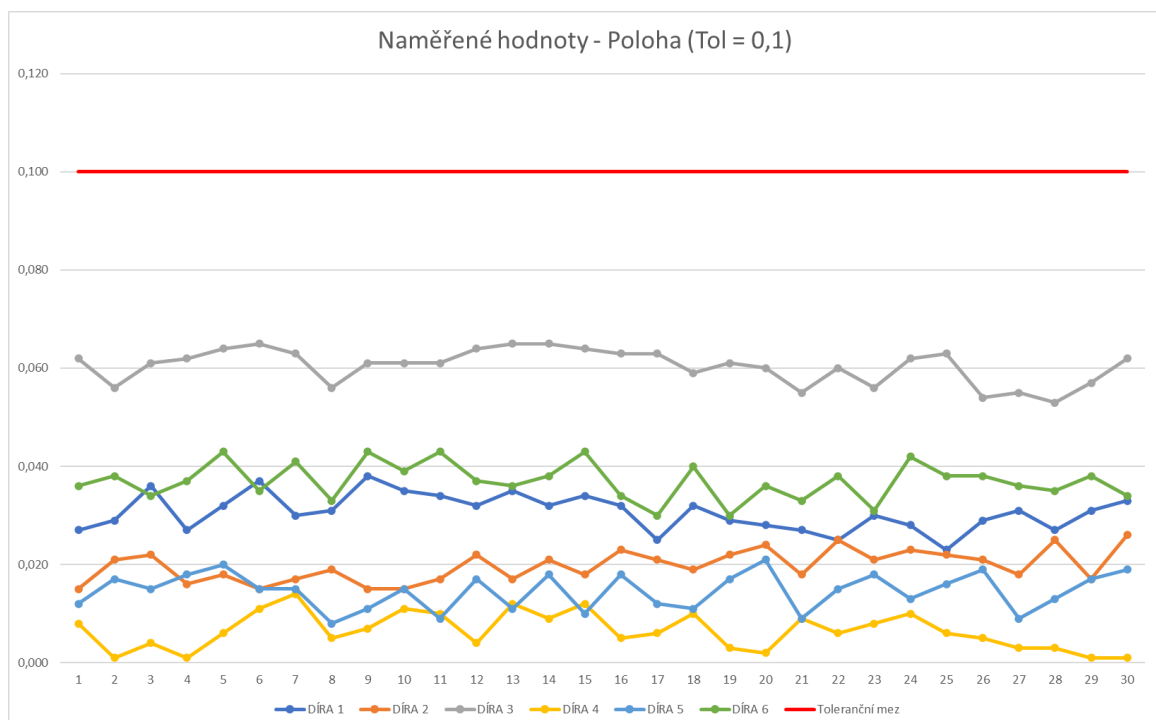
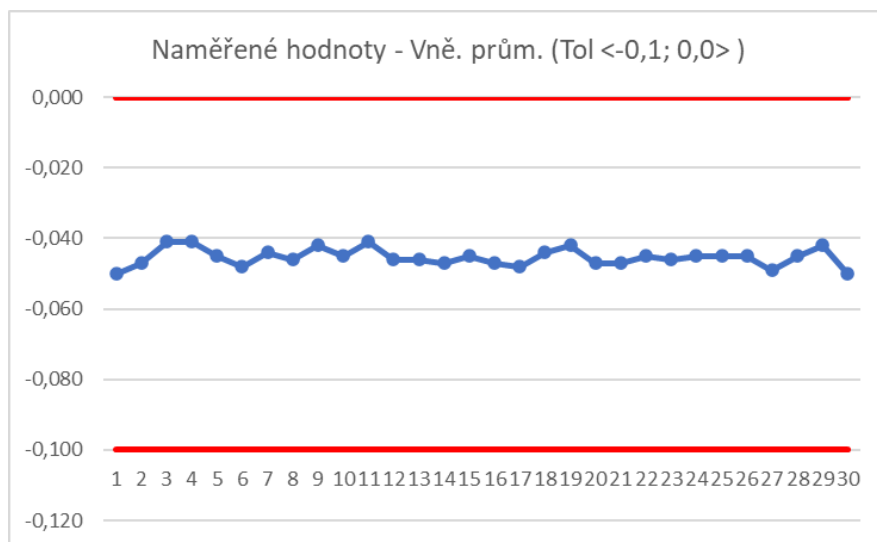
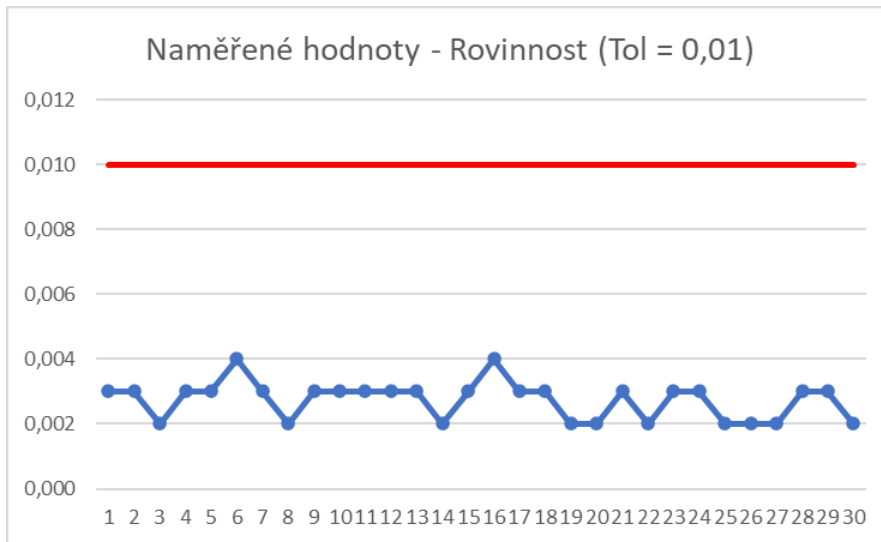
Příloha D – Upravený výkres etalonu (upraveny tolerance pro vhodný měřicí systém)

Příloha E – soubor MS Excel obsahující veškeré matematické vyhodnocení

PŘÍLOHY

Příloha A – Grafy naměřených hodnot včetně toleranční meze:

























**Production Part Approval Process
Dimensional Results**

Supplier: Ondřej Polášek **Part Number:** V-40

Inspection Facility: FSI-ÚVSSR **Part Name:** Spindle Housing - Domek pro vřeteno

Sample Identification: Díl 1 **Revision:**

Item	Specification	+Tol	-Tol	Measurement	OK	Reject
1	 0.004 (VALCOVITOS-POS)	0.004		0.005		
2	 \varnothing 0.008 A (KOLMOST VÁLEC-A-POS)	0.008	0.000	0.016		
3	 0.01 A (ROVNOB:ŽNOST ZÁKLADNA A-1-POS)	0.010	0.000	0.014		
4	 0.01 (ROVINNOST ZÁKLADNY A-POS)	0.010		0.002		
5	165.000 (VNĚJŠÍ PRŮMĚR-)	0.000		164.950		
6	165.000 (VNĚJŠÍ PRŮMĚR-GG)		-0.100	164.950		
6	 \varnothing 0.1 A B (POLOHA 1-POS)	0.100	0.000	0.014		
7	 \varnothing 0.1 A B (POLOHA 2-POS)	0.100	0.000	0.026		
8	 \varnothing 0.1 A B (POLOHA 3-POS)	0.100	0.000	0.062		
9	 \varnothing 0.1 A B (POLOHA 4-POS)	0.100	0.000	0.001		
10	 \varnothing 0.1 A B (POLOHA 5-POS)	0.100	0.000	0.019		
11	 \varnothing 0.1 A B (POLOHA 6-POS)	0.100	0.000	0.022		

Signature: **Title:** **Date:**



NÁZEV DÍLU : Mereni_1

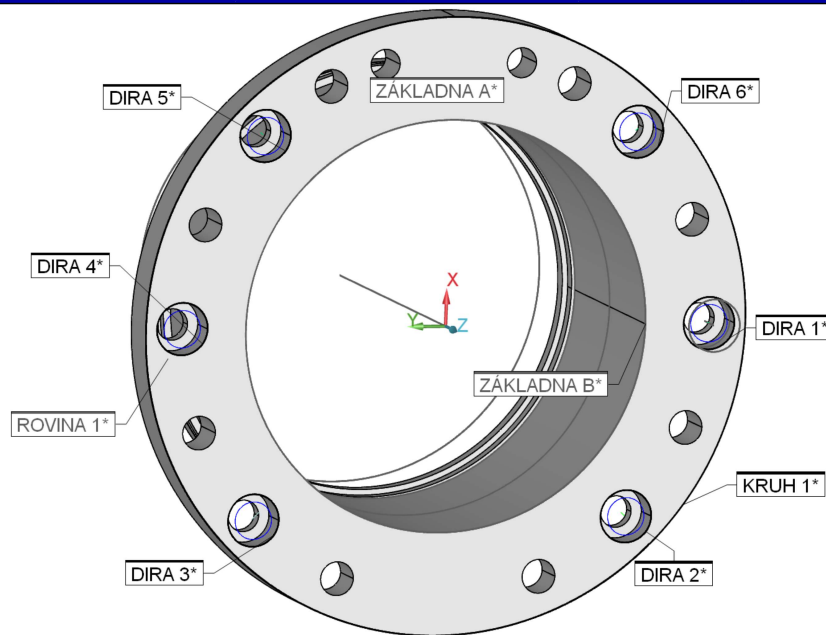
května 05, 2021

13:59

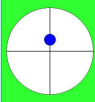
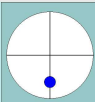
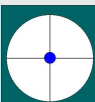
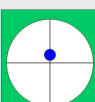
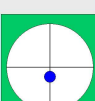
ČÍSLO REVIZE :

SÉRIOVÉ ČÍSLO :

POČÍTADLO STATISTIK : 1



VALCOVITOS	MM	\sqrt{R} 0.004		VÝCHOZÍ	ISO 1101			
Prvek	NOMINÁLNÍ	+TOL	-TOL	MĚŘ	ODCH	EXTTOL		
ZAKLADNA B	0.000	0.004		0.005	0.005	0.001		
KOLMOST VÁLEC-A	MM	\perp \varnothing 0.008 A		VÝCHOZÍ	ISO 1101			
Prvek	NOMINÁLNÍ	+TOL	-TOL	MĚŘ	ODCH	EXTTOL	BONUS	
ZAKLADNA B	0.000	0.008	0.000	0.016	0.016	0.008	0.000	
ROVNOBĚŽNOST ZÁKLADNA A-1	MM	\parallel 0.01 A		VÝCHOZÍ	ISO 1101			
Prvek	NOMINÁLNÍ	+TOL	-TOL	MĚŘ	ODCH	EXTTOL	BONUS	
ROVINA 1	0.000	0.010	0.000	0.014	0.014	0.004	0.000	
ROVINNOST ZÁKLADNY A	MM	\square 0.01		VÝCHOZÍ	ISO 1101			
Prvek	NOMINÁLNÍ	+TOL	-TOL	MĚŘ	ODCH	EXTTOL		
ZAKLADNA A	0.000	0.010		0.002	0.002	0.000		
VNĚJŠÍ PRŮMĚR-KRUH 1	MM	\varnothing 165 0 / -0.1 GG						
MODIFIKÁTOR	NOMINÁLNÍ	+TOL	-TOL	MĚŘ	ODCH	EXTTOL		
	165.000	0.000		164.950	-0.050	0.000		
GG	165.000		-0.100	164.950	-0.050	0.000		
POLOHA 1	MM	\oplus \varnothing 0.1 A B		VÝCHOZÍ	ISO 1101			
Prvek	OS	NOMINÁLNÍ	+TOL	-TOL	MĚŘ	ODCH	EXTTOL	BONUS
DIRA 1	TP	0.000	0.100	0.000	0.014	0.014	0.000	0.000

POLOHA 2		MM	$\text{⌀} \text{ } \text{⌀}0.1 \text{ } \text{ } A \text{ } \text{ } B$			VÝCHOZÍ	ISO 1101	
Prvek	OS	NOMINÁLNÍ	+TOL	-TOL	MĚŘ	ODCH	EXTTOL	BONUS
DIRA 2	TP	0.000	0.100	0.000	0.026	0.026	0.000	0.000
								
POLOHA 3		MM	$\text{⌀} \text{ } \text{⌀}0.1 \text{ } \text{ } A \text{ } \text{ } B$			VÝCHOZÍ	ISO 1101	
Prvek	OS	NOMINÁLNÍ	+TOL	-TOL	MĚŘ	ODCH	EXTTOL	BONUS
DIRA 3	TP	0.000	0.100	0.000	0.062	0.062	0.000	0.000
								
POLOHA 4		MM	$\text{⌀} \text{ } \text{⌀}0.1 \text{ } \text{ } A \text{ } \text{ } B$			VÝCHOZÍ	ISO 1101	
Prvek	OS	NOMINÁLNÍ	+TOL	-TOL	MĚŘ	ODCH	EXTTOL	BONUS
DIRA 4	TP	0.000	0.100	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000
								
POLOHA 5		MM	$\text{⌀} \text{ } \text{⌀}0.1 \text{ } \text{ } A \text{ } \text{ } B$			VÝCHOZÍ	ISO 1101	
Prvek	OS	NOMINÁLNÍ	+TOL	-TOL	MĚŘ	ODCH	EXTTOL	BONUS
DIRA 5	TP	0.000	0.100	0.000	0.019	0.019	0.000	0.000
								
POLOHA 6		MM	$\text{⌀} \text{ } \text{⌀}0.1 \text{ } \text{ } A \text{ } \text{ } B$			VÝCHOZÍ	ISO 1101	
Prvek	OS	NOMINÁLNÍ	+TOL	-TOL	MĚŘ	ODCH	EXTTOL	BONUS
DIRA 6	TP	0.000	0.100	0.000	0.022	0.022	0.000	0.000
								



NÁZEV DÍLU : Mereni_1

května 05, 2021

14:04

ČÍSLO REVIZE :

SÉRIOVÉ ČÍSLO :

POČÍTADLO STATISTIK : 1

ROVINNOST ZÁKLADNY A	MM	\square 0.01
Prvek	ODCH	
ZAKLADNA A	0.002	

POLOHA 1	MM	\oplus \varnothing 0.1 A B
Prvek	ODCH	
DIRA 1	0.014	

ROVNOBĚŽNOST ZÁKLADNA A-1	MM	\parallel 0.01 A
Prvek	ODCH	
ROVINA 1	0.014	

VALCOVITOS	MM	\varnothing 0.004
Prvek	ODCH	
ZAKLADNA B	0.005	

KOLMOST VÁLEC-A	MM	\perp \varnothing 0.008 A
Prvek	ODCH	
ZAKLADNA B	0.016	

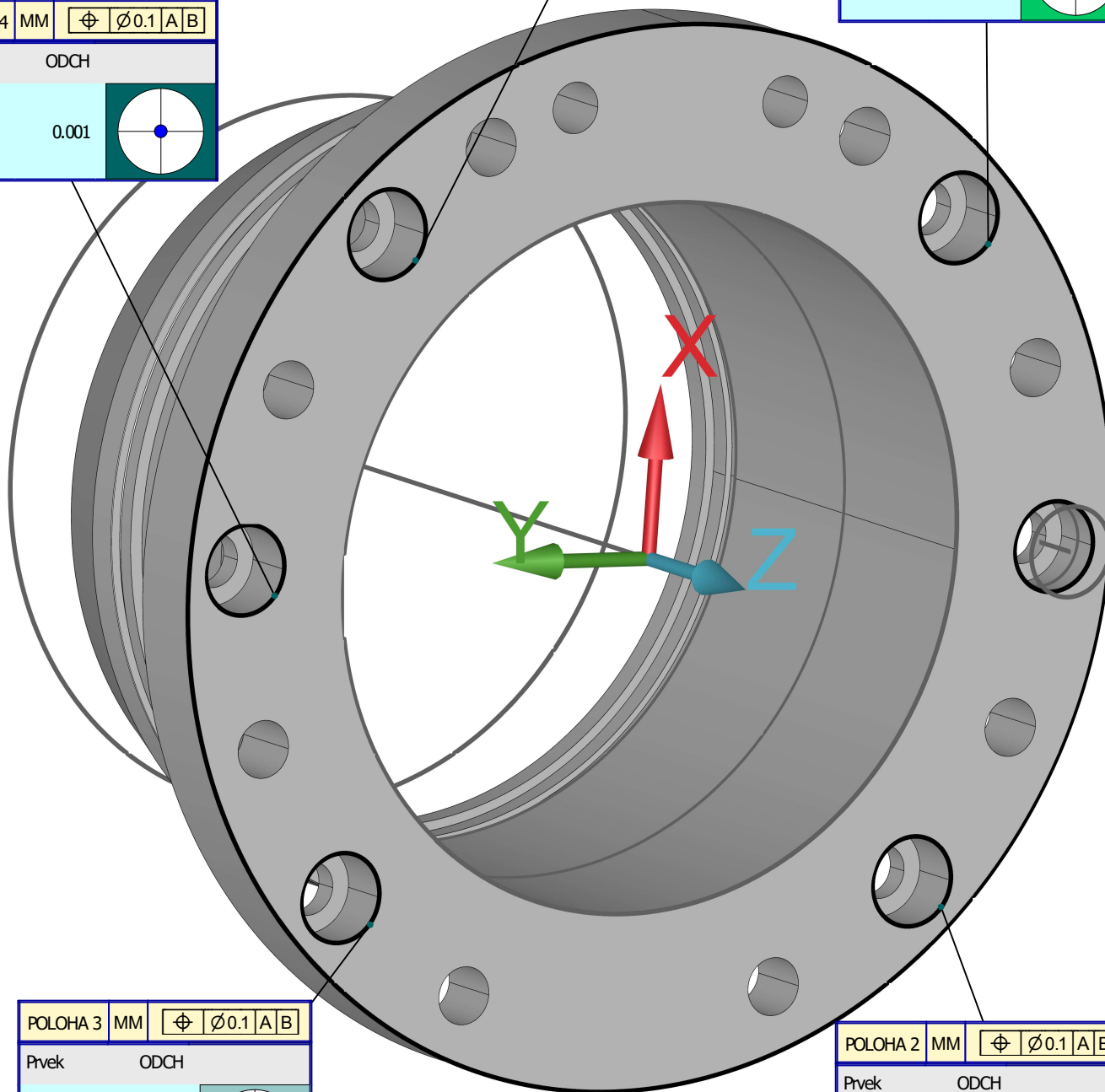
VVNĚJŠÍ PRŮMĚR-KRUH 1	MM	\varnothing 165 0 / -0.1 GG
MODIFIKÁTOR	ODCH	
	-0.050	
GG	-0.050	

-	0.000-0.011	0.011-0.022	0.022-0.033	0.033-0.044	0.044-0.056	0.056-0.067	0.067-0.078	0.078-0.089	0.089-0.100	+	LIMITS
---	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	---	--------

POLOHA 4	MM	\oplus	$\varnothing 0.1$	A	B
Prvek	ODCH				
DIRA 4	0.001				

POLOHA 5	MM	\oplus	$\varnothing 0.1$	A	B
Prvek	ODCH				
DIRA 5	0.019				

POLOHA 6	MM	\oplus	$\varnothing 0.1$	A	B
Prvek	ODCH				
DIRA 6	0.022				



POLOHA 3	MM	\oplus	$\varnothing 0.1$	A	B
Prvek	ODCH				
DIRA 3	0.062				

POLOHA 2	MM	\oplus	$\varnothing 0.1$	A	B
Prvek	ODCH				
DIRA 2	0.026				

-	0.000- 0.011	0.011- 0.022	0.022- 0.033	0.033- 0.044	0.044- 0.056	0.056- 0.067	0.067- 0.078	0.078- 0.089	0.089- 0.100	+	LIMITS
---	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	---	--------