



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

ETALONY PRO MĚŘENÍ ROVINNÉHO ÚHLU A ODCHYLEK TVARU NA CMM

STANDARDS FOR MEASURING PLANE ANGLE AND SHAPE DEVIATIONS ON CMM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Matúš Lipták

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Šrámek, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Bc. Matůš Lipták
Studijní program:	Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	Ing. Jan Šrámek, Ph.D.
Akademický rok:	2022/23

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:

Etalony pro měření rovinného úhlu a odchylek tvaru na CMM

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zavedení různých typů CMM vybavených dotykovým nebo optickým snímacím systémem umožňuje provádění přesných délkových měření, které v minulosti vyžadovalo specializované vybavení a postupy. Úkolem práce je vytvoření vhodných etalonů pro měření rovinného úhlu a odchylek tvaru použitelných na CMM v souladu s normou ČSN EN ISO/IEC 17025 a navazujících systémových norem řady ČSN EN ISO 10360. Etalony budou sloužit pro rychlou kalibraci různých typů CMM v rámci jejich použití v laboratořích ÚVSSR FSI.

Cíle diplomové práce:

Popis současného stavu v oblasti měření pomocí CMM (rešerše).
Charakteristika zvoleného CMM a rozbor řešené problematiky.
Volba vhodných kalibrovaných etalonů.
Provedení souboru měření při kalibraci CMM za pomocí etalonů.
Identifikace a kvantifikace jednotlivých složek nejistoty měření při kalibraci CMM.
Stanovení rozšířené nejistoty měření CMM.
Vyhodnocení dosažených výsledků dle ČSN EN ISO 14253-1.
Závěr a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

SŁADEK, Jerzy A. Coordinate Metrology, Springer Tracts in Mechanical Engineering. Berlín: Springer-Verlag, Německo, 2016, ISBN 978-3-662-48463-10.

ČSN EN ISO 10360-2:2002. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - přijímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) - Část 2: Souřadnicové měřicí stroje používané pro měření lineárních rozměrů (ISO 10360-2:2001). Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2002, 35 s. Třídící znak 252011.

ISO 10360-12:2016. Geometrical product specifications (GPS) — Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS) — Part 12: Articulated arm coordinate measurement machines (CMM).

ČSN EN ISO 17025:2018. Posuzování shody - Všeobecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018, 48 s. Třídící znak 015253.

EA 4/02 M:2022. Vyhodnocení nejistoty měření při kalibraci (Evaluation of the Uncertainty of Measurement in calibration). Praha: Český institut pro akreditaci, 2022. 70 stran.

TNI 01 0115:2009. Mezinárodní metrologický slovník - Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM). Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009, 90 s. Třídící znak 83031.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Predkladaná diplomová práca sa zaoberá problematikou výberu vhodných etalónov pre meranie rovinného uhla a odchýlok tvaru na súradnicových meracích strojoch. Z odchýlok tvaru boli v tejto práci spracované charakteristiky priamosti a kruhovitosti. Vybrané etalóny sú následne použité ku kalibrácii zvolených CMM, medzi ktoré patrí optický CMM SOL 311 a kĺbové rameno AACMM Hexagon Absolute Arm 83 Compact. V práci sú taktiež zahrnuté všeobecné teoretické poznatky z oblasti metrológie a súčasného stavu merania pomocou CMM. Praktická časť je zameraná na realizáciu experimentálnych meraní pri kalibrácii CMM, nasledovaná identifikáciou a kvantifikáciou jednotlivých zložiek neistoty. Na záver sú dosiahnuté výsledky meraných geometrických charakteristík na jednotlivých CMM strojoch podrobené vyhodnoteniu a vzájomnému porovnaniu.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Súradnicové meracie stroje, kalibrácia CMM, neistota merania, meranie rovinného uhla, odchýlky tvaru

ABSTRACT

The presented diploma thesis deals with the issue of selecting suitable standards for measurement of plane angle and shape deviations on coordinate measuring machines. As for the shape deviations, the characteristics of straightness and roundness have been processed in this thesis. The selected standards are then used to calibrate chosen CMMs, including the optical CMM SOL 311 and the articulated arm AACMM Hexagon Absolute Arm 83 Compact. The thesis also includes general theoretical knowledge in the field of metrology and the current state of measurement using CMMs. The experimental part is focused on carrying out the measurements during CMM calibration, followed by the identification and quantification of individual uncertainty components. Finally, the obtained results of the measured geometrical characteristics on individual CMMs are evaluated and compared with each other.

KEYWORDS

Coordinate measuring machines, CMM calibration, measurement uncertainty, plane angle measurement, shape deviations

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

LIPTÁK, Matúš. *Etalony pro měření rovinného úhlu a odchylek tvaru na CMM*. Online. Brno, 2023. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149820>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Jan Šrámek.

POĎAKOVANIE

Touto formou by som rád vyjadril poďakovanie predovšetkým svojej rodine za neustálu podporu počas celého štúdia. Ďalej by som sa chcel poďakovať vedúcemu práce Ing. Janovi Šrámkovi, Ph.D. za cenné rady, pripomienky a ochotu počas vypracovania tejto diplomovej práce. Za pomoc pri meraní patrí poďakovanie aj doc. Ing. Róbertovi Jankových, CSc. a Ing. Tomášovi Markovi, Ph.D.

ČESTNÉ VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, vypracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Jana Šrámka, Ph.D. a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brne dňa 26.5.2023

.....

Bc. Matúš Lipták

OBSAH

1	ÚVOD	17
2	MOTIVÁCIA	19
3	METROLÓGIA V ČR	21
3.1	Metrológia a jej úlohy	21
3.2	Vybrané pojmy a definície	21
3.3	Národný metrologický systém	25
3.3.1	Ministerstvo priemyslu a obchodu (MPO)	25
3.3.2	Úrad pre technickú normalizáciu, metrológiu a štátne skúšobníctvo (ÚNMZ)	25
3.3.3	Český metrologický inštitút (ČMI)	26
3.3.4	Český inštitút pre akreditáciu (ČIA)	26
3.4	Legislatíva v metrológii	27
3.4.1	Zákon o metrológii	27
3.4.2	Rozdelenie meradiel podľa zákona o metrológii	27
3.5	Chyby merania	28
3.5.1	Náhodné chyby	28
3.5.2	Systematické chyby	28
3.5.3	Hrubé chyby	29
3.6	Neistota merania	29
3.6.1	Štatistická analýza série pozorovaní – vyhodnotenie neistoty spôsobom A (u_A)	30
3.6.2	Vyhodnotenie neistoty spôsobom B (u_B)	31
3.6.3	Kombinovaná štandardná neistota (u_c) a rozšírená neistota (U)	31
4	SÚČASNÝ STAV V OBLASTI MERANIA POMOCOU CMM	33
4.1	Popis a funkcie CMM	33
4.1.1	Základné mechanické prvky CMM a ich uloženie	35
4.2	Typy konštrukcií a rozdelenie CMM	35
4.2.1	Rozdelenie CMM podľa konštrukcie	36
4.2.2	Rozdelenie CMM podľa geometrického usporiadania	36
4.2.3	Multisenzorové CMM	38
4.3	Meracie systémy CMM	39
4.4	Snímacie systémy CMM	40
4.4.1	Snímacie hlavice	40
4.4.2	Dotykové snímacie systémy	41
4.4.3	Bezdotykové snímacie systémy	43
4.5	Presnosť merania na CMM	45
5	ROZBOR RIEŠENEJ PROBLEMATIKY	47
5.1	Kontrola presnosti a kalibrácia CMM	47
5.1.1	Analytické metódy skúšania CMM	48
5.1.2	Globálne (komplexné) metódy skúšania CMM	48
5.2	Meranie rovinného uhla a odchýlok tvaru	49
5.2.1	Rovinný uhol	49
5.2.2	Odchýlky tvaru	50
5.3	Popis zvolených CMM ku kalibrácii	56
5.3.1	Micro-Vu SOL 311	57
5.3.2	Hexagon Absolute Arm 83 Compact	58
5.4	Voľba vhodných kalibrovaných etalónov	59

5.4.1	Uhlové mierky.....	60
5.4.2	Kontrolné pravítko	61
5.4.3	Kontrolné (nastavovacie) krúžky	61
5.5	Kalibrácia použitých etalónov	62
5.5.1	CMM stroj Zeiss UPMC 850 CARAT.....	62
5.5.2	Dĺžkomer SIP 1002M s laserinterferometrom XL80.....	63
5.5.3	Kruhomer Talyrond TR595S	63
6	STRATÉGIA A POPIS MERANIA PRI KALIBRÁCIÍ CMM.....	65
6.1	Meranie – Micro-Vu SOL 311	66
6.1.1	Uhlové mierky (UM).....	66
6.1.2	Kontrolné pravítko (STRt)	67
6.1.3	Kontrolné (nastavovacie) krúžky (RONt)	69
6.2	Meranie – rameno Hexagon	71
6.2.1	Uhlové mierky (UM).....	71
6.2.2	Kontrolné pravítko (STRt)	72
6.2.3	Kontrolné (nastavovacie) krúžky (RONt)	74
7	IDENTIFIKÁCIA A KVANTIFIKÁCIA JEDNOTLIVÝCH ZLOŽIEK NEISTOTY PRI KALIBRÁCIÍ CMM.....	77
7.1	Identifikácia zložiek neistôt a výpočet rozšírenej neistoty merania.....	77
7.1.1	Štatistická analýza série pozorovaní – vyhodnotenie neistoty spôsobom A (u_A).....	77
7.1.2	Neistota kalibrácie etalónu (u_{B1})	77
7.1.3	Vplyv rozlišovacej schopnosti stroja (u_{B2}).....	78
7.1.4	Vplyv rozdielu teploty CMM a meraného etalónu (u_{B3}).....	78
7.1.5	Vplyv rozdielu teploty od 20 °C (u_{B4}).....	78
7.2	Kvantifikácia zložiek neistôt a stanovenie rozšírenej neistoty merania (SOL – krúžok – priemer)	79
7.2.1	Štatistická analýza série pozorovaní – vyhodnotenie neistoty spôsobom A (u_A).....	79
7.2.2	Neistota kalibrácie etalónu (u_{B1})	79
7.2.3	Vplyv rozlišovacej schopnosti stroja (u_{B2}).....	79
7.2.4	Vplyv rozdielu teploty CMM a meraného etalónu (u_{B3}).....	79
7.2.5	Vplyv rozdielu teploty od 20 °C (u_{B4}).....	80
7.2.6	Kombinovaná štandardná neistota (u_c) a rozšírená neistota (U).....	80
7.3	Kvantifikácia zložiek neistôt a stanovenie rozšírenej neistoty merania (SOL – uhol).....	81
7.3.1	Štatistická analýza série pozorovaní – vyhodnotenie neistoty spôsobom A (u_A).....	81
7.3.2	Neistota kalibrácie etalónu (u_{B1})	81
7.3.3	Vplyv rozlišovacej schopnosti stroja (u_{B2}).....	82
7.3.4	Kombinovaná štandardná neistota (u_c) a rozšírená neistota (U).....	82
7.4	Kvantifikácia zložiek neistôt a stanovenie rozšírenej neistoty merania (SOL – pravítko)	82
7.4.1	Štatistická analýza série pozorovaní – vyhodnotenie neistoty spôsobom A (u_A).....	82
7.4.2	Neistota kalibrácie etalónu (u_{B1})	83
7.4.3	Vplyv rozlišovacej schopnosti stroja (u_{B2}).....	83
7.4.4	Kombinovaná štandardná neistota (u_c) a rozšírená neistota (U).....	83
7.5	Kvantifikácia zložiek neistôt a stanovenie rozšírenej neistoty merania (SOL – krúžok - kruhovitosť)	83
7.5.1	Štatistická analýza série pozorovaní – vyhodnotenie neistoty spôsobom A (u_A).....	84
7.5.2	Neistota kalibrácie etalónu (u_{B1})	84
7.5.3	Vplyv rozlišovacej schopnosti stroja (u_{B2}).....	84

7.5.4	Kombinovaná štandardná neistota (u_c) a rozšírená neistota (U).....	84
7.6	Kvantifikácia zložiek neistôt a stanovenie rozšírenej neistoty merania (rameno Hexagon – krúžok – priemer)	85
7.6.1	Štatistická analýza série pozorovaní – vyhodnotenie neistoty spôsobom A (u_A).....	85
7.6.2	Neistota kalibrácie etalónu (u_{B1}).....	85
7.6.3	Vplyv rozlišovacej schopnosti stroja (u_{B2})	85
7.6.4	Vplyv rozdielu teploty CMM a meraného etalónu (u_{B3})	85
7.6.5	Vplyv rozdielu teploty od 20 °C (u_{B4})	85
7.6.6	Kombinovaná štandardná neistota (u_c) a rozšírená neistota (U).....	85
7.7	Kvantifikácia zložiek neistôt a stanovenie rozšírenej neistoty merania (rameno Hexagon – uhol).....	86
7.7.1	Štatistická analýza série pozorovaní – vyhodnotenie neistoty spôsobom A (u_A).....	86
7.7.2	Neistota kalibrácie etalónu (u_{B1}).....	86
7.7.3	Vplyv rozlišovacej schopnosti stroja (u_{B2})	86
7.7.4	Kombinovaná štandardná neistota (u_c) a rozšírená neistota (U).....	87
7.8	Kvantifikácia zložiek neistôt a stanovenie rozšírenej neistoty merania (rameno Hexagon – pravítko)	88
7.8.1	Štatistická analýza série pozorovaní – vyhodnotenie neistoty spôsobom A (u_A).....	88
7.8.2	Neistota kalibrácie etalónu (u_{B1}).....	88
7.8.3	Vplyv rozlišovacej schopnosti stroja (u_{B2})	88
7.8.4	Kombinovaná štandardná neistota (u_c) a rozšírená neistota (U).....	88
7.9	Kvantifikácia zložiek neistôt a stanovenie rozšírenej neistoty merania (rameno Hexagon – krúžok - kruhovitosť)	89
7.9.1	Štatistická analýza série pozorovaní – vyhodnotenie neistoty spôsobom A (u_A).....	89
7.9.2	Neistota kalibrácie etalónu (u_{B1}).....	89
7.9.3	Vplyv rozlišovacej schopnosti stroja (u_{B2})	89
7.9.4	Kombinovaná štandardná neistota (u_c) a rozšírená neistota (U).....	89
8	VYHODNOTENIE DOSIAHNUTÝCH VÝSLEDKOV	91
8.1	Vyhodnotenie podľa ČSN EN ISO 14253-1	91
8.2	Porovnanie merania uhlových mierok (rozmer uhla)	92
8.3	Porovnanie merania pravítka (priamosť)	92
8.4	Porovnanie merania krúžkov (kruhovitosť).....	93
8.5	Porovnanie merania krúžkov (priemer)	94
9	ZÁVER.....	95
	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	97
	ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV.....	101
	ZOZNAM OBRÁZKOV	103
	ZOZNAM TABULIEK	105
	ZOZNAM PRÍLOH	107

1 ÚVOD

V súčasnej dobe možno vo všetkých priemyselných odvetviach pozorovať neustály nárast požiadaviek na celkovú kvalitu výrobkov, ich bezpečnostné štandardy apod. Z pohľadu udržania si stabilnej pozície na trhu, plnenie týchto požiadaviek vytvára na výrobcov určitý tlak, ktorému musia čeliť. S tým sú spojené aj nároky na zefektívňovanie a zrýchľovanie výrobných procesov, ktoré sú predpokladom pre dosahovanie vysokých cieľov.

Mnohé z týchto požiadaviek majú merateľný charakter. Najčastejšie vo forme danej špecifikácie, ktorá je zväčša vyjadrená určitým intervalom. Keďže procesy výroby nikdy nedokážu zaručiť nulovú variabilitu výstupných parametrov produktu, je daný výrobok nutné podrobiť overeniu zhody s touto špecifikáciou. Tu nastáva potreba uplatnenia metrologických aplikácií a použitia vhodnej meracej techniky. S rastúcimi požiadavkami na výrobky avšak rastú aj požiadavky na čoraz sofistikovanejšie a najmä rýchle meracie procesy. K vyspelým procesom náleží použitie moderného prístrojového vybavenia.

Medzi azda najžiadanejšie vlastnosti súčasnej meracej techniky možno zaradiť presnosť a špecifickosť použitia pre konkrétnu aplikáciu. Pre pokročilé merania sa v dnešnej dobe vo vysokej miere využívajú rôzne typy súradnicových meracích strojov, označené aj ako CMM (Coordinate Measuring Machines). Meranie pomocou týchto strojov predstavuje moderný, rýchly a efektívny spôsob ako získať komplexné a presné informácie o rôznych geometrických parametroch výrobkov. V závislosti na potrebách a možnostiach merania môžu pracovať na rôznom princípe, či mať rôznu veľkosť. Princíp merania na CMM vychádza z vyhodnotenia geometrických charakteristík reálnej súčasti na základe získaných súradníc v rámci meracieho priestoru CMM. Následne dôjde k porovnaniu so zadanou špecifikáciou a rozhodnutiu o zhode resp. nezhode. Pokročilé softwarové možnosti poskytujú rôzne spôsoby ako je možné získané dáta ďalej spracovávať.

Keďže v praxi meracie zariadenie pracuje s určitou úrovňou chyby, je potrebné aby sme pri meraní mali o týchto odchýlkach relevantné informácie. K dosiahnutiu požadovanej úrovne presnosti je preto nevyhnutné používané CMM stroje podrobiť pravidelnej kontrole a kalibrácii. Keďže CMM stroje umožňujú meranie mnohých geometrických veličín a charakteristík ako napríklad dĺžka, uhol, tvar alebo poloha, je potrebné sa pri ich kalibrácii zamerať jednotlivo na tieto uvedené charakteristiky. To nám umožní získať komplexné a hodnotné informácie o presnosti stroja. Na základe dosiahnutých výsledkov je potom možné aplikáciu CMM zamerať na meranie vhodných veličín. Účelom tejto práce bude práve dopracovať sa k takýmto výsledkom, na základe ktorých bude možné vzájomné porovnanie CMM strojov.

2 MOTIVÁCIA

Meranie je metóda, ktorá má v kontexte systému managementu kvality podľa normy ČSN EN ISO 9001 nezastupiteľnú úlohu potrebnú pre zaistenie efektívneho fungovania a riadenia procesov v rámci organizácie. Povinnosťou organizácií zapojených do QMS je pre overenie zhody svojich produktov a služieb určiť potrebné zdroje (vrátane dokumentovaných informácií o týchto zdrojoch), ktoré zaistia platné a spoľahlivé výsledky. [1]

V praxi sa často vyskytuje požiadavka na nadväznosť merania, ktorá sa považuje za nevyhnutnú súčasť poskytovania dôvery v platnosť výsledkov merania. K tomu sa požaduje aby meracie vybavenie bolo v stanovených intervaloch alebo pred použitím kalibrované, alebo overované podľa etalónov nadviazaných na medzinárodné alebo národné etalóny. Ďalej sa vyžaduje, aby používané meradlo bolo náležite označené a chránené proti zmenám nastavenia, poškodením alebo znehodnotením, čo by mohlo negatívne ovplyvniť výsledky merania. Informácie a vhodné dáta vyplývajúce z meraní sú následne podrobené analýze (vrátane štatistických metód) a používajú sa k hodnoteniu rôznych výkonnostných ukazovateľov. [1]

Požiadavky týkajúce sa procesu kalibrácie sú ďalej zahrnuté v norme ČSN EN ISO/IEC 17025 (Všeobecné požiadavky na kompetenciu skúšobných a kalibračných laboratórií). Meracie zariadenie musí byť kalibrované v prípade, že presnosť merania alebo neistota merania ovplyvňuje platnosť uvádzaných výsledkov resp. v prípade už spomínaného zaistenia metrologickej nadväznosti uvádzaných výsledkov. Metrologická nadväznosť vychádza z dokumentovaného a neprerušovaného reťazca kalibrácií, z ktorých každá prispieva k neistote merania a vzťahuje ju k príslušnej referencii. Zariadenia vyžadujúce kalibráciu sú patrične označené jej stavom a dobou platnosti. [2]

Súčasťou procesu každej kalibrácie je za použitia vhodných metód analýzy aj identifikácia významných zložiek neistoty merania a jej vyhodnotenie. Výsledky kalibrácie musia byť uvedené presne, jednoznačne a objektívne, a musia byť dokumentované formou výsledkovej správy (napr. kalibračný list), kde sú uvedené všetky informácie pre interpretáciu výsledkov. Medzi ďalšie náležitosti kalibračného listu patrí aj neistota výsledku merania, podmienky prostredia, vyhlásenie o metrologickej nadväznosti atď. [2]

Norma ČSN EN ISO/IEC 17025 tiež definuje požiadavky vzťahujúce sa k zavedeniu systému managementu pre laboratória, ktorý je zároveň v súlade s ISO 9001. Konkrétne je túto zhodu možné dosiahnuť súladom s kapitolami 4 až 7 a zavedením možnosti A resp. možnosti B kapitoly 8 uvedenej normy. Jedná sa najmä o požiadavky, ktoré zodpovedajú zameraniu laboratórnych činností. [2]

3 METROLÓGIA V ČR

3.1 Metrológia a jej úlohy

Medzinárodný metrologický slovník definuje metrológiu (VIM 2.2) ako vedu o meraní vrátane jeho aplikácií. Zároveň metrológia zahŕňa všetky teoretické a praktické aspekty merania, akékoľvek neistoty merania a oblasti použitia. [3] Táto vedecká sféra patrí medzi najstaršie vedy na svete a znalosť toho, ako ju využívať, je zásadnou nutnosťou prakticky pri všetkých vedeckých odboroch. Dôvera spoločnosti v túto disciplínu je dôležitá k tomu, aby mohla prepojiť ľudské činnosti navzájom naprieč zemepisnými a profesijnými hranicami. Túto dôveru a istotu posilňuje širšie využívanie sieťovej spolupráce, spoločných jednotiek miery a spoločných meracích postupov, a tiež uznávanie, akreditácia a vzájomné skúšanie meracích etalónov a laboratórií v rôznych krajinách sveta. Spolupráca je preto v odvetví metrológie kľúčová, aby ľuďom uľahčovala život v mnohých oblastiach života. [4]

Jednotné a presné meranie je jedným zo základných predpokladov vierohodnosti pri obchodovaní s tovarom, ale taktiež je aj jednou z nutných podmienok akejkoľvek efektívnej výroby. V súčasnom svete globalizovaného hospodárstva vznikajú mnohé výrobky z komponentov vyrobených na rôznych miestach sveta a nakoniec zložených v jediný funkčný celok, v ktorom musia časti bezchybne spolupracovať. To je možné len vďaka jednotnému a exaktnému meraniu, čo svedčí o mimoriadnom význame meracej techniky a metrológie na hospodárstvo. [5]

Významným historickým míľnikom na medzinárodnej úrovni bola dohoda z roku 1875 zvaná Metrická konvencia, ktorou bol prijatý systém jednotiek a ich etalónov, ktorý sa v súlade s vývojom poznatkov stále upresňuje. V podstate ale tento systém zaviedol dlhodobú a celosvetovú zlučiteľnosť meraní s cieľom podporiť medzinárodný obchod a výrobnú kooperáciu. Súčasťou dohody bolo aj zriadenie Medzinárodného úradu pre váhy a miery vo francúzskom Sèvres (BIPM), ktorý uchováva medzinárodné etalóny jednotiek. Ďalším významným krokom bolo prijatie modernej podoby metrického systému – Medzinárodnej sústavy jednotiek SI, a to v roku 1960. [5]

Vo všeobecnosti by sme mohli úlohy súčasnej metrológie zhrnúť do nasledovných bodov:

- Definovanie medzinárodne uznávaných jednotiek merania (napr. meter).
- Realizácia jednotiek merania pomocou vedeckých metód.
- Vytváranie reťazcov nadväznosti cestou stanovenia a dokumentovania hodnoty a presnosti merania a prenosu týchto údajov. [4]

Metrológia je ďalej charakteristická taktiež technickým rozvojom a pokrokom, jej využívaním v nových odvetviach alebo uplatnením výpočtovej techniky, elektroniky a automatizácie.

3.2 Vybrané pojmy a definície

V tejto podkapitole sú uvedené definície niektorých pojmov a termínov z oblasti metrológie alebo pojmov, ktoré súvisia s riešenou problematikou.

Kalibrácia (VIM 2.39) – činnosť, ktorá za špecifikovaných podmienok v prvom kroku stanoví vzťah medzi hodnotami veličiny s neistotami merania poskytnutými etalónmi a zodpovedajúcimi indikáciami s pridruženými neistotami merania a v druhom kroku použije tieto informácie k stanoveniu vzťahu pre získanie výsledku merania z indikácie. Kalibrácia býva vyjadrená údajom, kalibračnou funkciou, krivkou, diagramom alebo tabuľkou, a nemala by sa zamieňať s justovaním meracieho systému ani overením kalibrácie. [3]

Kalibrácia je nevyhnutná k tomu, aby sa zaistila konzistencia údajov meracieho zariadenia s iným meraním, správnosť údajov uvádzaných prístrojom a aby bolo známe, s akou neistotou údajov meradla je potrebné počítať. [5] Jedná sa o základný prostriedok pri zaistovaní nadväznosti merania. [4]

Overovanie (VIM 2.44) – poskytnutie objektívneho dôkazu, že daná položka spĺňa špecifikované požiadavky. Položkou môže byť napr. proces, postup merania, zlúčenina alebo merací systém. Špecifikovanými požiadavkami môže byť napríklad splnenie špecifikácií výrobcu. [3] V legálnej metrologii sa overujú požadované metrologické vlastnosti stanovených meradiel. Následne je takéto meradlo opatrené úradnou značkou od ČMI alebo od iného autorizovaného orgánu alebo sa vystaví overovací list. [6]

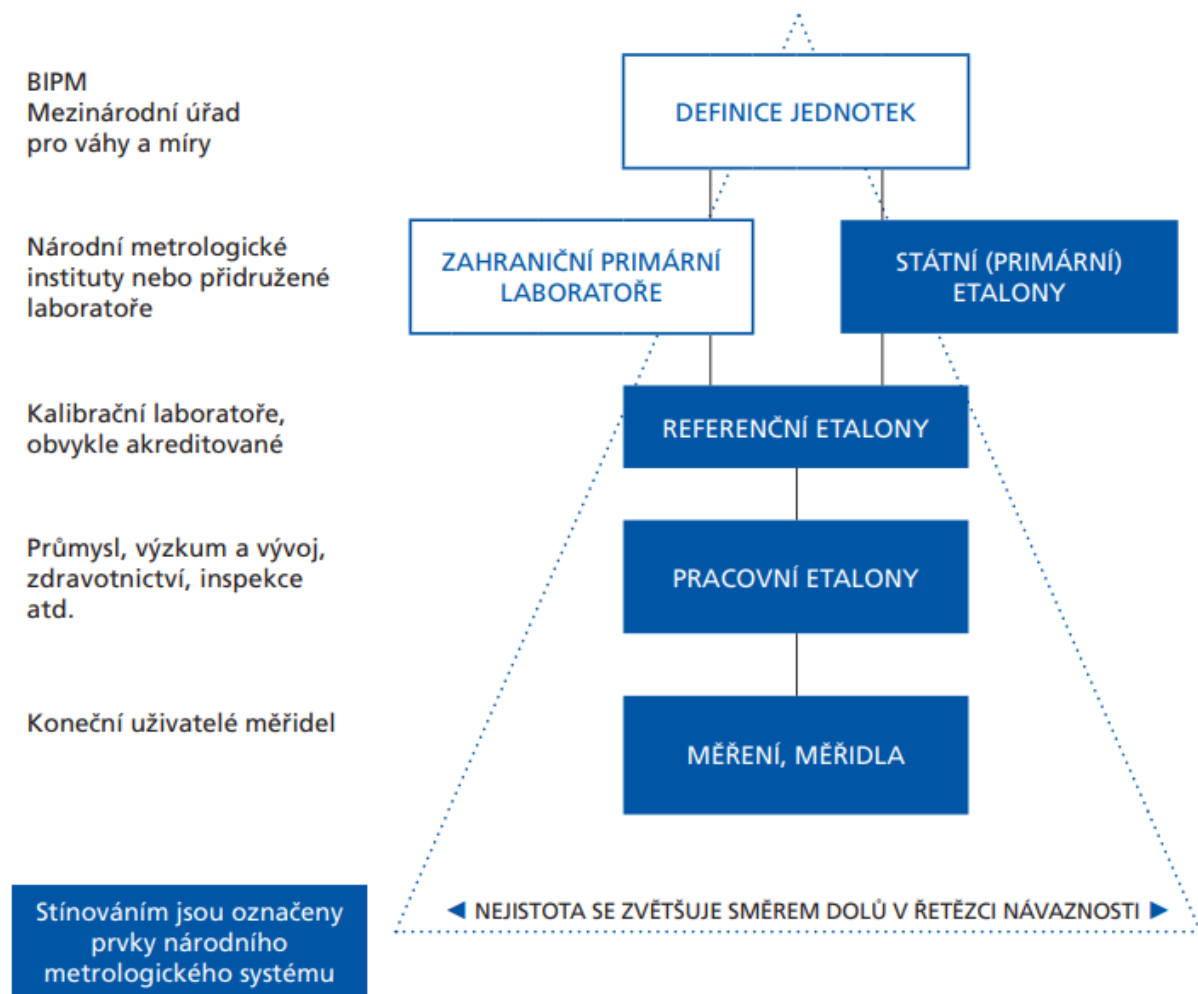
Rozdiel medzi kalibráciou a overovaním spočíva v tom, že pri overení sa skúma zhoda metrologických charakteristík týchto meradiel s úradne stanovenými požiadavkami, najmä s maximálnymi dovolenými chybami. Pri kalibrácii sa kvantitatívne zisťuje vzťah medzi nameranou hodnotou a menovitou hodnotou nastavenou etalónom. Obe činnosti sú formou metrologickej nadväznosti meradiel. [7]

Etalón (VIM 5.1) – definovaný ako realizácia danej veličiny so stanovenou hodnotou veličiny a pridruženou neistotou merania, slúži ako referencia. [3] Etalón zároveň slúži na uchovávanie danej jednotky alebo stupnice a na jej prenos na meradlá nižšej presnosti. Uchovávaním etalónu sa rozumejú všetky úkony potrebné na zachovanie metrologických charakteristík etalónu v stanovených medziach. [6]

Justovanie meracieho systému (VIM 3.11) – súbor činností vykonávaných na meracom systéme tak, aby poskytoval predpísané indikácie zodpovedajúce daným hodnotám meranej veličiny. Nejedná sa o kalibráciu, ktorá je spravidla vykonávaná pred aj po justovaní. [3]

Metrologická nadväznosť (VIM 2.41) – vlastnosť výsledku merania, pomocou ktorej sa výsledok môže vzťahovať k stanovenej referencii cez dokumentovaný neprerušovaný reťazec kalibrácií, z ktorej sa každá podieľa svojím príspevkom na stanovenej neistote merania. [3] Inak povedané, pri meradlách sa nadväznosť zaisťuje ich zaradením do neprerušovanej postupnosti prenosu hodnoty veličiny počínajúcej etalónom najvyššej kvality. [6]

Dôležitý prvok, ktorý sa používa k zaisteniu metrologickej nadväznosti, je podľa ILAC *reťazec metrologickej nadväznosti* (VIM 2.42 – sled etalónov a kalibrácií, prostredníctvom neho vyjadříme výsledok merania k referencii). Reťazec metrologickej nadväznosti je definovaný pomocou *hierarchie kalibrácie* (VIM 2.40), ktorý predstavuje sled kalibrácií od referencie (napr. definícia meracej jednotky) ku konečnému meradlu. Neistota merania sa s počtom kalibrácií vždy zvyšuje, pričom záver každej kalibrácie je závislý na závere kalibrácie predošlej. [3] Schéma reťazca metrologickej nadväznosti je zobrazená na obr. 1.



Obr. 1 Ret'azec metrologickej nadvaznosti [4]

Čitlivosť meracieho systému (VIM 4.12) – podiel zmeny indikácie meracieho zariadenia a zodpovedajúcej zmeny hodnoty meranej veličiny. Je nevyhnutné, aby zmena hodnoty meranej veličiny bola v porovnaní s rozlíšením veľká. [3]

Rozlíšenie (VIM 4.14) – najmenšia zmena meranej veličiny, ktorá spôsobí rozpoznateľnú zmenu v indikácii. Rozlíšenie môže byť závislé na šume alebo na trení. Na zobrazovacom zariadení ide o jednoznačne rozlíšiteľný najmenší rozdiel medzi zobrazenými indikáciami. [3]

Nameraná hodnota veličiny (VIM 2.10) – hodnota predstavujúca výsledok merania resp. odhad jedinečnej pravej hodnoty veličiny. [3]

Pravá hodnota veličiny (skutočná hodnota, VIM 2.11) – hodnota rovná alebo v zhode s definíciou veličiny, z princípu je jedinečná a v praxi nepoznatelná. [3]

Konvenčná hodnota veličiny (VIM 2.12) – pre daný účel dohodou priradená hodnota k veličine, v niektorých prípadoch odhad pravej hodnoty veličiny. [3]

Referenčná hodnota veličiny (VIM 5.18) – hodnota využívaná ako základ pre komparáciu s hodnotami veličín totožnej povahy. Môže predstavovať pravú hodnotu meranej veličiny, alebo konvenčnú hodnotu veličiny. [3]

Výsledok merania (VIM 2.9) – množina hodnôt veličiny priradená meranej veličine vrátane akejkoľvek ďalšej dostupnej relevantnej informácie. Výsledok merania je

vo všeobecnosti vyjadrený ako jedna *nameraná hodnota veličiny a neistota merania*. [3] Výsledok merania s príslušnou neistotou merania sa zapisuje v tvare (3.1),

$$Y = y \pm U \quad (3.1)$$

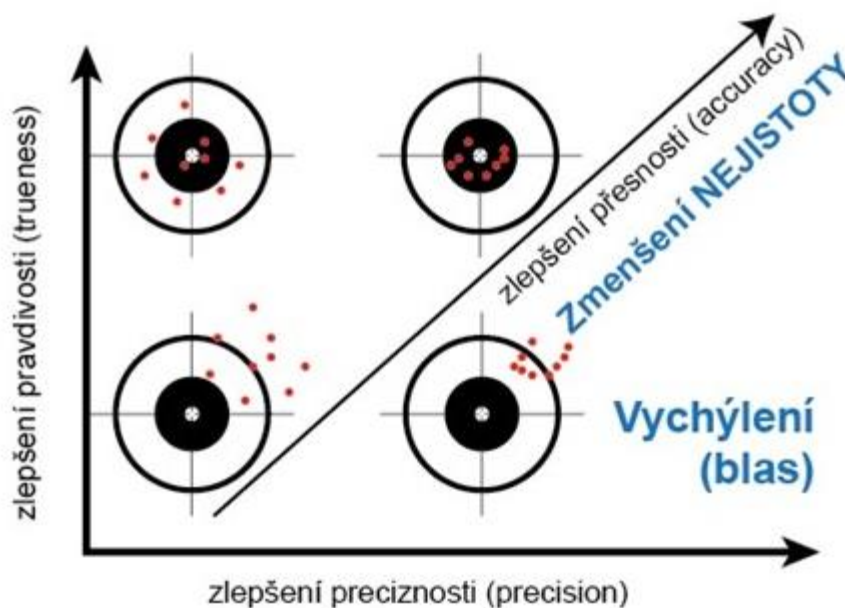
kde Y je meraná veličina, y je odhad meranej veličiny a U je rozšírená neistota meranej veličiny uvedená v rovnakých jednotkách s najviac dvoma platnými číslicami, pričom y je obdobne zaokrúhľená na rovnaký počet číslic. [4] [5]

Presnosť merania (VIM 2.13) – tesnosť zhody medzi nameranou a pravou hodnotou meranej veličiny. [3] Presnosť merania nie je možné vyjadriť číselne, preto ide o pojem, ktorý hodnotí meranie z kvalitatívneho hľadiska. Číselná charakteristika, ktorá ale najlepšie vyjadruje presnosť výsledku merania je neistota merania. [8]

Správnosť merania (pravdivosť merania, VIM 2.14) – tesnosť zhody medzi aritmetickým priemerom nekonečného počtu opakovaných meraní veličiny a referenčnej hodnoty. Túto charakteristiku nie je možné vyjadriť číselne. [3] Správnosť merania ale ovplyvňuje systematickú chybu, ktorá môže byť eliminovaná korekciou. [8]

Precíznosť merania (VIM 2.15) – tesnosť zhody medzi jednotlivými indikáciami resp. nameranými hodnotami veličiny za špecifikovaných podmienok, ako opakovateľnosť alebo reprodukovateľnosť. [3] Precíznosť merania môže byť vyjadrená číselne pomocou charakteristík variability, ako napríklad rozptyl, rozpätie alebo smerodajná odchýlka. [8]

Na obr. 2 je zobrazený princíp hodnotenia presnosti a neistoty merania použitého meradla. Optimálny prípad nastáva vtedy, ak dosiahneme čo najnižšiu hodnotu neistoty merania, a zároveň čo najvyššiu úroveň presnosti. Tento stav docielime za predpokladu nízkych hodnôt chýb merania a biasu (diferencia medzi nameranou hodnotou získanou z opakovaných meraní totožného vzorku a referenčnou hodnotou) nameraných hodnôt. [8] Okrem iného nám obrázok poskytuje vzťah medzi správnosťou (pravdivosťou), precíznosťou a presnosťou merania v súvislosti k polohe a variabilite indikovaných hodnôt merania.



Obr. 2 Princíp presného merania [9]

3.3 Národný metrologický systém

Pod pojmom národný metrologický systém sa rozumejú systémové činnosti a procesy, ktoré slúžia k zaisteniu jednotnosti a správnej funkcie meradiel a meraní v danom štáte. Tieto činnosti sú realizované prostredníctvom sústavy technických prostriedkov a zariadení, ale aj technických predpisov, práv a povinností správnych orgánov a zúčastnených osôb, či už právnických alebo podnikajúcich fyzických. [10]

Medzi základné oblasti pôsobnosti NMS patria:

- **Fundamentálna metrológia (vedecká metrológia)** – zaoberá sa sústavou meracích jednotiek a štátnymi etalónmi, činnosť s najvyššou presnosťou merania v danom odbore
- **Legálna metrológia** – zabezpečuje jednotnosť a správnosť meraní v regulovanej oblasti podľa platnej legislatívy
- **Priemyselná metrológia** – zameriava sa na obsluhu a náležité fungovanie meradiel používaných v podnikovej sfére, zaisťuje predpoklady pre dosiahnutie vysokej akosti širokého spektra výrobkov a služieb [4] [11]

Medzi základné prvky NMS ČR patria spotrebiteľia, verejnosť (občania ČR a cudzinci) a podnikateľské subjekty vrátane subjektov vyrábajúcich a poskytujúcich opravu a montáž meradiel. Ďalšie prvky NMS ČR zabezpečujú jeho management a služby pre zmienené základné prvky a taktiež sa podieľajú na rozvoji metrológie a nadväzujú medzinárodnú spoluprácu. Významnú úlohu má medzi nimi štát, ktorého úlohou je mimo iného aj tvorba súvisiacej legislatívy (najmä oblasť legálnej metrológie) a činnosti súvisiace s jej dodržiavaním. [10]

Ďalšie zložky NMS tvorí vzdelávanie, sieť certifikačných orgánov pre certifikáciu osôb alebo český národný akreditačný systém, na základe ktorého je možné preukazovať odbornú spôsobilosť kalibračných a skúšobných laboratórií alebo certifikačných a inšpekčných orgánov. NMS ČR je porovnateľný s ostatnými členskými štátmi Metrickej konvencie, ale najmä so systémami štátov EU. Tomu zodpovedá aj zapojenie do spolupráce na medzinárodnej úrovni. [10] Štruktúra a vzťahy medzi jednotlivými prvkami NMS ČR sú zobrazené na obr. 3. Nižšie sú uvedené niektoré dôležité subjekty aktívne pôsobiace v NMS ČR a ich úlohy a predmet činnosti v rámci systému.

3.3.1 Ministerstvo priemyslu a obchodu (MPO)

MPO je ústredným orgánom štátnej správy, ktoré má okrem iného kompetencie na zabezpečovanie výkonu štátnej správy v oblasti technickej normalizácie, metrológie a štátneho skúšobníctva. Úlohy MPO v oblasti metrológie sú napríklad:

- navrhovať príslušné legislatívne akty,
- navrhovať koncepciu rozvoja NMS ČR,
- riadiť ÚNMZ a ČMI. [4]

3.3.2 Úrad pre technickú normalizáciu, metrológiu a štátne skúšobníctvo (ÚNMZ)

ÚNMZ je orgán štátnej správy v organizačnej zložke rezortu MPO, ktorého hlavným poslaním je zabezpečovať úlohy vyplývajúce z legislatívy týkajúcej sa technickej normalizácie, metrológie a štátneho skúšobníctva, či už na národnej alebo európskej úrovni. [4] Medzi hlavné oblasti pôsobnosti ÚNMZ v oblasti metrológie patria:

- stanoviť a zabezpečiť realizáciu programu štátnej metrologie,
- zastupovať ČR v medzinárodných organizáciách,
- autorizovať subjekty na úkony v oblasti štátnej metrologickej kontroly meradiel a úradného merania,
- poverovať subjekty na uchovávanie štátnych etalónov,
- vykonávať kontrolu činnosti ČMI,
- kontrolovať dodržiavanie povinností stanovených príslušnými zákonmi;
- oznamovať orgánom Európskych spoločenstiev (ES) informácie o subjektoch poverených na typové schválenie meradiel a na overovanie meradiel. [10]

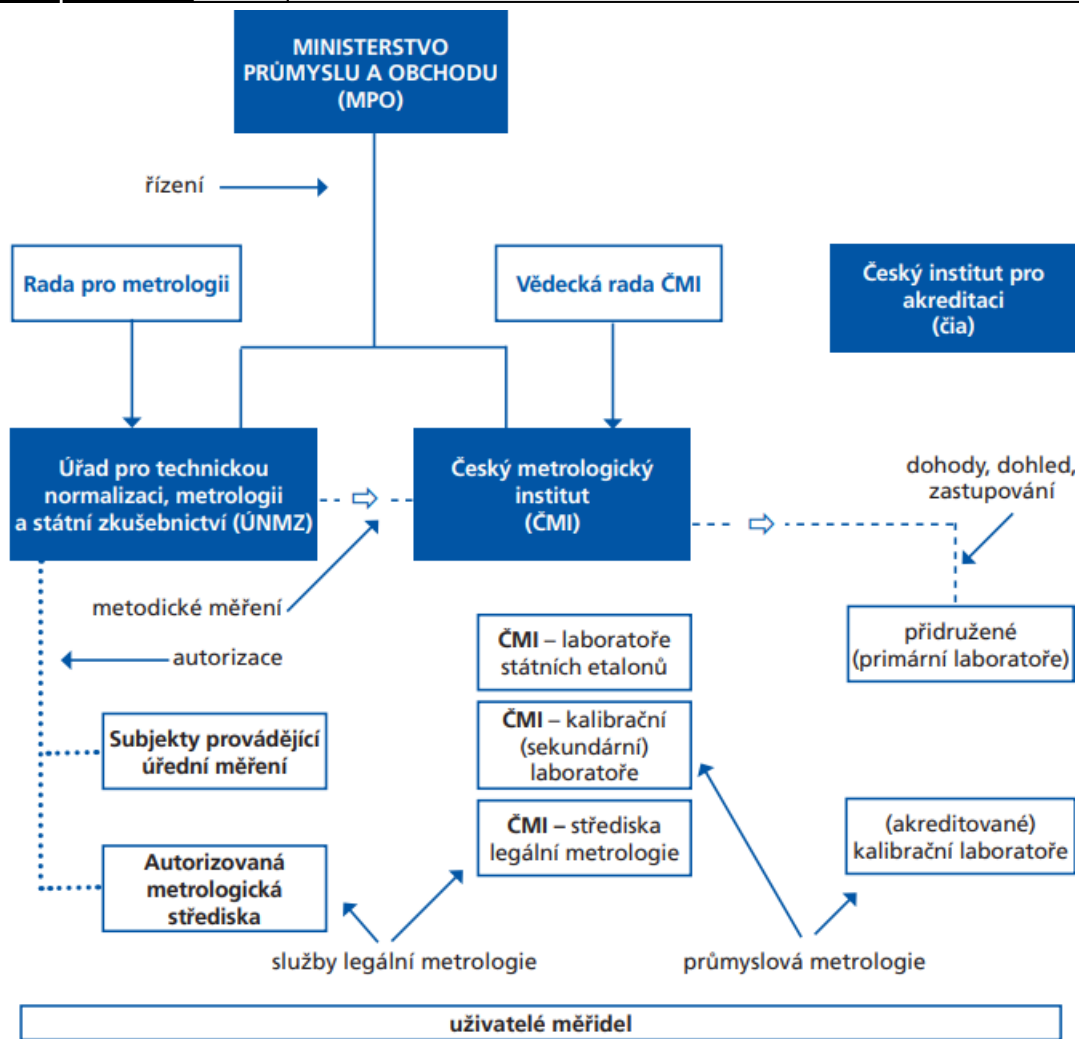
3.3.3 Český metrologický inštitút (ČMI)

ČMI je národný metrologický inštitút ČR, ktorého hlavnou funkciou je výkon štátnej správy v oblasti metrologie v rámci zákona o metrologii. Zároveň je hlavným výkonným orgánom NMS ČR. Hlavné činnosti v metrologii, ktoré ČMI vykonáva sú:

- metrologický výskum a uchovávanie štátnych etalónov vrátane zabezpečovania metrologickej nadväznosti meradiel,
- certifikácia referenčných materiálov,
- výkon štátnej metrologickej kontroly meradiel,
- vydávanie predpisov pre oblasť metrologie,
- registrácia a dozor nad subjektmi, ktoré vyrábajú, opravujú alebo vykonávajú montáž stanovených meradiel,
- výkon štátneho metrologického dozoru u autorizovaných metrologických stredísk a iných autorizovaných subjektov,
- metrologickú kontrolu hotového baleného tovaru a fliaš,
- poskytuje kvalifikované služby v oblasti metrologie. [4]

3.3.4 Český inštitút pre akreditáciu (ČIA)

ČIA má funkciu národného akreditačného orgánu. Je to organizácia, ktorá v rámci NMS ČR poskytuje služby v oblasti akreditácie a dozoru nad plnením požiadaviek na odbornú spôsobilosť subjektov pôsobiacich v metrologii. ČIA má širokú pôsobnosť, to znamená, že má oprávnenie poskytovať akreditačné služby vo viacerých oblastiach. Medzi tieto oblasti patrí zabezpečovanie akreditácií napríklad skúšobných, zdravotníckych a kalibračných laboratórií, rôznych certifikačných alebo inšpekčných orgánov, a iných subjektov podliehajúcich akreditácii. [4]



Obr. 3 Národní metrologický systém ČR [4]

3.4 Legislativa v metrologii

3.4.1 Zákon o metrologii

NMS ČR je postavený a zabezpečovaný na základe právnej úpravy, ktorá vymedzuje isté práva a povinnosti subjektov pôsobiacich v oblasti metrologie. Základným dokumentom tejto právnej úpravy je zákon č. 505/1990 Sb. o metrologii v znení neskorších predpisov. [12] Účelom tohto zákona je stanovenie práv a povinností právnických osôb, podnikajúcich fyzických osôb a orgánov štátnej správy, a to v náležitom rozsahu zabezpečujúcim jednotnosť a správnosť meradiel a meraní. [6] Medzi ďalšie relevantné zákony týkajúce sa tejto oblasti patria zákon č. 20/1993 Sb. o zabezpečení výkonu štátnej správy v oblasti technickej normalizácie, metrologie a štátneho skúšobníctva, v znení neskorších predpisov, a zákon č. 22/1997 Sb. o technických požiadavkách na výrobky, v znení neskorších predpisov. Na zákon o metrologii ďalej nadväzujú osobitné vyhlášky MPO a nariadenia vlády ČR týkajúce sa metrologie. [12]

3.4.2 Rozdelenie meradiel podľa zákona o metrologii

Hlavná funkcia meradiel je určenie hodnoty meranej veličiny. Pre účely zákona o metrologii sa meradlá spoločne s nevyhnutnými pomocnými zariadeniami členia podľa § 3 tohto zákona na:

- a) **etalóny** – vid' definícia v kap. 3.2;
- b) **pracovné meradlá stanovené** – meradlá určené vyhláškou MPO k povinnému overovaniu s ohľadom na ich význam, ako napr. v záväzkových vzťahoch, poskytovaní služieb, pri stanovení sankcií, poplatkov, taríf a daní, pre ochranu zdravia a životného prostredia, pre bezpečnosť pri práci a pod.;
- c) **pracovné meradlá nestanovené** – meradlá, ktoré nie sú etalónom ani stanoveným meradlom;
- d) **certifikované referenčné materiály a ostatné referenčné materiály**, pokiaľ sú určené k funkcii etalónu alebo stanoveného alebo pracovného meradla – materiály alebo látky presne stanoveného zloženia alebo vlastností, používané najmä na overovanie alebo kalibráciu prístrojov, vyhodnocovanie meracích metód a kvantitatívne určovanie vlastností materiálov. [6]

3.5 Chyby merania

Chyba merania (VIM 2.16) je definovaná ako nameraná hodnota veličiny zmenšená o hodnotu referencie. Chyba merania môže byť známa aj neznáma. [3]

Miera presnosti celého procesu merania je ovplyvnená viacerými faktormi ako vlastnosťami meradla, meracej metódy alebo vplyvmi operátora, ktorý meranie vykonáva. Každý reálny proces merania je zaťažený nejakou chybou. Z toho vyplýva, že nikdy nie je možné zistiť pravú (skutočnú) hodnotu veličiny. Jednou z charakteristických príčin tejto odchýlky je vplyv spätného pôsobenia meracieho zariadenia na objekt merania, čím dochádza na tomto objekte k zmenám pomerov. [13]

Výsledok merania je v dôsledku uvedených javov nevyhnutné spracovávať ako veličinu, ktorá nadobúda náhodné hodnoty s istou pravdepodobnosťou. Aby výsledky merania boli relevantné, cieľom každého merania je absolútnu chybu minimalizovať. [13] V nasledujúcich podkapitolách je uvedené základné rozdelenie chýb podľa spôsobu výskytu. Na obr. 4 je potom zobrazená schéma týchto chýb.

3.5.1 Náhodné chyby

Náhodné chyby (VIM 2.19) sú zložkou celkovej chyby merania, ktoré sa v opakovaných meraniach nepredvídateľne menia. Referenciou pre náhodnú chybu merania je aritmetický priemer získaný z nekonečného počtu opakovaných meraní rovnakej veličiny. [3] Vplyv náhodných chýb je možné eliminovať len veľkým počtom meraní za nemenných podmienok, kedy sú pri normálnom rozdelení symetricky rozložené okolo pravej hodnoty. [13] Na tieto chyby pôsobí mnoho náhodných vplyvov, a preto ich nie je možné jednoznačne určiť. Náhodné chyby negatívne ovplyvňujú najmä presnosť merania. [8]

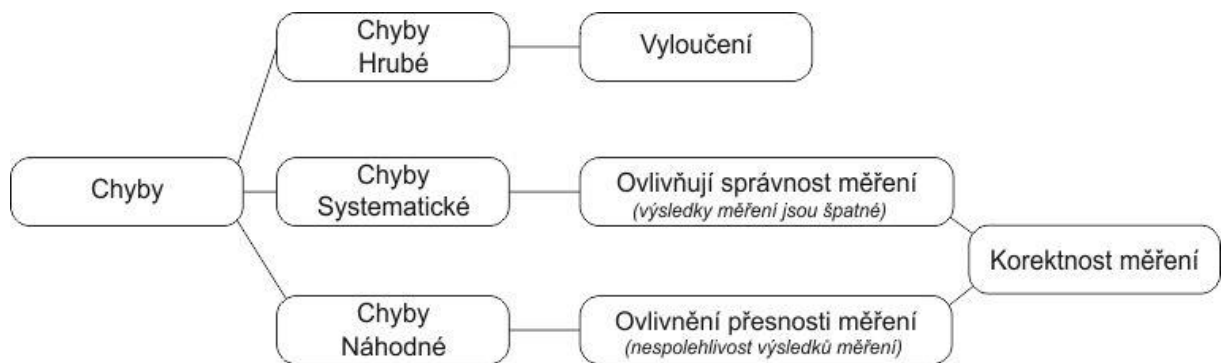
3.5.2 Systematické chyby

Systematické chyby (VIM 2.17) sú zložkou celkovej chyby merania, ktorá v opakovaných meraniach zostáva konštantná alebo sa predvídateľne mení. Referenciou pre systematickú chybu merania je pravá hodnota veličiny (etalónu) alebo konvenčná hodnota veličiny. [3] Zvyčajne sú tieto chyby spôsobené členmi v meracom reťazci a metódou merania. Ak sú známe, obvykle ich vieme eliminovať zavedením korekcií pri vyhodnocovaní merania alebo úpravou meracieho systému v podobe odstránenia príčin ich vzniku alebo zavedením vhodnej korekčnej veličiny. Na druhej strane môžu existovať chyby, ktoré nedokážeme určiť

ani korigovať. [13] Na rozdiel od chýb náhodných, chyby systematické negatívne ovplyvňujú správnosť merania. [8]

3.5.3 Hrubé chyby

Hrubé chyby sú veľké chyby, ktoré významne skresľujú a znehodnocujú výsledok. [13] Vznikajú napríklad omylom, pri poruche meracieho prístroja alebo nesprávnom usporiadaní experimentu. Hodnota zaťažená touto chybou sa významne líši od ostatných. Takáto hodnota je z metrologického hľadiska neprípustná, a preto sa musí z merania vylúčiť. [8]



Obr. 4 Rozdelenie chýb merania [14]

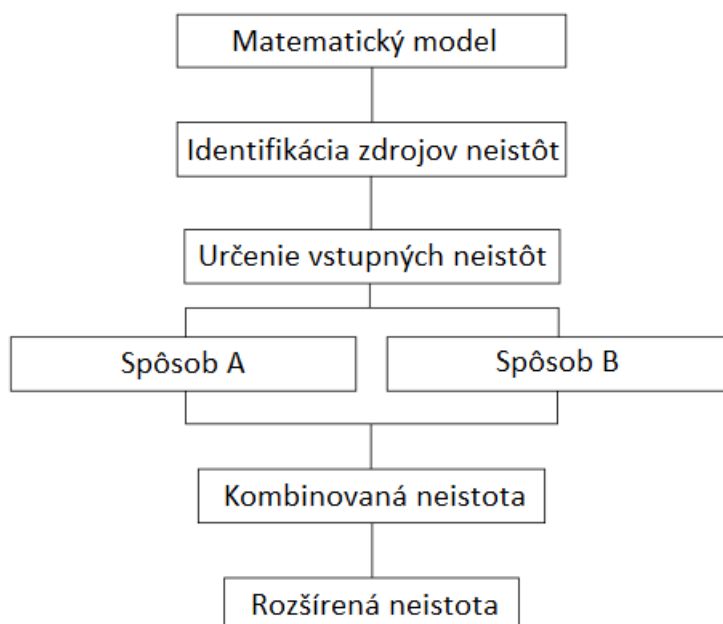
3.6 Neistota merania

Neistota merania (VIM 2.26) je charakterizovaná ako nezáporný parameter, ktorý popisuje rozptýlenie hodnôt veličiny priradených k meranej veličine na základe použitej informácie. [3] Je základným parametrom výsledku merania, ktorý pozostáva z mnohých príspevkov pochádzajúcich zo systematických vplyvov, ktoré by mohli negatívne zaťažiť výsledok merania. Vymedzuje interval, o ktorom sa s určitou úrovňou spoľahlivosti predpokladá, že doň výsledok merania bude patriť. Úplný výsledok merania by mal preto okrem vlastnej hodnoty meranej veličiny zahŕňať aj pridruženú neistotu merania. Iná definícia neistoty merania zasa znie, že sa jedná o parameter pridružený k výsledku merania, ktorý charakterizuje rozptyl hodnôt, ktoré by mohli byť dôvodne prisudzované k meranej veličine. [15]

Medzi zdroje neistôt možno zaradiť všetky javy, ktoré môžu nejakým spôsobom ovplyvniť neurčitost, a tým vzdialiť nameranú hodnotu od skutočnej. Medzi takéto vplyvy môžeme zaradiť napríklad nevhodný výber prístroja (rozlišovacia schopnosť), nevhodný postup merania, nekompensované a neznáme vplyvy prostredia, nedodržanie zhodných podmienok pri opakovaných meraniach, subjektívne vplyvy obsluhy, nepresnosť etalónov a referenčných materiálov, alebo linearizácia, aproximácia, interpolácia a extrapolácia pri vyhodnotení. [15]

K popisu merania je možné pristúpiť dvoma prístupmi, a to hodnotením pomocou chýb a hodnotením pomocou neistôt. V chybovom prístupe sa pravá hodnota veličiny považuje za jedinečnú a prakticky nepoznatel'nú. Na druhej strane prístup hodnotenia pomocou neistôt pripúšťa, že následkom už zo samej podstaty neúplného množstva podrobností v definícii veličiny neexistuje jediná pravá hodnota veličiny, ale skôr súbor pravých hodnôt veličiny, ktoré sú v zhode s jej definíciou. [3]

Postup stanovovania neistôt merania je možné zo všeobecného hľadiska zhrnúť do niekoľkých krokov, ktorého schematické znázornenie je na obr. 5. Na základe potrieb a špecifik konkrétnej riešenej úlohy je možné tento model modifikovať. [5]



Obr. 5 Schéma určenia neistoty merania [5]

3.6.1 Štatistická analýza série pozorovaní – vyhodnotenie neistoty spôsobom A (u_A)

Stanovenie neistoty vyhodnotenej spôsobom A je založené na štatistickej analýze série niekoľkých pozorovaní, ktoré boli vykonané za rovnakých podmienok nezávisle na sebe. Postup jej určenia je nasledovný. Označme \bar{y} ako odhad hodnoty vstupnej veličiny Y na základe n štatisticky nezávislých pozorovaní ($n > 1$). Tento odhad je daný aritmetickým priemerom individuálnych pozorovaných hodnôt a je vyjadrený vzťahom:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (3.2)$$

kde \bar{y} – aritmetický priemer z individuálnych pozorovaných hodnôt,
 n – počet štatisticky nezávislých pozorovaní (meraní),
 i – číslo merania,
 y_i – i -tá hodnota meranej veličiny Y .

Štandardná neistota merania vyhodnotená spôsobom A, spojená s týmto odhadom, je potom označená ako výberová smerodajná odchýlka aritmetického priemeru podľa vzťahu:

$$u_A = s(\bar{y}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (3.3)$$

kde u_A – neistota vyhodnotená spôsobom A,
 $s(\bar{y})$ – výberová smerodajná odchýlka aritmetického priemeru.

Vzťah (3.3) je platný len za predpokladu dostatočného počtu meraní ($n \geq 10$). V opačnom prípade, keď nie je možné túto podmienku dodržať, je nutné uskutočniť korekciu, ktorá zohľadní nízky počet pozorovaní (meraní). Korekcia je daná vzťahom:

$$u_A = k_s \cdot s(\bar{y}), \quad (3.4)$$

kde k_s – koeficient rozšírenia (Studentovo rozdelenie pravdepodobnosti). [16]

Tento koeficient vychádza zo Studentovho rozdelenia pravdepodobnosti a je závislý na počte meraní n , vid' tab. 3.1 [16]

Tab. 3.1 Hodnoty koeficientu k_s v závislosti na počte meraní n [16]

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
k_s	7,0	2,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1,0	1,0

3.6.2 Vyhodnotenie neistoty spôsobom B (u_B)

Vyhodnotenie štandardnej neistoty spôsobom B nie je založené na štatistickej analýze série pozorovaní, ale na vyhodnotení neistoty vzťahujúcej sa k odhadu vstupnej veličiny. Príslušná štandardná neistota je určená odborným úsudkom na základe všetkých dostupných informácií o možnej variabilite vstupnej veličiny. Do tejto kategórie neistôt zaraďujeme tie, ktoré sú odvodené na základe údajov z predošlých meraní, skúseností so správaním a vlastnosťami príslušných materiálov a zariadení, údajov výrobcu, údajov uvádzaných v kalibračných listoch (iných certifikátoch) a neistôt referenčných údajov prevzatých z príručiek. [17]

V prvom kroku určenia neistoty spôsobom B je potrebné určiť možné zdroje neistôt Z_j , a to za predpokladu, že nie sú korelované. Následne sa pre každý zdroj vytvorí odhad rozsahu odchýlok v medziach $\pm \Delta z_{maxj}$ od referenčnej hodnoty tak, aby bolo jeho prekročenie nepravdepodobné. V ďalšom kroku sa odhadne rozdelenie pravdepodobnosti, ktorému zodpovedajú jednotlivé odchýlky ΔZ v intervale $\pm \Delta z_{maxj}$. Neistota $u_B(z_j)$ pochádzajúca z jednotlivých zdrojov sa následne určí podľa vzťahu: [16]

$$u_B(z_j) = c_j \frac{\Delta z_{maxj}}{\chi}, \quad (3.5)$$

kde c_j – koeficient citlivosti,

Δz_{maxj} – horná (dolná) medzná hodnota odchýlky,

χ – koeficient vychádzajúci z rozdelenia pravdepodobnosti.

Hodnota koeficientu χ má pre normálne (Gaussovo) rozdelenie pravdepodobnosti hodnotu $\chi = 2$, pre rovnomerné rozdelenie $\chi = \sqrt{3}$ (má konštantnú pravdepodobnostnú hustotu), pre trojuholníkové $\chi = \sqrt{6}$. Celková štandardná neistota u_B vyhodnotená spôsobom B sa nakoniec určí zo vzťahu: [16]

$$u_B = \sqrt{\sum_{j=1}^m u_B(z_j)^2}, \quad (3.6)$$

kde m – počet príspevkov (zdrojov) k neistote vyhodnenej spôsobom B

3.6.3 Kombinovaná štandardná neistota (u_C) a rozšírená neistota (U)

Kombinovaná štandardná neistota je štandardná neistota odhadu výstupnej veličiny (výsledok merania) [17], ktorá v našom prípade vznikne kombináciou štandardnej neistoty

vyhodnotenej spôsobom A, a jednotlivých zložiek neistôt vyhodnotených spôsobom B. Výsledná kombinovaná štandardná neistota sa určí zo vzťahu:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (3.7)$$

Interval okolo výsledku merania, v ktorom sa s určitou požadovanou úrovňou pravdepodobnostného pokrytia nachádza výsledok merania, definuje rozšírená neistota U . Získa sa vynásobením kombinovanej štandardnej neistoty odhadu výstupnej veličiny príslušným koeficientom pokrytia, a to v závislosti na požadovanej úrovni spoľahlivosti a na efektívnom počte stupňov voľnosti výstupnej meranej veličiny. [15] Výsledná hodnota rozšírenej neistoty sa preto určí zo vzťahu:

$$U = k \cdot u_C, \quad (3.8)$$

kde k – koeficient rozšírenia

V prípadoch, kedy možno usúdiť, že meraná veličina má normálne (Gaussovo) rozdelenie, a kedy štandardná neistota odhadu výstupnej veličiny je stanovená s dostatočnou spoľahlivosťou, je potrebné použiť štandardný koeficient rozšírenia $k = 2$. Takto stanovená rozšírená neistota odpovedá pravdepodobnosti pokrytia asi 95 %. S týmito podmienkami sa možno stretnúť pri kalibráciách vo väčšine prípadov. [17] V ostatných prípadoch môžu byť za istých okolností použité iné základné koeficienty, a to $k = 2,58$ pre pravdepodobnosť pokrytia približne 99,01 % alebo $k = 3$ pre pravdepodobnosť pokrytia približne 99,73 %. [8]

4 SÚČASNÝ STAV V OBLASTI MERANIA POMOCOU CMM

CMM alebo súradnicový merací stroj je zariadenie používané na meranie fyzikálnych geometrických charakteristík dielov v širokej oblasti aplikácií. [18] CMM majú zaujímavú históriu siahajúcu vyše 60 rokov späť, ktorá sa datuje do roku 1959, keď sa prvýkrát objavili na Medzinárodnej výstave obrábacích strojov v Paríži. Vyrobila ich britská spoločnosť Ferranti, ktorá v roku 1951 vyvinula aj prvý komerčný počítač pre širokú verejnosť. Do výroby komerčných CMM sa v 60. rokoch zapojilo niekoľko veľkých spoločností z najvyspelejších krajín tej doby, vrátane USA, Japonska, Nemecka a Francúzska. Následne ich používanie podnikmi nabralo rýchle tempo. [19]

Oblasť CMM patrí k najrýchlejšie sa rozvíjajúcim oblastiam strojárkej meracej techniky. Umožňujú rýchlu a presnú kontrolu zložitých obrobkov. Prispievajú k zabezpečeniu kvality výroby a tým aj zvyšovaniu konkurencieschopnosti strojárskych produktov. Ich rýchly vývoj súvisí so spresňovaním a zrýchľovaním výrobného procesu, s ktorým musia procesy kontroly a meracia technika držať krok. [20]

CMM sú z hľadiska metrológie vyvinuté od meracích mikroskopov a z hľadiska konštrukcie (technológie) od NC frézok. Prvé CMM boli obmedzené na metrologické laboratórium, avšak pomerne rýchlo sa začali presadzovať aj v dielenskom prostredí. S tým však prichádzali aj isté problémy ako kolísanie okolitej teploty, chvenie a otrasy spôsobené výrobným zariadením či nepriaznivý vplyv chladiacich tekutín. Týmto podmienkam sa musela ich výroba prispôbiť v podobe zmien konštrukcie zložitých CMM či spôsobe snímania meraných rozmerov. Zatiaľ čo pri prvých CMM bolo snímanie predovšetkým dotykové, neskôr sa začali častejšie objavovať optické snímacie hlavy, ktoré umožňujú rýchlejšie snímanie meraných rozmerov a tým aj zvýšenie rýchlosti merania, avšak za cenu nižšej presnosti. Tieto faktory viedli ku vzniku kategórie multisenzorových CMM. [20]

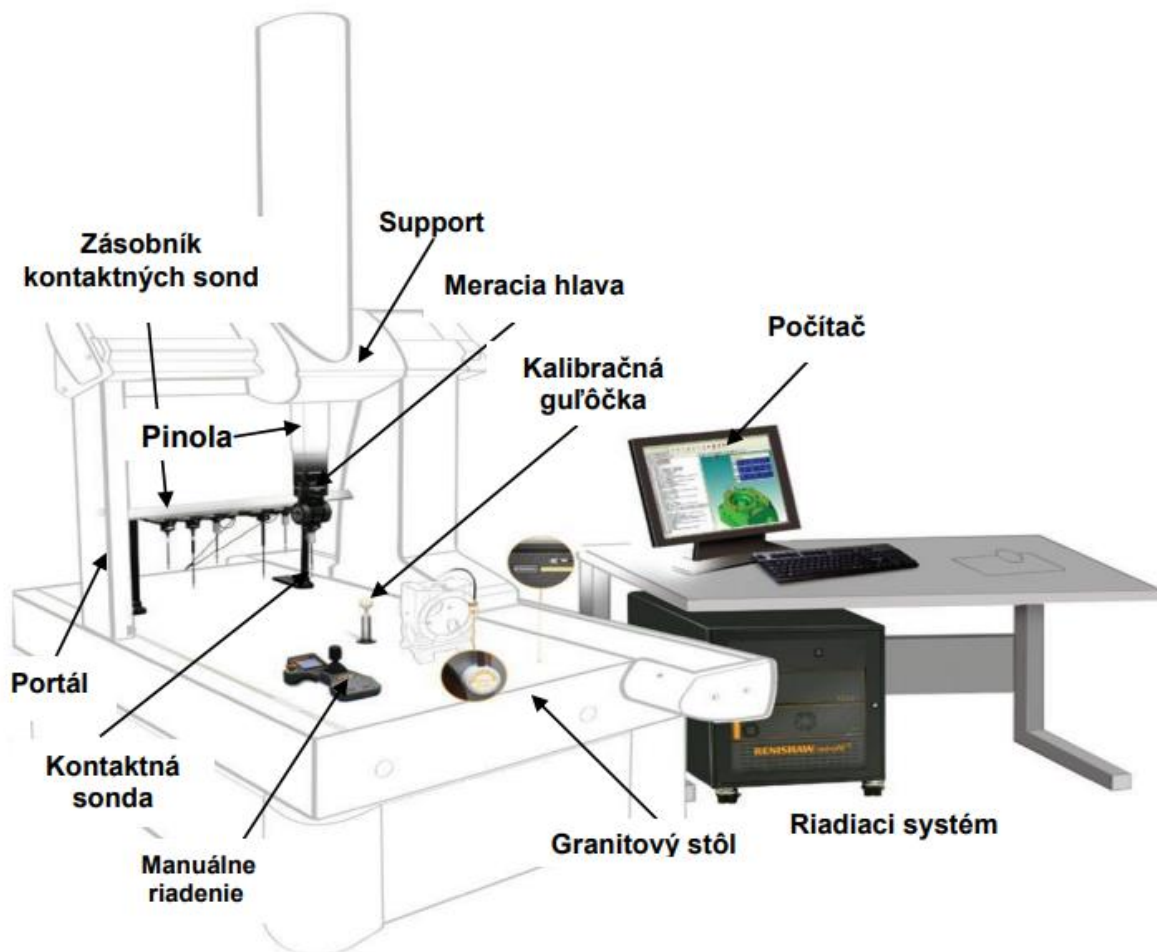
CMM sú počítačom kontrolované zariadenia so sofistikovaným meracím systémom a sú schopné merať v rovine alebo v priestore danej súradnicovej sústavy. Vedia pracovať s dvoma súradnicovými systémami: súradnicový systém stroja a súradnicový systém meraného predmetu. [21] Na meranom predmete môže byť niekoľko súradnicových systémov. [15]

V súčasnosti globálnymi lídrami v produkcii a distribúcii CMM sú napríklad spoločnosti Mitutoyo (Japonsko), Hexagon (USA), Zeiss (Nemecko), Wenzel (Nemecko), alebo Nikon Metrology. [19]

4.1 Popis a funkcie CMM

Každý CMM je zložený z niekoľkých čiastkových a navzájom prepojených subsystémov (obr. 6). Vo všeobecnosti medzi tieto systémy patria:

- pohonný systém,
- odmeriavací systém,
- snímací systém vrátane systému na výmenu snímačov,
- riadiaci systém,
- počítač,



- software. [15]

Obr. 6 Popis základných častí CMM [22]

Medzi funkcie uvedených subsystémov CMM patria najmä:

- absolútne a inkrementálne (meranie rozmeru po jednotlivých krokoch) meranie rozmeru v smere osí x, y a z,
- meranie vzdialenosti medzi definovanými bodmi,
- určenie obrysovej krivky z nameraných bodov,
- generovanie kriviek chýb,
- určenie geometrických odchýlok tvaru a polohy,
- automatické porovnanie požadovanej a skutočnej hodnoty,
- kontrola združených súčiastok,
- výpočet priesečníkov osí,
- výpočet stredov a priemerov otvorov rôznymi metódami,
- zistenie sklonu osí otvorov,
- zistenie stredu oblúkov,
- automatické nastavovanie nameraných objektov,
- automatická korekcia na dotyk,
- transformácia súradníc (karteziánske - polárne). [22]

4.1.1 Základné mechanické prvky CMM a ich uloženie

Zo všeobecného hľadiska medzi základné mechanické prvky CMM patrí: rám, stôl, stojan (stĺp), portál, most a pinola. [23] Nižšie je uvedená stručná charakteristika týchto prvkov a uloženia pohyblivých častí CMM.

Rám – obvykle ide o pozváranú konštrukciu s vysokou tuhosťou, a to aj pri dynamickom zaťažení. Pri veľkých CMM je rám nahradený vlastnou základovou doskou v podlahe. [23]

Stôl – tvorí základňu pre upnutie meranej súčasti (priamo alebo pomocou upínacieho prípravku). Sú vyrobené zo žuly, popr. granitu (umelý kameň) alebo liatinového odliatku. Pri výrobe sa kladú vysoké požiadavky na rovinnosť funkčných plôch (pracovná doska). Na materiál tohto prvku sa kladú požiadavky na vysokú životnosť, objemovú stálosť, odolnosť proti korózii, minimálnu teplotnú rozťažnosť a jednoduchosť opravy pri prípadnom poškodení. [15]

Stĺpy, portály a mostové konštrukcie – väčšinou sú konštruované ako pozvárané celky od ktorých sa vyžaduje dostatočná tuhosť, rozmerová a tvarová stálosť. Portál CMM musí byť odolný voči priehybu pri posune pinoly v priečnom smere. V niektorých prípadoch býva konštrukcia portálu zhotovená zo žuly alebo granitu. [15]

Pinola – tyč kruhového profilu H alebo štvorcového prierezu vyhotovená z liatiny, prírodného kameňa, duralu alebo keramiky. Môže mať vertikálne alebo horizontálne prevedenie. Horizontálna poloha pinoly môže byť vplyvom vlastnej hmotnosti a hmotnosti snímačej hlavy náchylná na priehyb, čomu sa predchádza správnym dimenzovaním a kompenzáciou vyvažovaním pomocou mechanických súmerných závaží. [15]

Vzájomný pohyb uvedených súčastí CMM (stôl, pinola, portál atď.) sa najčastejšie realizuje nasledujúcimi spôsobmi:

- *Klzné uloženie* – veľký odpor (nutnosť častého mazania), veľká tuhosť, zlepšujúca sa kvalita v priebehu používania (zároveň sa zvyšuje presnosť). [23]
- *Valivé uloženie* – nízky valivý odpor, značná odolnosť proti opotrebeniu, vhodné pre veľké zaťaženie, realizované pomocou presných kladiek alebo tzv. valivých hniezd.
- *Aerostatické uloženie* – pohyb jednotlivých súčastí po vzduchovom vankúši bez trenia, šírka 4 až 8 μm . Výhodami sú minimálny odpor, značná tuhosť, zanedbateľný vplyv nepresností povrchu a nevzniká tu trhavý pohyb ako pri klznom uložení. [15]

Vo všeobecnosti medzi požiadavky na realizáciu pohybu v jednotlivých osiach patria:

- priamočiarosť,
- vzájomná kolmosť,
- stálosť rozmerov,
- minimálna vôľa,
- minimálne pasívne odpory. [15]

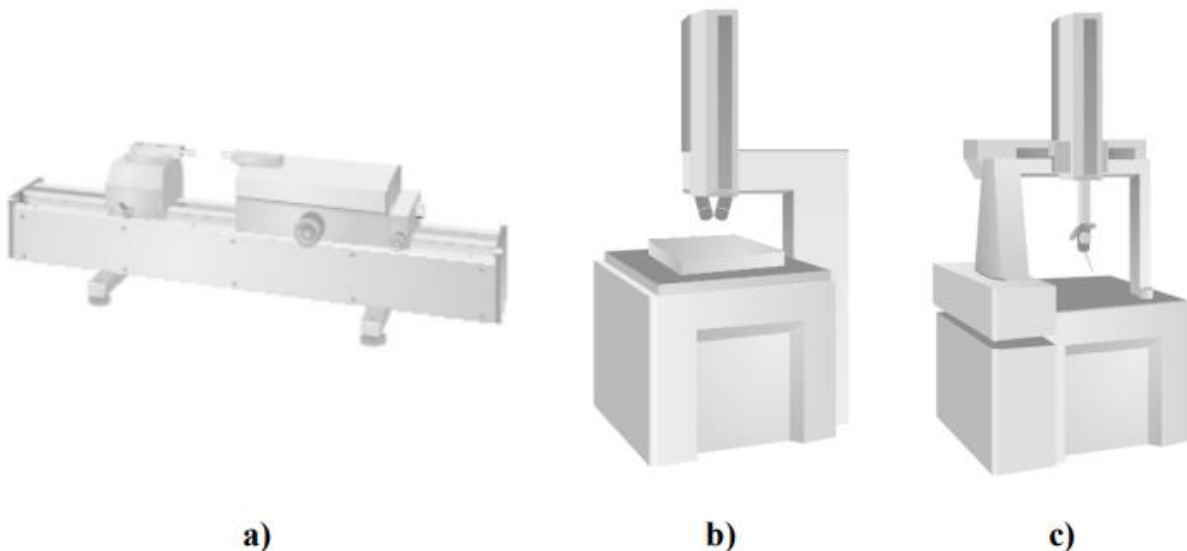
4.2 Typy konštrukcií a rozdelenie CMM

V praxi sa môžeme stretnúť s celou radou CMM strojov od menších stolných až po veľké mostové systémy. [15]

4.2.1 Rozdelenie CMM podľa konštrukcie

Na základe konštrukcie delíme CMM na tri základné skupiny:

- **Jednosúradnicové** (obr. 7a) – umožňujú merať rozmer len v jednej osi x. Pomocou nich sa dá dosiahnuť veľmi malá chyba meradla 0,6 až 6 mikrometrov v celom rozsahu, a to aj pri meraní veľkých rozmerov.
- **Dvojsúradnicové** (obr. 7b) – umožňujú merať rozmery v dvoch navzájom kolmých osiach "x" a "y", v jednej rovine. Pri meraní v 2D využívame mikroskopy, profilprojektory, laserové interferometre a skenery. Mikroskopy sú počítačom podporované a zvyčajne majú optoelektronický odmeriavací systém, okulár s nitkovým krížom alebo CCD kameru.
- **Trojsúradnicové** (obr. 7c) – umožňujú merať rozmery v troch navzájom kolmých osiach "x", "y" a "z", teda v priestore. Predstavujú vrchol techniky merania geometrických veličín. Na jedno upnutie umožňujú zložité rozmerové meranie v troch navzájom kolmých súradniciach. [21]

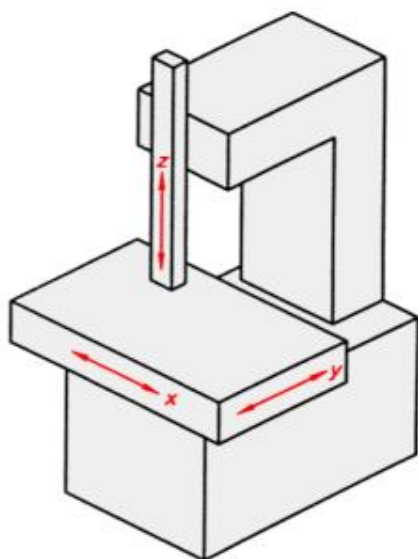


Obr. 7 Typy CMM podľa konštrukcie: a) jednosúradnicový; b) dvojsúradnicový; c) trojsúradnicový [15]

4.2.2 Rozdelenie CMM podľa geometrického usporiadania

V dnešnej dobe existuje veľké množstvo CMM vyznačujúce sa rôznymi stupňami automatizácie. Až na niektoré výnimky, všetky využívajú konštrukčné riešenie s polohovaním v karteziánskej (polárnej) súradnicovej sústave. Podľa normy ČSN EN ISO 10 360-1 sa stacionárne CMM na základe geometrického usporiadania delia na štyri základné typy: [21]

Stojanový (stĺpový) typ (obr. 8a, obr. 8b) – meraný predmet sa upína na stôl, ktorý sa pohybuje v smere osi "x" a "y" a meracia pinola sa pohybuje v smere osi "z". Stroje tohto typu sa radia medzi najpresnejšie a sú vhodné pre malé rozsahy merania; môžu byť vybavené kruhovým stolom s uhlovou stupnicou. Ich charakteristickými znakmi sú: tuhá uhlová konštrukcia, dobrý prístup k meranému predmetu. [21]



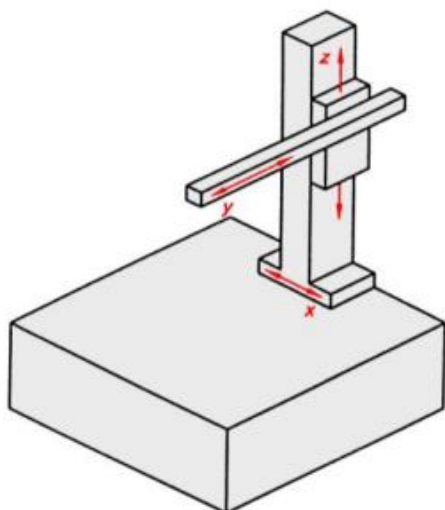
a)



b)

Obr. 8 a) stĺpový typ CMM; b) stojanový merací stroj na vodiacom nosníku [22]

Výložníkový typ (obr. 9a, obr. 9b) – meraný predmet sa upína na stôl, pričom meracia pinola výložníka sa pohybuje v smere osi "y" a kolmo v osi "x", v osi "y" sa mení vyloženie pinoly od vodiacej plochy, preto je nutné vyvažovanie. Ich charakteristickým znakom je dobrý prístup k meranému predmetu - vhodný pre dlhé úzke súčasti. [21]



a)

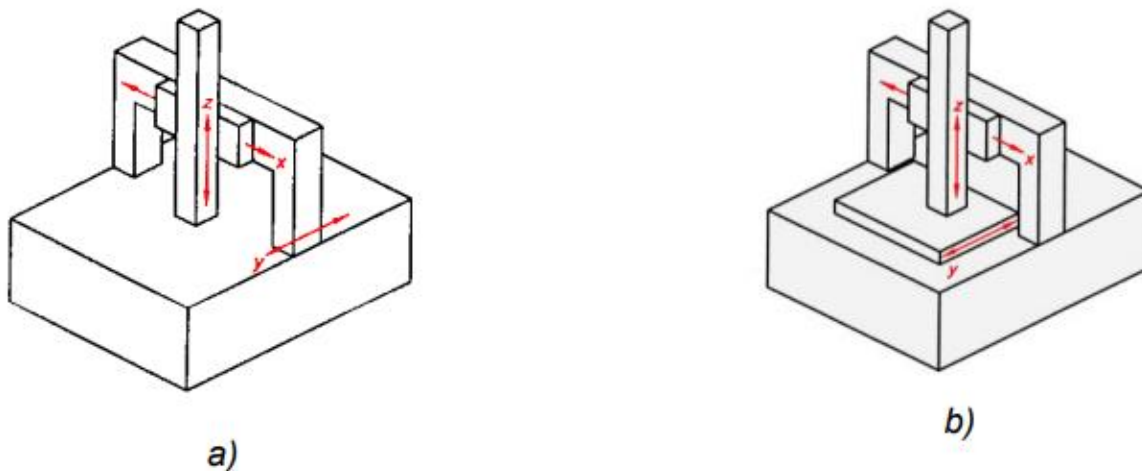


b)

Obr. 9 Výložníkový typ CMM: a) jeden stroj; b) duplexné prevedenie [22]

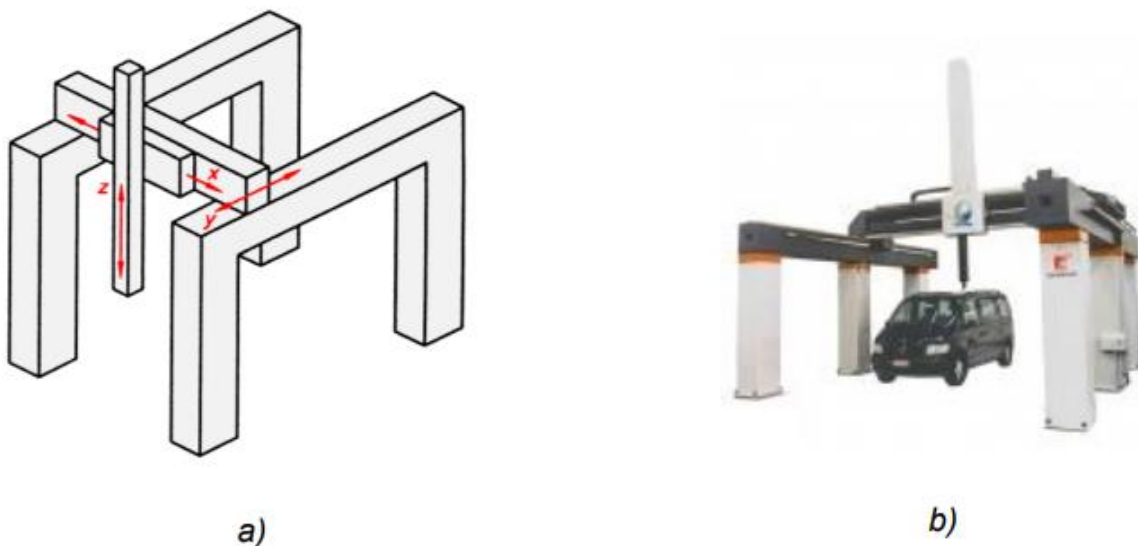
Portálový typ (obr. 10) – patrí k najrozšírenejším súradnicovým meracím strojom pre stredné a veľké rozsahy merania. Ich charakteristickým znakom je vysoká tuhosť (umožňuje vysokú presnosť merania). Môžu byť v prevedení s pohyblivým portálom (obr. 10a) pohybujúcim sa nad pevným stolom (prístup do meracieho priestoru je obmedzený

konštrukciou stroja), alebo s pevným portálom (obr. 10b) vyžadujúcim pohyblivý stôl, ktorý sa pohybuje v osi "x". [21]



Obr. 10 Portálový typ CMM: a) s pohyblivým portálom; b) s pevným portálom [22]

Mostový typ (obr. 11a, obr. 11b) – je charakteristický svojou veľkosťou a má najväčšie rozsahy merania. Merací rozsah v osi "x" je až 24 m. Používa sa na meranie nadrozmerných súčiastok, a to najmä v automobilovom a leteckom priemysle. [21]



Obr. 11 Mostový typ CMM: a) schéma; b) stroj firmy LK [22]

4.2.3 Multisenzorové CMM

Osobitnou kategóriou CMM sú multisenzorové stroje, ktoré využívajú rôzne kombinácie meracích sond ako napr. optická sonda, mikrosonda, mechanický snímač a iné. Podstata ich využitia vyplýva zo základných vlastností sond. V súvislosti s využitím týchto sond je potrebné rozlíšiť niekoľko atribútov. Je to najmä veľkosť a druh meraných geometrických prvkov objektu a tiež vhodnosť k rýchlemu zachycovaniu veľkého množstva bodov (skenovanie). K riešeniu komplexných meracích úloh je väčšinou potrebné používať viacero typov meracích sond v priebehu jedného merania. Zvyčajne sa vyskytujú v stacionárnom prevedení (napr. video check, tomograf) alebo mobilnom prevedení (napr. FARO). [22]

Medzi CMM stroje, ktoré sa typicky konštruujú ako multisenzorové, patria stroje využívajúce modernú technológiu označenú ako metrotomografia. Ich súčasťou je primárna sonda (röntgen), ktorá býva obvykle doplnená o kombináciu ďalších sond (kontaktná sonda, laserová sonda). Princíp tomografu spočíva v umiestnení meraného objektu na otočný stôl v takej polohe, aby ležal v lúčoch vychádzajúceho z röntgenového žiariča. Jeho profil je zachytávaný na detektore, ktorý ho prevedie z röntgenového obrazu do digitálnych 2D obrazov pre ďalšie spracovanie. Trojrozmerný obraz vzniká potom otáčaním objektu o 360° okolo vlastnej osi (na otočnom stole zariadenia). Z údajov získaných takýmto spôsobom je následne prepočítaním možné získať 3D model. [22]

Meranie pomocou tomografu sa využíva typicky pri potrebe získania kompletnej geometrie meraného predmetu v jednej meracej sekvencii, pri meraní vnútornej geometrie súčiastok v zle prístupných miestach, pri 3D porovnaní nominálnych a aktuálnych hodnôt (napr. 3D zobrazenie odchýlok), alebo pri reverznom inžinierstve. [22]

4.3 Meracie systémy CMM

Meracie systémy tvoria podstatu merania na CMM. Umožňujú nám získať súradnice snímaných bodov v karteziánskych alebo polárnych súradniciach, ktoré môžu byť v analógovom alebo číslicovom tvare. [15] Nižšie sú spolu s popisom uvedené používané dĺžkové meracie systémy.

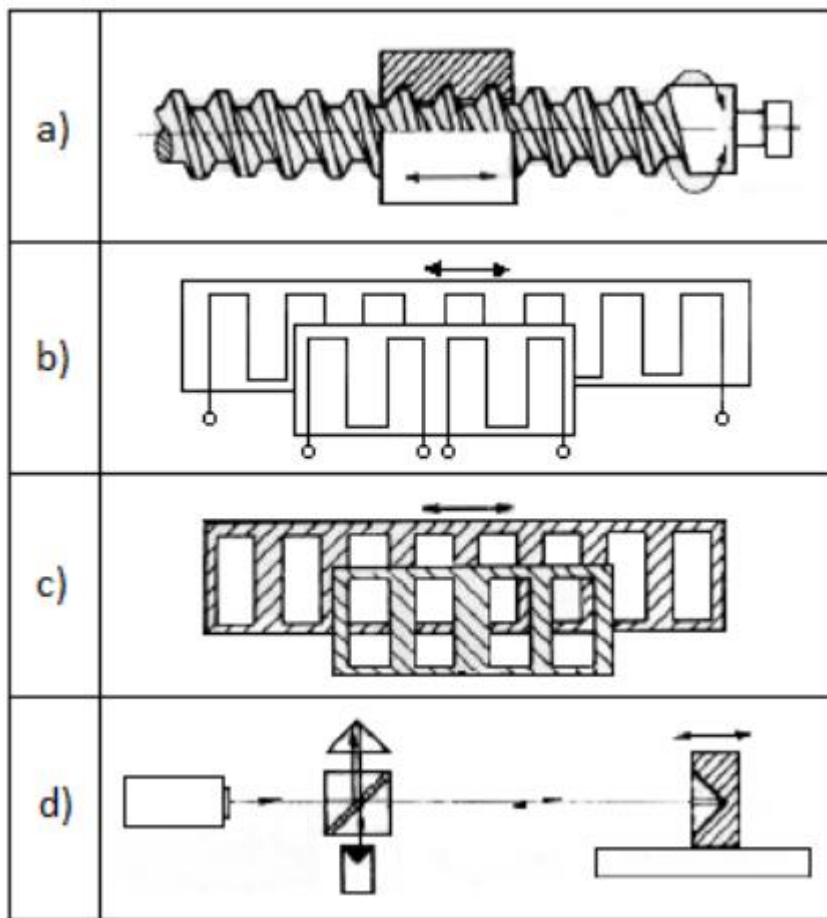
Závitový hriadeľ s uhlovým prevodníkom (obr. 12a) – vyrábajú sa do dĺžky 1,2 m, majú malé stúpanie, bývajú uložené v oleji kvôli teplotnej stabilite. Majú obvykle lichobežníkový tvar závitú. Medzi nevýhody patrí chyba reverzibility, spôsobená vymedzením mŕtveho chodu medzi skrutkou a maticou (pri posuve v opačných smeroch). [23]

Lineárny indukčný (obr. 12b) – mierka zhotovená v podobe vodivého plošného spoja na nevodivej fólii, ktorá sa lepí na kovovú podložku, s rovnakým koeficientom tepelnej rozťažnosti ako materiál stroja. Plošný spoj je napájaný striedavým prúdom a má pravouhlý meandrovitý tvar. Oproti je vo vzdialenosti cca 0,1 mm umiestnený jazdec s dvoma slučkami podobného meandra so stúpaním 2 mm, ktorých vzájomná vzdialenosť má diferenciu 0,5 mm. Na slučkách sú indikované napätia fázovo posunuté o 90°. Pri pohybe jazdca vzniká približne sínusový priebeh napätia, ktorého interpoláciou vychádza odmeriavací krok 1 μm , pri rozlíšení zmyslu pohybu. [15] Výhodou tohto systému je odolnosť a to, že nevyžaduje zvláštnu údržbu. [23]

Inkrementálna dĺžková stupnica (obr. 12c) – jedná sa o najpoužívanejší odmeriavací systém CMM. Základná stupnica sa nachádza na sklenenom (kovovom) podklade tak, aby sa striedali polia prepúšťajúce (odrážajúce) svetlo s poľami neprepúšťajúcimi (neodrážajúcimi) svetlo. Jazdec má 4 polia prepúšťajúce svetlo, pričom dve polia sú posunuté o štvrtinu rozostupu. Vzdialenosť medzi ryskami je $0,01 \div 0,04$ mm. Špecifickým spôsobom je možné dosiahnuť rozlíšiteľnosť až 0,1 μm . Výhodou je jednoduchá kalibrácia, ktorá sa dá doceliť náklonom jazdca. [15]

Laserinterferometer (obr. 12d) – používa sa na kontrolu presnosti CMM, ide o pomerne drahé a citlivé zariadenie disponujúce rozlíšiteľnosťou až 0,01 μm . Princíp spočíva vo vyžarovaní svetelného lúča zo zdroja svetla, ktorý sa na polopriepustnom zrkadle rozkladá do dvoch lúčov, ktoré sa namieria na dve zrkadlá, od ktorých sa úplne odrazia späť na polopriepustné zrkadlo, kde sa spoja a interferujú. Pri pohybe jedného z odrazových zrkadiel spôsobuje zmena jeho vzdialenosti striedavú zmenu svetelnej intenzity. Na mieste pozorovateľa vytvára fotodetektor periodický vlnový signál, kde dĺžka svetelnej vlny

zodpovedá zmene veľkosti signálu. Počet vln potom úmerne zodpovedá skutočnej zmene polohy pohyblivého zrkadla. Na zabezpečenie dĺžkového merania s vysokou presnosťou je potrebné kompenzovať vplyv prostredia ako teplota, vlhkosť, tlak vzduchu a obsah oxidu



uhličitého. [15]

Obr. 12 Meracie systémy CMM: a) závitový hriadel; b) indukčný; c) inkrementálna dĺžková stupnica; d) laserinterferometer [15]

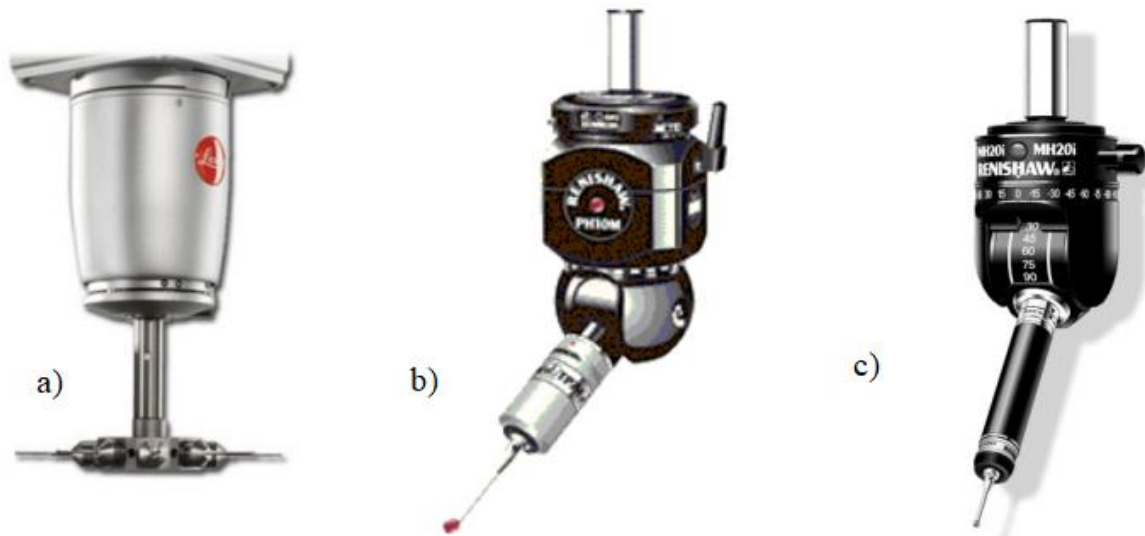
4.4 Snímacie systémy CMM

Dôležitou súčasťou CMM je snímací systém slúžiaci k snímaniu meraných bodov. Príslušný merací program nám umožní vyhodnotiť o obdržať numerickú informáciu o meranej veličine. Snímací systém je prepojený s pinolou a je zložený zo snímačnej hlavy, predĺženia snímačnej hlavy, systému výmeny snímačnej hlavy, snímačieho dotyku, systému výmeny snímačieho dotyku a predĺženia snímačieho dotyku. [15]

4.4.1 Snímacie hlavice

Snímacie hlavice rozdeľujeme na *pevné* (obr. 13a), ktorými nie je možné natáčať, ale sú presnejšie, a *indexovateľné* (obr. 13b), ktorými možno presne polohovať snímacie sondy v priestore a natáčať ich v jednotlivých osiach. Rozlišujeme dva typy indexovateľných hlavíc, a to *motorické* a *manuálne* (obr. 13c). Motorické hlavice umožňujú snímať v mnohých uhloch vďaka možnosti polohovania sondy. Vďaka opakovateľnosti dokážu šetriť čas a aplikovať sondu v optimálnom uhle. Naproti tomu manuálne hlavice umožňujú vďaka ručnému nastaveniu flexibilnejšie meranie, a to aj komplikovanejších tvarov. Z uvedeného vyplýva, že

voľba spôsobu snímania súčastí pri meraní značne ovplyvňuje presnosť a automatizáciu merania. [15]



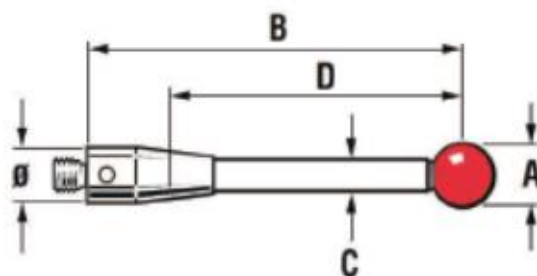
Obr. 13 Snímacie hlavice: a) pevná; b) indexovateľná; c) manuálna [15]

Snímacie systémy vo všeobecnosti rozdeľujeme na dotykové (kontaktné), využívajúce dotykové senzory, a bezdotykové, ktoré využívajú napríklad optické senzory. [15]

4.4.2 Dotykové snímacie systémy

CMM s ručným ovládaním využívajú pevné dotyky (napr. guľa, kužeľ a pod.), kedy sú na základe zosnímaných bodov zaznamenané ich súradnice a následne softvérovo vypočítané požadované geometrické charakteristiky. Oproti tomu CMM s CNC riadením využívajú najčastejšie elektrokotaktné snímacie systémy, ktoré delíme na systémy spínacieho typu (kontaktná sonda) a systémy snímacieho typu (skenujúca sonda). [15]

Snímacie dotyky – slúžia k sprostredkovaniu kontaktu medzi meraným dielcom a sondou a iniciuje zopnutie v mechanizme sondy. Pomocou vytvoreného signálu je možné zaznamenať súradnice snímaného bodu. Vlastnosti použitého dotyku (obr. 14) závisia na snímanom prvku. Medzi najdôležitejšie patria tuhosť dotyku a dokonalý tvar meracej guľôčky. Pre dosiahnutie vysokej presnosti je dôležité voliť čo najkratší dotyk, obmedziť použitie predlžovacích nastavcov a voliť čo najväčší priemer guľičky. [15]

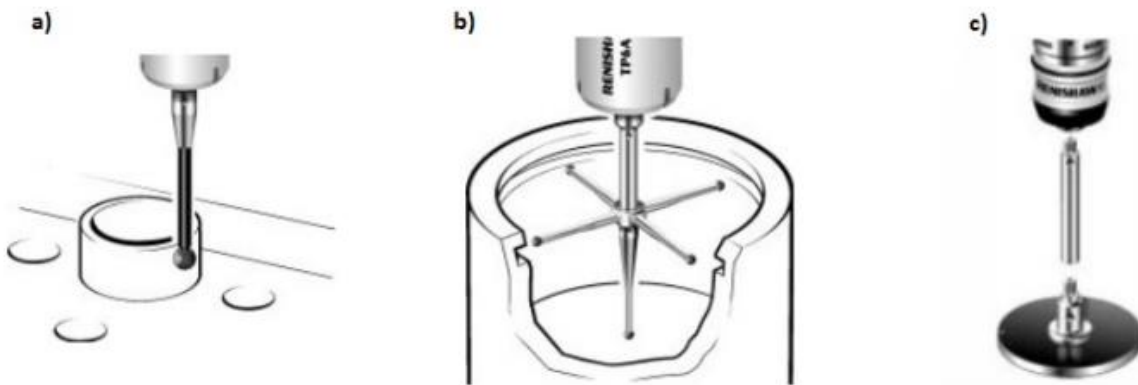


A – priemer kuličky,
B – celková dĺžka,
C – priemer dříku,
D – efektívni činná dĺžka (EWL).

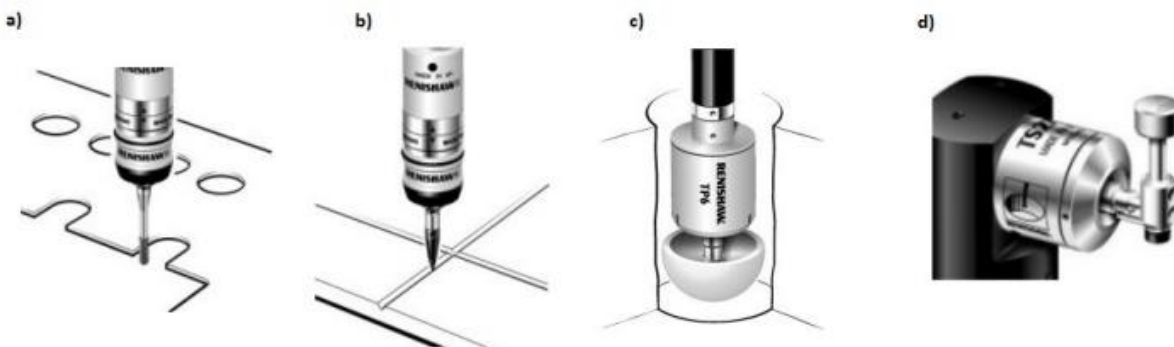
Obr. 14 Rozmery dotyku [15]

Typy dotykov – z konštrukčného hľadiska delíme snímacie dotyky na:

- *priame* (obr. 15a) – najpoužívanejšie a najjednoduchšie, guľôčka je z priemyslového rubínu,
- *hviezdicové* (obr. 15b) – väčší počet hrotov, snímanie zložitejších tvarov a otvorov,
- *diskové* (obr. 15c) – kontrola drážok a zápichov, kde nie je možné použiť hviezdicový dotyk,
- *dotyky pre špeciálne účely* – valcový dotyk (obr. 16a), špička (obr. 16b), dutá keramická pologuľa (obr. 16c) a dotyk na ustavovanie nástrojov (obr. 16d). [22]

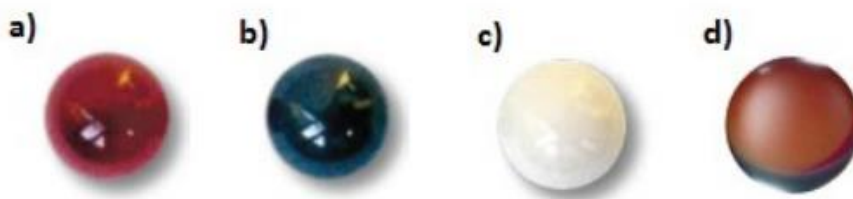


Obr. 15 Základné typy dotykov: a) priamy dotyk; b) hviezdicový dotyk; c) diskový dotyk [15]



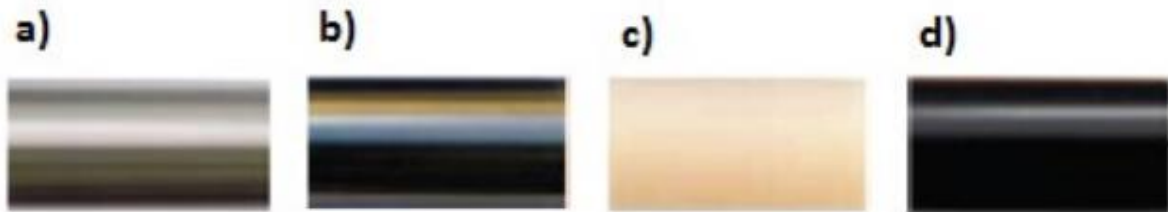
Obr. 16 Dotyky pre špeciálne účely: a) valcový dotyk; b) špička; c) dutá keramická pologuľa; d) dotyk na ustavovanie nástrojov [15]

Materiály guľôčky dotyku – medzi najpoužívanejšie patrí *rubín* (obr. 17a), okrem prípadov aplikácií na hliníkové a liatinové povrchy, kedy by hrozilo opotrebenie guľôčky oterom. Ďalej sa využívajú materiály ako *nitrid kremíku* (obr. 17b), ktorý je tvrdý a odolný, ale ľahko sa opotrebuje pri kontakte s oceľovými povrchmi, *oxid zirkoničitý* (obr. 17c), ktorý je pevný keramický materiál využiteľný pre aplikácie na liatinové súčiastky, a *diamant* (obr. 17d), ktorý sa vďaka vysokej tvrdosti málo opotrebuje, poskytuje univerzálne možnosti využitia a veľmi presné merania. [15]



Obr. 17 Materiály guľôčok: a) rubín; b) nitrid kremíku; c) oxid zirkoničitý; d) diamant [15]

Materiály stopky (drieku) meracieho dotyku – využívajú sa materiály ako oceľ (obr. 18a), karbid volfrámu (obr. 18b), keramika (obr. 18c), a uhlíkové vlákna (obr. 18d). [15]



Obr. 18 Materiály pre stopky dotykov: a) oceľ; b) karbid volfrámu; c) keramika; d) uhlíkové vlákna [15]

4.4.3 Bezdotykové snímacie systémy

Najbežnejšie formou aplikácie založenou na princípe bezdotykového snímania sú dvojsúradnicové meracie systémy pracujúce v rovine (napr. automatické meracie mikroskopy). V súčasnosti je ale táto forma aplikácie najviac uplatnená pri multisenzorovej meracej technike (kap. 4.2.3). Bezdotykové systémy pre 3D merania sú v podstate skenery (poskytujúce 3D digitalizáciu), keďže nevyžadujú žiaden fyzický kontakt s meranou súčasťou. Medzi najväčšie výhody tohto systému patria kvalitnejšie výstupy, nižšia časová náročnosť skenovania a lepšia schopnosť vytvorenia hustejších bodov v miestach, kde je obťažnejší prístup pre dotyk. [15]

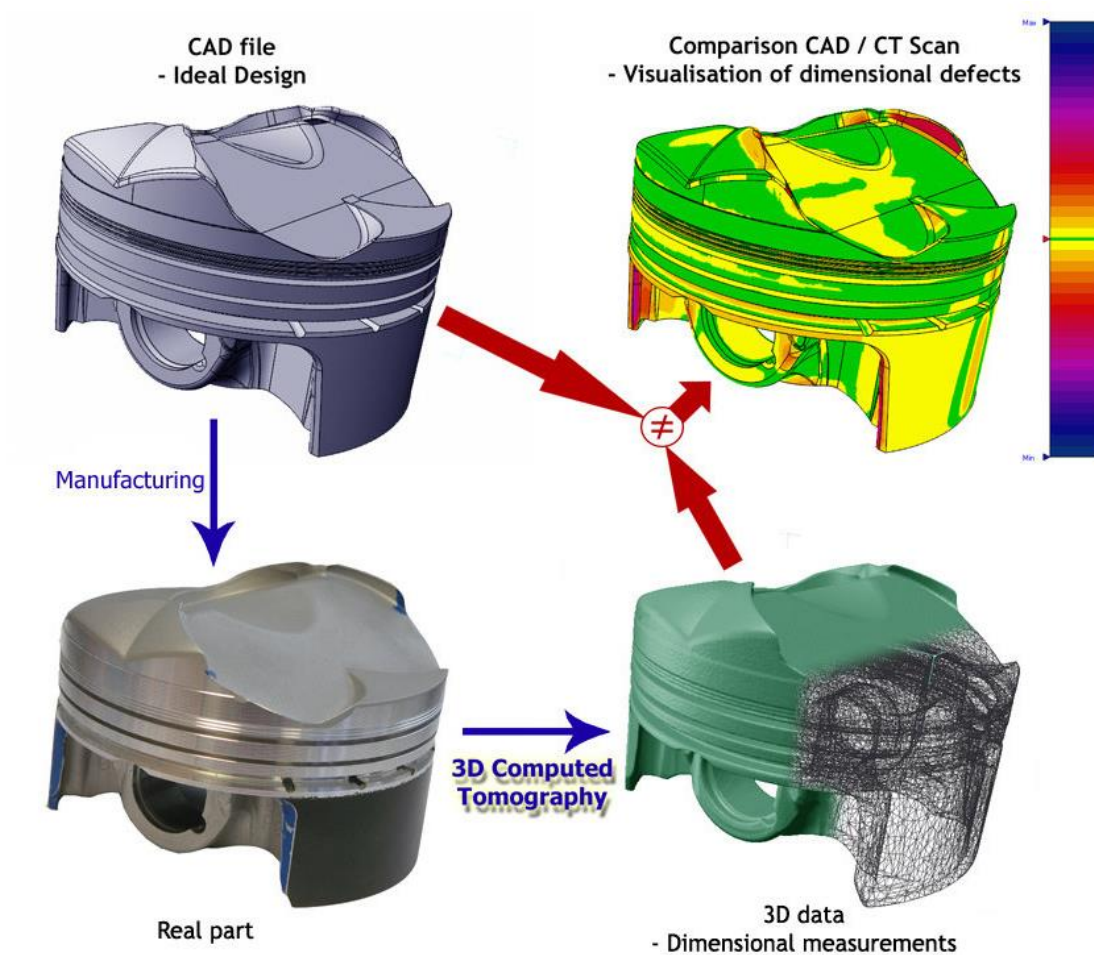
Medzi najpoužívanéjšie princípy bezdotykového snímania zaradíme *laserové systémy* (obr. 19), *kamerové (optické) systémy* (obr. 20) a princíp založený na *počítačovej tomografii* (obr. 21). Pri použití laseru sa využívajú dva rôznobežné laserové lúče pretínajúce sa v presne určenej vzdialenosti. V okamžiku prieniku týchto lúčov na meranom objekte vyhodnocovacia jednotka zaeviduje dotyk. Takto je možné skenovať v jednej alebo v troch rovinách. Pri kamerovom (optickom) systéme snímania sa pomocou optickej kamery prenesie optický signál na digitálny obraz ako podklad k výpočtu meraných bodov v príslušnom programe. Poslednou uvedenou formou snímania je už zmienená počítačová tomografia, ktorá je bližšie popísaná v kap. 4.2.3. [15]



Obr. 19 Ultrapresný laserový skener HP-L-10.10 pre CMM od spoločnosti Hexagon [24]



Obr. 20 Optický snímač HP-C pre CMM od spoločnosti Hexagon [25]



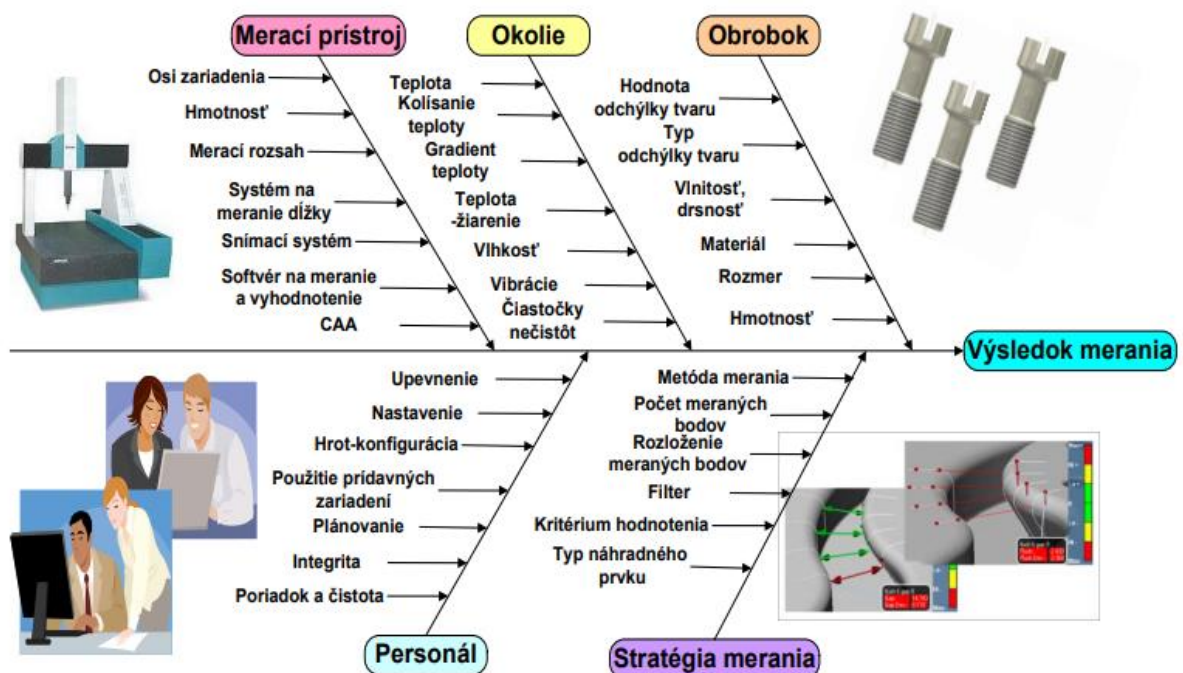
Obr. 21 Nominálne/skutočné porovnanie geometrie súčiastky s využitím CT technológie [26]

4.5 Presnosť merania na CMM

Presnosť je významná kvalitatívna charakteristika CMM, ktorá vyjadruje jeho schopnosť poskytovať údaje zhodné so skutočnými hodnotami meranej veličiny. Keďže CMM stroje tvoria z konštrukčného hľadiska zložitý systém, ich presnosť ovplyvňuje mnoho dielčích faktorov. Avšak najvýznamnejší podiel na celkovej presnosti merania predstavuje najmä rozťažnosť materiálu meraného objektu a atmosférické podmienky. [15]

Hodnoty, ktoré nám poskytne CMM zariadenie je nutné vhodným spôsobom spracovať tak, aby bolo možné obdržať hodnotný výsledok merania. K tomu je potrebné uvažovať široké spektrum faktorov (obr. 22), ktoré v rôznej miere prispievajú k neistote merania a tým ovplyvňujú aj celkový výsledok merania. Tieto faktory môžeme rozdeliť do niekoľkých skupín:

- **Vplyv od meracieho prístroja** – každé meracie zariadenie je charakteristické určitou mierou nepresnosti vyplývajúcej z výroby jednotlivých funkčných elementov, montáže prevodových systémov a mechanizmov a deformácie.
- **Vplyv okolia** – medzi najvýznamnejší faktor tejto kategórie patrí teplota, preto je dôležité udržiavať jej úroveň a stabilitu.
- **Vplyv od objektu merania** – vlastnosti meraného obrobku ako charakteristiky povrchu, tvrdosť, elastická a plastická pružnosť môžu ovplyvniť výsledok merania.
- **Vplyv obsluhy a stratégie merania** – voľba adekvátnej stratégie a jej aplikácia sú taktiež dôležitým faktorom. [22]



Obr. 22 Faktory ovplyvňujúce výsledok merania [22]

V praxi je väčšinou obťažné stanoviť celkovú presnosť merania na CMM, keďže mnohé vplyvy sa kontinuálne menia a spôsobujú, že nie vždy dokážeme spoľahlivo určiť ich hodnotu. [15]

Ovplyvnenie presnosti CMM pochádza aj od jednotlivých komponentov stroja, medzi ktoré patria najmä *snímacie hlavy* (ovplyvnenie dráhových charakteristík, necitlivosť snímačej hlavy, stabilita referenčného bodu), *meracie sondy* (poddajnosť a tvar meraných súčiastok), *gulôčka dotyku* (opotrebenie, usadzovanie nečistôt) a *prepočet súradníc meraného bodu*. [15]

Na základe normy ČSN EN ISO 10360 má každá špecifikácia presnosti CMM označenie MPE (Maximum Permissible Error), pričom jej je priradený index na základe meracej úlohy. Medzi typické chyby patria *najväčšia dovolená chyba CMM pri meraní rozmeru* (MPE_E), uvádzaná v tvare $MPE_E = \pm (A + L/K)$, kde A [μm] a K [-] sú konštanty a L je meraný rozmer, *najväčšia dovolená chyba snímania* (MPE_P) alebo *najväčšia dovolená chyba kontaktného snímania* (MPE_{THP}). K stanoveniu uvedených chýb sa používajú špecifické metódy na overenie rozmerových a geometrických špecifikácií uvedené v normách rady ČSN EN ISO 10360. [15]

5 ROZBOR RIEŠENEJ PROBLEMATIKY

V tejto kapitole postupne rozoberieme a vymedzíme riešenú problematiku v teoreticko-praktickej rovine. Zameriame sa na charakteristiku metód posudzovania presnosti CMM, zadefinujeme geometrické špecifikácie a odchýlky vyplývajúce zo zadania a potrebné pre účely tejto práce a uvedieme popis zvolených CMM strojov pre účely praktickej časti. Súčasťou bude aj voľba vhodných kalibrovaných etalónov, ktoré budú pri meraniach použité.

5.1 Kontrola presnosti a kalibrácia CMM

Ako už bolo uvedené, kalibrácia je dvojkrovová metrologická činnosť, kedy v prvom kroku zistíme údaje o chybách, aby sme v druhom kroku na ich základe zabezpečili korekciu resp. poskytlí metrologicky správny výsledok merania. Kalibračný list vytvára predpoklad pre úplnú realizáciu činností druhého kroku kalibrácie, podľa VIM však nie je kalibráciou samotnou. [27]

Typický priebeh realizácie kalibrácie CMM uvedieme na stručnom príklade veličiny dĺžky. Jej postup spočíva v zistení a určení chyby vedenia snímacieho systému v smere troch súradnicových osí. Následne sú v definovaných krokoch prevedené merania experimentálne získaných lineárnych funkcií chýb spoločne s chybami pravouhlosti vedenia. Tieto činnosti sú naplnením prvého kroku kalibrácie a naplnením predpokladu k zahájeniu kroku druhého. Ten spočíva v zadaní konštant do priestorovej matice (tzv. mapa korekcií). Takto získané údaje o chybách v maticovej podobe je potrebné zapísať na hardware CMM, čo pri výpočtoch umožní softwaru korigovať získané výsledky. Túto činnosť je spravidla oprávnený vykonať len výrobca CMM alebo jeho autorizovaný zástupca. Realizáciou týchto činností je kalibrácia ukončená a je možné vystaviť kalibračný list. [27]

CMM stroje vyžadujú kalibráciu na pravidelnej báze, avšak medzi jej intervalmi si podniky vykonávajú skúšky vo vlastnej réžii alebo v súlade s požiadavkami vlastného systému managementu kvality prizývajú tretie subjekty (napr. skúšobné a kalibračné laboratóriá). [27]

S cieľom zabezpečiť spôsobilosť CMM strojov sú zavedené normy rady ČSN EN ISO 10360-x, ktoré možno považovať za jeden z vhodných dôkazov overenia kalibrácie, avšak podľa VIM nie za kalibráciu samotnú. [27] Tieto normy špecifikujú požiadavky stanovené výrobcom alebo užívateľom a spôsob vykonania akceptačných a verifikačných skúšok k preukázaniu stanovených požiadaviek. Na základe týchto noriem sú stanovené skúšobné postupy, ktorými možno overiť spôsobilosť CMM podľa špecifikácií pre stanovené maximálne dovolené chyby. Tento spôsob overenia spôsobilosti je využívaný nie len pri akceptačnej skúške, ale aj pri verifikačnej skúške, kedy špecifikácie pre maximálne dovolené chyby môžu byť stanovené užívateľom. V prípade, že nie je možnosť vykonať riadnu verifikačnú (periodickú) skúšku, odporúča sa, a to najmä v organizáciách s vnútorným preukazovaním systému kvality, v pravidelných intervaloch vykonávať obmedzené skúšky spôsobilosti, ako už bolo vyššie spomenuté. Tým sa preukáže pravdepodobnosť, že CMM splňuje maximálne dovolené požiadavky vzťahnuté na maximálne dovolené chyby. V tomto prípade môže byť použitý menší počet meraní a polôh meraní ako popisuje norma. [28] V tejto myšlienke tzv. medzikontroly (rýchlej a praktickej kalibrácie) budeme realizovať praktickú časť tejto diplomovej práce.

Cieľom pravidelnej kalibrácie CMM strojov je zaistiť to, aby dáta, ktoré nám poskytujú boli dostatočne presné a hodnotné. V závislosti od požiadavku na precíznosť kalibrácie sú

volené rôzne prístupy a náročnosť k jej prevedeniu. So spôsobom aplikácie a využívania CMM súvisí aj požiadavka na frekvenciu jej opakovania. [29]

Presnosť CMM ako vlastnosť hodnotenú na základe kalibrácie možno vnímať buď ako presnosť jednotlivých prvkov stroja (sleduje výrobca), alebo ako presnosť celého systému a rýchlosť jej overenia (zaujíma užívateľa). Skúšobné metódy CMM sa z uvedeného dôvodu delia na **analytické metódy** (po komponentoch) a na **globálne (komplexné)** metódy, ktoré využívajú etalóny a skúšobné telesá. [15]

5.1.1 Analytické metódy skúšania CMM

Analytické metódy jednotlivo hodnotia základné prvky CMM ako:

- chyby meracích systémov v jednotlivých osiach,
- chyby polohovania v jednotlivých osiach, v ktorých sa prejavia chyby meracieho systému a priamosti pohybu,
- chyby vzájomnej kolmosti jednotlivých osí,
- odchýlky rovinnosti pracovného stola,
- chyby snímacieho systému. [15]

Základným prostriedkom na kontrolu týchto parametrov CMM je laserinterferometer s rozlíšením 0,1 μm pre meranie dĺžky, ale aj napr. kontrolu odchýlok priamosti či kolmosti. Pre kontrolu rovinnosti je využívaná elektronická libela. [15]

5.1.2 Globálne (komplexné) metódy skúšania CMM

Globálne metódy získavajú údaje o presnosti celého systému ako celku. Ich výhodou je jednoduchosť a časová úspora. Sú založené na použití uvedených telies:

- *lineárne etalóny* – koncové mierky samostatné alebo ako zostava s viacerými rozmermi,
- *plošné etalóny* – dosky s guľami (ballplate) alebo dosky s otvormi (holeplate), kalibrácia prebieha v dvoch horizontálnych a dvoch vertikálnych rovinách,
- *priestorové etalóny* – používané rôzne tvary etalónov orientovaných v pracovnom priestore CMM,
- *kombinované etalóny*. [23]

Uvedené metódy kalibrácie umožňujú experimentálne určiť realizovanú presnosť merania CMM pomocou niektorých z vyššie uvedených typov etalónov vhodnej veľkosti a tvaru podobných bežne meraným objektom. Princíp týchto metód je založený na porovnávaní hodnôt geometrických charakteristík indikovaných CMM strojom s odpovedajúcimi nominálnymi hodnotami poskytnutými etalónmi. Dosiachnuté odchýlky sú vyhodnotené ako chyby meracieho stroja, ktoré môžu byť následne použité na korigovanie meraných charakteristík objektu resp. ako zdroj informácií pre výpočet neistoty merania CMM. Hodnota neistoty získaná týmto spôsobom je zároveň ovplyvnená aj postupom merania, vlastnosťami etalónu, atmosférickými podmienkami, atď. [30]

Týmito metódami nie je možné priamo identifikovať príčiny chýb CMM, ale poskytujú nám predstavu o ich vplyvoch formou stanovenia odchýlok od referenčného rozmeru. Ich výhodou je jednoduchosť a rýchlosť prevedenia. [30] Vzhľadom k splneniu cieľov a zadania tejto diplomovej práce bude použitá uvedená metóda kalibrácie CMM s využitím kombinácie vhodných etalónov v zmysle požiadaviek na geometrické špecifikácie CMM.

5.2 Meranie rovinného uhla a odchýlok tvaru

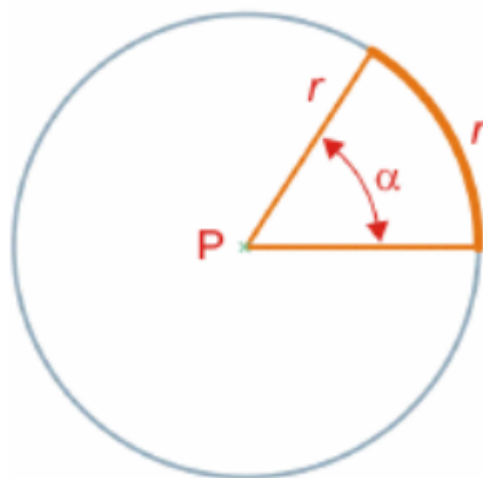
Z charakteristiky problematiky úlohy tejto diplomovej práce vyplýva vytvorenie vhodných etalónov pre meranie rovinného uhla a odchýlok tvaru. Z tohto dôvodu vymedzíme uvedené geometrické charakteristiky a špecifikácie a oboznámime sa s ich definíciami a možnými spôsobmi merania.

5.2.1 Rovinný uhol

Podľa normy ČSN EN ISO 80000-3 (Veličiny a jednotky – Časť 3: Prostor a čas) je rovinný uhol definovaný ako miera geometrického útvaru, ktorý tvoria dva lúče, nazývané strany rovinného uhla, ktoré vychádzajú zo spoločného bodu, nazývaného vrchol rovinného uhla. Väčšinou sa značí gréckymi písmenami α , β , γ a pod. [31] Jednoduchšie povedané, rovinný uhol je uhol medzi dvoma polpriamkami vedenými z rovnakého bodu. [5] Uhol je daný vzťahom:

$$\alpha = \frac{s}{r}, \quad (5.1)$$

kde s je dĺžka oblúka kružnice zovretého uhlom so stredom vo vrchole rovinného uhla, a r je polomer tejto kružnice. [31] Jednotkou rovinného uhla je radián značený *rad*. Radián je definovaný ako stredový uhol prislúchajúci oblúku s rovnakou dĺžkou, ako je polomer kružnice (obr. 23). Ide o jednotkový uhol pri meraní v oblúčkovej miere. V sústave SI je využívaný ako doplnková jednotka. [5]



Obr. 23 Definícia jednotky pre rovinný uhol [5]

Okrem jednotky radián sa v praxi častejšie stretáme s používanějšíou jednotkou stupeň. Stupeň (presnejšie uhlový stupeň) ako miera rovinného uhla býva označená „°“. Stupeň môžeme ďalej rozdeliť na uhlové minúty (′), pričom $1' = (1/60)^\circ$, a uhlové sekundy (″), pričom $1'' = (1/60)' = (1/3600)^\circ$. Definície a prevody jednotiek uvádzajú vzťahy (5.2), (5.3) a (5.4). [5]

$$\alpha = \frac{r \cdot 180^\circ}{\pi}, \quad (5.2)$$

kde α je veľkosť uhla v stupňoch a r je veľkosť uhla v radiánoch.

$$1^\circ = \frac{\pi}{180^\circ} \text{ rad} \approx 1,745 \cdot 10^{-2} \text{ rad} \quad (5.3)$$

$$1 \text{ rad} = \frac{180^\circ}{\pi} \approx 57,296^\circ \approx 57^\circ 17' 45'' \quad (5.4)$$

Meranie uhla môže byť v niektorých prípadoch náročnejšie než meranie dĺžky. Voľba meracej stratégie závisí od niekoľkých faktorov, medzi ktoré patria napr. forma definície uhla, požiadavky na presnosť merania alebo vlastnosti meraných objektov. Princíp väčšiny meracích metód vychádza z porovnávania meraného uhla so známym uhlom. Iný spôsob predstavuje meranie inej veličiny, ktorá je s meraným uhlom vo funkčnej väzbe. Metódy merania uhla môžeme rozdeliť na dve skupiny, a to *priame metódy* a *nepriame (trigonometrické) metódy*. [5]

Priame metódy – patria medzi najrozšírenejšie. Princíp merania založený na porovnávaní hodnoty so známou hodnotou mierky alebo uhlomernou stupnicou, ktorá je v kruhovej miere a býva súčasťou meracieho zariadenia. Vlastnosťou každej mierky je určitá dovolená chyba, ktorá je potom zložkou neistoty merania. Najpoužívanjšie sú mechanické a optické meradlá (príp. iné pomocné meradlá). Medzi priame meradlá patria napríklad:

- *uhlové mierky* – vid' kap. 5.4.1,
- *uholníky* – kontrola kolmosti plôch, nastavenie pravého uhla, orysovanie, vyrábajú sa v rôznych tvaroch, veľkostiach a stupňoch presnosti (ploché, príložné, nožové, kontrolné atď.),
- *uhlomery* – slúžia na nastavovanie a orysovanie uhla (mechanické, digitálne, optické), [5]
- *vodováhy* – existuje mnoho typov s rozličnou presnosťou určených pre rôzne aplikácie (digitálne vodováhy, krížové vodováhy, rámové vodováhy, hadicové vodováhy, U trubice, kvapalinové libely, elektronické libely, koincidenčné libely, atď.), [5] [23]
- *profilprojektory* – optický prístroj, ktorý premieta obraz reálnej súčasti na matnicu alebo premietaciu plochu. Zväčšenie býva 10 až 100 násobné, preto sa využíva na kontrolu tvarovo zložitých súčastí alebo malých rozmerov. Využíva princípy diaprojekcie (pozorovanie prechádzajúcim svetlom) a epiprojekcie (pozorovanie odrazeným svetlom). [5]

Nepriame metódy (trigonometrické) – princíp merania je založený na meraní iných veličín, kde sa neznámy uhol doráta pomocou goniometrických funkcií. Medzi meradlá tohto princípu zaradíme napríklad: [5]

- *sínusové pravítko* – v spojení s koncovými mierkami je pomocou neho možné presne nastavovať a merať uhol. Využíva sa na kontrolu uhlov na súčiastkach a ako prípravok pri obrábaní.
- *tangentové pravítko* – pravítko položené na dve mierky (alebo valčeky) vzdialené od seba o určitú vzdialenosť, kde rozdiel veľkosti mierok a ich vzdialenosti určuje tangentu uhlu. Má nižšiu presnosť ako sínusové pravítko. [23]

5.2.2 Odchýlky tvaru

Skutočné plochy vždy vykazujú isté odchýlky od svojich menovitých hodnôt. Tieto odchýlky geometrie súčastí sú spôsobené nepresnosťou výroby a musia byť kontrolované. [23] Z pohľadu funkčnosti jednotlivých súčastí je preto zavedené geometrické tolerovanie.

Geometrická tolerancia platná pre určitý prvok (bod, čiara, povrch súčasti) stanovuje podľa normy ČSN EN ISO 1101 tolerančné pole okolo referenčného prvku, v ktorom musí

tolerovaný prvok súčasti ležať. V závislosti na spôsobe špecifikácie vyhodnocovanej geometrickej charakteristiky môže mať tolerančné pole rôznu podobu. [32] Základné tolerancie pre geometrickú presnosť klasifikujeme na základe spomínanej normy na tolerancie tvaru, smeru, polohy a hádzania. [23]

Pokiaľ sa zameriame na jeden tvarový prvok, tak jeho odchýlku od ideálneho geometrického tvaru nazývame odchýlku tvaru. Odchýlka geometrického tvaru vyhodnocovaná v rozsahu vzťažného úseku je najvyššie vychýlenie bodov skutočnej plochy určené v smere normály k menovitej ploche. [23] Jednoduchšie povedané, ide o najväčšiu vzdialenosť skutočnej plochy od obalovej plochy alebo profilu. Tolerančné pole prvku môže byť v tomto prípade ohraničené dvoma rovnobežnými priamkami alebo medzikružím v rovine, a dvoma rovnobežnými rovinami alebo dvoma sústrednými valcami v priestore. [22]

Medzi základné geometrické tolerancie tvaru zaraďujeme priamosť, rovinnosť, kruhovitosť, valcovitosť, tvar daného profilu a tvar danej plochy. [22] Pre potreby tejto diplomovej práce bližšie definujeme prvé štyri spomenuté geometrické charakteristiky.

1) *Priamosť*

Priamosť je podľa normy ČSN EN ISO 12780-1 definovaná ako vlastnosť priamej čiary, resp. číselná reprezentácia priesečnice skutočného povrchu a roviny priamosti. Za miestnu odchýlku priamosti sa považuje kolmá odchýlka bodu na profile priamosti od referenčnej čiary. [33] Menovitý tolerovaný prvok priamosti má podobu priamky alebo súboru priamok. [32]

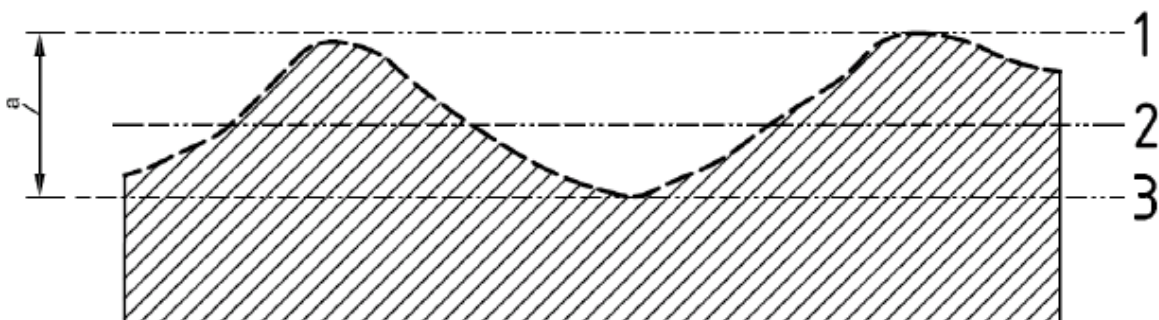
Priamosť tolerovaného prvku sa považuje za vyhovujúcu v prípade, ak každý zaznamenaný bod v rovine skutočného povrchu leží medzi rovnobežnými priamkami vzdialenými od seba najvyšš o hodnotu predpísanú tolerančným poľom. Priamosť môžeme vyhodnotiť metódami:

- **LSLI (Referenčná čiara najmenších štvorcov)** – referenčná priamka profilu je preložená bodmi tak, aby súčet štvorcov vzdialenosti od nej bol čo najmenší. Od tejto priamky sa vyhodnocuje najväčšia kolmá vzdialenosť dvoch bodov profilu.
- **MZLI (Referenčné čiary minimálnej zóny)** – obalová metóda, kde sa vyhodnocuje minimálna vzdialenosť dvoch rovnobežných priamok v kolmom smere, ktoré ohraničujú zónu obsiahnutú všetkými zaznamenanými bodmi. [22]

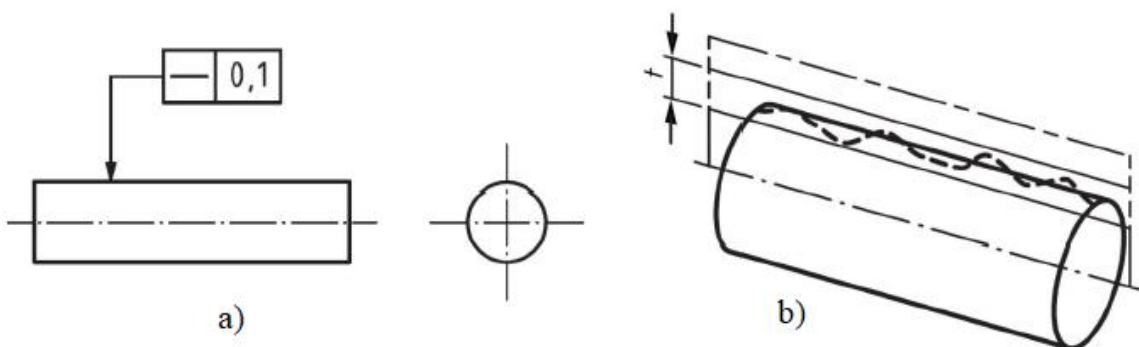
Princíp vyhodnotenia priamosti metódou MZLI je zobrazený na obr. 24, kde sú v rovine priamosti zobrazené minimálne vzdialené rovnobežné čiary ohraničujúce profil priamosti (minimálna zóna). Číslami sú označené referenčné čiary minimálnej zóny (1 – vonkajšia, 2 – stredná, 3 – vnútorná), a a je najmenšia vzdialenosť medzi 1 a 3. [33]

Na obrázku nižšie je uvedený príklad indikácie (predpisu) tolerancie priamosti (obr. 25a) a definície tolerančného poľa priamosti (obr. 25b). V tomto prípade musí pre vyhovieť tolerancie akákoľvek extrahovaná čiara pozdĺžneho rezu na valcovom povrchu ležať medzi dvoma rovnobežnými čiarami vzdialenými $t = 0,1$ mm od seba v rovine, ktorá zahrňuje os valca. [32]

Odchýlku priamosti môžeme merať rôznymi spôsobmi v závislosti na požiadavkách presnosti a dostupnosti meracích prostriedkov. Na jej kontrolu (meranie) využívame napr. vlasové pravítko (určenie priesvitom), prímernú dosku a odchýlkomer (koncové mierky), sečnú (krokovú) metódu (relatívna zmena sklonu dielčích úsekov profilu zistená pomocou libely, odchýlkomeru apod.), CMM a pod. [23]



Obr. 24 Referenčné čiary minimálnej zóny [33]



Obr. 25 Tolerancia priamosti: a) indikácia; b) definícia tolerančného poľa [32]

2) Rovinnosť

Rovinnosť je podľa normy ČSN EN ISO 12781-1 definovaná ako vlastnosť roviny, resp. je to číselná reprezentácia skutočného povrchu. Za miestnu odchýlku rovinnosti sa považuje kolmá odchýlka bodu na rovinnom povrchu od referenčnej roviny. [34] Menovitý tolerovaný prvok rovinnosti má podobu rovinného povrchu, ktorý je plošný prvok. [32]

Rovinnosť tolerovaného prvku sa považuje za vyhovujúcu v prípade, ak každý zaznamenaný bod v priestore skutočného povrchu leží medzi rovnobežnými rovinami vzdialenými od seba nanajvyš o hodnotu predpísanú tolerančným poľom. Rovinnosť môžeme vyhodnotiť metódami:

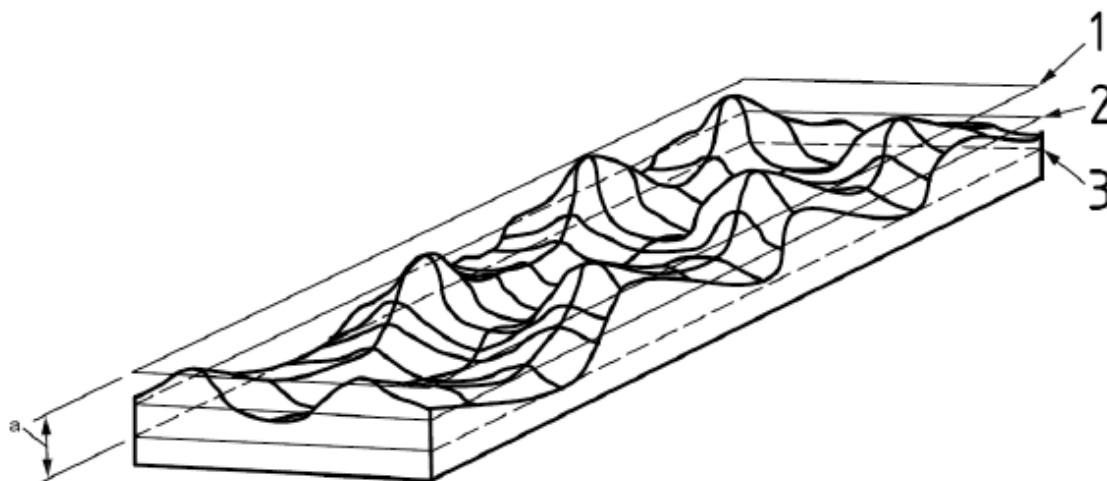
- **LSPL (Referenčná rovina najmenších štvorcov)** – referenčná rovina oblasti v priestore je preložená bodmi tak, aby súčet štvorcov vzdialenosti od nej bol čo najmenší. Od tejto roviny sa vyhodnocuje najväčšia kolmá vzdialenosť dvoch bodov oblasti.
- **MZPL (Referenčné roviny minimálnej zóny)** – obalová metóda, kde sa vyhodnocuje minimálna vzdialenosť dvoch rovnobežných rovín v kolmom smere, ktoré ohraničujú zónu obsiahnutú všetkými zaznamenanými bodmi. [22]

Princíp vyhodnotenia rovinnosti metódou MZPL je zobrazený na obr. 26, kde sú zobrazené minimálne vzdialené rovnobežné roviny ohraničujúce rovinný povrch (minimálna zóna). Číslami sú označené referenčné roviny minimálnej zóny (1 – vonkajšia, 2 – stredná, 3 – vnútorná), a a je najmenšia vzdialenosť medzi 1 a 3. [34]

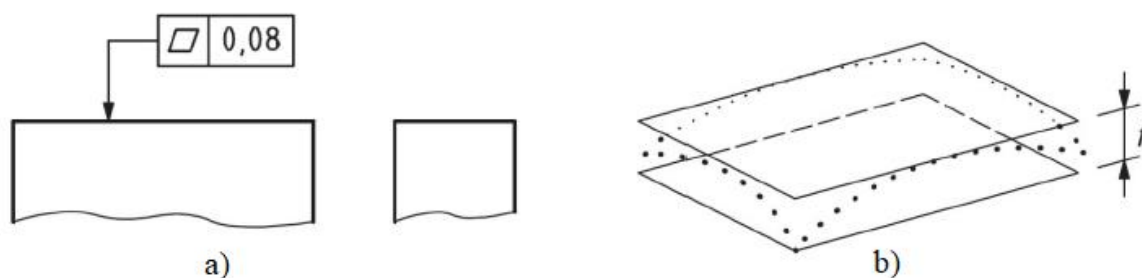
Na obrázku nižšie je uvedený príklad indikácie (predpisu) tolerancie rovinnosti (obr. 27a) a definície tolerančného poľa rovinnosti (obr. 27b). V tomto prípade musí pre vyhovenie

tolerancie extrahovaný povrch ležať medzi dvoma rovnobežnými rovinami vzdialenými $t = 0,08$ mm od seba. [32]

Na kontrolu odchýlky rovinnosti môžeme použiť napr. interferenciu svetla (planparalelné doštičky alebo interferometer), nepriamu metódu merania na základe odchýlok priamosti v pozdĺžnych, kolmých a diagonálnych rezoch, alebo CMM. [23]



Obr. 26 Referenčné roviny minimálnej zóny [34]



Obr. 27 Tolerancia rovinnosti: a) indikácia; b) definícia tolerančného poľa [32]

3) Kruhovitost'

Kruhovitost' je podľa normy ČSN EN ISO 12181-1 definovaná ako vlastnosť kružnice, resp. číselná reprezentácia priesečnice skutočného povrchu a roviny kruhovitosti. Za miestnu odchýlku kruhovitosti sa považuje minimálna vzdialenosť od bodu na profile kruhovitosti k referenčnej kružnici. [35] Menovitý tolerovaný prvok kruhovitosti má podobu kruhovej krivky alebo súboru kruhových kriviek, ktoré sú lineárnym prvkom. Pri valcových prvkoch sa kruhovitosť aplikuje v priečných prierezoch kolmých na osu prvku, pri guľových prvkoch zasa v priečných prierezoch, ktoré obsahujú stred gule. [32]

Tolerančnú zónu kruhovitosti ohraničujú dve sústredné kružnice v rovine, ktorých radiálna vzdialenosť predstavuje predpísanú hodnotu tolerancie. V závislosti od spôsobu vyhodnotenia jedna kružnica má funkciu obalového prvku a druhá referenčného prvku. Na vyhodnotenie môžeme použiť nasledovné metódy:

- **Maximálna vpísaná kružnica (MICI)** – referenčná kružnica je najväčšia možná vpísaná kružnica do získaného profilu. Pomocou nej vyhodnocujeme vnútorné povrchy.

- **Minimálna opísaná kružnica (MCCI)** – referenčná kružnica je najmenšia možná opísaná kružnica okolo získaného profilu. Pomocou nej vyhodnocujeme vonkajšie povrchy.
- **Minimálna radiálna vzdialenosť; minimálna zóna (MZCI)** – referenčnú zónu tvoria dve sústredné kružnice, ktoré zachytávajú zaznamenaný profil v čo najmenšom rozdieli svojich polomerov.
- **Gaussova kompenzačná kružnica; kružnica najmenších štvorcov (LSCI)** – referenčná kružnica je preložená cez zaznamenaný profil metódou najmenších štvorcov. [22]

Na obr. 28 sú zobrazené tolerančné zóny kruhovitosti v závislosti na metóde vyhodnotenia. V tomto prípade je tolerančné pole stanovené špecifikáciou v uvažovanom priechom priereze na povrchu kužeľa vymedzené dvoma kružnicami so vzdialenosťou 0,02 mm od seba. [32]

Kontrola (meranie) odchýlok kruhovitosti sa realizuje na základe merania zmien polomeru (radiálnou alebo absolútnou metódou). K tomuto sa využívajú špeciálne meracie prístroje s otočným vretenom (súčasť stojí) alebo s otočným stolom (snímač stojí a otáča sa súčasť). Radiálne pohyby snímača sa prevedú na elektrické signály a ďalej spracujú, z čoho možno vo výsledku dostať grafický záznam skutočného profilu kruhovitosti resp. jeho číselne vyhodnotenie. [23]

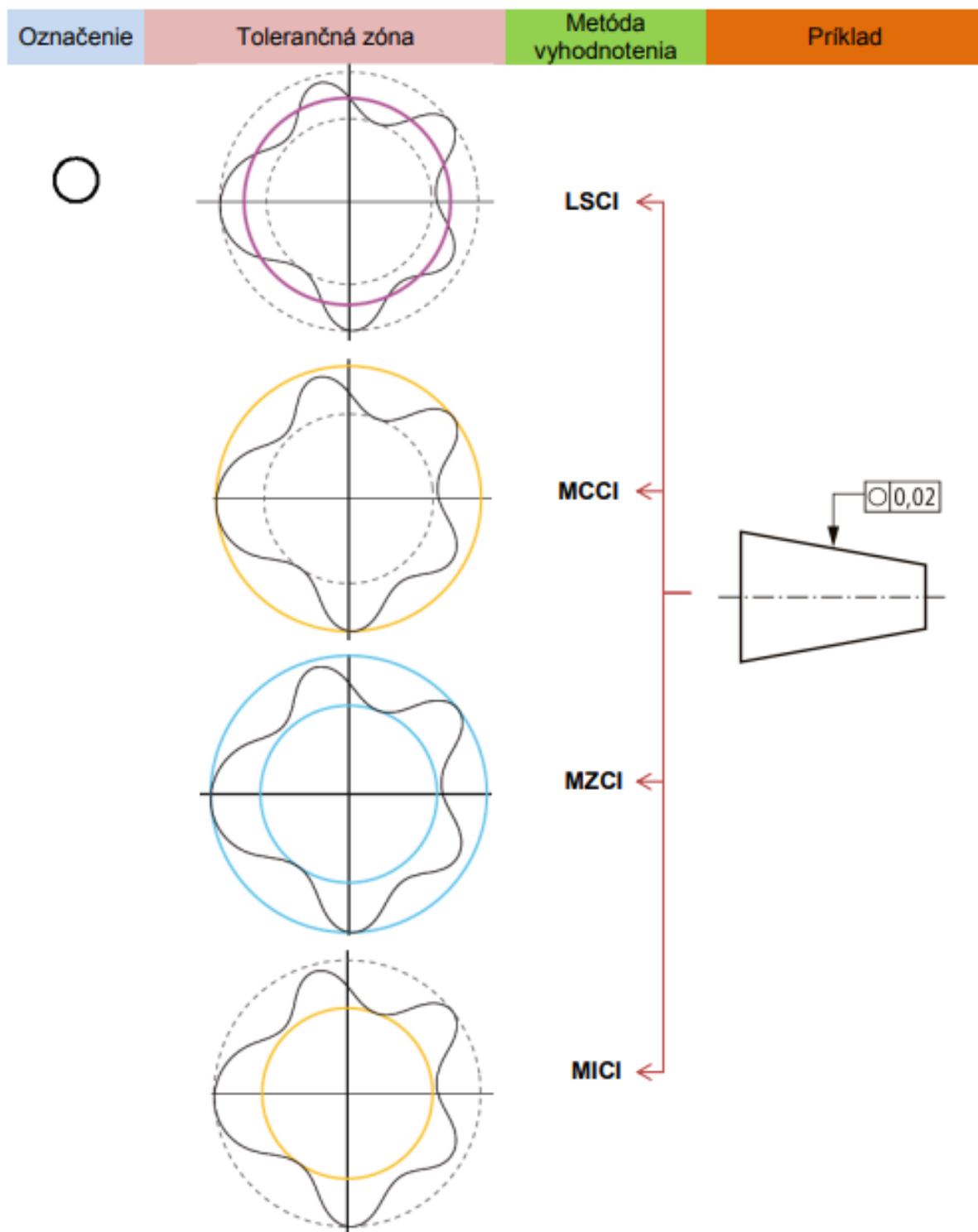
Medzi ďalšie spôsoby merania kruhovitosti patria metódy relatívne ako dvojbodová, trojbodová alebo n-bodová metóda. [23]

4) *Valcovitosť*

Valcovitosť je podľa normy ČSN EN ISO 12180-1 definovaná ako vlastnosť valca, resp. číselná reprezentácia jeho skutočného povrchu. Za miestnu odchýlku valcovitosti sa považuje kolmá vzdialenosť medzi bodom na valcovom povrchu a referenčným valcom. [36] Menovitý tolerovaný prvok valcovitosti má podobu valcového povrchu, ktorý je plošný prvok. [32]

Tolerančnú zónu valcovitosti ohraničujú dva sústredné valce v priestore, ktorých radiálna vzdialenosť predstavuje predpísanú hodnotu tolerancie. V závislosti od spôsobu vyhodnotenia jeden valec má funkciu obalového prvku a druhý referenčného prvku. Na vyhodnotenie môžeme použiť nasledovné metódy:

- **Maximálny vpísaný valec (MICY)** – referenčný valec je najväčší možný vpísaný valec do získanej oblasti. Pomocou neho vyhodnocujeme vnútorné povrchy.
- **Minimálny opísaný valec (MCCY)** – referenčný valec je najmenší možný opísaný valec okolo získanej oblasti. Pomocou neho vyhodnocujeme vonkajšie povrchy.
- **Minimálna radiálna vzdialenosť; minimálna zóna (MZCY)** – referenčnú zónu tvoria dva sústredné valce, ktoré zachytávajú zaznamenanú oblasť v čo najmenšom rozdieli svojich polomerov.
- **Gaussov kompenzačný valec; valec najmenších štvorcov (LSCY)** – referenčný valec je preložený cez zaznamenanú oblasť metódou najmenších štvorcov. [22]



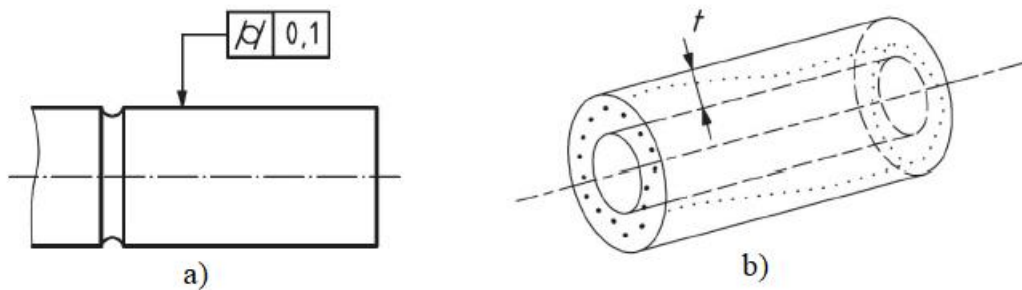
Obr. 28 Označenie, tolerančné zóny a príklad predpisu kruhovitosti [22]

Na obrázku nižšie je uvedený príklad indikácie (predpisu) tolerancie valcovitosti (obr. 29a) a definície tolerančného poľa valcovitosti (obr. 29b). V tomto prípade musí pre vyhovie tolerancie extrahovaný povrch ležať medzi dvoma súosovými valcami s rozdielom polomerov $t = 0,1$ mm. [32]

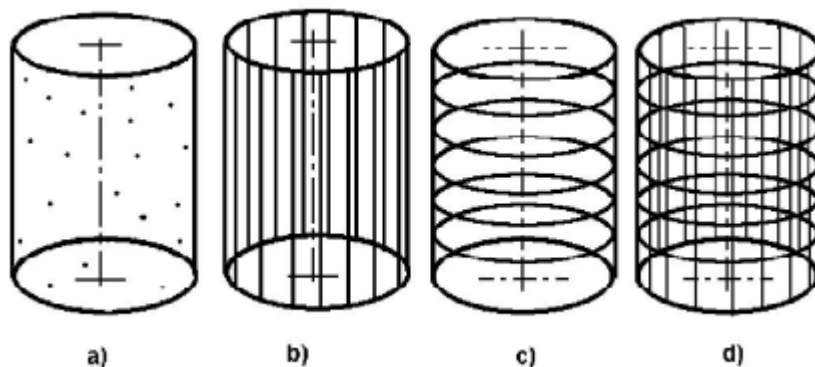
Odchýlka valcovitosti je komplexná odchýlka pomocou ktorej vieme zistiť tiež odchýlku kruhovitosti v priečných rezoch, odchýlku priamosti povrchových priamok

v pozdĺžnych rezoch a odchýlku rovnobežnosti povrchových priamok s osou obalového valca. [23]

Odchýlku valcovitosti je možné merať na CMM strojoch alebo pomocou prístrojov na meranie odchýlok tvaru. Na obrázku nižšie sú zobrazené jednotlivé stratégie merania odchýlky valcovitosti. Podľa normy ČSN EN ISO 12180-2, ktorá určuje podmienky merania valcovitosti, by mala byť preferovaná metóda klietky (obr. 30d), taktiež sa ale pripúšťa použitie metódy bodovej (obr. 30a), metódy tvoriacich priamok (obr. 30b) alebo metódy priečných rezov (obr. 30c). [23]



Obr. 29 Tolerancia valcovitosti: a) indikácia; b) definícia tolerančného poľa [32]



Obr. 30 Stratégie merania odchýlky valcovitosti: a) metóda bodová; b) metóda tvoriacich priamok; c) metóda priečných rezov; d) metóda klietky [23]

Pri vyhodnocovaní a meraní uvedených geometrických charakteristík je dôležité zohľadniť tiež proces filtrácie. V prípade kruhovitosti a valcovitosti je pre ich správne vyhodnotenie nevyhnuté vychádzať zo špecifikovaných a jednoznačne určených hodnôt pre operácie špecifikácie ako hodnoty filtrov vlny na otáčku (UPR), polomer snímacieho dotyku a metóda asociácie (referencia). [37]

5.3 Popis zvolených CMM ku kalibrácii

V tejto kapitole v stručnosti uvedieme charakteristiku zvolených CMM strojov, na ktorých budeme realizovať praktické merania pri ich kalibrácii. Konkrétne sa jedná o meracie zariadenia umiestnené v laboratóriách na Ústave výrobných strojov, systémov a robotiky na Fakulte strojného inžinierstva VUT v Brne, a to optický CMM SOL 311 od spoločnosti Micro-Vu a prenosné kĺbové meracie rameno Hexagon Absolute Arm 83 Compact.

5.3.1 Micro-Vu SOL 311

SMS SOL 311 (obr. 31) spoločnosti Micro-Vu využíva merací systém Sol Vision, ktorý poskytuje relatívne rýchle, presné a spoľahlivé merania. Jedná sa o istý kompromis medzi manuálnymi meracími zariadeniami a automatizovanými multisenzorovými CMM. Sol sa primárne používa na meranie rozmerov a kontrolu presne obrábaných dielov. [38]

Sol ponúka programovateľný 19,5x zoom, programovateľné viacsegmentové osvetlenie, 6,5x optické zväčšenie, 3x digitálne zväčšenie, nelineárnu kompenzáciu stolíka a optiky a kompatibilitu programovania dielov. Disponuje ručne ovládaným stolíkom a motorizovaným zoom objektívom. [38]

Optické komponenty stroja zahŕňajú digitálnu kameru s vysokým rozlíšením, rôzne svetelné zdroje a sadu softvérových nástrojov slúžiacich na rozpoznávanie hrán charakteristík. Spoločne tieto komponenty zaisťujú optické snímanie dielu, zachytenie obrazu a počítačovú lokalizáciu hrán pomocou softwaru InSpec Metrology. Tento výkonný a pritom ľahko použiteľný systém umožňuje automaticky detegovať hrany, riadiť presné umiestnenie dielu a realizovať zložité geometrické merania. [39]

InSpec ako výkonný softwarový nástroj podporuje mnoho typov geometrických charakteristík a operácií. Charakteristikou môže byť napríklad hrana, výška, otvor, polomer alebo niektorá iná z mnohých ďalších geometrických charakteristík meraného dielu. Pri meraní charakteristík vypočíta InSpec polohu, veľkosť a tvar charakteristiky. Zároveň je ľahko programovateľný, pričom sa program automaticky vytvára počas merania dielu. Na základe výsledkov meraní je potom možné vytvoriť automaticky generovaný protokol. [39]



Obr. 31 Optický CMM SOL 311 na ÚVSSR FSI VUT

Meranie prebieha nasledovne: meraný diel sa umiestni alebo pripevní na merací stolík a zvrchu ho sníma kamera. Merací stolík sa posunie tak, aby v zábere kamery bola požadovaná časť dielu. Pohyb v pravom a ľavom smere je pohyb pozdĺž osi X. Podobne označujeme pohyb vpred a vzad ako pohyb pozdĺž osi Y. Kamera sa pohybuje hore a dole pozdĺž zvislice, resp. osi Z, a meria výšky a zaostruje na diel. Pretože meranie môžeme vykonávať pozdĺž osí X, Y a Z, nazývame tento typ systému trojosový merací stroj. [39]

Stolíkom a kamerou je možné ručne pohybovať v smere osí X, Y a Z. Presné prevody nám umožňujú nastaviť polohu stolíka s presnosťou na niekoľko mikróv, zatiaľ čo optické nástroje poskytujú výsledky merania v ešte väčšom rozlíšení. Program riadi nastavenie osvetlenia a zväčšenia a ukladá ho, takže užívateľ musí pri prehrávaní programu len nastaviť polohu stolíka v osiach X, Y a Z. [39]

Rozlíšenie enkodéra stroja je 1 μm . Presnosť v osiach XY je daná vzťahom $4,5+L/150$, a v osi Z to je $2,8+L/100$, kde jednotky sú v mikrónoch a dĺžka L je v milimetroch. Merací priestor je limitovaný rozmermi 315x315x160 mm a nosnosť stolíku je 10 kg. [38]

5.3.2 Hexagon Absolute Arm 83 Compact

Spoločnosť Hexagon Manufacturing Intelligence sa zaoberá vývojom meracej techniky s rôznymi meracími technológiami. Medzi jej produkty patria napr. ručné meracie náradie, súradnicové meracie systémy, prenosné meracie ramená, laserové trackery, 3D optické skenery a softvérová podpora pre metrológiu. Samotná ponuka prenosných meracích ramien obsahuje ramená v troch rôznych modeloch, troch úrovniach presnosti (83, 85, 87) a siedmich veľkostiach. [40]



Obr. 32 Hexagon Absolute Arm 83 Compact na ÚVSSR FSI VUT

Ramená sú dostupné v 6-osom a 7-osom prevedení, alebo v najmenšej verzii Compact, ktoré je zároveň najpresnejšie v dvoch úrovniach presnosti 83 (nižšia úroveň; obr. 32) a 85 (stredná úroveň). Všetky ramená Absolute Arm majú konštrukciu z uhlíkových vlákien, ktoré majú veľmi nízky koeficient teplotnej rozťažnosti a dobrú pevnosť. V kombinácii so protizávažím integrovaným v základni ramena ponúkajú vhodné riešenie na zníženie namáhavosti meracích operácií. Verzia Compact je najmenším modelom, avšak zo sortimentu Absolute Arm je s hmotnosťou 12,1 kg najťažšie, čo je spôsobené konštrukciou základne, ktorá na použitie ramena nevyžaduje fixné uchytenie k pracovnému stolu, čo významne uľahčuje jeho mobilitu. [40]

Výhodou všetkých ramien Absolute Arm sú absolútne enkodéry odmeriavajúce natočenie jednotlivých osí, čo v porovnaní s inkrementálnymi enkodermi (vyžaduje nájdenie referenčnej polohy) podstatne znižuje dobu prípravy na meranie. Časovú úsporu pri meraní poskytuje tiež automatické rozpoznávanie typu pripojenej sondy a možnosť jej výmeny počas merania bez nutnosti recalibrácie. Namiesto sondy aj verzia Compact umožňuje pripojenie 3D laserového skenera HP-L-8.9. Poskytuje konektivitu cez WiFi a Bluetooth a disponuje zvukovou, optickou alebo hmatovou odozvou. [40]

Vďaka svojej kompaktnej veľkosti sa model Compact hodí najviac na presné meranie malých a stredne veľkých dielov. Maximálny dosah ramena je 1,49 m, merací rozsah má priemer 1,2 m. Pre túto oblasť je maximálna prípustná chyba pre dotyk MPE_p rovná 0,008 mm a maximálna prípustná chyba pre meranie dĺžky MPE_e je vyjadrená vzťahom $5+L/40 < 0,018$ mm (pre úroveň presnosti 83, podľa ČSN EN ISO 10360-2). [40]

Meracie rameno je certifikované podľa ČSN EN ISO 10360-12 (Kĺbové rameno súradnicových meracích strojov), resp. ČSN EN ISO 10360-2 (Súradnicové meracie stroje používané na meranie lineárnych rozmerov). [40]

5.4 Voľba vhodných kalibrovaných etalónov

Ako už bolo spomenuté v kap. 5.1.2, úlohou praktickej časti tejto diplomovej práce je z komplexného hľadiska posúdiť presnosť zvolených CMM strojov. Naším cieľom je získať predstavu o presnosti celého systému pri meraní špecifických geometrických charakteristík, a to rovinného uhla a vybraných odchýlok tvaru. Podstatou experimentu bude porovnávanie hodnoty poskytnutej etalónom a hodnoty indikovanej CMM strojom. Z tohto dôvodu je potrebné zvoliť vhodné kalibrované hmotné telesá, ktoré budú plniť úlohu etalónu. Tieto telesá sú zhmotnením a nositeľom určitej nominálnej hodnoty veličiny resp. reprezentujú určitú geometrickú charakteristiku. Keďže ich účelom je poskytnúť presnú a vierohodnú hodnotu alebo reprezentovať ideálny tvar, musia byť vyrábané s ohľadom na to, aby takéto vlastnosti zaručili. To sa dosiahne najmä vhodnou voľbou materiálu (rozmerová stálosť) resp. dôslednou povrchovou úpravou funkčných plôch.

Z uvedených dôvodov vyššie a s ohľadom na vybavenosť univerzitného laboratória sme vybrali nasledovné telesá, ktoré budú plniť úlohu etalónov. Ako reprezentanta pre veličinu rovinný uhol volíme základné mierky uhla (uhlové mierky), pre meranie odchýlok kruhovitosti volíme kontrolné (nastavovacie) krúžky, a pre meranie odchýlky priamosti volíme kontrolné pravítko. Týmto výberom pokryjeme všetky charakteristiky tvaru, ktoré máme možnosť s ohľadom na typy vybraných CMM strojov zmerať, a ktoré vyplynuli z požiadaviek a potrieb na ÚVSSR.

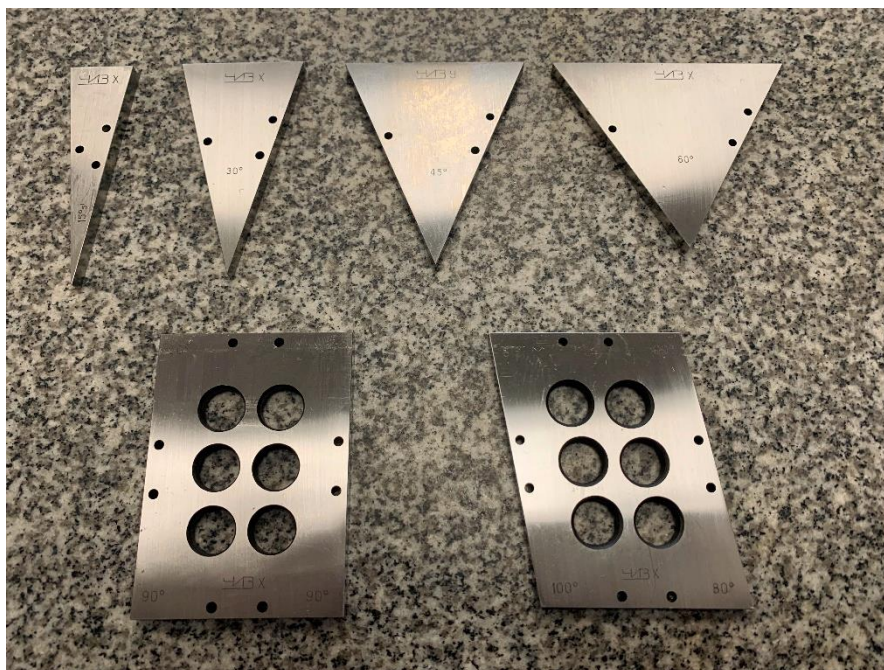
5.4.1 Uhlové mierky

Majú podobu plochých hranolov s hrúbkou 2 až 16 mm s jedným alebo viacerými definovanými uhlami a sú základným prostriedkom na meranie uhla. [23] Vyrábajú sa z nástrojovej oceli a funkčné plochy majú špeciálne upravené brúsením a jemným lapovaním. Dodávajú sa v rôznych súboroch s odstupňovanými hodnotami a v rôznych triedach presnosti. [5]

Ako kalibrované etalóny boli pre potreby merania rovinného uhla použité mierky zo súboru koncových mierok uhla (výrobca ČIZ, identifikačné číslo X127), ktoré sú k dispozícii na ÚVSSR (obr. 33). Z praktických dôvodov sme pre meranie (kalibráciu) vybrali šesť kusov mierok, z ktorých sú štyri v trojuholníkovom tvare, jeden v kosodĺžnikovom tvare a jeden v obdĺžnikovom tvare. Konkrétne budú použité mierky so siedmimi definovanými hodnotami uhlov $15^{\circ}5'$, 30° , 45° , 60° , 80° , 81° a 90° (obr. 34).



Obr. 33 Súbor uhlových mierok (výrobca ČIZ, identifikačné číslo X127) na ÚVSSR



Obr. 34 Uhlové mierky použité ku kalibrácii

5.4.2 Kontrolné pravítko

Pre meranie odchýlok priamosti sme zvolili oceľové kontrolné pravítko (identifikačné číslo D107), ktoré je k dispozícii na ÚVSSR (obr. 35). Pravítko má dĺžku 500 mm a využíva sa tiež na meranie rovinnosti. Má dve rovnobežné a precízne obrobené funkčné plochy (strany označené písmenami A a B).

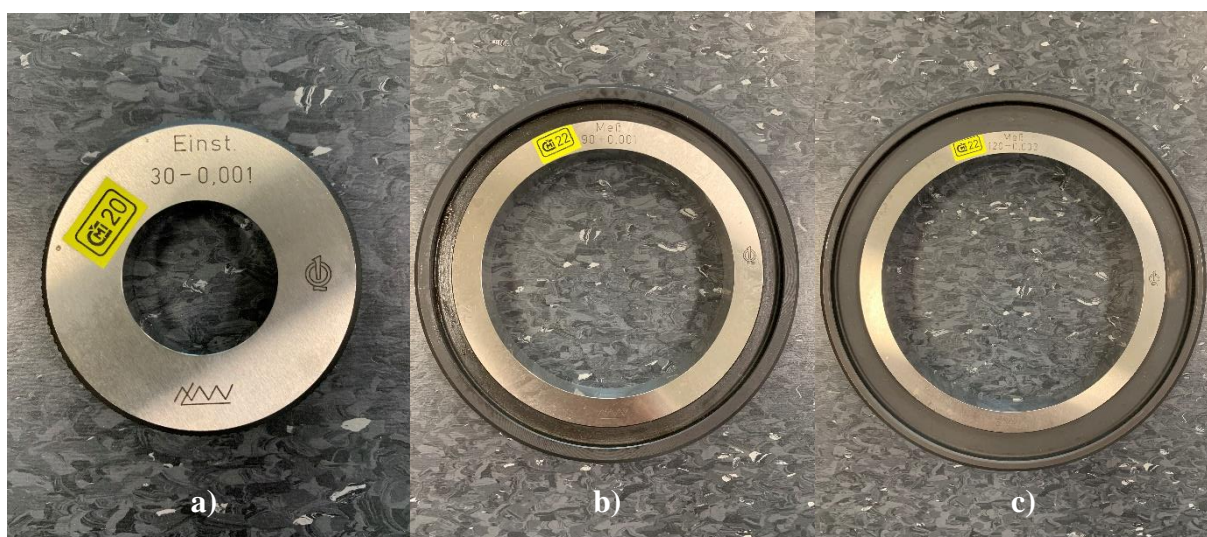


Obr. 35 Kontrolné pravítko 500 mm (identifikačné číslo D107) na ÚVSSR

5.4.3 Kontrolné (nastavovacie) krúžky

Na kontrolu odchýlok kruhovitosti (valcovitosti) sú pre jednoduchosť použitia vhodnou voľbou kontrolné (nastavovacie) krúžky s presne definovaným priemerom. Majú precízne obrobenú funkčnú plochu (vonkajšiu alebo vnútornú) brúsením a lapovaním. Využívajú sa napr. na kontrolu obrobkov alebo nastavovanie meradiel.

Ako kalibrované etalóny boli pre potreby merania kruhovitosti použité tri nastavovacie (kontrolné) krúžky značky Einst s vnútornou funkčnou plochou s nominálnymi vnútornými priermi $\varnothing 30$ mm, $\varnothing 90$ mm a $\varnothing 120$ mm, ktoré boli k dispozícii na ÚVSSR (obr. 36).



Obr. 36 Nastavovacie (kontrolné) krúžky Einst použité ku kalibrácii s priermi:
 a) $\varnothing 30$ mm; b) $\varnothing 90$ mm; c) $\varnothing 120$ mm

5.5 Kalibrácia použitých etalónov

Aby výsledky našich meraní mohli byť všestranne aplikovateľné a použiteľné v praxi, je nevyhnutné, aby boli hierarchicky vzťahnuté k referencii geometrických veličín, ktorú predstavujú národné resp. medzinárodné etalóny. Tento jav dosiahneme zaradením nami vybraných nositeľov geometrických charakteristík (etalónov) do reťazca metrologickej nadväznosti, a to formou kalibrácie pomocou etalónov resp. kalibrovaných meracích zariadení.

Kalibrácia našich etalónov bola zrealizovaná pod záštitou ČMI, ktorý má osvedčenie o akreditácii pre kalibračné laboratórium podľa normy ČSN EN ISO/IEC 17025:2018. Kalibrácia sa uskutočnila s využitím *CMM Zeiss UPMC 850 CARAT*, dĺžkomera *SIP 1002M* spojeného s laserinterferometrom *XL80* a kruhomera *Talyrond TR 595 S*. Výsledky jednotlivých kalibrácií sú uvedené v kalibračných listoch, ktoré sú súčasťou príloh tejto práce.

Pre naše potreby budú najdôležitejšími údajmi z kalibračných listov neistoty merania jednotlivých geometrických charakteristík, ktoré budú tvoriť zložky našich dosiahnutých neistôt a výsledkov meraní. V nasledujúcich podkapitolách sú uvedené stručné charakteristiky uvedených meracích zariadení použitých ku kalibrácii etalónov.

5.5.1 CMM stroj Zeiss UPMC 850 CARAT

Tento CMM stroj, ktorý je produktom nemeckej spoločnosti Zeiss, sa zaraďuje medzi portálové súradnicové meracie stroje s pevným stolom a pohyblivým portálom. Disponuje pneumatickým antivibračným systémom, mierkami zo Zerodur-u, pracovnou doskou z granitu, univerzálnou hlavou HSS so širokou aplikáciou snímacích dotykov. Súčasťou vybavenia sú funkcie kompenzácie teploty a korekcie vplyvom priehybu stola. Pohyb vo všetkých osiach zabezpečujú výkonné servopohony. Ovládací panel disponuje joystickom. Stroj dokáže merať obrobky s maximálnou hmotnosťou 1500 kg v rozsahu osí X – 850 mm, Y – 1200 mm, Z – 600 mm. [16]

Jedná sa o veľmi presný merací prístroj, ktorý je vhodný pre meracie aplikácie vo výskume a vývoji, rovnako tak ale na kalibráciu a kontrolu meradiel. K dosiahnutiu čo najpresnejších výsledkov meraní je nutné ho prevádzkovať pri teplote $20\text{ °C} \pm 1\text{ °K}$. Stroj je vybavený softwarom Calypso kompatibilným s CAD programami. [16] Na obr. 37 je zobrazený



Obr. 37 Zeiss UPMC 850 CARAT (vľavo); detail priestoru merania (vpravo)

uvedený CMM umiestnený na ČMI Brno s detailným pohľadom na pracovný priestor stroja pri kalibrácii krúžku.

5.5.2 Dĺžkomer SIP 1002M s laserinterferometrom XL80

SIP 1002M je produktom švajčiarskej spoločnosti SIP. Jedná sa o presný digitálny dĺžkomer, ktorý umožňuje meranie rozmerov do 1 m s rozlíšením 0,0001 mm. Tento jednoosový dotykový prístroj má stabilnú prepracovanú konštrukciu, ktorej výhodou je dodržanie Abbého princípu merania. Disponuje nastaviteľným stolíkom v troch osiach, čo umožňuje precízne polohovanie a vyrovnanie meranej súčasti. S využitím širokej škály prídavného vybavenia je pomocou neho možné meranie rôznych typov meradiel a kalibrov vrátane vnútorných rozmerov. Prístroj má uplatnenie napríklad pri akreditovanej metóde kalibrácie etalónov. [8]



Obr. 38 Dĺžkomer SIP 1002M v spojení s laserinterferometrom XL8

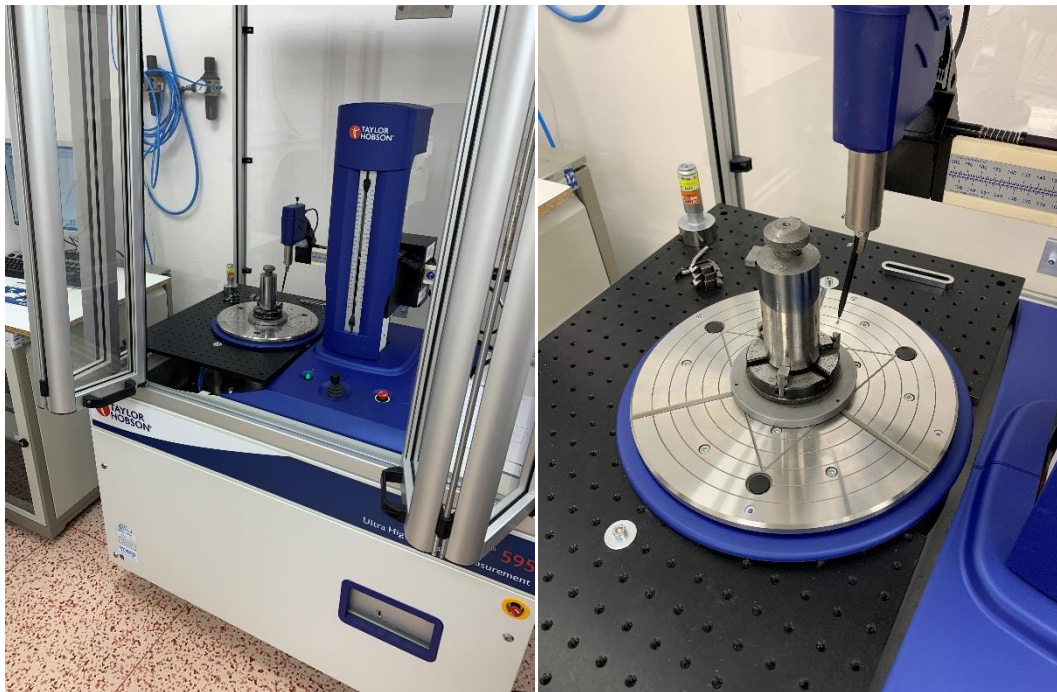
V spojení s priemyselným laserinterferometrom Renishaw XL80, ktorý je pri dodržaní Abbého princípu merania umiestnený priamo v ose odmeriavacieho systému dĺžkometra, poskytuje značné zvýšenie presnosti merania. Toto spojenie meracích aparátúr sa rovnako využíva k akreditovanej metóde kalibrácie. [8] Na obr. 38 je zobrazená zostava dĺžkometra SIP 1002M v spojení s priemyselným laserinterferometrom Renishaw XL80 počas ukážky kalibrácie krúžku (meranie vnútorného priemeru).

5.5.3 Kruhomer Talyrond TR595S

Kruhomer Talyrond TR595S je produktom spoločnosti Taylor Hobson Ltd. z Veľkej Británie. Tento prístroj poskytuje dotykové meranie pomocou meracieho ramienka. Základňu kruhomera tvorí liatinový podstavec. Keďže meranie pomocou neho prebieha v rádoch desiatin nanometrov, je vybavený aktívnou antivibračnou ochranou, ktorá pomocou piezoelektrických ovládaných úchytoz izoluje systém od vonkajších vibrácií. [41]

K meraniu využíva kruhomer tri meracie základne, a to konkrétne rotačnú, vertikálnu a horizontálnu, ktorým odpovedajú prvky – vreteno, stĺp, rameno. Uvedené súčasti sú chránené krytom pred ochranou proti vonkajším vplyvom ako prúdenie vzduchu alebo kolísanie teploty. [41]

Prístroj má inštalované vzduchové vreteno s nivelačnými motorčekmi, vďaka čomu je možné merané objekty s hmotnosťou do 40 kg veľmi presne vyrovnať a vycentrovať. Talyrond TR 595S poskytuje radu meracích a analytických nástrojov medzi ktoré patrí meranie kruhovitosti, odchýlok tvaru, drsnosti apod. [41] Na obr. 39 je zobrazený uvedený kruhomer Talyrond TR 595S počas kalibrácie kontrolného valca, ktorý sa nachádza na ČMI Brno.



Obr. 39 Kruhomer Talyrond TR595S (vľavo); detail priestoru merania (vpravo)

6 STRATÉGIA A POPIS MERANIA PRI KALIBRÁCII CMM

Pred samotným zahájením merania pri kalibrácii vybraných CMM strojov je vhodné dodržať isté náležité zásady vyplývajúce z ČSN EN ISO 10360-2 (akceptačné a verifikačné skúšky CMM používaných pre meranie lineárnych rozmerov) resp. ČSN EN ISO 10360-12 (akceptačné a verifikačné skúšky – kĺbové rameno CMM), a ČSN EN ISO 15530-3 (Metódy určovania neistoty merania – použitie kalibrovaných obrobkov alebo etalónov). Jedná sa najmä o environmentálne, prevádzkové a metrologické požiadavky.

Keďže sa pri našich experimentoch nejedná o riadnu akceptačnú ani verifikačnú skúšku za použitia definovaných artefaktov, ale o akúsi formu obmedzenej medzikontroly ako je popísané v kap. 5.1, nevieme pri nich aplikovať žiadne špecifické podmienky určené výrobcami CMM alebo normatívnymi dokumentmi. Použité metódy a postupy pri meraniach budú do istej miery jedinečné a budú prispôsobené s ohľadom na použité etalóny, merané geometrické charakteristiky, možnosti CMM a softwaru.

Pri meraní sme schopní ale dodržať podmienky všeobecného charakteru ako napríklad environmentálne podmienky (teplota, vlhkosť vzduchu), prevádzkové podmienky (spustenie a konfigurácia strojov, čistota a teplotná stabilita snímacích systémov apod.). [28]

Normy ČSN EN ISO 10360-2 a ČSN EN ISO 10360-12 v zásade pripúšťajú použitie iných artefaktov, než ktoré sú v nich uvedené. To nám umožňuje použiť najvhodnejšie artefakty v závislosti na úlohe merania. Vo všeobecnosti by skúšobná súčasť mala mať prvky reprezentujúce požadovaný geometrický tvar, byť rozmerovo stabilná, mechanicky robustná a mať drsnosť povrchu, ktorá významne neovplyvní neistotu merania. Odporúča sa tiež, aby materiál artefaktu mal súčiniteľ teplotnej rozťažnosti podobný ako typické merané predmety na CMM. [28] S ohľadom na uvedené náležitosti boli zvolené artefakty v podobe etalónov uvedených v kap. 5.4.

Ako bolo uvedené vyššie, dodržíme niektoré z odporúčaných zásad ako na základe vyššie spomenutých noriem uvádza Šladek [30]. Mimo iné, je na mieste tiež spomenúť, že v niektorých prípadoch zachováme už zaužívané a odskúšané postupy meraní jednotlivých etalónov, a v niektorých prípadoch zasa na ne naviažeme vlastnými adaptáciami na základe nadobudnutých skúseností počas využívania CMM strojov. K zásadám a princípom všeobecného charakteru, ktoré sa budeme snažiť dodržať ďalej patria:

- prirodzené okolité podmienky ako teplota a vlhkosť,
- príprava, očistenie a teplotná stabilizácia kalibrovaných etalónov,
- nastavenie a konfigurácia CMM a snímacích systémov (kalibrácia) podľa odporúčaní výrobcu,
- teplotná stabilita bez výraznejších výkyvov,
- prirodzená a približne vycentrovaná poloha a orientácia používaných etalónov vzhľadom k meraciemu priestoru CMM,
- vhodné upevnenie a zafixovanie etalónov proti pohybu,
- zmena polohy (orientácie) etalónov v rámci merania jednej geometrickej charakteristiky,
- dostatočný počet opakovaných meraní v rámci jednej polohy (aspoň 10).

6.1 Meranie – Micro-Vu SOL 311

Po zapnutí stroja a spustení softwaru InSpec je pred začiatkom merania potrebné posuvom osí cez referenčné značky vykonať inicializáciu k nájdeniu súradníc stroja.

6.1.1 Uhlové mierky (UM)

Uhlové mierky rozmiestnime približne rovnomerne od seba na stolík v rovine XY v rámci meracieho rozsahu stroja. Proti pohybu ich zafixujeme pomocou modelovacej hmoty (obr. 40). Meranie realizujeme pri priemernej teplote okolitého vzduchu 24,8 °C. Nastavíme osovú osvetlenie s intenzitou približne na úrovni 21 %. Zoom je 74x.



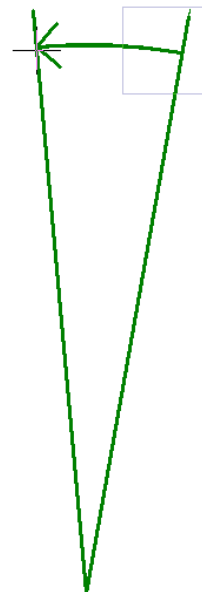
Obr. 40 Rozmiestnenie uhlových mierok počas merania v rovine XY stroja

Meranie zjednodušíme tým, že využijeme súradnicový systém stroja. Taktiež zanedbáme vyrovnanie v osi Z, a to z dôvodu malých rozmerov mierok. Týmto predpokladáme, že na výsledky nebude mať prípadná nerovnosť mierky žiadny vplyv.

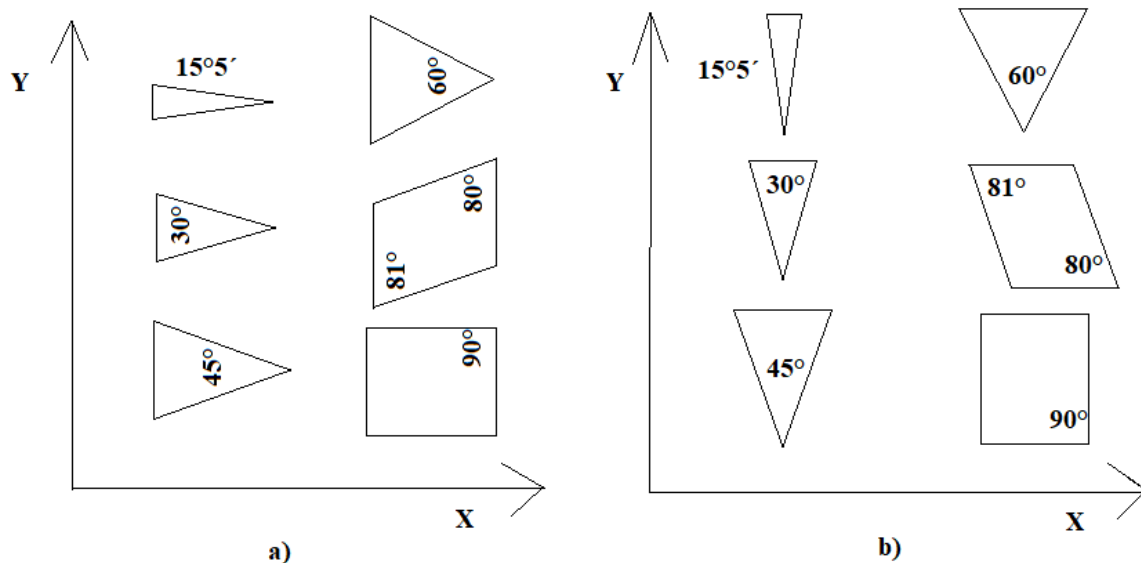
Po zaostrení aplikujeme na horné hrany funkčných plôch mierok (ramená uhla) nástroj priamky (1, 2). Tieto priamky sú vstupom pre nástroj uhla (3), pomocou ktorého necháme vyhodnotiť veľkosť uhla príslušnej mierky. Použité charakteristiky s ich grafickým nákresom zobrazuje obr. 41. Meranie opakujeme 10-krát pre každú mierku v dvoch rôznych polohách (1. poloha – s osou X; 2. poloha – s osou Y) tak, ako je schematicky zobrazené na obr. 42. Namerané hodnoty jednotlivých uhlov sú súčasťou príloh tejto práce.

Charakteristiky	
/ Přímka	1
/ Přímka	2
Úhel	3
/ Přímka	4
/ Přímka	5
Úhel	6
/ Přímka	7
/ Přímka	8
Úhel	9
/ Přímka	10
/ Přímka	11
Úhel	12
/ Přímka	13
/ Přímka	14
Úhel	15

Vstupy	
Zachytit body	/ Přímka 1
Zachytit body	/ Přímka 2



Obr. 41 Vstupné charakteristiky a ich grafický náčrt v programovom rozhraní softwaru InSpec pri meraní UM



Obr. 42 Náčrt meraných polôh mierok počas merania v rovine XY:
 a) 1. poloha (s osou X); b) 2. poloha (s osou Y)

6.1.2 Kontrolné pravítko (STRt)

Pravítko umiestnime na stolík stroja približne po diagonále v rovine XY meracieho priestoru (obr. 43). Meranie realizujeme pri priemernej teplote okolitého vzduchu 25,4 °C. Nastavíme dolné osvetlenie s intenzitou približne na úrovni 28 %. Zoom je 74x.

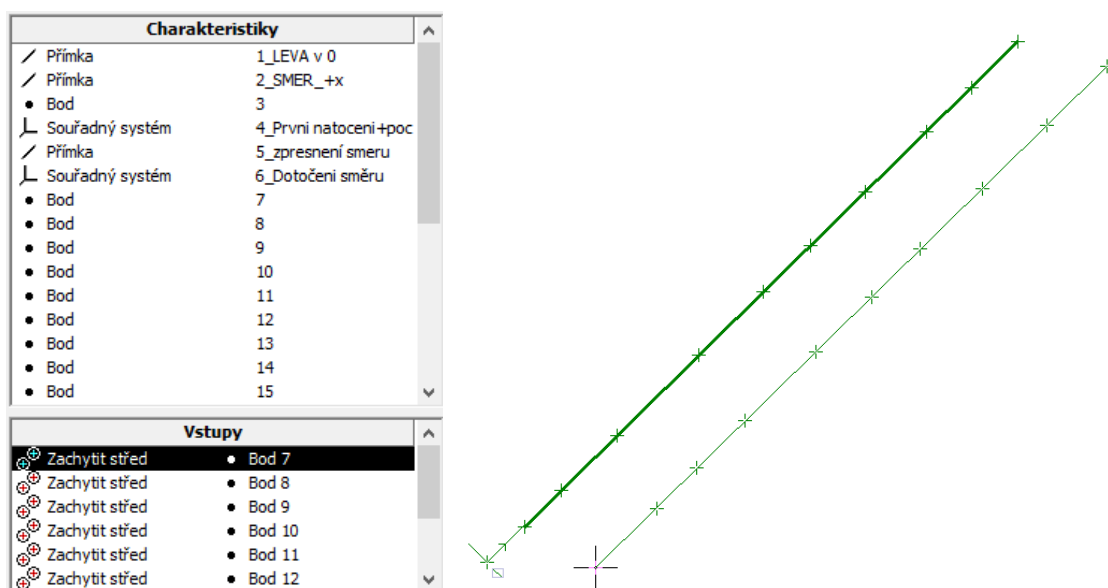
Na začiatku použijeme nástroje *priamky* (1, 2) a *bodu* (3 – prienik priamok), čím vytvoríme *počiatočný súradnicový systém* (4) meraného pravítka, tak ako je zobrazené na obr. 45. Pomocou ďalšej *priamky* (5), ktorú naniesieme na vzdialenejšom mieste pozdĺžnej hrany pravítka, dosiahneme *natočenie a spresnenie súradnicového systému* (6). Následne na obidve pozdĺžne hrany pravítka, ktoré sú súčasťou jeho funkčných plôch, naniesieme približne rovnomerne po celej dĺžke po desať *bodov ostrosti* (7 – 16; 18 – 27) a preložíme ich *priamkou*

(17; 28). Z týchto priamok potom necháme software na základe referencie LSLI vyhodnotiť celkovú priamosť (STRt). Súčasne s priamosťou sme vyhodnocovali aj rovnobežnosť (A k základni B v 1. polohe, B k základni A v 2. polohe).

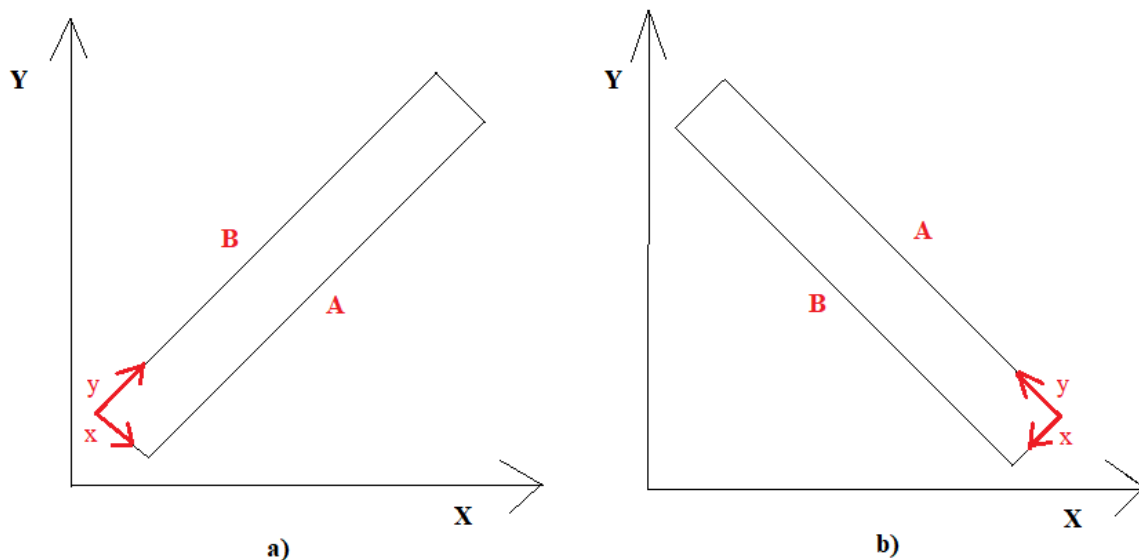


Obr. 43 Umiestnenie pravítka počas merania v rovine XY

Úvodnú časť použitých charakteristík s ich grafickým nákrešom zobrazuje obr. 44. Pomocou vytvoreného programu na začiatku opakujeme meranie 10-krát v dvoch polohách tak, ako je schematicky zobrazené na obr. 45. Namerané hodnoty priamosti (STRt) a rovnobežnosti sú súčasťou príloh tejto práce.



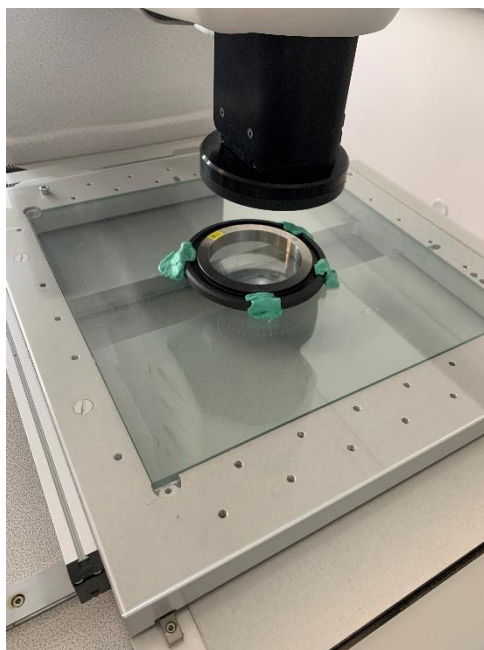
Obr. 44 Vstupné charakteristiky a ich grafický nákreš v programovom rozhraní softwaru InSpec pri meraní pravítka



Obr. 45 Náskres meraných polôh pravítka v rovine XY s vyznačením použitého súradnicového systému:
 a) 1. poloha; b) 2. poloha

6.1.3 Kontrolné (nastavovacie) krúžky (RONt)

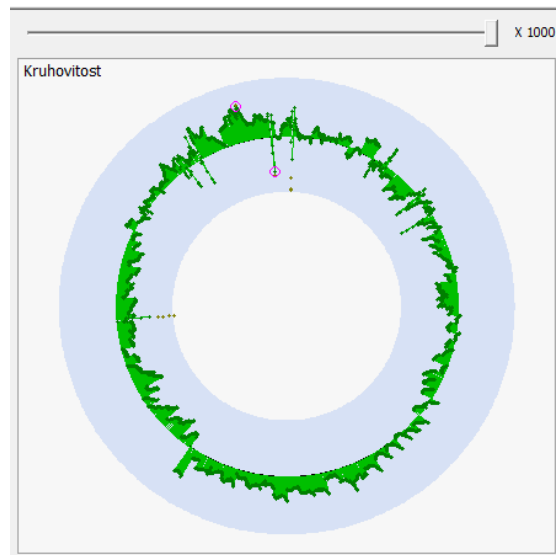
Meraný krúžok umiestnime na stolík približne do stredu roviny XY. Proti pohybu ho zafixujeme pomocou modelovacej hmoty (obr. 46). Meranie realizujeme pri priemernej teplote okolitého vzduchu 25,4 °C. Nastavíme dolné osvetlenie s intenzitou približne na úrovni 41 %. Zoom je 149x.



Obr. 46 Umiestnenie krúžku počas merania v rovine XY

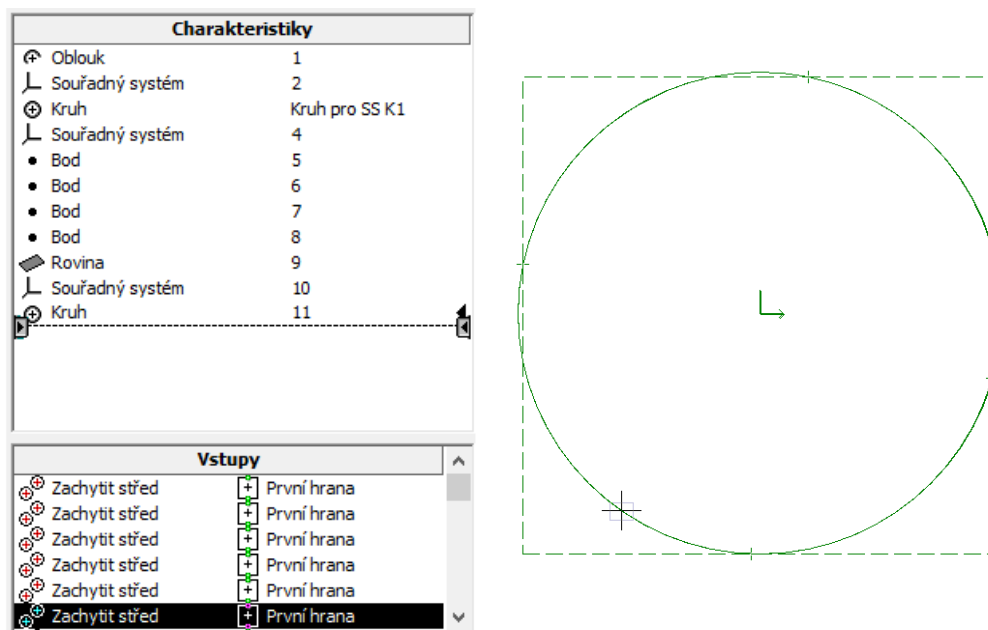
Na začiatku určíme pomocou nástroja *oblúk* (1) *počiatočný súradnicový systém* (2), ktorý vytvorením *kruhu* (*Kruh pro SS KI* – použitím ďalších štyroch *oblúkov*) *spresníme* (4) a s ohľadom na polohu krúžku vycentrujeme. Následne aplikujeme po obvodu krúžku 4 *body ostrosti* (5 – 8), ktoré zdefinujú *rovinu* (9). Na začiatku vytvorený prvok *kruh* je referenciou v rovine XY a vzniknutá *rovina* (9 – z *bodov ostrosti*) určuje polohu voči osi Z. Tieto prvky

potom určia *súradnicový systém* (10), ktorý je vyrovnaný vo všetkých osiach. Samotné snímanie bodov po vnútornom obvode krúžku (funkčná plocha) realizujeme postupne v skupinách prvkov *prvá hrana*. Celkovo zosnímame až 3600 bodov, z ktorých je vytvorený prvok *kruh* (11). Z tohto prvku necháme software vyhodnotiť celkovú kruhovitosť (RONt) s referenciou LSCI (Gauss) a jeho priemer. Ukážka profilu vyhodnotenej kruhovitosti je zobrazená na obr. 47.



Obr. 47 Ukážka profilu vyhodnotenej kruhovitosti

Použité charakteristiky a ich grafické znázornenie s vyznačeným súradnicovým systémom zobrazuje obr. 48. Pomocou vytvoreného programu opakujeme meranie 10-krát pre každý krúžok ($\varnothing 30$ mm, $\varnothing 90$ mm, $\varnothing 120$ mm). Namerané hodnoty RONt a priemeru krúžkov sú súčasťou príloh tejto práce.



Obr. 48 Vstupné charakteristiky a ich grafický náčrt s vyznačeným súradnicovým systémom v programovom rozhraní softwaru InSpec pri meraní krúžku

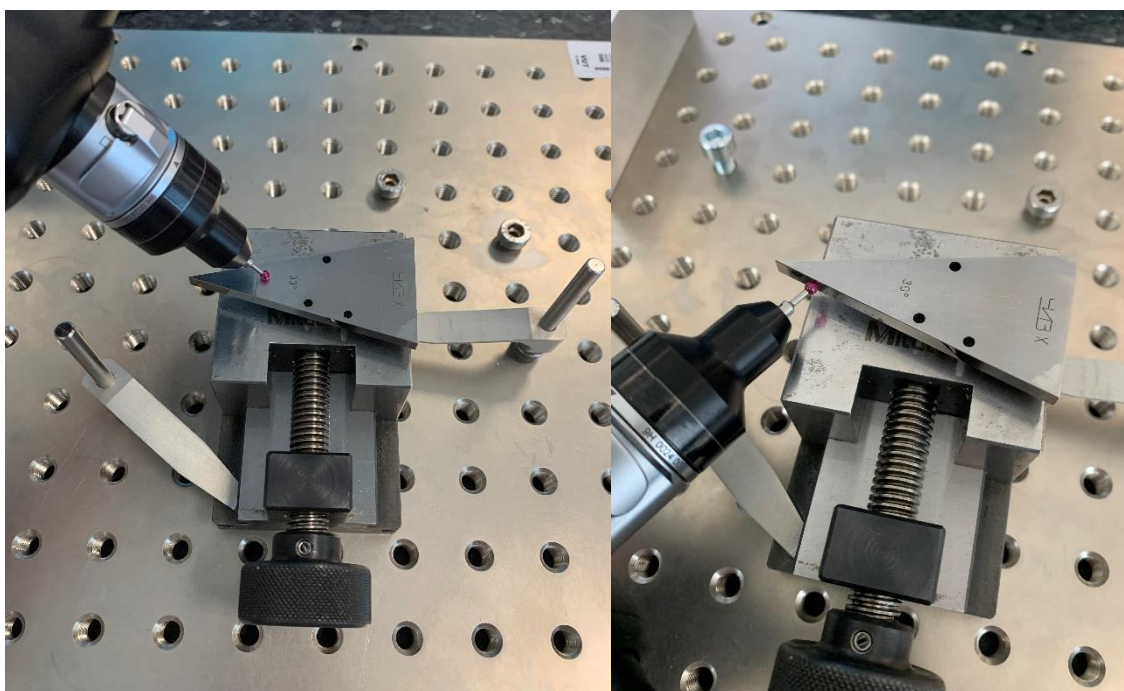
6.2 Meranie – rameno Hexagon

Po zapnutí meracieho zariadenia je vhodné vykonať kalibráciu použitého dotyku pomocou kalibračnej sféry podľa postupu odporúčaného výrobcom. Umiestnením ramena do softwarom naznačovanej polohy a zosnímaním niekoľkých bodov po povrchu kalibračnej gule vyhodnotíme indikované odchýlky, ktoré by mali byť dostatočne malé, čím sa preukáže vhodnosť jeho použitia. Spustením meracieho softwaru PC-DMIS je rameno pripravené na použitie. Software automaticky rozpozná typ použitej sondy (dotyk – 3 mm rubínová guľička).

6.2.1 Uhlové mierky (UM)

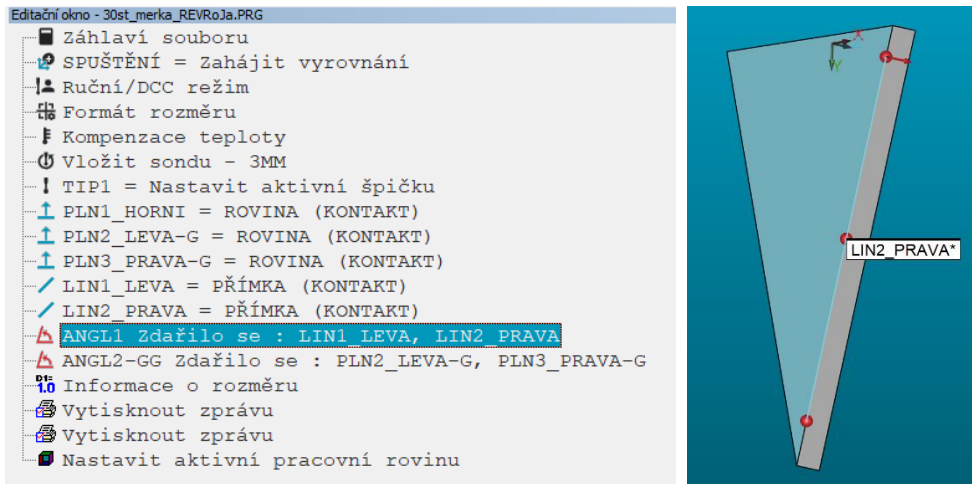
Uhlové mierky meriame jednotlivo, umiestnené približne vo vycentrovanej polohe funkčného dosahu ramena. Meranie realizujeme na montážnej doske s mierkou upnutou pomocou upínacích prípravkov a magnetu (obr. 49). Priemerná teplota okolitého vzduchu počas merania bola 25,8 °C.

Importovaním CAD modelu mierky vrátane určeného súradnicového systému do prostredia softwaru PC-DMIS a spustením pripraveného programu zahájime meranie požadovaných parametrov. Na začiatku zosnímame horný povrch mierky pomocou 9 bodov (obr. 49 vľavo), čím jej zadefinujeme polohu v jednej rovine (*PLN1_HORNI*). Následne zosnímame obe funkčné plochy mierky (obr. 49 vpravo), a to pomocou prvkov *rovin*a (9 bodov; *PLN2_LEVA-G*, *PLN3_PRAVA-G*) a *priamka* (3 body; *LIN1_LEVA*, *LIN2_PRAVA*). Nato necháme software vyhodnotiť *uhol* zvierajúci zvlášť *rovinami* (*ANGL2_GG*) a zvlášť *priamkami* (*ANGL1*). Následne je vygenerovaný protokol s nameranými hodnotami uhlov.



Obr. 49 Upnutie a snímanie mierky dotykom

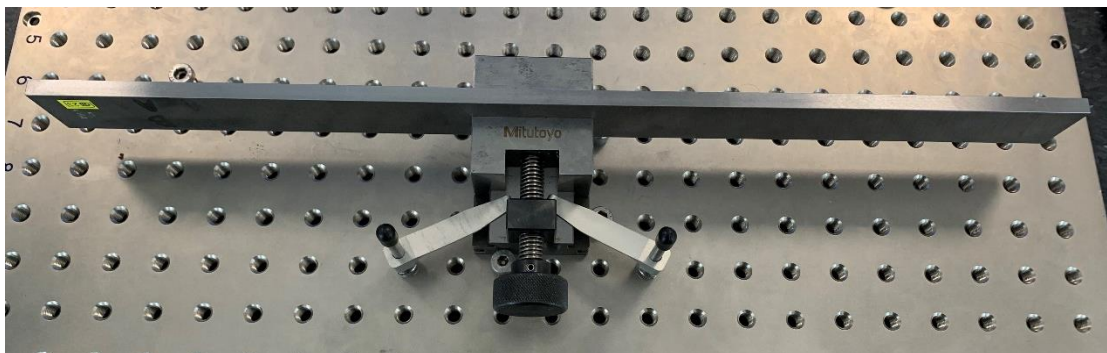
Editačné okno programu na meranie so sekvenciou použitých prvkov a grafickým zobrazením CAD modelu je znázornené na obr. 50. Meranie opakujeme 10-krát pre každú mierku (15°5', 30°, 45°, 60°, 80°, 81°, 90°) približne v rovnakej polohe. Namerané hodnoty jednotlivých uhlov (*ANGLE*) sú súčasťou príloh tejto práce.



Obr. 50 Editačné okno použitého programu na meranie uhlových mierok v softvare PC-DMIS s grafickým zobrazením CAD modelu

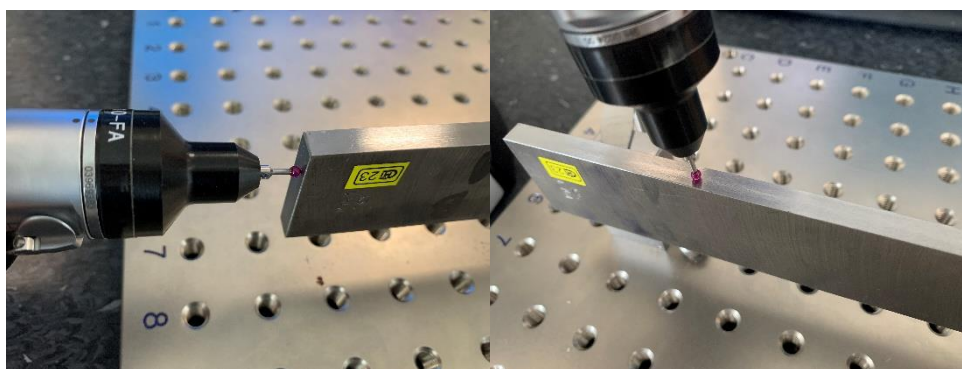
6.2.2 Kontrolné pravítko (STRt)

Kontrolné pravítko umiestnime približne vo vycentrovanej polohe funkčného dosahu ramena. Meranie realizujeme na montážnej doske s pravítkom upnutým pomocou upínacích prípravkov (obr. 51). Priemerná teplota okolitého vzduchu počas merania bola 24,8 °C.



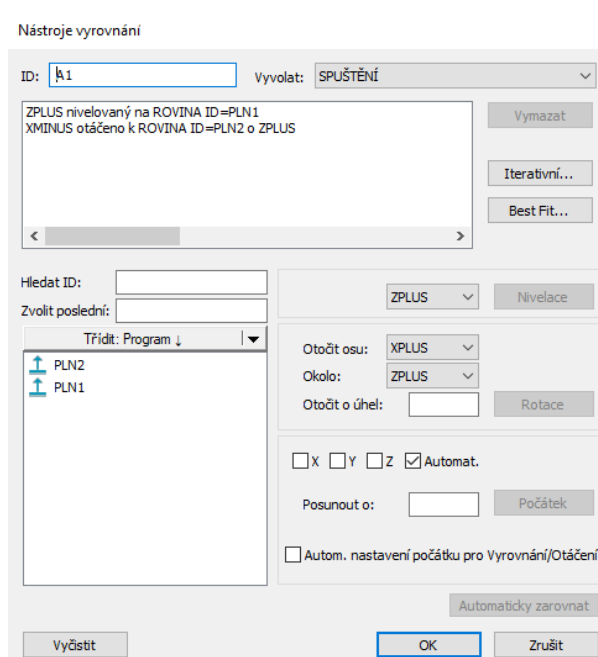
Obr. 51 Upnutie pravítka pri meraní

Importovaním CAD modelu pravítka vrátane určeného súradnicového systému do prostredia softwaru PC-DMIS a spustením pripraveného programu zahájime meranie požadovaných parametrov. Na začiatku pomocou prvku *rovina* (vyhodnotenej metódou najmenších štvorcov) zosnímame 15 bodmi funkčnú plochu pravítka (*PLN1*), tak ako je znázornené na obr. 52 vpravo. Nato opäť prvkom *rovina* (vyhodnotenej metódou najmenších štvorcov) zosnímame 15 bodmi kolmú (bočnú) plochu pravítka (*PLN2*), tak ako je znázornené na obr. 52 vľavo.



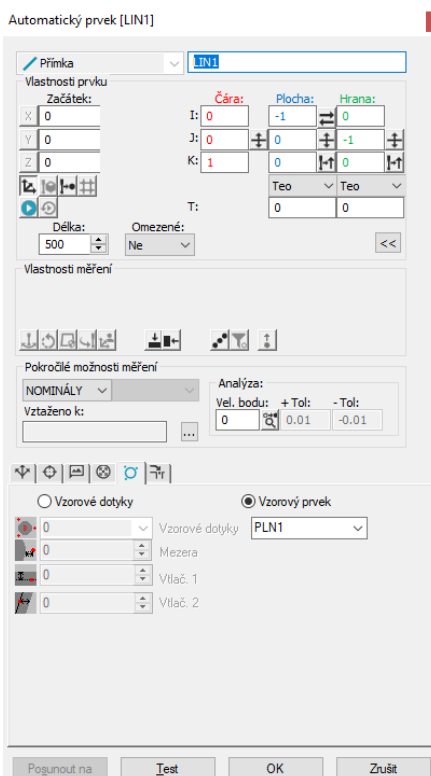
Obr. 52 Snímanie pravítka dotykom

Následně sme na vytvorené roviny nivelizovali (ZPLUS na PLN1) resp. rotovali (XMINUS na PLN2) osi súradnicového systému, čím sme ho vyrovnali (obr. 53).



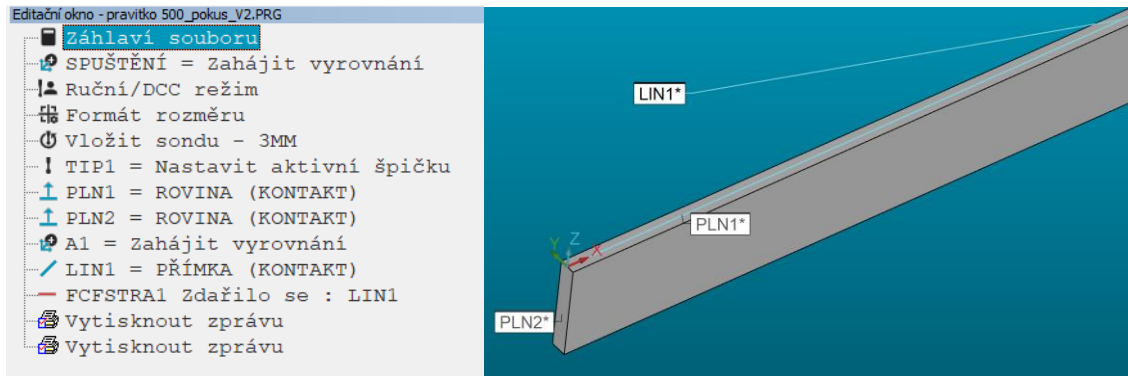
Obr. 53 Vyrovnanie rovin v softwari PC-DMIS

V ďalšom kroku sme prvkom *priamka* (LIN1; obr. 54), pre ktorú je vzorovým prvkom *PLN1*, zosníмали 15 bodmi funkčnú plochu pravítka (obr. 52 vpravo). Nato necháme pomocou tejto *priamky* software na základe referencie LSLI vyhodnotiť celkovú priamosť (STRt). Následne je vygenerovaný protokol s nameranými hodnotami priamosti.



Obr. 54 Vlastnosti prvku priamka LIN1 v softwari PC-DMIS

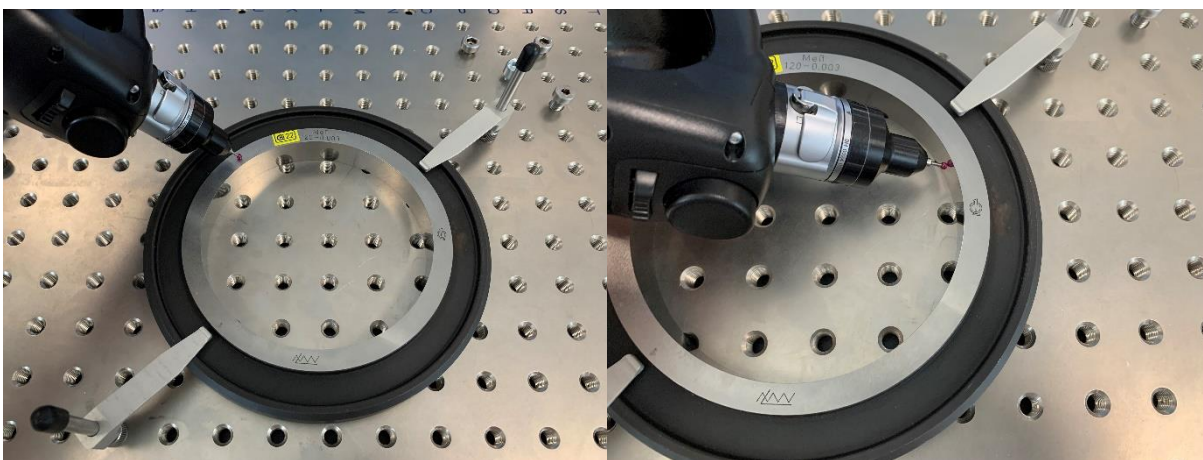
Editáčn  okno programu na meranie pravítka so sekvenciou použitých prvkov a grafickým zobrazením CAD modelu je zn zornen  na obr. 55. Meranie opakujeme 10-krát pre obe funk n  plochy pravítka (strany A a B). Nameran  hodnoty odchýlok priamosti (STRt) sú s  s t ou príloh te to práce.



Obr. 55 Edit n  okno použitého programu na meranie pravítka v softvare PC-DMIS s grafickým zobrazením CAD modelu

6.2.3 Kontrolné (nastavovacie) kr  zky (RONt)

Kontrolné kr  zky meriame jednotlivo, umiestnen  približne vo vycentrovanej polohe funkčného dosahu ramena. Meranie realizujeme na montážnej doske s kr  zkom upnutým pomocou upínacích pomôcok (obr. 56). Priemern  teplota okolitého vzduchu počas merania bola 24,5  C.

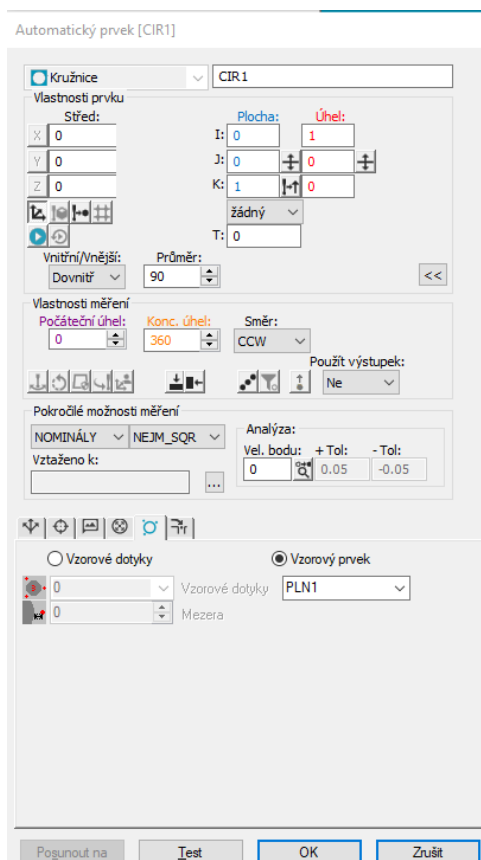


Obr. 56 Upnutie a snímanie kr  zku dotykom

Importovan m CAD modelu kr  zku vrátane určeného súradnicového systému do prostredia softvare PC-DMIS a spustením pripraveného programu zahájime meranie požadovaných parametrov. Na začiatku pomocou prvku *rovina* (vyhodnotenej metódou najmen ich štvorcov) zosnímame  eln  povrch kr  zku 15 bodmi (*PLN1*), tak ako je zn zornen  na obr. 56 vľavo. Podobným spôsobom ako pri prav tke sme na rovinu *PLN1* nivelizovali os ZPLUS,  im sme vyrovnali s radnicov  systém.

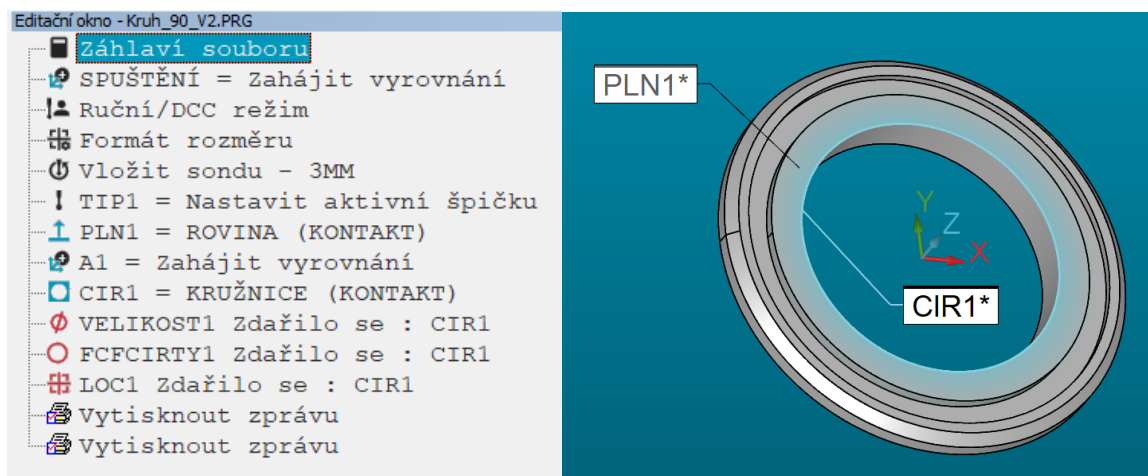
Následne pomocou prvku *kružnica* (*CIR1*; 0), vyhodnotenej metódou najmen ich štvorcov a pre ktor  je vzorovým prvkom *PLN1*, zosnímame približne v strednej rovine vn torn  funk n  plochu kr  zku, a to 15 bodmi (obr. 56 vpravo). Nato necháme pomocou tejto *kružnice* software na základe referencie LSCI (Gauss) vyhodnotiť celkov  kruhovitosť (RONt)

a jej priemer. Následne je vygenerovaný protokol s nameranými hodnotami kruhovitosti a priemeru.



Obr. 57 Vlastnosti prvku kružnice CIR1 v softwari PC-DMIS

Editačné okno programu na meranie krúžkov so sekvenciou použitých prvkov a grafickým zobrazením CAD modelu je znázornené na obr. 58. Meranie opakujeme 10-krát pre každý krúžok ($\varnothing 30$ mm, $\varnothing 90$ mm, $\varnothing 120$ mm) približne v rovnakej polohe. Namerané hodnoty kruhovitosti (RONt) a priemeru krúžkov sú súčasťou príloh tejto práce.



Obr. 58 Editáčn  okno použitého programu na meranie krúžkov v softwari PC-DMIS s grafickým zobrazením CAD modelu

7 IDENTIFIKÁCIA A KVANTIFIKÁCIA JEDNOTLIVÝCH ZLOŽIEK NEISTOTY PRI KALIBRÁCII CMM

Na základe teoretických poznatkov týkajúcich sa neistôt merania uvedených v kapitole 3.6, môžeme po vykonaní experimentálnych meraní pristúpiť k identifikácii a následnej kvantifikácii jednotlivých zložiek celkovej neistoty, ktorá je nutnou a neoddeliteľnou súčasťou výsledku každého merania.

7.1 Identifikácia zložiek neistôt a výpočet rozšírenej neistoty merania

Pre vyhodnotenie a stanovenie neistoty sme zvolili substitučnú metódu. Po zrelej úvahe a na základe doposiaľ získaných skúseností sme identifikovali niekoľko zdrojov neistôt, ktoré by mohli mať nezanedbateľný vplyv na výsledky meraní. Konkrétne sa jedná o tieto zložky a vplyvy:

- štatistická analýza série pozorovaní – vyhodnotenie neistoty spôsobom A (u_A),
- kalibrácia etalónu (u_{B1}),
- rozlišovacia schopnosť CMM stroja (u_{B2}),
- rozdiel teploty CMM a meraného etalónu (u_{B3}),
- rozdiel teploty od 20 °C (u_{B4}),

Všetky neistoty boli vyhodnotené na základe dokumentu EA-4/02 M:2022 (Vyhodnotenie neistoty merania pri kalibrácii). [17]

7.1.1 Štatistická analýza série pozorovaní – vyhodnotenie neistoty spôsobom A (u_A)

Pre stanovenie neistoty vyhodnotenej spôsobom A budeme postupovať tak, ako je uvedené v kapitole 3.6.1. Ako už bolo uvedené, jedná sa o štatistickú analýzu série niekoľkých pozorovaní (meraní). Na začiatku určíme aritmetický priemer podľa vzťahu (3.2), následne je táto štandardná neistota vyjadrená ako výberová smerodajná odchýlka aritmetického priemeru daná vzťahom (3.3).

7.1.2 Neistota kalibrácie etalónu (u_{B1})

Táto neistota zahŕňa vplyv kalibrácie etalónu. Jej hodnota býva uvedená v kalibračnom liste etalónu (viď prílohy I až M). V obecnom tvare je daná vzťahom:

$$U_E = a + bL, \quad (7.1)$$

kde a a b sú experimentálne určené koeficienty a L je meraný rozmer v metroch (priemer). Pre kruhovitost' sa vo vzťahu (7.1) v kalibračných listoch namiesto L uvádza R (kde R je nameraná kruhovitost' v μm). Pre uhlové mierky a pravítka je táto hodnota neistoty konštantná.

Príspevok k celkovej neistote vplyvom kalibrácie etalónu je potom daný vzťahom:

$$u_{B1} = c_j \frac{U_E}{k}, \quad (7.2)$$

kde c_j je koeficient citlivosti a k je koeficient rozšírenia. Koeficient citlivosti sa v tomto prípade predpokladá $c_j = 1$ a štandardný koeficient rozšírenia $k = 2$, ktorý odpovedá pravdepodobnosti pokrytia asi 95 %.

7.1.3 Vplyv rozlišovacej schopnosti stroja (u_{B2})

Táto neistota je založená na najmensej rozlišovacej schopnosti meracieho zariadenia. Pri jej výpočte sa predpokladá rovnomerné rozdelenie pravdepodobnosti ($\chi = \sqrt{3}$), a určí sa podľa vzťahu:

$$u_{B2} = c_j \frac{R_{CMM}}{\chi}, \quad (7.3)$$

kde R_{CMM} – najmenšia rozlíšiteľnosť enkodéra CMM,

χ – koeficient popisujúci variabilitu vstupnej veličiny založený na pravdepodobnostnom rozdelení (rovnomerné rozdelenie).

Ak je možné pre hodnoty vstupnej veličiny odhadnúť iba hornú a dolnú medznú hranicu (napr. údaj výrobcu pre meracie zariadenie, rozmedzie teplôt, chyby zaokrúhľovania alebo chyby vznikajúce skracovaním pri automatickej redukcii dát), je potrebné použiť pre popis jej variability pravdepodobnostné rozdelenie s konštantnou pravdepodobnostnou hustotou medzi týmito medzami (rovnomerné rozdelenie). Použitie rovnomerného rozdelenia predstavuje primerané štatistické vyjadrenie nedostatočnej znalosti vstupnej veličiny, pokiaľ o nej nie sú známe iné informácie, než sú medze jej variability. [17]

7.1.4 Vplyv rozdielu teploty CMM a meraného etalónu (u_{B3})

Táto zložka neistoty zahŕňa možný teplotný rozdiel medzi CMM strojom a použitým etalónom, ktorý by mal byť v ideálnom prípade nulový, čo však v realite nie je úplne možné dosiahnuť. Pre túto neistotu uvažujeme rovnomerné rozdelenie pravdepodobnosti a určíme ju zo vzťahu:

$$u_{B3} = \frac{\Delta t}{\chi} \cdot \alpha_A \cdot L, \quad (7.4)$$

kde Δt – rozdiel teplôt CMM stroja a etalónu,

α_A – koeficient tepelnej rozťažnosti materiálu meraného objektu.

Túto neistotu budeme uvažovať len pre priemery meraných krúžkov, pretože element dĺžky nie je v prípade merania tvaru a uhla možné na základe tohto vzťahu vyčíslieť, respektíve je možné ho úplne zanedbať.

7.1.5 Vplyv rozdielu teploty od 20 °C (u_{B4})

V tomto prípade sa jedná o neistotu, ktorá uvažuje vplyv odchýlky teploty vzduchu od 20 °C. Keďže meranie realizujeme v podmienkach, kde nie je možné udržiavať stabilnú konvenčnú teplotu 20 °C, je nutné túto zložku vziať do úvahy. Pre túto neistotu uvažujeme rovnomerné rozdelenie pravdepodobnosti a určíme ju zo vzťahu:

$$u_{B4} = \frac{\Delta \alpha}{\chi} \cdot \frac{\Delta t_{20}}{\chi} \cdot L, \quad (7.5)$$

kde $\Delta \alpha$ – rozdiel koeficientov tepelnej rozťažnosti,

Δt_{20} – odchýlka teploty vzduchu od 20 °C.

Túto neistotu budeme taktiež uvažovať len pre priemery meraných krúžkov, pretože element dĺžky nie je v prípade merania tvaru a uhla možné na základe tohto vzťahu vyčíslieť, respektíve je možné ho úplne zanedbať.

7.2 Kvantifikácia zložiek neistôt a stanovenie rozšírenej neistoty merania (SOL – krúžok – priemer)

Na základe identifikovaných zdrojov neistôt a vychádzajúc zo vzťahov uvedených v kapitole 7.1 predložíme vzorový výpočet rozšírenej neistoty merania. Uvedený príklad výpočtu zrealizujeme z údajov merania priemeru krúžku s nominálnym priemerom $D = 120$ mm na CMM SOL (viď príloha B). Hodnoty vo výpočtoch sú uvádzané zaokrúhlené nanajvyš na päť desiatinných miest, avšak vstupné hodnoty do výpočtov vychádzajú z pôvodných nezaokrúhlených hodnôt tak, aby celkový výsledok nebol vplyvom zaokrúhľovania skreslený.

7.2.1 Štatistická analýza série pozorovaní – vyhodnotenie neistoty spôsobom A (u_A)

Ako prvý krok sme zrealizovali odhad hodnoty vstupnej veličiny v podobe výpočtu aritmetického priemeru z desiatich hodnôt individuálnych pozorovaní (meraní), a to podľa vzťahu (3.2):

$$\bar{y} = \frac{1}{10} \cdot (120,00436 + \dots + 120,00501) = 120,00467 \text{ mm.}$$

Tým, že máme k dispozícii dostatočný počet meraní ($n \geq 10$), je možné k výpočtu štandardnej neistoty vyhodnotenej spôsobom A použiť vzťah (3.3):

$$u_A = s(\bar{y}) = \sqrt{\frac{(120,00436 - 120,00467)^2 + \dots + (120,00501 - 120,00467)^2}{10 \cdot (10 - 1)}},$$

$$u_A = s(\bar{y}) = 0,00006 \text{ mm.}$$

7.2.2 Neistota kalibrácie etalónu (u_{B1})

Neistota kalibrácie etalónu (krúžku) je uvedená v jeho kalibračnom liste (príloha M), a na základe vzťahu (7.1) má pre meraný rozmer $L = 0,12$ m hodnotu:

$$U_E = 0,5 + 5 \cdot 0,12 = 0,0011 \text{ mm.}$$

Následne po aplikovaní vzťahu (7.2), pričom koeficient citlivosti $c_j = 1$ a štandardný koeficient rozšírenia $k = 2$, má táto zložka neistoty hodnotu:

$$u_{B1} = 1 \cdot \frac{0,0011}{2} = 0,00055 \text{ mm.}$$

7.2.3 Vplyv rozlišovacej schopnosti stroja (u_{B2})

Najmenšia rozlišovacia schopnosť CMM stroja SOL 311 je 0,001 mm. Predpokladáme rovnomerné rozdelenie pravdepodobnosti ($\chi = \sqrt{3}$) a koeficient citlivosti $c_j = 1$. Následne má podľa vzťahu (7.3) táto neistota hodnotu:

$$u_{B2} = 1 \cdot \frac{0,001}{\sqrt{3}} = 0,00058 \text{ mm.}$$

7.2.4 Vplyv rozdielu teploty CMM a meraného etalónu (u_{B3})

Etalón aj CMM stroj boli dostatočne dlhú dobu vystavení rovnakým teplotným podmienkam, preto rozdiel teplôt medzi nimi predpokladáme nanajvyš $\Delta t = 0,2$ °C. Všetky použité etalóny sú z materiálu s koeficientom tepelnej rozťažnosti $11,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (vo výpočtoch $11,5 \mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$). Pre meraný rozmer $L = 0,12$ m má za predpokladu

rovnomerneho rozdelenia pravdepodobnosti ($\chi = \sqrt{3}$) táto neistota podľa vzťahu (7.4) hodnotu:

$$u_{B3} = \frac{0,2}{\sqrt{3}} \cdot 11,5 \cdot 0,12 = 0,00016 \text{ mm.}$$

7.2.5 Vplyv rozdielu teploty od 20 °C (u_{B4})

Teplota vzduchu počas merania bola v tomto prípade 25,4 °C, čo predstavuje odchýlku $\Delta t_{20} = 5,4$ °C od požadovaných 20 °C. Koeficient tepelnej rozťažnosti CMM stroja v tomto prípade zanedbáme, čiže rozdiel $\Delta\alpha = 11,5 \mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$. Za predpokladu rovnomerneho rozdelenia pravdepodobnosti ($\chi = \sqrt{3}$) má táto neistota pre meraný rozmer $L = 0,12$ m podľa vzťahu (7.5) hodnotu:

$$u_{B4} = \frac{11,5}{\sqrt{3}} \cdot \frac{5,4}{\sqrt{3}} \cdot 0,12 = 0,00248 \text{ mm.}$$

7.2.6 Kombinovaná štandardná neistota (u_C) a rozšírená neistota (U)

V kapitolách 7.2.1 až 7.2.5 sa nám podarilo vyčíslit' všetky uvažované zložky neistoty. Teraz môžeme na základe metodiky uvedenej v kapitolách 3.6.2 a 3.6.3 pristúpiť k určeniu kombinovanej štandardnej neistoty. Postupným použitím vzťahov (3.6) a (3.7) bude mať kombinovaná štandardná neistota hodnotu:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + u_{B4}^2},$$

$$u_C = \sqrt{0,00006^2 + 0,00055^2 + 0,00058^2 + 0,00016^2 + 0,00248^2} = 0,00261 \text{ mm.}$$

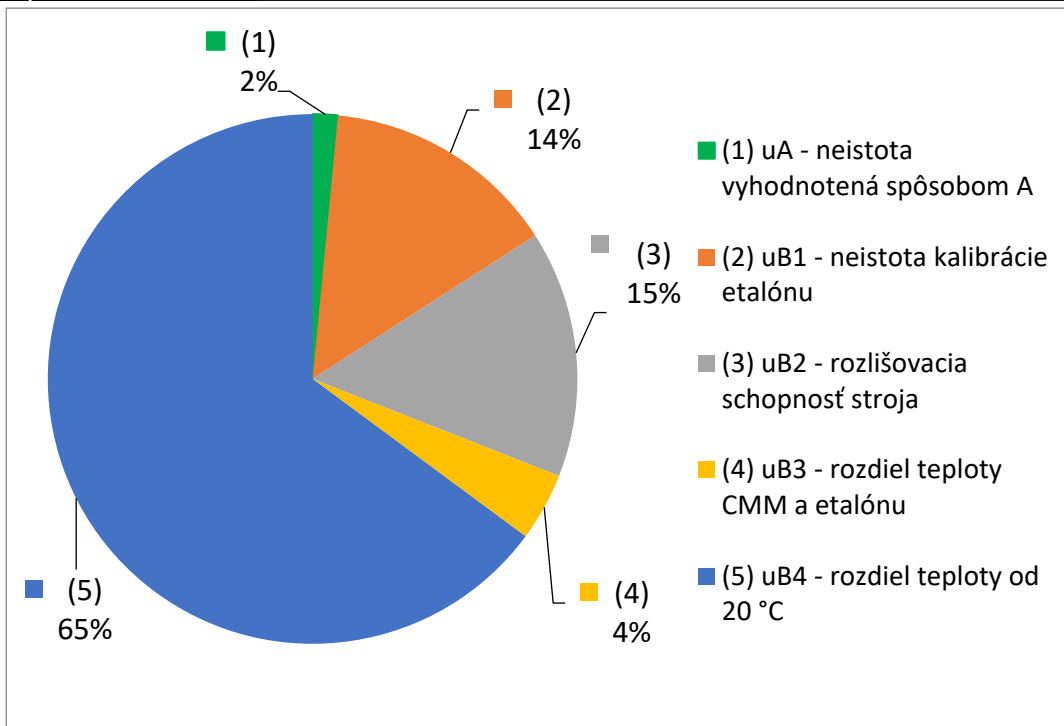
Posledným krokom je stanovenie rozšírenej neistoty, pre ktorú budeme uvažovať štandardný koeficient rozšírenia $k = 2$. Týmto definujeme interval okolo výsledku merania, v ktorom s úrovnou spoľahlivosti približne 95 % predpokladáme výskyt hodnoty meranej veličiny. Aplikovaním vzťahu (3.8) stanovíme hodnotu rozšírenej neistoty s hodnotou zaokrúhlenou nahor:

$$U = 2 \cdot 0,00261 \doteq 0,0053 \text{ mm} = 5,3 \mu\text{m}$$

Týmto môžeme skonštatovať, že pri meraní priemeru krúžku s nominálnym priemerom 120 mm, má celková neistota pridružená k výsledku merania na CMM SOL hodnotu 5,3 μm .

Pre tento špecifický prípad ukážky výpočtu neistoty bol pre lepšiu názornosť zostavený graf (obr. 59) zobrazujúci podiel jednotlivých zložiek neistoty ku kombinovanej neistote merania.

Ako je možné vyčítať z grafu, najväčší podiel na kombinovanú neistotu má vplyv rozdielu teploty od 20 °C, a to až 65 %. Keďže počas merania bola teplota vzduchu 25,4 °C, ide o pomerne značný nedostatok, avšak kalibrácia prebiehala v miestnosti kde nebolo možné dosiahnuť optimálne atmosférické podmienky. Druhý najvyšší podiel má rozlíšiteľnosť CMM (15 %), ktorá je jeho danou vlastnosťou. Podobný vplyv (14 %) má neistota kalibrácie použitého etalónu, ktorá je nevyhnutnou zložkou k zaisteniu metrologickej nadväznosti na medzinárodné resp. národné etalóny. Už menej významný vplyv (4 %) má rozdiel teplôt CMM stroja a etalónu. Keďže sme teplotu objektov počas merania nemonitorovali, tento rozdiel bol len predpokladaný, a môže byť spôsobený napríklad manipuláciou s etalónom pred meraním. Najmenší vplyv (2 %) mal rozptyl nameraných údajov, čo svedčí o vysokej precízności merania.



Obr. 59 Podiel jednotlivých príspevkov ku kombinovanej neistote merania pre CMM SOL (krížok Ø120mm)

7.3 Kvantifikácia zložiek neistôt a stanovenie rozšírenej neistoty merania (SOL – uhol)

Uvedený príklad výpočtu zrealizujeme z údajov merania uhlovej mierky (v 1. polohe) s nominálnou hodnotou uhla 90° na stroji SOL (viď príloha A). Hodnoty vo výpočtoch sú uvádzané zaokrúhlené nanajvýš na päť desiatinných miest, avšak vstupné hodnoty do výpočtov vychádzajú z pôvodných nezaokrúhlených hodnôt tak, aby celkový výsledok nebol vplyvom zaokrúhľovania skreslený.

7.3.1 Štatistická analýza série pozorovaní – vyhodnotenie neistoty spôsobom A (u_A)

Ako prvý krok sme zrealizovali odhad hodnoty vstupnej veličiny v podobe výpočtu aritmetického priemeru z desiatich hodnôt individuálnych pozorovaní (meraní), a to podľa vzťahu (3.2):

$$\bar{y} = \frac{1}{10} \cdot (89,9587 + \dots + 89,9892) = 89,9941^\circ \doteq 89^\circ 59' 39''.$$

Tým, že máme k dispozícii dostatočný počet meraní ($n \geq 10$), je možné k výpočtu štandardnej neistoty vyhodnovej spôsobom A použiť vzťah (3.3):

$$u_A = s(\bar{y}) = \sqrt{\frac{(89,9587 - 89,9941)^2 + \dots + (89,9892 - 89,9941)^2}{10 \cdot (10 - 1)}},$$

$$u_A = s(\bar{y}) = 0,00738^\circ \doteq 0^\circ 0' 27''.$$

7.3.2 Neistota kalibrácie etalónu (u_{B1})

Neistota kalibrácie uhlových mierok je uvedená v ich kalibračnom liste (príloha I), ktorá je uvedená ako konštanta s hodnotou $U_E = 10'$. Následne po dosadení hodnoty U_E v stupňoch

do vzťahu (7.2), pričom koeficient citlivosti $c_j = 1$ a štandardný koeficient rozšírenia $k = 2$, má táto zložka neistoty hodnotu:

$$u_{B1} = 1 \cdot \frac{0,16667}{2} = 0,08333^\circ = 0^\circ 5'.$$

7.3.3 Vplyv rozlišovacej schopnosti stroja (u_{B2})

Najmenšiu rozlišovaciu schopnosť prístroja SOL uvažujeme $0,001^\circ$. Predpokladáme rovnomerné rozdelenie pravdepodobnosti ($\chi = \sqrt{3}$) a koeficient citlivosti $c_j = 1$. Následne má podľa vzťahu (7.3) táto neistota hodnotu:

$$u_{B2} = 1 \cdot \frac{0,001}{\sqrt{3}} = 0,00058^\circ \doteq 0^\circ 0' 2''.$$

7.3.4 Kombinovaná štandardná neistota (u_C) a rozšírená neistota (U)

V kapitolách 7.3.1 až 7.3.3 sa nám podarilo vyčíslit' všetky uvažované zložky neistoty. Teraz môžeme na základe metodiky uvedenej v kapitolách 3.6.2 a 3.6.3 pristúpiť k určeniu kombinovanej štandardnej neistoty. Postupným použitím vzťahov (3.6) a (3.7) bude mať kombinovaná štandardná neistota hodnotu:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2},$$

$$u_C = \sqrt{0,00738^2 + 0,08333^2 + 0,00058^2} = 0,08336^\circ \doteq 0^\circ 5' 1''.$$

Posledným krokom je stanovenie rozšírenej neistoty, pre ktorú budeme uvažovať štandardný koeficient rozšírenia $k = 2$. Týmto definujeme interval okolo výsledku merania, v ktorom s úrovnou spoľahlivosti približne 95 % predpokladáme výskyt hodnoty meranej veličiny. Aplikovaním vzťahu (3.8) stanovíme hodnotu rozšírenej neistoty s hodnotou zaokrúhlenou nahor:

$$U = 2 \cdot 0,08336 \doteq 0,17^\circ = 0^\circ 10' 12''.$$

Týmto môžeme skonštatovať, že pri meraní uhlovej mierky (v 1. polohe) s nominálnou hodnotou uhla 90° , má celková neistota pridružená k výsledku merania na prístroji SOL hodnotu $0,17^\circ$ resp. $0^\circ 10' 12''$.

7.4 Kvantifikácia zložiek neistôt a stanovenie rozšírenej neistoty merania (SOL – pravítko)

Uvedený príklad výpočtu zrealizujeme z údajov merania priamosti na pravítku (strana A) v 1. polohe na CMM SOL (viď príloha B). Hodnoty vo výpočtoch sú uvádzané zaokrúhlené nanajvýš na päť desatinných miest, avšak vstupné hodnoty do výpočtov vychádzajú z pôvodných nezaokrúhlených hodnôt tak, aby celkový výsledok nebol vplyvom zaokrúhľovania skreslený.

7.4.1 Štatistická analýza série pozorovaní – vyhodnotenie neistoty spôsobom A (u_A)

Ako prvý krok sme zrealizovali odhad hodnoty vstupnej veličiny v podobe výpočtu aritmetického priemeru z desiatich hodnôt individuálnych pozorovaní (meraní), a to podľa vzťahu (3.2):

$$\bar{y} = \frac{1}{10} \cdot (0,04279 + \dots + 0,01526) = 0,03475 \text{ mm}.$$

Tým, že máme k dispozícii dostatočný počet meraní ($n \geq 10$), je možné k výpočtu štandardnej neistoty vyhodnotenej spôsobom A použiť vzťah (3.3):

$$u_A = s(\bar{y}) = \sqrt{\frac{(0,04279 - 0,03475)^2 + \dots + (0,01526 - 0,03475)^2}{10 \cdot (10 - 1)}}$$

$$u_A = s(\bar{y}) = 0,00321 \text{ mm.}$$

7.4.2 Neistota kalibrácie etalónu (u_{B1})

Neistota kalibrácie etalónu (pravítka) je uvedená v jeho kalibračnom liste (príloha J), a má hodnotu $U_E = 0,2 \mu\text{m}$. Následne po dosadení hodnoty U_E do vzťahu (7.2), pričom koeficient citlivosti $c_j = 1$ a štandardný koeficient rozšírenia $k = 2$, má táto zložka neistoty hodnotu:

$$u_{B1} = 1 \cdot \frac{0,0002}{2} = 0,0001 \text{ mm.}$$

7.4.3 Vplyv rozlišovacej schopnosti stroja (u_{B2})

Postup a hodnota neistoty u_{B2} sú v tomto prípade zhodné tomu, ako je uvedené v kapitole 7.2.3.

7.4.4 Kombinovaná štandardná neistota (u_C) a rozšírená neistota (U)

V kapitolách 7.4.1 až 7.4.3 sa nám podarilo vyčísliť všetky uvažované zložky neistoty. Teraz môžeme na základe metodiky uvedenej v kapitolách 3.6.2 a 3.6.3 pristúpiť k určeniu kombinovanej štandardnej neistoty. Postupným použitím vzťahov (3.6) a (3.7) bude mať kombinovaná štandardná neistota hodnotu:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2},$$

$$u_C = \sqrt{0,00321^2 + 0,0001^2 + 0,00058^2} = 0,00326 \text{ mm.}$$

Posledným krokom je stanovenie rozšírenej neistoty, pre ktorú budeme uvažovať štandardný koeficient rozšírenia $k = 2$. Týmto definujeme interval okolo výsledku merania, v ktorom s úrovnou spoľahlivosti približne 95 % predpokladáme výskyt hodnoty meranej veličiny. Aplikovaním vzťahu (3.8) stanovíme hodnotu rozšírenej neistoty s hodnotou zaokrúhlenou nahor:

$$U = 2 \cdot 0,00326 \doteq 0,0066 \text{ mm} = 6,6 \mu\text{m}$$

Týmto môžeme skonštatovať, že pri meraní priamosti na pravítku (strana A) v 1. polohe, má celková neistota pridružená k výsledku merania na CMM SOL hodnotu 6,6 μm .

7.5 Kvantifikácia zložiek neistôt a stanovenie rozšírenej neistoty merania (SOL – krúžok - kruhovitost')

Uvedený príklad výpočtu zrealizujeme z údajov merania kruhovitosti na krúžku s nominálnym priemerom $D = 120 \text{ mm}$ na CMM SOL (viď príloha B). Hodnoty vo výpočtoch sú uvádzané zaokrúhlené nanajvyš na päť desatinných miest, avšak vstupné hodnoty do výpočtov vychádzajú z pôvodných nezaokrúhlených hodnôt tak, aby celkový výsledok nebol vplyvom zaokrúhľovania skreslený.

7.5.1 Štatistická analýza série pozorovaní – vyhodnotenie neistoty spôsobom A (u_A)

Ako prvý krok sme zrealizovali odhad hodnoty vstupnej veličiny v podobe výpočtu aritmetického priemeru z desiatich hodnôt individuálnych pozorovaní (meraní), a to podľa vzťahu (3.2):

$$\bar{y} = \frac{1}{10} \cdot (0,00638 + \dots + 0,00681) = 0,00681 \text{ mm.}$$

Tým, že máme k dispozícii dostatočný počet meraní ($n \geq 10$), je možné k výpočtu štandardnej neistoty vyhodnotenej spôsobom A použiť vzťah (3.3):

$$u_A = s(\bar{y}) = \sqrt{\frac{(0,00638 - 0,00681)^2 + \dots + (0,00681 - 0,00681)^2}{10 \cdot (10 - 1)}},$$
$$u_A = s(\bar{y}) = 0,00009 \text{ mm.}$$

7.5.2 Neistota kalibrácie etalónu (u_{B1})

Neistota kalibrácie etalónu (krúžku) je uvedená v jeho kalibračnom liste (príloha M), a na základe vzťahu (7.1) má pre nameranú kruhovitost' $R = 1,94 \mu\text{m}$ hodnotu:

$$U_E = 0,1 + 0,01 \cdot 0,00194 = 0,00012 \text{ mm.}$$

Následne po aplikovaní vzťahu (7.2), pričom koeficient citlivosti $c_j = 1$ a štandardný koeficient rozšírenia $k = 2$, má táto zložka neistoty hodnotu:

$$u_{B1} = 1 \cdot \frac{0,00012}{2} = 0,00006 \text{ mm.}$$

7.5.3 Vplyv rozlišovacej schopnosti stroja (u_{B2})

Postup a hodnota neistoty u_{B2} sú v tomto prípade zhodné tomu, ako je uvedené v kapitole 7.2.3.

7.5.4 Kombinovaná štandardná neistota (u_C) a rozšírená neistota (U)

V kapitolách 7.5.1 až 7.5.3 sa nám podarilo vycíslit' všetky uvažované zložky neistoty. Teraz môžeme na základe metodiky uvedenej v kapitolách 3.6.2 a 3.6.3 pristúpiť k určeniu kombinovanej štandardnej neistoty. Postupným použitím vzťahov (3.6) a (3.7) bude mať kombinovaná štandardná neistota hodnotu:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2},$$
$$u_C = \sqrt{0,00009^2 + 0,00006^2 + 0,00058^2} = 0,00059 \text{ mm.}$$

Posledným krokom je stanovenie rozšírenej neistoty, pre ktorú budeme uvažovať štandardný koeficient rozšírenia $k = 2$. Týmto definujeme interval okolo výsledku merania, v ktorom s úrovnou spoľahlivosti približne 95 % predpokladáme výskyt hodnoty meranej veličiny. Aplikovaním vzťahu (3.8) stanovíme hodnotu rozšírenej neistoty s hodnotou zaokrúhlenou nahor:

$$U = 2 \cdot 0,00059 \doteq 0,0012 \text{ mm} = 1,2 \mu\text{m}$$

Týmto môžeme skonštatovať, že pri meraní kruhovitosti krúžku s nominálnym priemerom 120 mm, má celková neistota pridružená k výsledku merania na CMM SOL hodnotu 1,2 μm .

7.6 Kvantifikácia zložiek neistôt a stanovenie rozšírenej neistoty merania (rameno Hexagon – krúžok – priemer)

Uvedený príklad výpočtu zrealizujeme z údajov merania priemeru krúžku s nominálnym priemerom $D = 120$ mm na ramene Hexagon (viď príloha D). Hodnoty vo výpočtoch sú uvádzané zaokrúhlené nanajvýš na päť desiatinných miest, avšak vstupné hodnoty do výpočtov vychádzajú z pôvodných nezaokrúhlených hodnôt tak, aby celkový výsledok nebol vplyvom zaokrúhľovania skreslený.

7.6.1 Štatistická analýza série pozorovaní – vyhodnotenie neistoty spôsobom A (u_A)

Ako prvý krok sme zrealizovali odhad hodnoty vstupnej veličiny v podobe výpočtu aritmetického priemeru z desiatich hodnôt individuálnych pozorovaní (meraní), a to podľa vzťahu (3.2):

$$\bar{y} = \frac{1}{10} \cdot (120,0171 + \dots + 120,0195) = 120,0176 \text{ mm.}$$

Tým, že máme k dispozícii dostatočný počet meraní ($n \geq 10$), je možné k výpočtu štandardnej neistoty vyhodnotenej spôsobom A použiť vzťah (3.3):

$$u_A = s(\bar{y}) = \sqrt{\frac{(120,0171 - 120,0176)^2 + \dots + (120,0195 - 120,0176)^2}{10 \cdot (10 - 1)}},$$

$$u_A = s(\bar{y}) = 0,00046 \text{ mm.}$$

7.6.2 Neistota kalibrácie etalónu (u_{B1})

Postup a hodnota neistoty u_{B1} sú v tomto prípade zhodné tomu, ako je uvedené v kapitole 7.2.2.

7.6.3 Vplyv rozlišovacej schopnosti stroja (u_{B2})

Postup a hodnota neistoty u_{B2} sú v tomto prípade zhodné tomu, ako je uvedené v kapitole 7.2.3.

7.6.4 Vplyv rozdielu teploty CMM a meraného etalónu (u_{B3})

Postup a hodnota neistoty u_{B3} sú v tomto prípade zhodné tomu, ako je uvedené v kapitole 7.2.4.

7.6.5 Vplyv rozdielu teploty od 20 °C (u_{B4})

Teplota vzduchu počas merania bola v tomto prípade 24,5 °C, čo predstavuje odchýlku $\Delta t_{20} = 4,5$ °C od požadovaných 20 °C. Koefficient tepelnej rozťažnosti CMM stroja v tomto prípade zanedbáme, čiže rozdiel $\Delta \alpha = 11,5 \mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$. Za predpokladu rovnomerného rozdelenia pravdepodobnosti ($\chi = \sqrt{3}$) má táto neistota pre meraný rozmer $L = 0,12$ m podľa vzťahu (7.5) hodnotu:

$$u_{B4} = \frac{11,5}{\sqrt{3}} \cdot \frac{4,5}{\sqrt{3}} \cdot 0,12 = 0,00207 \text{ mm.}$$

7.6.6 Kombinovaná štandardná neistota (u_C) a rozšírená neistota (U)

V kapitolách 7.6.1 až 7.6.5 sa nám podarilo vyčíslíť všetky uvažované zložky neistoty. Teraz môžeme na základe metodiky uvedenej v kapitolách 3.6.2 a 3.6.3 pristúpiť k určeniu

kombinovanej štandardnej neistoty. Postupným použitím vzťahov (3.6) a (3.7) bude mať kombinovaná štandardná neistota hodnotu:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + u_{B4}^2},$$

$$u_C = \sqrt{0,00046^2 + 0,00055^2 + 0,00058^2 + 0,00016^2 + 0,00207^2} = 0,00227 \text{ mm}.$$

Posledným krokom je stanovenie rozšírenej neistoty, pre ktorú budeme uvažovať štandardný koeficient rozšírenia $k = 2$. Týmto definujeme interval okolo výsledku merania, v ktorom s úrovňou spoľahlivosti približne 95 % predpokladáme výskyt hodnoty meranej veličiny. Aplikovaním vzťahu (3.8) stanovíme hodnotu rozšírenej neistoty s hodnotou zaokrúhlenou nahor:

$$U = 2 \cdot 0,00227 \doteq 0,0046 \text{ mm} = 4,6 \mu\text{m}$$

Týmto môžeme skonštatovať, že pri meraní priemeru krúžku s nominálnym priemerom 120 mm, má celková neistota pridružená k výsledku merania na ramene Hexagon hodnotu 4,6 μm .

7.7 Kvantifikácia zložiek neistôt a stanovenie rozšírenej neistoty merania (rameno Hexagon – uhol)

Uvedený príklad výpočtu zrealizujeme z údajov merania uhlovej mierky (2D uhol rozmeru) s nominálnou hodnotou uhla 90° (viď príloha C) na ramene Hexagon. Uvádzané hodnoty vo výpočtoch sú uvádzané zaokrúhlené nanajvyš na päť desatinných miest, avšak vstupné hodnoty do výpočtov vychádzajú z pôvodných nezaokrúhlených hodnôt tak, aby celkový výsledok nebol vplyvom zaokrúhľovania skreslený.

7.7.1 Štatistická analýza série pozorovaní – vyhodnotenie neistoty spôsobom A (u_A)

Ako prvý krok sme zrealizovali odhad hodnoty vstupnej veličiny v podobe výpočtu aritmetického priemeru z desiatich hodnôt individuálnych pozorovaní (meraní), a to podľa vzťahu (3.2):

$$\bar{y} = \frac{1}{10} \cdot (90,0125 + \dots + 90,0245) = 90,0157^\circ \doteq 90^\circ 0' 57''.$$

Tým, že máme k dispozícii dostatočný počet meraní ($n \geq 10$), je možné k výpočtu štandardnej neistoty vyhodnotenej spôsobom A použiť vzťah (3.3):

$$u_A = s(\bar{y}) = \sqrt{\frac{(90,0125 - 90,0157)^2 + \dots + (90,0245 - 90,0157)^2}{10 \cdot (10 - 1)}},$$

$$u_A = s(\bar{y}) = 0,00195^\circ \doteq 0^\circ 0' 7''.$$

7.7.2 Neistota kalibrácie etalónu (u_{B1})

Postup a hodnota neistoty u_{B1} sú v tomto prípade zhodné tomu, ako je uvedené v kapitole 7.3.2.

7.7.3 Vplyv rozlišovacej schopnosti stroja (u_{B2})

Najmenšiu rozlišovaciu schopnosť ramena Hexagon uvažujeme $0,001^\circ$. Predpokladáme rovnomerné rozdelenie pravdepodobnosti ($\chi = \sqrt{3}$) a koeficient citlivosti $c_j = 1$. Následne má podľa vzťahu (7.3) táto neistota hodnotu:

$$u_{B2} = 1 \cdot \frac{0,001}{\sqrt{3}} = 0,00058^\circ \doteq 0^\circ 0' 2''.$$

7.7.4 Kombinovaná štandardná neistota (u_C) a rozšírená neistota (U)

V kapitolách 7.7.1 až 7.7.3 sa nám podarilo vyčísliť všetky uvažované zložky neistoty. Teraz môžeme na základe metodiky uvedenej v kapitolách 3.6.2 a 3.6.3 pristúpiť k určeniu kombinovanej štandardnej neistoty. Postupným použitím vzťahov (3.6) a (3.7) bude mať kombinovaná štandardná neistota hodnotu:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2},$$

$$u_C = \sqrt{0,00195^2 + 0,08333^2 + 0,00058^2} = 0,08336^\circ \doteq 0^\circ 5'.$$

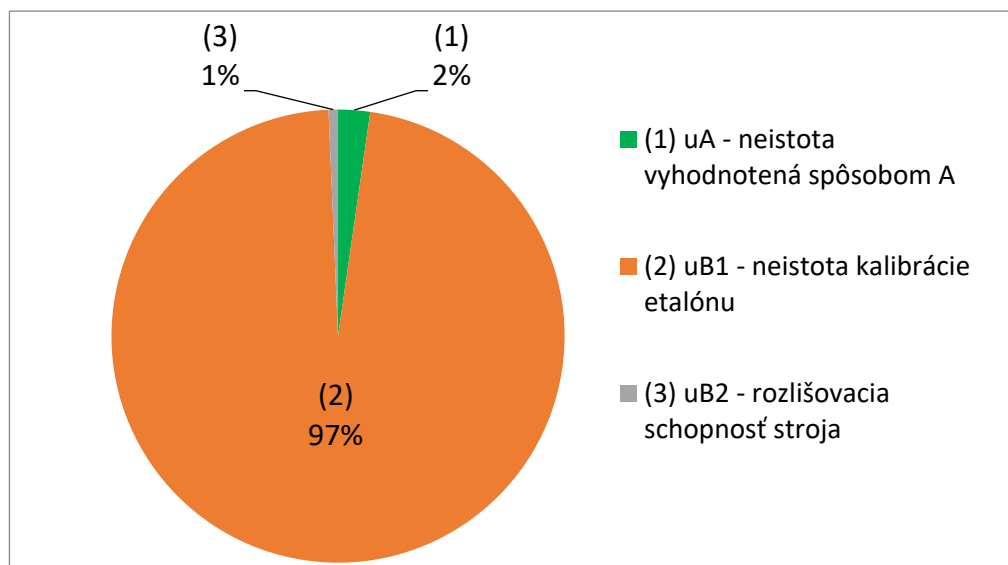
Posledným krokom je stanovenie rozšírenej neistoty, pre ktorú budeme uvažovať štandardný koeficient rozšírenia $k = 2$. Týmto definujeme interval okolo výsledku merania, v ktorom s úrovnou spoľahlivosti približne 95 % predpokladáme výskyt hodnoty meranej veličiny. Aplikovaním vzťahu (3.8) stanovíme hodnotu rozšírenej neistoty s hodnotou zaokrúhlenou nahor:

$$U = 2 \cdot 0,08336 \doteq 0,17^\circ = 0^\circ 10' 12''.$$

Týmto môžeme skonštatovať, že pri meraní uhlovej mierky (s využitím 2D prvkov) s nominálnou hodnotou uhla 90° , má celková neistota pridružená k výsledku merania na ramene Hexagon hodnotu $0,17^\circ$ resp. $0^\circ 10' 12''$.

Pre tento špecifický prípad ukážky výpočtu neistoty bol pre lepšiu názornosť zostavený graf (obr. 60) zobrazujúci podiel jednotlivých zložiek neistoty ku kombinovanej neistote merania.

Z uvedeného grafu je možné pozorovať vysoký nepomer medzi jednotlivými zložkami neistoty. S markantným podielom (97 %) dominuje zložka neistoty kalibrácie použitého etalónu, ktorým sú uhlové mierky. Minimálny podiel (1 %) má rozlišovacia schopnosť ramena Hexagon, ktorú by bolo možné aj úplne zanedbať. Podobne nízko významný je podiel neistoty vyhodnotenej spôsobom A, čo svedčí o pomerne nízkej variabilite a vyššej precízności nameraných dát.



Obr. 60 Podiel jednotlivých príspevkov ku kombinovanej neistote merania pre rameno Hexagon (90° uhlová mierka – 2D uhol rozmeru)

Tým, že neistota vplyvom kalibrácie etalónu je pre všetky použité uhlové mierky rovnaká a konštantná, a tým, že má tak významný podiel spôsobí, že nami dosiahnutá neistota bude taktiež rovnaká a konštantná pre všetky merané uhlové mierky. Jedinou variabilnou zložkou neistoty v závislosti na meranej mierke je neistota vyhodnotená spôsobom A, avšak v konečnom dôsledku na výslednú neistotu nebude mať žiaden vplyv (viď príloha C).

7.8 Kvantifikácia zložiek neistôt a stanovenie rozšírenej neistoty merania (rameno Hexagon – pravítko)

Uvedený príklad výpočtu zrealizujeme z údajov merania priamosti na pravítku (strana A) na ramene Hexagon (viď príloha D). Hodnoty vo výpočtoch sú uvádzané zaokrúhlené nanajvýš na päť desatinných miest, avšak vstupné hodnoty do výpočtov vychádzajú z pôvodných nezaokrúhlených hodnôt tak, aby celkový výsledok nebol vplyvom zaokrúhľovania skreslený.

7.8.1 Štatistická analýza série pozorovaní – vyhodnotenie neistoty spôsobom A (u_A)

Ako prvý krok sme zrealizovali odhad hodnoty vstupnej veličiny v podobe výpočtu aritmetického priemeru z desiatich hodnôt individuálnych pozorovaní (meraní), a to podľa vzťahu (3.2):

$$\bar{y} = \frac{1}{10} \cdot (0,0041 + \dots + 0,0064) = 0,0054 \text{ mm.}$$

Tým, že máme k dispozícii dostatočný počet meraní ($n \geq 10$), je možné k výpočtu štandardnej neistoty vyhodnenej spôsobom A použiť vzťah (3.3):

$$u_A = s(\bar{y}) = \sqrt{\frac{(0,0041 - 0,0054)^2 + \dots + (0,0064 - 0,0054)^2}{10 \cdot (10 - 1)}},$$

$$u_A = s(\bar{y}) = 0,0005 \text{ mm.}$$

7.8.2 Neistota kalibrácie etalónu (u_{B1})

Postup a hodnota neistoty u_{B1} sú v tomto prípade zhodné tomu, ako je uvedené v kapitole 7.4.2.

7.8.3 Vplyv rozlišovacej schopnosti stroja (u_{B2})

Postup a hodnota neistoty u_{B2} sú v tomto prípade zhodné tomu, ako je uvedené v kapitole 7.2.3.

7.8.4 Kombinovaná štandardná neistota (u_C) a rozšírená neistota (U)

V kapitolách 7.8.1 až 7.8.3 sa nám podarilo vyčísliť všetky uvažované zložky neistoty. Teraz môžeme na základe metodiky uvedenej v kapitolách 3.6.2 a 3.6.3 pristúpiť k určeniu kombinovanej štandardnej neistoty. Postupným použitím vzťahov (3.6) a (3.7) bude mať kombinovaná štandardná neistota hodnotu:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2},$$

$$u_C = \sqrt{0,0005^2 + 0,0001^2 + 0,00058^2} = 0,00077 \text{ mm.}$$

Posledným krokom je stanovenie rozšírenej neistoty, pre ktorú budeme uvažovať štandardný koeficient rozšírenia $k = 2$. Týmto definujeme interval okolo výsledku merania, v ktorom s úrovnou spoľahlivosti približne 95 % predpokladáme výskyt hodnoty meranej

veličiny. Aplikovaním vzťahu (3.8) stanovíme hodnotu rozšírenej neistoty s hodnotou zaokrúhlenou nahor:

$$U = 2 \cdot 0,00077 \doteq 0,0016 \text{ mm} = 1,6 \mu\text{m}$$

Týmto môžeme skonštatovať, že pri meraní priamosti na pravítku (strana A), má celková neistota pridružená k výsledku merania na ramene Hexagon hodnotu 1,6 μm .

7.9 Kvantifikácia zložiek neistôt a stanovenie rozšírenej neistoty merania (rameno Hexagon – krúžok - kruhovitost')

Uvedený príklad výpočtu zrealizujeme z údajov merania kruhovitosti na krúžku s nominálnym priemerom $D = 120 \text{ mm}$ na ramene Hexagon (viď príloha D). Hodnoty vo výpočtoch sú uvádzané zaokrúhlené nanajvyš na päť desiatinných miest, avšak vstupné hodnoty do výpočtov vychádzajú z pôvodných nezaokrúhlených hodnôt tak, aby celkový výsledok nebol vplyvom zaokrúhľovania skreslený.

7.9.1 Štatistická analýza série pozorovaní – vyhodnotenie neistoty spôsobom A (u_A)

Ako prvý krok sme zrealizovali odhad hodnoty vstupnej veličiny v podobe výpočtu aritmetického priemeru z desiatich hodnôt individuálnych pozorovaní (meraní), a to podľa vzťahu (3.2):

$$\bar{y} = \frac{1}{10} \cdot (0,0154 + \dots + 0,0180) = 0,0131 \text{ mm.}$$

Tým, že máme k dispozícii dostatočný počet meraní ($n \geq 10$), je možné k výpočtu štandardnej neistoty vyhodnotenej spôsobom A použiť vzťah (3.3):

$$u_A = s(\bar{y}) = \sqrt{\frac{(0,0154 - 0,0131)^2 + \dots + (0,0180 - 0,0131)^2}{10 \cdot (10 - 1)}},$$

$$u_A = s(\bar{y}) = 0,00094 \text{ mm.}$$

7.9.2 Neistota kalibrácie etalónu (u_{B1})

Postup a hodnota neistoty u_{B1} sú v tomto prípade zhodné tomu, ako je uvedené v kapitole 7.5.2.

7.9.3 Vplyv rozlišovacej schopnosti stroja (u_{B2})

Postup a hodnota neistoty u_{B2} sú v tomto prípade zhodné tomu, ako je uvedené v kapitole 7.2.3.

7.9.4 Kombinovaná štandardná neistota (u_C) a rozšírená neistota (U)

V kapitolách 7.9.1 až 7.9.3 sa nám podarilo vyčíslíť všetky uvažované zložky neistoty. Teraz môžeme na základe metodiky uvedenej v kapitolách 3.6.2 a 3.6.3 pristúpiť k určeniu kombinovanej štandardnej neistoty. Postupným použitím vzťahov (3.6) a (3.7) bude mať kombinovaná štandardná neistota hodnotu:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2},$$

$$u_C = \sqrt{0,00094^2 + 0,00006^2 + 0,00058^2} = 0,00111 \text{ mm.}$$

Posledným krokom je stanovenie rozšírenej neistoty, pre ktorú budeme uvažovať štandardný koeficient rozšírenia $k = 2$. Týmto definujeme interval okolo výsledku merania,

v ktorom s úrovnou spoľahlivosti približne 95 % predpokladáme výskyt hodnoty meranej veličiny. Aplikovaním vzťahu (3.8) stanovíme hodnotu rozšírenej neistoty s hodnotou zaokrúhlenou nahor:

$$U = 2 \cdot 0,00111 \doteq 0,0023 \text{ mm} = 2,3 \mu\text{m}$$

Týmto môžeme skonštatovať, že pri meraní kruhovitosti krúžku s nominálnym priemerom 120 mm, má celková neistota pridružená k výsledku merania na ramene Hexagon hodnotu 2,3 μm .

8 VYHODNOTENIE DOSIAHNUTÝCH VÝSLEDKOV

Na záver môžeme na základe získaných údajov pristúpiť k ich vyhodnoteniu a porovnaniu. V prvej podkapitole ukážeme vzorový prístup k vyhodnoteniu podľa normy ČSN EN ISO 14253-1. Následne v ďalších podkapitolách je pomocou grafických prvkov znázornené vzájomné porovnanie nameraných hodnôt medzi oboma súradnicovými strojmi, na ktorých boli realizované merania, a to v závislosti na meranej geometrickej charakteristike resp. v závislosti od použitých etalónov.

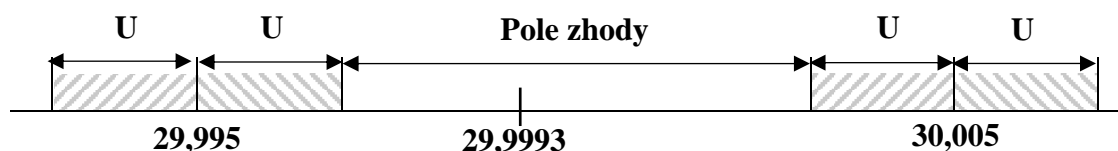
8.1 Vyhodnotenie podľa ČSN EN ISO 14253-1

Špecifikácie v podobe najväčších dovolených chýb nebolo možné pre jednotlivé stroje na základe dostupných údajov výrobcov resp. noriem jednoznačne určiť. Týka sa to všetkých meraných geometrických charakteristík. Preto sme pre potreby vyhodnotenia zhody so špecifikáciou podľa normy ČSN EN ISO 14253-1 zvolili vlastné konštantné hodnoty najväčších dovolených chýb MPE, a to jednotlivo pre každý stroj a každú meranú charakteristiku. Hodnoty zvolených MPE sú uvedené v tab. 8.1.

Tab. 8.1 Zvolené hodnoty MPE pre merané stroje a charakteristiky

	SOL 311 (optika)	Rameno Hexagon (dotyk)
Uhlové mierky (rozmer uhla)	20°	15°
Pravítko (Priamosť)	0,03 mm	0,01 mm
Kružky (Kruhovitost')	0,01 mm	0,025 mm
Kružky (Priemer)	0,005 mm	0,015 mm

Vzorové vyhodnotenie zhody so špecifikáciami realizujeme na základe údajov merania priemeru krúžku $\varnothing 30\text{mm}$ na CMM SOL. Nominálna hodnota priemeru etalónu je 30 mm. Nameraná hodnota bola $\bar{y} = 29,9993 \text{ mm}$. MPE má pre túto charakteristiku hodnotu 0,005 mm. Horná medza špecifikácie USL sa rovná 30,005 mm. Dolná medza špecifikácie LSL sa rovná 29,995 mm. Vyčíslená neistota bola v tomto prípade $U = 0,0019 \text{ mm}$. Táto neistota vymedzí okolo USL a LSL z oboch strán interval, ktorý označíme ako pole neistoty. Grafické znázornenie polohy poľa zhody je pre tento konkrétny prípad na obr. 61.

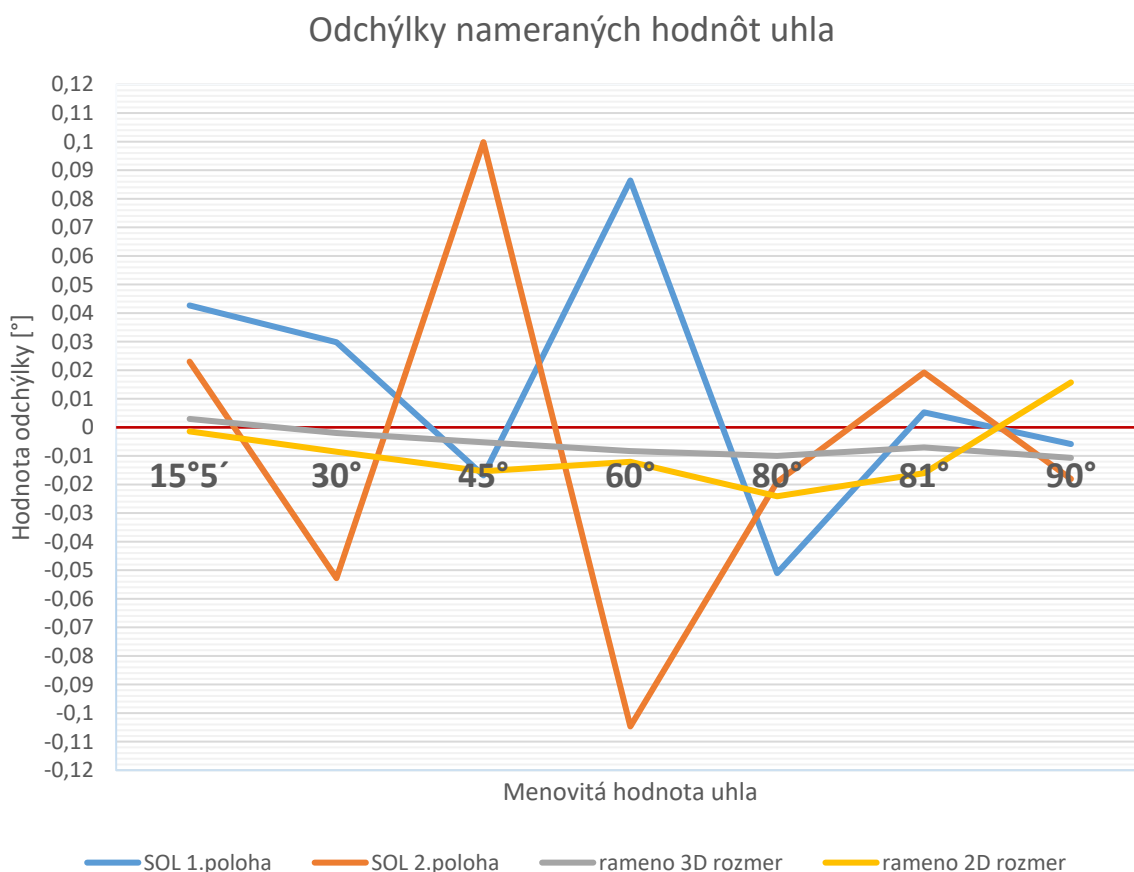


Obr. 61 Grafické znázornenie poľa zhody

Na základe týchto parametrov možno usúdiť, že v tomto špecifickom prípade je nameraný priemer krúžku $\varnothing 30\text{mm}$ v zhode s nami zvolenou špecifikáciou. Závery o zhode so zvolenými špecifikáciami podľa normy ČSN EN ISO 14253-1 sú pre všetky ostatné charakteristiky uvedené v tabuľkách v poslednom riadku (prílohy A až D). Pre zhodu so špecifikáciami je použitý pojem „zhoda“, pre nezhodu so špecifikáciami je použitý pojem „nezhoda“, a v prípade kedy nemožno rozhodnúť o zhode ani nezhode, je použitý pojem „pole neistoty“.

8.2 Porovnanie merania uhlových mierok (rozmer uhla)

V grafe na obr. 62 sú znázornené jednotlivé odchýlky nameraných hodnôt uhla od hodnôt nominálnych. V grafe vystupujú štyri krivky, ktoré predstavujú dve polohy merania na stroji SOL, a dva spôsoby vyhodnotenia uhla na ramene Hexagon. Všeobecne možno povedať, že pomocou ramena sme dosiahli vyššiu presnosť aj nižšiu variabilitu nameraných údajov. Prístroj SOL vykázal vyššiu presnosť pri meraní vyšších hodnôt uhla, najnižšiu zasa okolo 60°, a to zhode v oboch polohách. Pri ramene sa ukázalo ako spoľahlivejšie použitie vyhodnotenia 3D rozmeru uhla za použitia definovaných rovín (bolo použitých viac zosnímaných bodov) ako vyhodnotenie 2D rozmeru uhla pomocou priamok (bolo zosnímaných menej bodov).

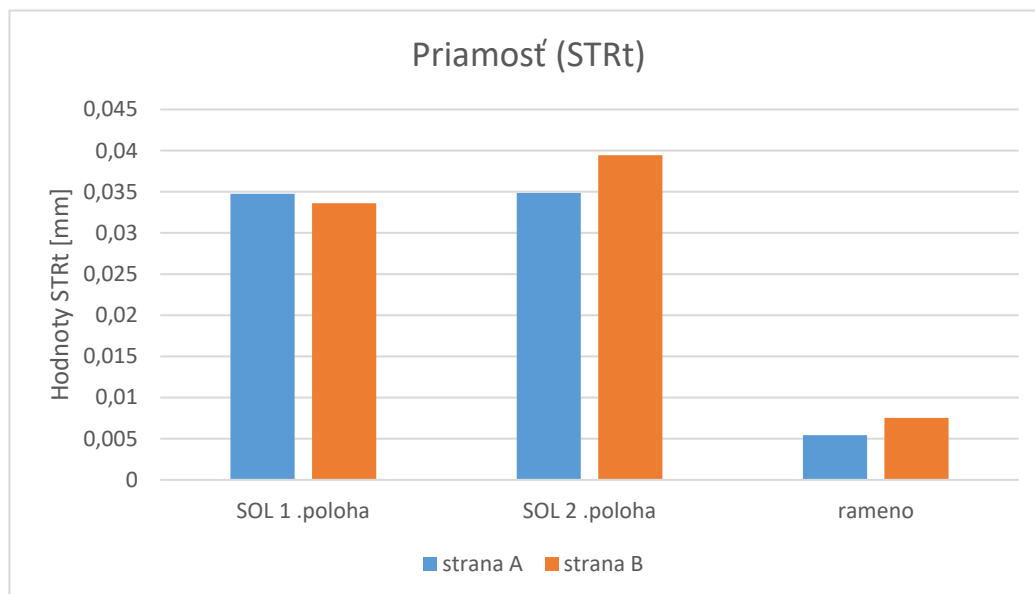


Obr. 62 Vyhodnotenie odchýlok nameraných hodnôt uhla

8.3 Porovnanie merania pravítka (priamost')

V grafe na obr. 63 sú znázornené odchýlky priamosti v závislosti na polohe resp. meranej strane pravítka. Pri pohľade na graf možno na prvý pohľad spozorovať zásadný rozdiel medzi meraním pomocou optického prístroja resp. pomocou dotykového prístroja. Tento rozdiel možno najpravdepodobnejšie pripísať použitej stratégii merania. Pri stroji SOL bola priamost' vyhodnotená len z desiatich bodov po celej dĺžke pravítka, čo sa značne odlišuje od prístupu, ktorý sme použili napríklad pri meraní kruhovitosti. Pri pohľade na rozdiely výsledkov dosiahnutých pri meraní ostatných charakteristík, nepredstavujú tieto výstupy očakávané hodnoty. Pri ďalšom použití týchto výsledkov v praxi sa preto určite odporúča v prvom rade vychádzať z postupu, ktorý bol pri meraní použitý, aby následné porovnávanie malo istú

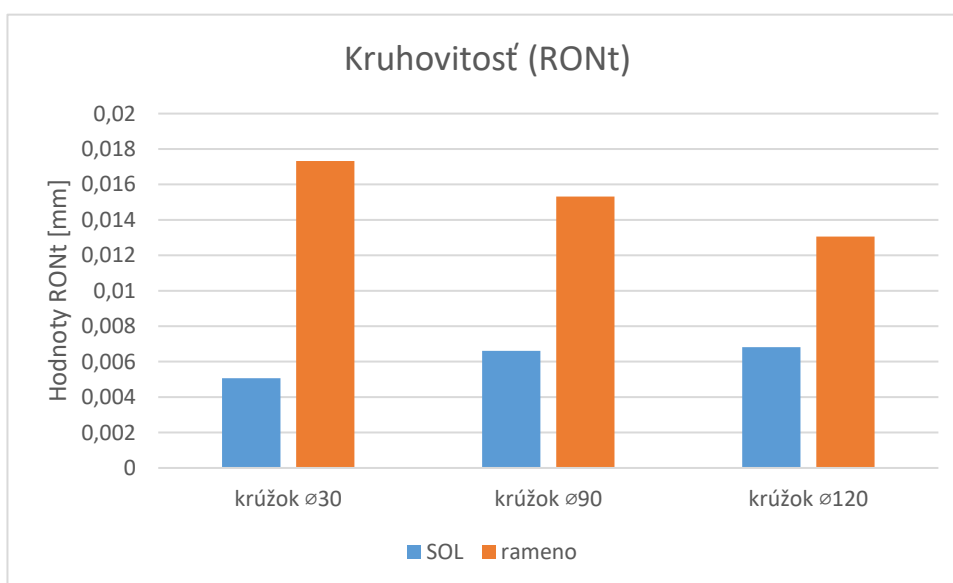
výpovednú hodnotu. K samotným výsledkom možno dodať, že rozdiely odchýlok priamosti dosiahnuté v rôznych polohách pravítka resp. na meraných stranách neboli zásadne odlišné.



Obr. 63 Vyhodnotenie odchýlok priamosti

8.4 Porovnanie merania krúžkov (kruhovitost')

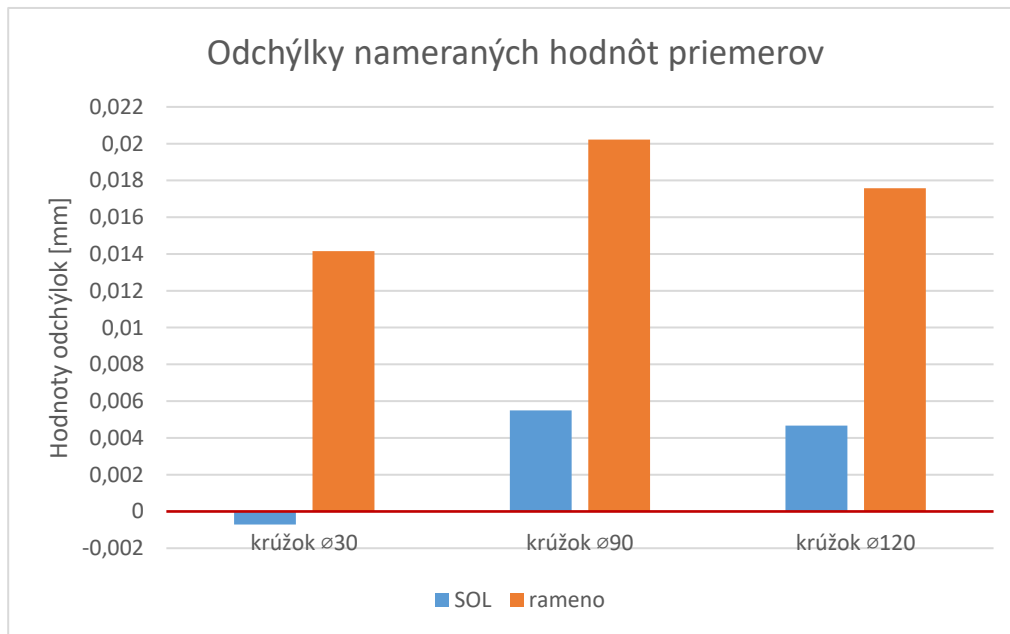
V grafe na obr. 64 sú znázornené odchýlky kruhovitosti pri meraní nastavovacích krúžkov na jednotlivých typoch CMM. Tu sa ukazuje, že vo všeobecnosti sme dosiahli presnejšie výsledky na stroji SOL. Postup merania kruhovitosti na SOL-e bol dostatočne dôkladný, keďže po obvode krúžku sme zosníмали optikou až 3600 bodov. Pri meraní pomocou dotyku bolo použitých 15 bodov približne v strednej rovine krúžku. Výsledky sú v tomto prípade takpovediac očakávané. Z tohto možno usúdiť, že CMM SOL je vhodnejší na meranie prvkov kruhového tvaru, pričom presnosť sa s vyšším priemerom len mierne zhoršovala. Pri ramene to bolo paradoxne naopak, kedy bola nižšia kruhovitosť preukázaná pri použití krúžku s väčším priemerom.



Obr. 64 Vyhodnotenie odchýlok kruhovitosti

8.5 Porovnanie merania krúžkov (priemer)

Pri pohľade na stĺpcový graf na obr. 65, kde sú zobrazené odchýlky nameraných priemerov krúžkov od ich menovitých hodnôt, možno usúdiť, že sa tu vyskytuje podobný trend výsledkov ako pri meraní kruhovitosti. Na základe týchto výstupov možno tvrdiť, že presnejšie výsledky dosiahneme pri meraní priemeru na CMM SOL, zvlášť pri meraní menšieho priemeru. Na druhej strane, pomocou ramena dosiahneme v závislosti od veľkosti meraného priemeru porovnateľné výsledky, avšak so značne nižšou presnosťou ako pri použití optického prístroja.



Obr. 65 Vyhodnotenie odchýlok nameraných hodnôt priemerov

9 ZÁVER

Témou tejto diplomovej práce bolo zrealizovať výber vhodných etalónov, ktoré by sa dali použiť na meranie rovinného uhla a odchýlok tvaru pri kalibrácii zvolených súradnicových meracích strojov. Medzi zvolené CMM patri stroje dostupné na ÚVSSR, a to optický CMM SOL 311 a AACMM Hexagon Absolute Arm 83 Compact.

Keďže sa v práci venujeme procesu kalibrácie, v rámci motivácie sme problematiku s ňou spojenú zasadili ako systémový proces merania do konceptu systému managementu kvality vychádzajúceho z noriem ČSN EN ISO 9001 a ČSN EN ISO/IEC 17025. Na začiatku sme čitateľa oboznámili s oblasťou metrológie a jej aplikáciami v praxi. V úvodnej časti vlastného textu práce bolo zhodnotiť súčasný stav merania pomocou CMM techniky. Následne sme vykonali rozbor riešenej problematiky, kde sme v teoretickej rovine opísali skúmané geometrické charakteristiky a popísali stroje, na ktorých budú realizované samotné merania.

Ďalšia kapitola sa venuje už popisu a stratégii merania pri kalibrácii CMM. V rámci tohto cieľa boli realizované všetky experimentálne merania popísané v uvedenej kapitole.

Následne boli identifikované a pre jednotlivé CMM resp. merané charakteristiky kvantifikované všetky relevantné zložky neistoty prispievajúce k celkovej neistote merania.

Výstupom experimentálnych meraní je vyhodnotenie dosiahnutých výsledkov vrátane tabuliek v prílohách a taktiež vytvorenie kalibračných listov pre uhol a odchýlky tvaru, ktoré sú rovnako súčasťou príloh. Následne je realizované ukázkové vyhodnotenie podľa zhody podľa normy ČSN EN ISO 14253-1 a vzájomne porovnanie dosiahnutých výsledkov. Týmto možno skonštatovať, že všetky ciele tejto práce boli splnené.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] ČSN EN ISO 9001. *Systémy managementu kvality - Požadavky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016, 48 s. Třídící znak 010321.
- [2] ČSN EN ISO/IEC 17025. *Všeobecné požadavky na kompetenci zkušebních a kalibračních laboratoří*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018, 48 s. Třídící znak 015253.
- [3] TNI 01 0115. *Mezinárodní metrologický slovník - Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM)*. 3. vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009, 90 s.
- [4] *Metrologie v kostce* [online]. Třetí upravené a doplněné vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009 [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: https://www.unmz.cz/sborniky_th/sb2009/MvK_7_vidit_hypervazby_small.pdf
- [5] PETŘKOVSKÁ, Lenka a Lenka ČEPOVÁ. *STROJÍRENSKÁ METROLOGIE* [online]. První. Ostrava, 2011, 101 s. [cit. 2023-03-20]. ISBN 978-80-248-2723-0. Dostupné z: <https://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2723-0.pdf>
- [6] ČESKO. Zákon č. 505/1990 Sb.: Zákon o metrologii - znění od 13. 6. 2021. In: *Zákony pro lidi.cz*. © AION CS 2010-2023. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1990-505?citace=1#Top>
- [7] Jaký je rozdíl mezi kalibrací a ověřením?. In: *Český metrologický institut* [online]. [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://cmi.cz/node/11>
- [8] ŠRÁMEK, Jan. *Stanovení přesnosti měření v nanometrologii* [online]. Brno, 2019 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/184092/final-thesis.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Róbert Jankových.
- [9] SENFT, Václav. Analytické vlastnosti metod. In: *SlidePlayer* [online]. [cit. 2023-03-31]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/11240670/>
- [10] Národní metrologický systém České republiky. In: *Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví* [online]. [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://www.unmz.cz/metrologie/metrologicky-system/narodni-metrologicky-system-ceske-republiky/>
- [11] Národní Metrologický Systém. In: *Český metrologický institut* [online]. [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://www.cmi.cz/popis%20NMS>
- [12] Právní rámec metrologie. In: *Český metrologický institut* [online]. [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://www.cmi.cz/pravni%20ramec%20metrologie>
- [13] TŮMOVÁ, Olga. *Metrologie a hodnocení procesů*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2009, 231 s. ISBN 978-80-7300-249-7. Dostupné také z: http://www.ben.cz/_d/ukazka/121303u.pdf

- [14] Hodnocení výsledků měření. In: *VŠB, Zkoušení stavebních materiálů a výrobků - Zkoušení stavebních materiálů - Chyby měření* [online]. [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: <https://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=chyby>
- [15] PETŘKOVSKÁ, Lenka a Lenka ČEPOVÁ. *Legislativa ve strojírenské metrologie a přesné měření 3D ploch* [online]. První. Ostrava: VŠB – TUO, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2011, 125 s. [cit. 2023-04-05]. ISBN 978-80- 248-2514-4. Dostupné z: https://projekty.fs.vsb.cz/019/dokumenty/METROLOGIE_FINAL.pdf
- [16] HÁJKOVÁ, Alena. *Návrh interní metodiky pro měření výrobků a dílů na přístroji CMM UPMC Zeiss na pracovišti ČMI Brno* [online]. Brno, 2020 [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/192663>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Jan Šrámek.
- [17] EA 4/02 M:2022. *Vyhodnocení nejistoty měření při kalibraci (Evaluation of the Uncertainty of Measurement in calibration)*. Praha: Český institut pro akreditaci, 2022, 70 s.
- [18] AMRHEIN, Laura. A History of CMM's. In: *COMPONENT ENGINEERING* [online]. [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: <https://www.cequalitysolutions.com/2019/08/22/a-history-of-cmms/>
- [19] A BRIEF HISTORY OF CMM TECHNOLOGY. In: *STATUS* [online]. [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: <https://status-cmm.co.uk/blog/a-brief-history-of-cmm-technology/>
- [20] NENÁHLO, Čeněk. Souřadnicová měřicí technika. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/souradnicovamerici-technika>
- [21] KENDER, Štefan. *Súradnicové meracie stroje* [online]. [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: <https://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/26-2013/pdf/233-235.pdf>
- [22] DRBÚL, Mário, Michal ŠAJGALÍK, Ján ŠEMCER, Tatiana CZÁNOVÁ a Lenka ČEPOVÁ. *STROJÁRSKA METROLÓGIA A KVALITA POVRCHOV VYTVORENÝCH TECHNOLOGIAMI OBRÁBANIA* [online]. Prvé. Žilina: ŽU v Žiline, Strojnícka fakulta, Katedra obrábania a výrobnjej techniky, 2014, 115 s. [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: <https://projekty.fs.vsb.cz/064/docs/metrologie.pdf>
- [23] TICHÁ, Šárka. *STROJÍRENSKÁ METROLOGIE* [online]. Část 1. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2004 [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: <http://books.fs.vsb.cz/StrojMetro/strojirenska-metrologie.pdf>
- [24] Ultra-High Accuracy CMM Scanner Offers 70% Faster Inspection. In: *Metrology.news* [online]. [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://metrology.news/ultra-high-accuracy-cmm-scanner-offers-70-percent-faster-inspection/>
- [25] Optický snímač HP-C. In: *Hexagon* [online]. [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://hexagon.com/cs/products/hp-c-vision-sensor>
- [26] Nondestructive, 3D Scanning of Internal and External Geometries. In: *Laser Design* [online]. [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.laserdesign.com/ct-scanning>

- [27] SKOPAL, Miroslav Jan a Alois FIALA. Kalibrace a přesnost měření. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kalibrace-a-presnost-mereni>
- [28] ČSN EN ISO 10360-2. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) - Část 2: Souřadnicové měřicí stroje používané pro měření lineárních rozměrů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010, 32 s. Třídící znak 252011.
- [29] THE CMM CALIBRATION PROCEDURE EXPLAINED. In: *STATUS* [online]. [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://status-cmm.co.uk/blog/the-cmm-calibration-procedure-explained/>
- [30] SŁADEK, Jerzy A. *Coordinate Metrology* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016 [cit. 2023-02-15]. Springer Tracts in Mechanical Engineering. ISBN 978-3-662-48463-0. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-662-48465-4
- [31] ČSN EN ISO 80000-3. *Veličiny a jednotky - Část 3: Prostor a čas*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021, 20 s. Třídící znak 011300.
- [32] ČSN EN ISO 1101. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Geometrické tolerování - Tolerance tvaru, orientace, umístění a házení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020, 178 s. Třídící znak 014120.
- [33] ČSN EN ISO 12780-1. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Přímost - Část 1: Slovník a parametry přímosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 16 s. Třídící znak 014140.
- [34] ČSN EN ISO 12781-1. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Rovinnost - Část 1: Slovník a parametry rovinnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 16 s. Třídící znak 014146.
- [35] ČSN EN ISO 12181-1. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Kruhovitost - Část 1: Slovník a parametry kruhovitosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 16 s. Třídící znak 014151.
- [36] ČSN EN ISO 12180-1. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Válcovitost - Část 1: Slovník a parametry válcovitosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 20 s. Třídící znak 014156.
- [37] ČSN EN ISO 12180-2. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Válcovitost - Část 2: Operátory specifikace*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 16 s. Třídící znak 014156.
- [38] SOL: Manual Vision System. In: *Resources of Manufacturing Inc.* [online]. [cit. 2023-05-01].
- [39] E-LEARNING VUT. *Manuál SOL*. 201 s.
- [40] POLÁŠEK, Ondřej. *Metrologické charakteristiky měřicího ramene Hexagon Absolute Arm 83*. Brno, 2021, 82 s. 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 Tomáš Marek.

[41] ŠRŮT, Petr. *Měření drsnosti pomocí kruhoměru* [online]. Brno, 2015, 86 s. [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/40402/final-thesis.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Róbert Jankových.

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

Skratka	Význam
2D	Dvojmerný
3D	Trojmerný
AACMM	Articulated Arm Coordinate Measuring Machine
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures
CAD	Computer Aided Design
CCD	Charged-coupled device
CMM	Coordinate Measuring Machines
CNC	Computer Numerical Control
ČIA	Český institut pro akreditaci
ČMI	Český metrologický institut
ČR	Česká republika
ČSN	Česká technická norma
EN	Európska norma
EÚ	Európska únia
GPS	Geometrical Product Specifications
ISO	International Organization for Standardization
LSL	Lower Specification Limit
MPE	Maximum Permissible Error
MPO	Ministerstvo průmyslu a obchodu
NC	Numerical Control
NMS	Národní metrologický systém
RONt	Roundness Total
SI	Système international d'unités
STRt	Straightness Total
USL	Upper Specification Limit
ÚNMZ	Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví
VIM	Vocabulaire international de métrologie

Symbol	Význam
°	Uhlový stupeň
'	Uhlová minúta
"	Uhlová sekunda
π	Ludolfovo číslo

\varnothing	Priemer
α	Koeficient tepelnej rozťažnosti
α_A	Koeficient tepelnej rozťažnosti materiálu meraného objektu
$\Delta\alpha$	Rozdiel koeficientu teplotnej rozťažnosti etalónu a CMM
Δt	Rozdiel teplôt medzi meraným objektom a strojom
Δt_{20}	Odchýlka teploty od 20 °C
Δz_{maxj}	Rozsah odchýlok
χ	Koeficient vychádzajúci z rozdelenia pravdepodobnosti
a, b	Experimentálne určené koeficienty
c_j	Koeficient citlivosti
k	Koeficient rozšírenia
k_s	Koeficient rozšírenia podľa Studentovho rozdelenia pravdepodobnosti
L	Meraná dĺžka v metroch
m	Počet príspevkov neistoty vyhodnotenej spôsobom B
n	Celkový počet meraní veličiny
R	Nameraná kruhovitosť
R_{CMM}	Hodnota rozlíšiteľnosti daného CMM
$s(\bar{y})$	Výberová smerodajná odchýlka aritmetického priemeru
u_A	Štandardná neistota vyhodnotená spôsobom A
u_B	Štandardná neistota vyhodnotená spôsobom B
u_{B1}	Vplyv neistoty kalibrácie CMM
u_{B2}	Vplyv rozlíšiteľnosti použitého odmeriavacieho systému
u_{B3}	Vplyv rozdielu teploty CMM a meraného objektu
u_{B4}	Vplyv rozdielu teploty od 20 °C
$u_B(z_j)$	Neistota jednotlivých zdrojov
u_C	Kombinovaná štandardná neistota
U	Rozšírená neistota meranej veličiny
U_E	Neistota kalibrácie etalónu
U	Výsledná rozšírená neistota
\bar{y}	Odhad hodnoty vstupnej veličiny (aritmetický priemer)
y_i	i-tá hodnota meranej veličiny Y
y_{max}	Maximálna nameraná hodnota meranej veličiny
y_{min}	Minimálna nameraná hodnota meranej veličiny
Y	Hodnota vstupnej veličiny

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1	Reťazec metrologickej nadväznosti [4].....	23
Obr. 2	Princíp presného merania [9].....	24
Obr. 3	Národný metrologický systém ČR [4].....	27
Obr. 4	Rozdelenie chýb merania [14].....	29
Obr. 5	Schéma určenia neistoty merania [5].....	30
Obr. 6	Popis základných častí CMM [22]	34
Obr. 7	Typy CMM podľa konštrukcie: a) jednosúradnicový; b) dvojsúradnicový; c) trojsúradnicový [15]	36
Obr. 8	a) stĺpový typ CMM; b) stojanový merací stroj na vodiacom nosníku [22]....	37
Obr. 9	Výložníkový typ CMM: a) jeden stroj; b) duplexné prevedenie [22]	37
Obr. 10	Portálový typ CMM: a) s pohyblivým portálom; b) s pevným portálom [22]	38
Obr. 11	Mostový typ CMM: a) schéma; b) stroj firmy LK [22]	38
Obr. 12	Meracie systémy CMM: a) závitový hriadeľ; b) indukčný; c) inkrementálna dĺžková stupnica; d) laserinterferometer [15].....	40
Obr. 13	Snímacie hlavice: a) pevná; b) indexovateľná; c) manuálna [15]	41
Obr. 14	Rozmery dotyku [15].....	41
Obr. 15	Základné typy dotykov: a) priamy dotyk; b) hviezdicový dotyk; c) diskový dotyk [15].....	42
Obr. 16	Dotyky pre špeciálne účely: a) valcový dotyk; b) špička; c) dutá keramická pologuľa; d) dotyk na ustavovanie nástrojov [15].....	42
Obr. 17	Materiály guľôčok: a) rubín; b) nitrid kremíku; c) oxid zirkoničitý; d) diamant [15].....	43
Obr. 18	Materiály pre stopky dotykov: a) oceľ; b) karbid volfrámu; c) keramika; d) uhlíkové vlákna [15].....	43
Obr. 19	Ultrapresný laserový skener HP-L-10.10 pre CMM od spoločnosti Hexagon [24].....	43
Obr. 20	Optický snímač HP-C pre CMM od spoločnosti Hexagon [25].....	44
Obr. 21	Nominálne/skutočné porovnanie geometrie súčiastky s využitím CT technológie [26]	44
Obr. 22	Faktory ovplyvňujúce výsledok merania [22]	45
Obr. 23	Definícia jednotky pre rovinný uhol [5]	49
Obr. 24	Referenčné čiary minimálnej zóny [33]	52
Obr. 25	Tolerancia priamosti: a) indikácia; b) definícia tolerančného poľa [32].....	52
Obr. 26	Referenčné roviny minimálnej zóny [34].....	53
Obr. 27	Tolerancia rovinnosti: a) indikácia; b) definícia tolerančného poľa [32].....	53

Obr. 28	Označenie, tolerančné zóny a príklad predpisu kruhovitosti [22].....	55
Obr. 29	Tolerancia valcovitosti: a) indikácia; b) definícia tolerančného poľa [32].....	56
Obr. 30	Stratégie merania odchýlky valcovitosti: a) metóda bodová; b) metóda tvoriacich priamok; c) metóda priečných rezov; d) metóda kliečky [23]	56
Obr. 31	Optický CMM SOL 311 na ÚVSSR FSI VUT	57
Obr. 32	Hexagon Absolute Arm 83 Compact na ÚVSSR FSI VUT.....	58
Obr. 33	Súbor uhlových mierok (výrobca ČIZ, identifikačné číslo X127) na ÚVSSR60	
Obr. 34	Uhlové mierky použité ku kalibrácii	60
Obr. 35	Kontrolné pravítko 500 mm (identifikačné číslo D107) na ÚVSSR	61
Obr. 36	Nastavovacie (kontrolné) krúžky Einst použité ku kalibrácii s priermi: a) $\varnothing 30$ mm; b) $\varnothing 90$ mm; c) $\varnothing 120$ mm.....	61
Obr. 37	Zeiss UPMC 850 CARAT (vľavo); detail priestoru merania (vpravo).....	62
Obr. 38	Dĺžkomer SIP 1002M v spojení s laserinterferometrom XL8	63
Obr. 39	Kruhomer Talyrond TR595S (vľavo); detail priestoru merania (vpravo)	64
Obr. 40	Rozmiestnenie uhlových mierok počas merania v rovine XY stroja	66
Obr. 41	Vstupné charakteristiky a ich grafický náčrt v programovom rozhraní softwaru InSpec pri meraní UM	67
Obr. 42	Náčrt meraných polôh mierok počas merania v rovine XY: a) 1. poloha (s osou X); b) 2. poloha (s osou Y).....	67
Obr. 43	Umiestnenie pravítka počas merania v rovine XY.....	68
Obr. 44	Vstupné charakteristiky a ich grafický náčrt v programovom rozhraní softwaru InSpec pri meraní pravítka	68
Obr. 45	Náčrt meraných polôh pravítka v rovine XY s vyznačením použitého súradnicového systému: a) 1. poloha; b) 2. poloha	69
Obr. 46	Umiestnenie krúžku počas merania v rovine XY.....	69
Obr. 47	Ukážka profilu vyhodnotenej kruhovitosti.....	70
Obr. 48	Vstupné charakteristiky a ich grafický náčrt s vyznačeným súradnicovým systémom v programovom rozhraní softwaru InSpec pri meraní krúžku	70
Obr. 49	Upnutie a snímanie mierky dotykcom	71
Obr. 50	Editáčne okno použitého programu na meranie uhlových mierok v softwari PC-DMIS s grafickým zobrazením CAD modelu.....	72
Obr. 51	Upnutie pravítka pri meraní	72
Obr. 52	Snímanie pravítka dotykcom	72
Obr. 53	Vyrovnanie rovín v softwari PC-DMIS	73
Obr. 54	Vlastnosti prvku priamka LIN1 v softwari PC-DMIS	73
Obr. 55	Editáčne okno použitého programu na meranie pravítka v softwari PC-DMIS s grafickým zobrazením CAD modelu.....	74
Obr. 56	Upnutie a snímanie krúžku dotykcom	74

Obr. 57	Vlastnosti prvku kružnica CIR1 v softwari PC-DMIS	75
Obr. 58	Editáčné okno použitého programu na meranie krúžkov v softwari PC-DMIS s grafickým zobrazením CAD modelu	75
Obr. 59	Podiel jednotlivých príspevkov ku kombinovanej neistote merania pre CMM SOL (krúžok Ø120mm)	81
Obr. 60	Podiel jednotlivých príspevkov ku kombinovanej neistote merania pre rameno Hexagon (90° uhlová mierka – 2D uhol rozmeru)	87
Obr. 61	Grafické znázornenie poľa zhody	91
Obr. 62	Vyhodnotenie odchýlok nameraných hodnôt uhla	92
Obr. 63	Vyhodnotenie odchýlok priamosti	93
Obr. 64	Vyhodnotenie odchýlok kruhovitosti	93
Obr. 65	Vyhodnotenie odchýlok nameraných hodnôt priemerov	94

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 3.1	Hodnoty koeficientu k_s v závislosti na počte meraní n [16]	31
Tab. 8.1	Zvolené hodnoty MPE pre merané stroje a charakteristiky	91

ZOZNAM PRÍLOH

- Príloha A Tabuľka nameraných hodnôt s vyhodnotením (SOL – uhol)
- Príloha B Tabuľka nameraných hodnôt s vyhodnotením (SOL – odchýlky tvaru a priemer)
- Príloha C Tabuľka nameraných hodnôt s vyhodnotením (rameno Hexagon – uhol)
- Príloha D Tabuľka nameraných hodnôt s vyhodnotením (rameno Hexagon – odchýlky tvaru a priemer)
- Príloha E Kalibračný list (SOL – uhol)
- Príloha F Kalibračný list (SOL – odchýlky tvaru a priemer)
- Príloha G Kalibračný list (rameno Hexagon – uhol)
- Príloha H Kalibračný list (rameno Hexagon – odchýlky tvaru a priemer)
- Príloha I Kalibračný list pre uhlové mierky
- Príloha J Kalibračný list pre prímerné pravítko oceľové
- Príloha K Kalibračný list pre nastavovací krúžok $\varnothing 30$ mm
- Príloha L Kalibračný list pre nastavovací krúžok $\varnothing 90$ mm
- Príloha M Kalibračný list pre nastavovací krúžok $\varnothing 120$ mm

Príloha B

	SOL - TVAR/POLOHA/ROZMER (hodnoty v mm)											
	Pravítko						Kružky					
	1. poloha			2. poloha			RONt			priemer D		
	STRt (A)	STRt (B)	rovnobež. A (zákl. B)	STRt (A)	STRt (B)	rovnobež. B (zákl. A)	D30	D90	D120	D30	D90	D120
1	0,0428	0,0294	0,0431	0,0438	0,0536	0,0556	0,0063	0,0060	0,0064	30,0002	90,0060	120,0044
2	0,0394	0,0237	0,0397	0,0553	0,0183	0,0187	0,0052	0,0074	0,0070	29,9992	90,0056	120,0047
3	0,0430	0,0230	0,0552	0,0333	0,0806	0,0810	0,0053	0,0059	0,0065	29,9996	90,0057	120,0049
4	0,0346	0,0802	0,0417	0,0381	0,0548	0,0675	0,0043	0,0071	0,0070	29,9989	90,0058	120,0046
5	0,0263	0,0412	0,0248	0,0256	0,0311	0,0326	0,0045	0,0065	0,0069	29,9994	90,0051	120,0046
6	0,0347	0,0459	0,0437	0,0271	0,0530	0,0500	0,0052	0,0066	0,0069	29,9991	90,0052	120,0046
7	0,0429	0,0176	0,0447	0,0255	0,0311	0,0410	0,0052	0,0066	0,0073	29,9992	90,0053	120,0046
8	0,0455	0,0193	0,0469	0,0304	0,0356	0,0358	0,0051	0,0069	0,0065	29,9992	90,0054	120,0047
9	0,0230	0,0323	0,0201	0,0265	0,0244	0,0327	0,0048	0,0063	0,0068	29,9992	90,0054	120,0046
10	0,0153	0,0234	0,0146	0,0431	0,0120	0,0189	0,0048	0,0069	0,0068	29,9990	90,0055	120,0050
y _{max}	0,0455	0,0802	0,0552	0,0553	0,0806	0,0810	0,0063	0,0074	0,0073	30,0002	90,0060	120,0050
y _{min}	0,0153	0,0176	0,0146	0,0255	0,0120	0,0187	0,0043	0,0059	0,0064	29,9989	90,0051	120,0044
y_{bar} (3.2)	0,0347	0,0336	0,0375	0,0349	0,0394	0,0434	0,0051	0,0066	0,0068	29,9993	90,0055	120,0047
u _A (3.3)	0,00321	0,00594	0,00413	0,00317	0,00658	0,00641	0,00017	0,00015	0,00009	0,00011	0,00008	0,00006
u _{B1} (7.2)	0,00010	0,00010	0,00010	0,00010	0,00010	0,00010	0,00005	0,00005	0,00006	0,00033	0,00048	0,00055
u _{B2} (7.3)	0,00058	0,00058	0,00058	0,00058	0,00058	0,00058	0,00058	0,00058	0,00058	0,00058	0,00058	0,00058
u _{B3} (7.4)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00004	0,00012	0,00016
u _{B4} (7.5)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00062	0,00186	0,00248
u _c (3.7)	0,00326	0,00597	0,00417	0,00322	0,00660	0,00643	0,00061	0,00060	0,00059	0,00092	0,00201	0,00261
U (3.8; k=2)	0,0066	0,0120	0,0084	0,0065	0,0140	0,0130	0,0013	0,0012	0,0012	0,0019	0,0041	0,0053
MPE	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,010	0,010	0,010	0,005	0,005	0,005
USL	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,010	0,010	0,010	30,005	90,005	120,005
LSL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29,995	89,996	119,995
Záver podľa ČSN EN ISO 14253-1	pole neistoty	pole neistoty	pole neistoty	pole neistoty	pole neistoty	nehoda	zhoda	zhoda	zhoda	zhoda	pole neistoty	pole neistoty

Príloha D

	Rameno HEXAGON - TVAR/ROZMER (hodnoty v mm)							
	Pravítko		Krúžky					
	STRt (A)	STRt (B)	RONt			priemer D		
			D30	D90	D120	D30	D90	D120
1	0,0041	0,0097	0,0190	0,0095	0,0154	30,0067	90,0140	120,0171
2	0,0051	0,0081	0,0106	0,0119	0,0101	30,0153	90,0141	120,0164
3	0,0066	0,0076	0,0299	0,0254	0,0139	30,0001	90,0095	120,0188
4	0,0039	0,0091	0,0149	0,0170	0,0135	30,0094	90,0403	120,0187
5	0,0046	0,0091	0,0177	0,0108	0,0139	30,0196	90,0150	120,0159
6	0,0048	0,0067	0,0132	0,0130	0,0069	30,0200	90,0152	120,0179
7	0,0036	0,0068	0,0183	0,0131	0,0120	30,0359	90,0162	120,0194
8	0,0086	0,0055	0,0275	0,0133	0,0138	30,0124	90,0165	120,0156
9	0,0066	0,0058	0,0120	0,0213	0,0131	30,0113	90,0437	120,0165
10	0,0064	0,0069	0,0101	0,0179	0,0180	30,0109	90,0177	120,0195
y _{max}	0,0086	0,0097	0,0299	0,0254	0,0180	30,0359	90,0437	120,0195
y _{min}	0,0036	0,0055	0,0101	0,0095	0,0069	30,0001	90,0095	120,0156
y_{bar} (3.2)	0,0054	0,0075	0,0173	0,0153	0,0131	30,0142	90,0202	120,0176
u _A (3.3)	0,00050	0,00046	0,00215	0,00159	0,00094	0,00305	0,00370	0,00046
u _{B1} (7.2)	0,00010	0,00010	0,00005	0,00005	0,00006	0,00033	0,00048	0,00055
u _{B2} (7.3)	0,00058	0,00058	0,00058	0,00058	0,00058	0,00058	0,00058	0,00058
u _{B3} (7.4)	-	-	-	-	-	0,00004	0,00012	0,00016
u _{B4} (7.5)	-	-	-	-	-	0,00052	0,00155	0,00207
u _C (3.7)	0,00077	0,00074	0,00222	0,00169	0,00111	0,00316	0,00409	0,00227
U (3.8; k=2)	0,0016	0,0015	0,0045	0,0034	0,0023	0,0064	0,0082	0,0046
MPE	0,010	0,010	0,025	0,025	0,025	0,015	0,015	0,015
USL	0,010	0,010	0,025	0,025	0,025	30,015	90,015	120,015
LSL	0	0	0	0	0	29,985	89,985	119,985
Záver podľa ČSN EN ISO 14253-1	zhoda	zhoda	zhoda	zhoda	zhoda	pole neistoty	pole neistoty	pole neistoty



Pracoviště: Vysoké Učení Technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství,
 Ústav výrobných strojů, systémů a robotiky,
 Odbor kvality, spolehlivosti a bezpečnosti, Technická 2896/2, 616 69 Brno

KALIBRAČNÝ LIST

č.: KL-SOL-ANG-1

Dátum vystavenia: 23.5.2023 List 1 z 3 listov
Zákazník: VUT v Brne, FSI, ÚVSSR, OKSB
 Technická 2896/2, 616 69 Brno
Meradlo: CMM SOL 311
Výrobca: MicroVu
Identifikačné číslo: SL31101329
Rozsah: (315x315x160) mm
Metrolog. nadväznosť: Merania sú metrologicky nadviazané na
 (medzi)národné etalóny

Použitie etalóny:

Názov:	Identifikačné číslo	Číslo KL
súbor uhlových mierok, výrobca ČIZ	X127	6014-KL-F0185-23

Kalibračný postup: nešpecifikovaný
Miesto kalibrácie: laboratórium A1/1337, FSI VUT
Podmienky prostredia: Teplota vzduchu: (24,8 ± 0,5) °C

Výsledky kalibrácie boli získané za podmienok a s použitím postupov uvedených v tomto kalibračnom liste a vzťahujú sa len k dobe a miestu vykonania kalibrácie.

Neistota merania: $U = 0^{\circ} 10' 12''$

Štandardná neistota merania bola určená v súlade s dokumentom EA-4/02. Uvedená rozšírená neistota merania je súčinom štandardnej neistoty merania a koeficientu k , ktorý zodpovedá pravdepodobnosti pokrytia približne 95 %, čo pre normálne rozdelenie zodpovedá koeficientu rozšírenia $k = 2$.

Dátum kalibrácie: 13. - 14.4.2023
Kalibráciu vykonal: Matúš Lipták



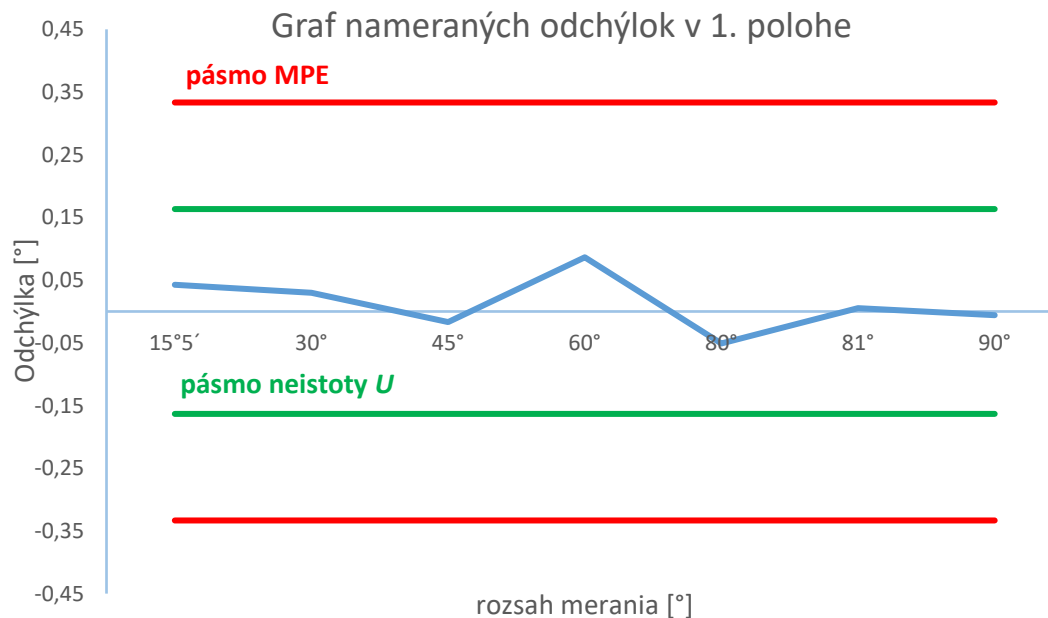
Pracoviště: Vysoké Učení Technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství,
Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky,
Odbor kvality, spolehlivosti a bezpečnosti, Technická 2896/2, 616 69 Brno

List 2 z 3 listov

Výsledky kalibrácie za použitia etalónov rovinného uhla:

Meranie v 1. polohe (s osou X):

Menovitá hodnota uhla [° ' "]	Nameraná hodnota [° ' "]
15°5'	15° 7 ' 34"
30°	30° 1 ' 47"
45°	44° 58 ' 60"
60°	60° 5 ' 11"
80°	79° 56 ' 56"
81°	81° 0 ' 19"
90°	89° 59 ' 39"



Prehlásenie o zhode so špecifikáciou:

Namerané chyby CMM vyhovujú uvádzanej *MPE*.

Maximálna povolená chyba *MPE* = 0° 20'.

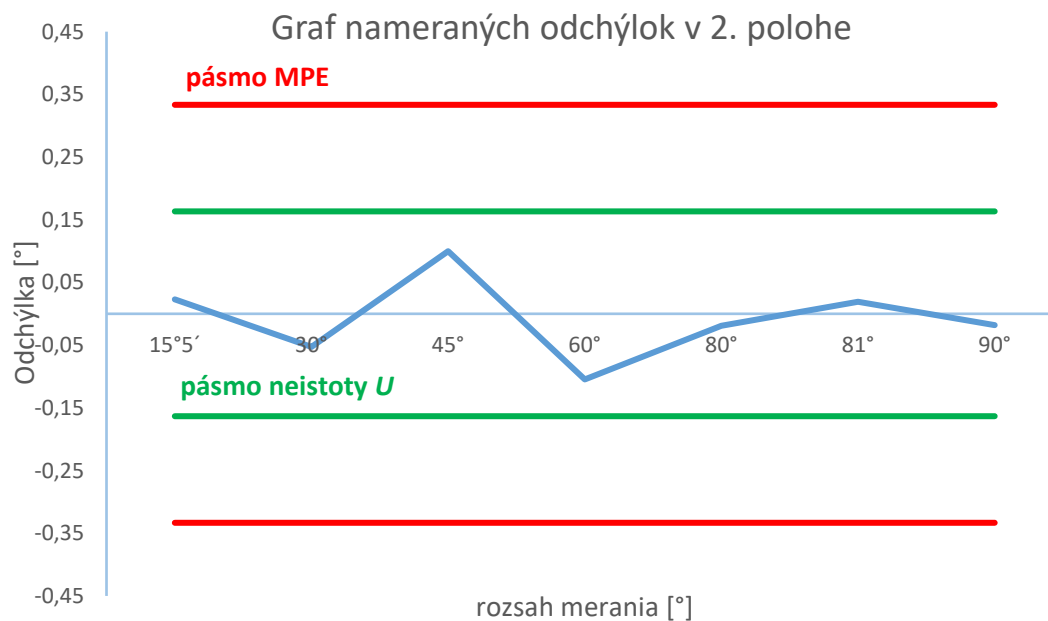


Pracoviště: Vysoké Učení Technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství,
Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky,
Odbor kvality, spolehlivosti a bezpečnosti, Technická 2896/2, 616 69 Brno

List 3 z 3 listov

Meranie v 2. polohe (s osou Y):

Menovitá hodnota uhla [° ' "]	Nameraná hodnota [° ' "]
15°5'	15° 6 ' 23"
30°	29° 56 ' 50"
45°	45° 5 ' 59"
60°	59° 53 ' 43"
80°	79° 58 ' 51"
81°	81° 1 ' 9"
90°	89° 58 ' 55"



Prehlásenie o zhode so špecifikáciou:

Namerané chyby CMM vyhovujú uvádzanej *MPE*.

Maximálna povolená chyba *MPE* = 0° 20'.



Pracoviště: Vysoké Učení Technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství,
 Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky,
 Odbor kvality, spoľehlivosti a bezpečnosti, Technická 2896/2, 616 69 Brno

KALIBRAČNÝ LIST

č.: KL-SOL-SHA-1

Dátum vystavenia:	23.5.2023	List 1 z 2 listov
Zákazník:	VUT v Brne, FSI, ÚVSSR, OKSB Technická 2896/2, 616 69 Brno	
Meradlo:	CMM SOL 311	
Výrobca:	MicroVu	
Identifikačné číslo:	SL31101329	
Rozsah:	(315x315x160) mm	
Metrolog. nadväznosť:	Merania sú metrologicky nadviazané na (medzi)národné etalóny	
Použité etalóny:		
<i>Názov:</i>	<i>Identifikačné číslo</i>	<i>Číslo KL</i>
prímerné pravítko oceľové	D107	6014-KL-F0186-23
nastavovací krúžok ø30, výrobca Einst	neuvadené	6014-KL-F0351-22
nastavovací krúžok ø90, výrobca Einst	neuvadené	6014-KL-F0353-22
nastavovací krúžok ø120, výrobca Einst	neuvadené	6014-KL-F0354-22
Kalibračný postup:	nešpecifikovaný	
Miesto kalibrácie:	laboratórium A1/1337, FSI VUT	
Podmienky prostredia:	Teplota vzduchu: (25,4 ± 0,5) °C	

Výsledky kalibrácie boli získané za podmienok a s použitím postupov uvedených v tomto kalibračnom liste a vzťahujú sa len k dobe a miestu vykonania kalibrácie.

Neistota merania: $U = \text{vid' výsledky kalibrácie}$

Štandardná neistota merania bola určená v súlade s dokumentom EA-4/02. Uvedená rozšírená neistota merania je súčinom štandardnej neistoty merania a koeficientu k , ktorý zodpovedá pravdepodobnosti pokrytia približne 95 %, čo pre normálne rozdelenie zodpovedá koeficientu rozšírenia $k = 2$.

Dátum kalibrácie: 2.5.2023 a 11.5.2023

Kalibráciu vykonal: Matúš Lipták



Pracoviště: Vysoké Učení Technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství,
Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky,
Odbor kvality, spolehlivosti a bezpečnosti, Technická 2896/2, 616 69 Brno

List 2 z 2 listov

Výsledky kalibrácie:

Meranie za použitia etalónov – pravítko:

Priamosť STRt	Nameraná hodnota [μm]	Neistota [μm]
1. poloha (strana A)	34,7	6,6
1. poloha (strana B)	33,6	12,0
2. poloha (strana A)	34,9	6,5
2. poloha (strana B)	39,4	14,0

Meranie za použitia etalónov – krúžky:

Etalón	Charakteristika	Nameraná hodnota	Neistota
Krúžok $\varnothing 30$	Priemer [mm]	29,999 3	0,002 0
	Kruhovitost' RONt [μm]	5,1	1,3
Krúžok $\varnothing 90$	Priemer [mm]	90,005 5	0,004 5
	Kruhovitost' RONt [μm]	6,6	1,2
Krúžok $\varnothing 120$	Priemer [mm]	120,004 7	0,005 8
	Kruhovitost' RONt [μm]	6,8	1,2



Pracoviště: Vysoké Učení Technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství,
Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky,
Odbor kvality, spolehlivosti a bezpečnosti, Technická 2896/2, 616 69 Brno

KALIBRAČNÝ LIST

č.: KL-ARM-ANG-1

Dátum vystavenia: 23.5.2023 List 1 z 3 listov
Zákazník: VUT v Brne, FSI, ÚVSSR, OKSB
Technická 2896/2, 616 69 Brno
Meradlo: CMM Kĺbové rameno (sonda 3mm)
Výrobca: Hexagon
Identifikačné číslo: 8725-6-8084-FA
Rozsah: 2500 mm
Metrolog. nadväznosť: Merania sú metrologicky nadviazané na
(medzi)národné etalóny

Použité etalóny:

Názov:	Identifikačné číslo	Číslo KL
súbor uhlových mierok, výrobca ČIZ	X127	6014-KL-F0185-23

Kalibračný postup: nešpecifikovaný
Miesto kalibrácie: laboratórium A1/1337, FSI VUT
Podmienky prostredia: Teplota vzduchu: $(25,8 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$

Výsledky kalibrácie boli získané za podmienok a s použitím postupov uvedených v tomto kalibračnom liste a vzťahujú sa len k dobe a miestu vykonania kalibrácie.

Neistota merania: $U = 0^\circ 10' 12''$

Štandardná neistota merania bola určená v súlade s dokumentom EA-4/02. Uvedená rozšírená neistota merania je súčinom štandardnej neistoty merania a koeficientu k , ktorý zodpovedá pravdepodobnosti pokrytia približne 95 %, čo pre normálne rozdelenie zodpovedá koeficientu rozšírenia $k = 2$.

Dátum kalibrácie: 20. - 21.4.2023
Kalibráciu vykonal: Matúš Lipták



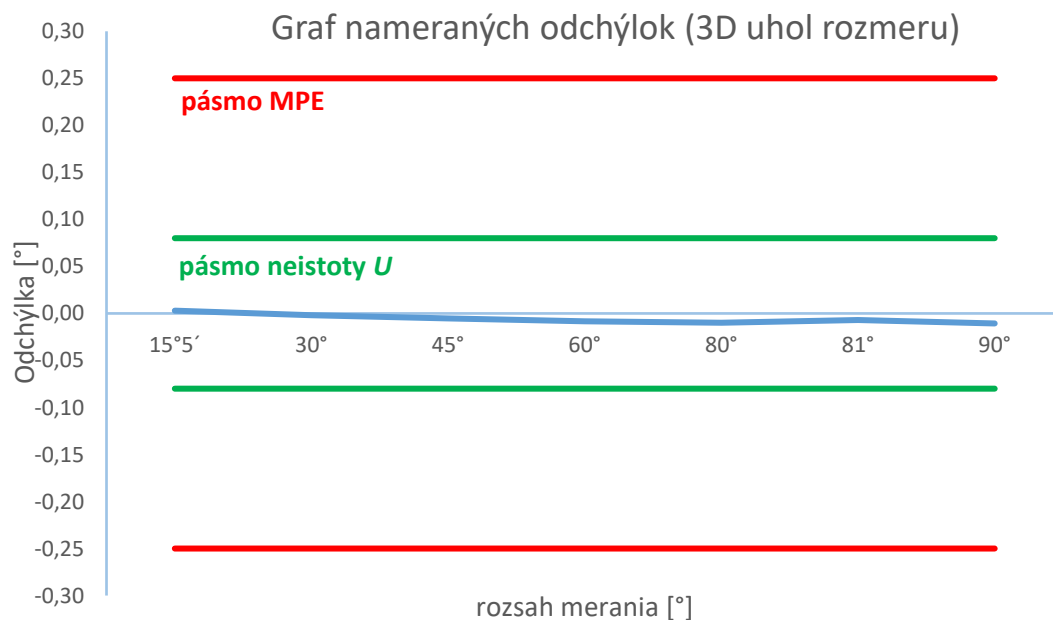
Pracoviště: Vysoké Učení Technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství,
Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky,
Odbor kvality, spolehlivosti a bezpečnosti, Technická 2896/2, 616 69 Brno

List 2 z 3 listov

Výsledky kalibrácie za použitia etalónov rovinného uhla:

Meranie 3D uhla rozmeru (2 roviny):

Menovitá hodnota uhla [° ' "]	Nameraná hodnota [° ' "]
15°5'	15° 5 ' 11"
30°	29° 59 ' 53"
45°	44° 59 ' 41"
60°	59° 59 ' 30"
80°	79° 59 ' 24"
81°	80° 59 ' 35"
90°	89° 59 ' 22"



Prehlásenie o zhode so špecifikáciou:

Namerané chyby CMM vyhovujú uvádzanej *MPE*.

Maximálna povolená chyba *MPE* = 0° 15'.



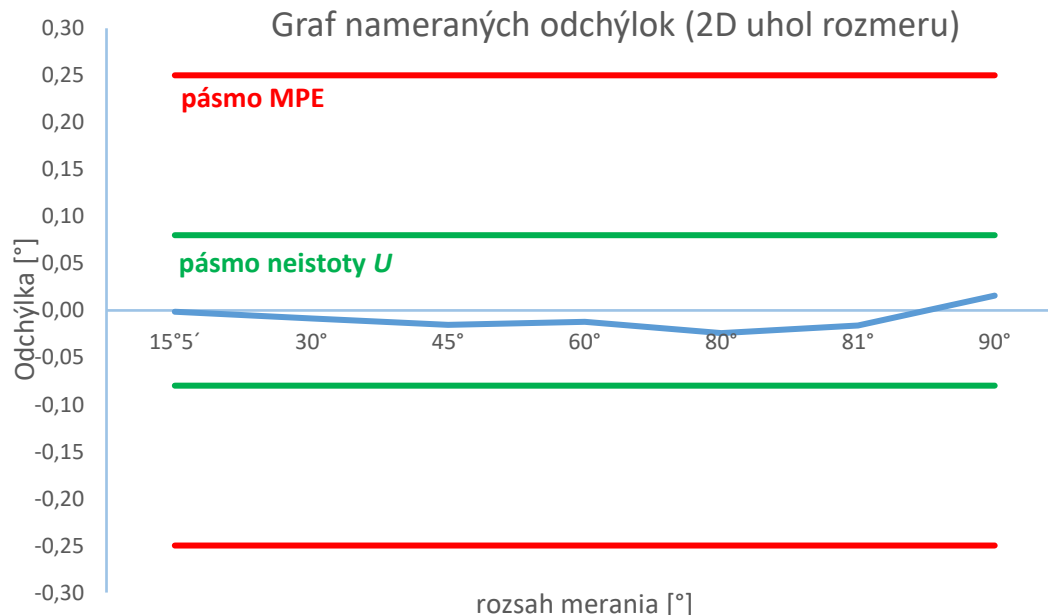
Pracoviště: Vysoké Učení Technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství,
Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky,
Odbor kvality, spolehlivosti a bezpečnosti, Technická 2896/2, 616 69 Brno

List 3 z 3 listov

Výsledky kalibrácie za použitia etalónov rovinného uhla:

Meranie 2D uhla rozmeru (2 priamky):

Menovitá hodnota uhla [° ' "]	Nameraná hodnota [° ' "]
15°5'	15° 4 ' 55"
30°	29° 59 ' 29"
45°	44° 59 ' 5"
60°	59° 59 ' 17"
80°	79° 58 ' 33"
81°	80° 59 ' 2"
90°	90° 0 ' 57"



Prehlásenie o zhode so špecifikáciou:

Namerané chyby CMM vyhovujú uvádzanej *MPE*.

Maximálna povolená chyba *MPE* = 0° 15'.



Pracoviště: Vysoké Učení Technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství,
 Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky,
 Odbor kvality, spolehlivosti a bezpečnosti, Technická 2896/2, 616 69 Brno

KALIBRAČNÝ LIST

č.: KL-ARM-SHA-1

Dátum vystavenia: 23.5.2023 List 1 z 2 listov

Zákazník: VUT v Brne, FSI, ÚVSSR, OKSB
 Technická 2896/2, 616 69 Brno

Meradlo: CMM Kľbové rameno (sonda 3mm)

Výrobca: Hexagon

Identifikačné číslo: 8725-6-8084-FA

Rozsah: 2500 mm

Metrolog. nadväznosť: Merania sú metrologicky nadviazané na
 (medzi)národné etalóny

Použitie etalóny:

Názov:	Identifikačné číslo	Číslo KL
prímerné pravítko oceľové	D107	6014-KL-F0186-23
nastavovací krúžok ø30, výrobca Einst	neuvedené	6014-KL-F0351-22
nastavovací krúžok ø90, výrobca Einst	neuvedené	6014-KL-F0353-22
nastavovací krúžok ø120, výrobca Einst	neuvedené	6014-KL-F0354-22

Kalibračný postup: nešpecifikovaný

Miesto kalibrácie: laboratórium A1/1337, FSI VUT

Podmienky prostredia: Teplota vzduchu: (24,7 ± 0,5) °C

Výsledky kalibrácie boli získané za podmienok a s použitím postupov uvedených v tomto kalibračnom liste a vzťahujú sa len k dobe a miestu vykonania kalibrácie.

Neistota merania: $U = \text{vid' výsledky kalibrácie}$

Štandardná neistota merania bola určená v súlade s dokumentom EA-4/02. Uvedená rozšírená neistota merania je súčinom štandardnej neistoty merania a koeficientu k , ktorý zodpovedá pravdepodobnosti pokrytia približne 95 %, čo pre normálne rozdelenie zodpovedá koeficientu rozšírenia $k = 2$.

Dátum kalibrácie: 13.5.2023, 15.5.2023 a 19.5.2023

Kalibráciu vykonal: Matúš Lipták



Pracoviště: Vysoké Učení Technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství,
Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky,
Odbor kvality, spolehlivosti a bezpečnosti, Technická 2896/2, 616 69 Brno

List 2 z 2 listov

Výsledky kalibrácie:

Meranie za použitia etalónov – pravítko:

Priamosť STRt	Nameraná hodnota [μm]	Neistota [μm]
strana A	5,4	1,6
strana B	7,5	1,5

Meranie za použitia etalónov – krúžky:

Etalón	Charakteristika	Nameraná hodnota	Neistota
Kružok $\varnothing 30$	Priemer [mm]	30,014 2	0,006 4
	Kruhovitost' RONt [μm]	17,3	4,5
Kružok $\varnothing 90$	Priemer [mm]	90,020 2	0,008 2
	Kruhovitost' RONt [μm]	15,3	3,4
Kružok $\varnothing 120$	Priemer [mm]	120,017 6	0,004 6
	Kruhovitost' RONt [μm]	13,1	2,3

Príloha I



Český metrologický institut

Okružní 31, 638 00 Brno

tel. +420 545 555 111

www.cmi.cz

Pracoviště: Oblastní inspektorát Brno, Okružní 31, 638 00 Brno

Oddělení primární nanometrologie a technické délky, tel. +420 545 555 111, fax +420 545 555 183

KALIBRAČNÍ LIST

6014-KL-F0185-23

Datum vystavení : 4. dubna 2023
Zákazník : VUT v Brně, FSI, ÚVSSR
Technická 2896/2, 616 00 Brno
Měřidlo : sada úhlových měrek
Výrobce : ČIZ
Identifikační číslo sady : X 127
Rozsah : (15 - 100)°
Metrolog. návaznost : Měření jsou metrologicky návazná na (mezi)národní etalony
Etalon : Souřadnicový měřicí stroj UPMC 850 CARAT, v.č. 115499
číslo KL 8582001902
Metoda měření : 815-MP-C503
Místo kalibrace : Oblastní inspektorát Brno, Okružní 31, 638 00 Brno
Podmínky měření : Teplota vzduchu (20,0 ± 0,5) °C
Nejistota měření : $U = 0^{\circ} 10'$

List 1 z 1 listu

Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA 4/02 M:2022. Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření k , který odpovídá pokrytí asi 95 %, což pro normální rozdělení odpovídá koeficientu $k = 2$.

Výrobní číslo měřky	Jmenovitá hodnota [° '"]	Naměřená hodnota [° '"]

neuveďeno	15°5'	15°55''
neuveďeno	30°	30°10'
neuveďeno	45°	45°10'
neuveďeno	60°	60°10'
neuveďeno	90°	90°15'
neuveďeno	80°	80°15'
neuveďeno	81°	81°15'
neuveďeno	99°	99°20'
neuveďeno	100°	100°20'

Výsledky kalibrace byly získány za podmínky a s použitím postupu uvedených v tomto kalibračním listě a vztahují se pouze ke kalibrovanému měřidlu a k době a místu provedení kalibrace.

Datum kalibrace : 3. - 4. 4. 2023

Kalibraci provedl:

Ing. Jan Šrámek, Ph.D.



Zástupce vedoucího oddělení:

Ing. Václav Duchoň

Tento dokument nesmí být bez písemného souhlasu provádějící laboratoře rozmnožován jinak než v celkovém počtu listů.



Český metrologický institut

Okružní 31, 638 00 Brno

tel. +420 545 555 111

www.cmi.cz



Kalibrační laboratoř č.2202 akreditovaná Českým institutem pro akreditaci, o.p.s. podle
ČSN EN ISO/IEC 17025:2018

Pracoviště: Oblastní inspektorát Brno, Okružní 31, 638 00 Brno

Oddělení primární nanometrologie a technické délky, tel. +420 545 555 111, fax +420 545 555 183

KALIBRAČNÍ LIST

6014-KL-F0186-23

Datum vystavení : 20. dubna 2023

List 1 ze 2 listů

Zákazník : VUT v Brně, FSI, ÚVSSR
Technická 2896/2, 616 00 Brno

Měřidlo : průměrné pravítko ocelové

Výrobce : neuveden

Identifikační číslo : D107

Rozsah : 300 mm

Metrolog. návaznos : Měření jsou metrologicky návazná na (mezi)národní etalony

Použité etalony : Kruhoměr Taylor Hobson TR 595 S, ev.č. 0009, Kal. list č.: 6014-KL-D0129-22

Kalibrační postup : 614-MP-C103

Podmínky měření : Teplota vzduchu (20,0 ± 0,5) °C

Nejistota měření : $U = 0,2 \mu\text{m}$

Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA 4/02 M:2022. Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření k , který odpovídá pokrytí asi 95 %, což pro normální rozdělení odpovídá koeficientu $k = 2$.

Výsledky kalibrace byly získány za podmínek a s použitím postupů uvedených v tomto kalibračním listě a vztahují se pouze ke kalibrovanému měřidlu a k době a místu provedení kalibrace.

Datum kalibrace : 19. - 20. 4. 2023

Kalibraci provedl:

Zástupce vedoucího oddělení:

Ing. Jan Šrámek, Ph.D.

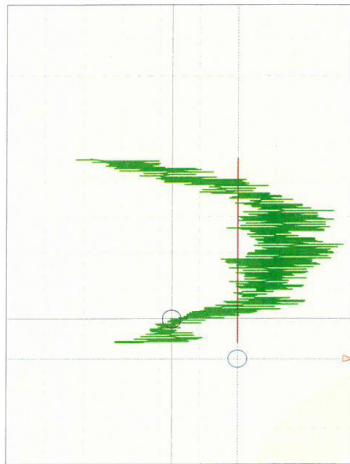


Ing. Václav Duchoň

Výsledky kalibrace:

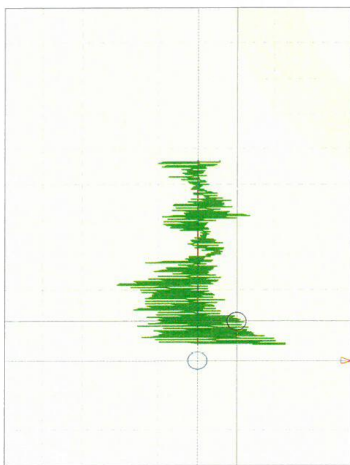
Grafy přímosti L500 mm:

strana A: přímost 3,46 μm



mikrometry

Strana B: přímost 4,37 μm



mikrometry

Aktuální bod
R -0,850 μm
Z 55,0 mm

Referenční bod
R 1903,000 μm
Z 0,0 mm

Rozdíl
delta R -1903,850 μm
delta Z 55,0 mm

Vybraná STRt
1,174 μm

Vertikální přímost		
prav300 D107_3 - 2		
STR/LS páčka/Gauss/2.5mm		
20.4.2023 13:00:00		
prav300 D107_3		
260mm/Admin/TR595S		
20.4.2023 13:02:33		
Specifikace		
Typ reference		LS páčka
Typ filtru		Gauss
Základní délka	2,5	mm
Základna		žádná
Parametry		
STRp (přímost - vstupek)	1,36	μm
STRv (přímost - prohlubeň)	2,10	μm
STRt (přímost)	3,46	μm
Podmínky		
Poloha R	23,200	mm
Poloha vřetene	358,9	mm
Počáteční poloha měření	22,501	mm
Délka dat	260	mm
Koncová poloha měření	282,501	mm
Směr měření		Z(+)
Poloha snímače		Horizontální
Směr kontaktu		R-
Snímač natočení	0	°

Aktuální bod
R 1,037 μm
Z 55,0 mm

Referenční bod
R 1903,000 μm
Z 0,0 mm



Rozdíl
delta R -1901,963 μm
delta Z 55,0 mm

Vybraná STRt
3,811 μm

Vertikální přímost		
prav300 D107_3 stranaB -1		
STR/LS páčka/Gauss/2.5mm		
20.4.2023 13:06:14		
prav300 D107_3 stranaB		
260mm/Admin/TR595S		
20.4.2023 13:07:38		
Specifikace		
Typ reference		LS páčka
Typ filtru		Gauss
Základní délka	2,5	mm
Základna		žádná
Parametry		
STRp (přímost - vstupek)	2,28	μm
STRv (přímost - prohlubeň)	2,09	μm
STRt (přímost)	4,37	μm
Podmínky		
Poloha R	18,356	mm
Poloha vřetene	176,7	mm
Počáteční poloha měření	22,499	mm
Délka dat	260	mm
Koncová poloha měření	282,499	mm
Směr měření		Z(+)
Poloha snímače		Horizontální
Směr kontaktu		R-
Snímač natočení	0	°

Konec kalibračního listu

Príloha K

	Český metrologický institut Okružní 31, 638 00 Brno tel. +420 545 555 111 www.cmi.cz		
---	--	---	---

Kalibrační laboratoř č.2202 akreditovaná Českým institutem pro akreditaci, o.p.s. podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2018

Pracoviště: Oblastní inspektorát Brno, Okružní 31, 638 00 Brno
Oddělení primární nanometrologie a technické délky, tel. +420 545 555 111, fax +420 545 555 183

KALIBRAČNÍ LIST

6014-KL-F0351-22

Datum vystavení : 24. srpna 2022 List 1 ze 3 listů

Zákazník : **VUT v Brně, FSI, ÚVSSR**
Technická 2896/29, 619 00 Brno

Měřidlo : Nastavovací kroužek
Výrobce : Einst
Identifikační číslo : neuveden
Rozsah : \varnothing 30 mm

Metrolog. návaznost : Měření jsou metrologicky návazná na (mezi)národní etalony
Kalibrační postup : 614-MP-C029 a 614-MP-C103
Místo kalibrace : Oblastní inspektorát Brno, Okružní 31, 638 00 Brno
Podmínky měření : Teplota vzduchu ($20,0 \pm 0,5$) °C
Nejistota měření : $U = (0,5 + 5L) \mu\text{m}$ pro průměr, L je měřený rozměr v metrech
 $U = (0,1 + 0,01R) \mu\text{m}$ pro kruhovitost, R je naměřená kruhovitost v μm
 $U = (0,3 + 0,03C) \mu\text{m}$ pro válcovitost, C je naměřená válcovitost v μm


Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA 4/02 M:2013. Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření k , který odpovídá pokrytí asi 95 %, což pro normální rozdělení odpovídá koeficientu $k = 2$.


Výsledky kalibrace


Průměr ve střední rovině ve vyznačeném směru (Dx) [mm]	30,000 4
Průměr ve střední rovině kolmo k vyznačenému směru (Dy) [mm]	30,000 6
Kruhovitost ve střední rovině [μm]	0,20
Válcovitost z devíti řezů kruhovitosti [μm]	0,74

Výsledky kalibrace byly získány za podmínky a s použitím postupu uvedených v tomto kalibračním listě a vztahují se pouze k době a místu provedení kalibrace.

Datum kalibrace : 24. 8. 2022

Kalibraci provedl: 
Ing. Jan Šrámek, Ph.D.

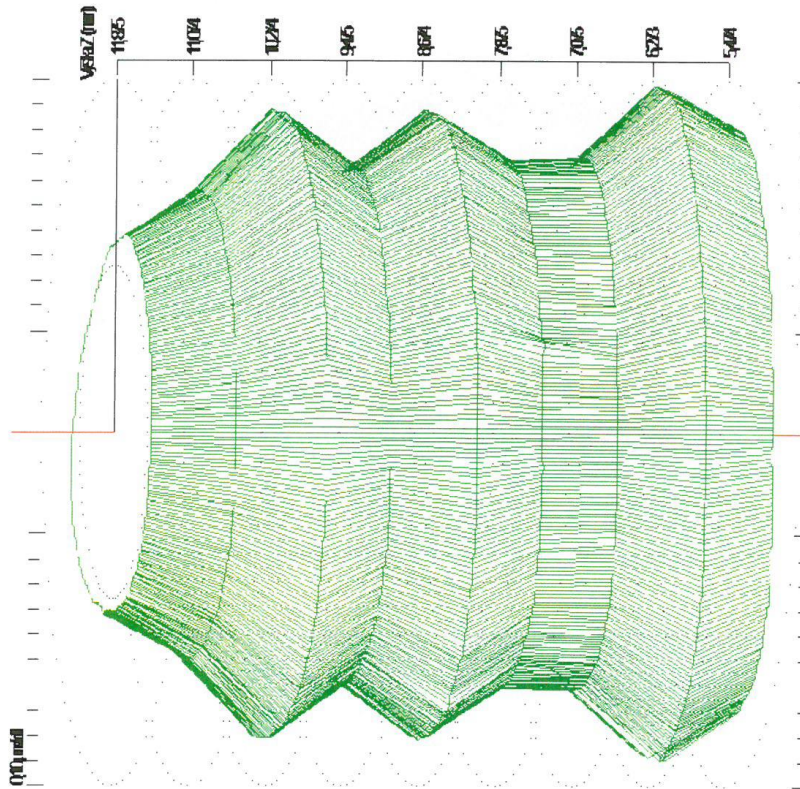


Zástupce vedoucího oddělení: 
Ing. Václav Duchoň

Tento dokument nesmí být bez písemného souhlasu provádějící laboratoře rozmnožován jinak než v celkovém počtu listů.

Výsledky měření válcovitosti v 9 řezech:

Válcovitost	
Kosa VJ1, 30mm, 10 řezů na 0,1mm ZAP - 1	
Kosa SV1, 30mm, 10 řezů na 0,1mm ZAP - 1	
4.8.2022 08:30:10	
K 30 End	
4.8.2022 08:30:01	
Typ reference	LS válec
Typ profilu	Gauss
1-50VC	
Zakázka	Masní
Průměr řez1	9
CM1 (válcovitost, vchupě)	Parametry 0.3
	μm
CM2 (válcovitost, protluh)	0.3
	μm
CM3 (válcovitost)	0.74
	μm
Základní profil	99.7
	μm
Polohy	Vertikál
Polohy	R+



Pozn.: spodní řez - 1mm nad okrajem, střední řez - střední rovina, horní řez - 1mm pod okrajem

Český metrologický institut
 Oblastní inspekce Brno
 Okružní 31
 638 00 Brno
 -3-

Konec kalibračního listu

Tento dokument nesmí být bez písemného souhlasu provádějící laboratoře rozmnožován jinak než v celkovém počtu listů.

Príloha L

	Český metrologický institut Okružní 31, 638 00 Brno tel. +420 545 555 111 www.cmi.cz		
--	--	--	--

Kalibrační laboratoř č.2202 akreditovaná Českým institutem pro akreditaci, o.p.s. podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2018

Pracoviště: Oblastní inspektorát Brno, Okružní 31, 638 00 Brno
Oddělení primární nanometrologie a technické délky, tel. +420 545 555 111, fax +420 545 555 183

KALIBRAČNÍ LIST

6014-KL-F0353-22

Datum vystavení : 24. srpna 2022 List 1 ze 3 listů

Zákazník : **VUT v Brně, FSI, ÚVSSR**
Technická 2896/29, 619 00 Brno

Měřidlo : Nastavovací kroužek
Výrobce : Einst
Identifikační číslo : neuveden
Rozsah : \varnothing 90 mm

Metrolog. návaznost : Měření jsou metrologicky návazná na (mezi)národní etalony
Kalibrační postup : 614-MP-C029 a 614-MP-C103
Místo kalibrace : Oblastní inspektorát Brno, Okružní 31, 638 00 Brno
Podmínky měření : Teplota vzduchu ($20,0 \pm 0,5$) °C
Nejistota měření : $U = (0,5 + 5L) \mu\text{m}$ pro průměr, L je měřený rozměr v metrech
 $U = (0,1 + 0,01R) \mu\text{m}$ pro kruhovitosť, R je naměřená kruhovitosť v μm
 $U = (0,3 + 0,03C) \mu\text{m}$ pro válcovitosť, C je naměřená válcovitosť v μm

Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA 4/02 M:2013. Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření k , který odpovídá pokrytí asi 95 %, což pro normální rozdělení odpovídá koeficientu $k = 2$.

Výsledky kalibrace :

Průměr ve střední rovině ve vyznačeném směru (Dx) [mm]	90,002 2
Průměr ve střední rovině kolmo k vyznačenému směru (Dy) [mm]	90,002 6
Kruhovitosť ve střední rovině [μm]	0,43
Válcovitosť z 10 řezů kruhovitosti [μm]	1,68

Výsledky kalibrace byly získány za podmínek a s použitím postupu uvedených v tomto kalibračním listě a vztahují se pouze k době a místu provedení kalibrace.

Datum kalibrace : 24. 8. 2022

Kalibraci provedl:
Ing. Jan Šrámek, Ph.D.

Zástupce vedoucího oddělení:
Ing. Václav Duchoň

Tento dokument nesmí být bez písemného souhlasu provádějící laboratoře rozmnožován jinak než v celkovém počtu listů.

Príloha M

	Český metrologický institut Okružní 31, 638 00 Brno tel. +420 545 555 111 www.cmi.cz		
--	--	--	--

Kalibrační laboratoř č.2202 akreditovaná Českým institutem pro akreditaci, o.p.s. podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2018

Pracoviště: Oblastní inspektorát Brno, Okružní 31, 638 00 Brno
Oddělení primární nanometrologie a technické dílky, tel. +420 545 555 111, fax +420 545 555 183

KALIBRAČNÍ LIST

6014-KL-F0354-22

Datum vystavení	: 24. srpna 2022	List 1 ze 3 listů
Zákazník	: VUT v Brně, FSI, ÚVSSR Technická 2896/29, 619 00 Brno	
Měřidlo	: Nastavovací kroužek	
Výrobce	: Einst	
Identifikační číslo	: neuvedeno	
Rozsah	: \varnothing 120 mm	
Metrolog. návaznost	: Měření jsou metrologicky návazná na (mezi)národní etalony	
Kalibrační postup	: 614-MP-C029 a 614-MP-C103	
Místo kalibrace	: Oblastní inspektorát Brno, Okružní 31, 638 00 Brno	
Podmínky měření	: Teplota vzduchu $(20,0 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$	
Nejistota měření	: $U = (0,5 + 5L) \mu\text{m}$ pro průměr, L je měřený rozměr v metrech $U = (0,1 + 0,01R) \mu\text{m}$ pro kruhovitost, R je naměřená kruhovitost v μm $U = (0,3 + 0,03C) \mu\text{m}$ pro válcovitost, C je naměřená válcovitost v μm	

Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA 4/02 M:2013. Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření k , který odpovídá pokrytí asi 95 %, což pro normální rozdělení odpovídá koeficientu $k = 2$.

Výsledky kalibrace	: Průměr ve střední rovině ve vyznačeném směru (Dx) [mm]	120,000 3
	: Průměr ve střední rovině kolmo k vyznačenému směru (Dy) [mm]	120,000 5
	: Kruhovitost ve střední rovině [μm]	1,94
	: Válcovitost z 11 řezů kruhovitostí [μm]	1,54

Výsledky kalibrace byly získány za podmínek a s použitím postupu uvedených v tomto kalibračním listě a vztahují se pouze k době a místu provedení kalibrace.

Datum kalibrace :	24. 8. 2022	Zástupce vedoucího oddělení:
Kalibraci provedl:		
Ing. Jan Šrámek, Ph.D.		Ing. Václav Duchoň

Tento dokument nesmí být bez písemného souhlasu provádějící laboratoře rozmnožován jinak než v celkovém počtu listů.

