



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

PROGRAMOVÁNÍ MĚŘICÍCH OPERACÍ PROSTŘEDNICTVÍM SOFTWARE CALYPSO FIRMY ZEISS

PROGRAMMING OF MEASUREMENT OPERATIONS THROUGH ZEISS CALYPSO SOFTWARE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Marcel Machara

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Bc. Marcel Machara
Studijní program:	Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	Ing. Aleš Polzer, Ph.D.
Akademický rok:	2023/24

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:

Programování měřicích operací prostřednictvím softwaru Calypso firmy Zeiss

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Programování měřicích operací prostřednictvím softwaru Calypso firmy Zeiss je možné různými způsoby. Přímé programování objektů kreslených v softwaru Calypso, nebo import 3D modelu z CAD softwaru, anebo např. využívání PMI dat z CAD modelů, které snižuje obtížnost a zefektivňuje tvorbu měřicího programu pro CMM stroje.

Každá u zvedených metod má svou oblast použití. Pro analyzování a definování výhod/nevýhod je prostor v této závěrečné práci.

Cíle diplomové práce:

Systémový rozbor řešené problematiky.

Vytvoření základní technické dokumentace k navrženému obrobku.

Měření vybraných parametrů obrobku.

Zdůvodnění zvoleného způsobu měření a posouzení dosažených výsledků.

Vlastní závěry a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

ČSN EN ISO 1101. Geometrické specifikace produktu (GPS) - Geometrické tolerování – Tolerance tvaru, orientace, umístění a házení. Praha: Český normalizační institut, 2020, 178 s. Třídící znak 014120.

PETR, Karel. Geometrické tolerance dle ISO GPS. Praha: Verlag Dashöfer, 2019. ISBN 978-80-7635-019-9.

KUDELA, M. Příručka obrábění: kniha pro praktiky. Praha: Sandvik CZ a Scientia, 1997, 857 s. ISBN 91-972299-4-6.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Táto diplomová práca sa zaoberá problematikou merania na 3D súradnicových meracích strojoch, a s tým súvisiacim programovaním meracích operácií v softvéri Calypso od spoločnosti ZEISS. Prvá časť práce je venovaná systému ISO GPS. Druhá časť práce sa venuje súradnicovým meracím strojom a základným princípom programovania meracích operácií.

Praktická časť práce je zameraná na vytvorenie programu merania testovacieho obrobku HSC obrábacích strojov. V tejto časti je vypracovaná základná technická dokumentácia a je vytvorený program merania obrobku. Po vykonaní merania na 3D súradnicovom stroji ZEISS ECLIPSE 1000 sú namerané hodnoty spracované a vyhodnotené. V rámci vybraných charakteristík obrobku je znázornené štatistické vyhodnotenie nameraných hodnôt spolu s posúdením zhody so špecifikáciou podľa normy ČSN EN ISO 14253-1:2023.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the issue of measurement on 3D coordinate measuring machines and the related programming of measurement operations in Calypso software from ZEISS. The first part of the thesis deals with the ISO GPS system. The second part of the thesis deals with coordinate measuring machines and basic principles of programming measuring operations.

The practical part of the thesis is focused on creating a program for measuring the test workpiece of HSC milling machines. In this part, the basic technical documentation is developed and the workpiece measurement program is created. After the measurement on the 3D coordinate machine ZEISS ECLIPSE 1000, the measured values are processed and evaluated. Within the selected characteristics of the workpiece, the statistical evaluation of the measured values is shown together with the assessment of conformity with the specification according to the standard ČSN EN ISO 14253-1:2023.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Programovanie meracích operácií, súradnicový merací stroj, ZEISS Calypso, geometrické špecifikácie produktu, ISO GPS, meranie súčasti na 3D súradnicovom meracom stroji, posudzovanie zhody so špecifikáciou, testovací obrobok HSC obrábacích strojov

KEYWORDS

Programming of measurement operations, coordinate measuring machine CMM, ZEISS Calypso, geometric product specifications, ISO GPS, measuring the part on the 3D CMM, assessment of conformity with the specification, test workpiece of the HSC milling machines

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

MACHARA, Marcel. Programování měřicích operací prostřednictvím softwaru Calypso firmy Zeiss. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157077>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Aleš Polzer.

POĎAKOVANIE

Touto cestou by som chcel vyjadriť poďakovanie vedúcemu tejto diplomovej práce Ing. Alešovi Polzerovi, Ph.D., za mnoho odborných rád k riešenej problematike, vecné pripomienky počas konzultácií, ochotu a čas strávený dohľadom nad prácou, a za ústretové vedenie práce.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojim pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Aleša Polzera, Ph.D. a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brne dňa 24. mája 2024

.....

Machara Marcel

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	SÚČASNÝ STAV POZNANIA	17
2.1	Geometrická špecifikácia produktu ISO GPS	17
2.1.1	Tolerancie	18
2.1.2	Rozmerové tolerancie	21
2.1.3	Geometrické tolerancie	24
2.2	Metodika vyhodnotenia výsledkov merania	33
2.2.1	Chybový prístup	34
2.2.2	Neistotový prístup	36
2.3	Posudzovanie zhody so špecifikáciou	38
2.4	Súradnicový merací stroj (CMM)	40
2.4.1	Základné mechanické prvky CMM	41
2.4.2	Snímacie systémy CMM	43
2.5	Programovanie meracích operácií	46
2.5.1	Offline programovanie	48
2.5.2	Metódy programovania meracích operácií	49
2.5.3	Tvorba meracieho programu	50
2.5.4	Stratégie merania	52
3	SYSTÉMOVÝ ROZBOR RIEŠENEJ PROBLEMATIKY	59
3.1	Testovací obrobok HSC strojov podľa normy VDI/NGC 5211:2013	59
3.2	Testovací obrobok spoločnosti DATRON	61
3.2.1	Materiál obrobku	61
3.2.2	Postup obrábania	62
3.3	Tvorba plánu merania na CMM	63
3.4	Návrh postupu riešenia	64
3.5	ZEISS ECLIPSE 1000	64
4	MERANIE VYBRANÝCH PARAMETROV OBROBKU	67
4.1	Programy merania	67
4.1.1	Program merania obrobku po dokončovacích operáciách	67
4.1.2	Ostatné programy merania	72
4.2	Vplyv stratégie na výsledné hodnoty merania	73
4.3	Meranie vybraných parametrov obrobkov	74
4.4	Posúdenie zhody vybraných parametrov obrobku	79
5	POSÚDENIE DOSIAHNUTÝCH VÝSLEDKOV	85
6	DOPORUČENIE PRE PRAX	89
7	ZÁVER	91
8	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	93
9	ZOZNAM SKRATIEK, SYMBOLOV A TABULIEK	95
9.1	Zoznam skratiek a symbolov	95
9.2	Zoznam tabuliek	97
9.3	Zoznam obrázkov	98
10	ZOZNAM PRÍLOH	101

1 ÚVOD

Vzhľadom k neustálemu zvyšovaniu požiadaviek na kvalitu produktov predstavuje neoddeliteľnú súčasť výroby proces merania a kontroly jednotlivých dielov. Zaistenie kvality produkcie je jedným z najdôležitejších faktorov ovplyvňujúcich konkurencieschopnosť podnikov. Cieľom procesu kontroly je včasné a hospodárne zistenie odchýlok skutočných produktov od ich ideálnych geometrických vlastností. Nezhody so špecifikáciou tolerovaných geometrických parametrov môžu mať negatívny vplyv na funkciu a kvalitu produktov. Jednotlivým špecifikáciám produktu sa dôkladne venuje systém ISO GPS, ktorý je rozobraný v samostatnej časti tejto práce. Na overenie zhody s predpísanými požiadavkami súčastí je nevyhnutné správne a predovšetkým presné meranie.

V súčasnej dobe sa na zaistovanie kvality v modernom priemysle využívajú okrem iných metód aj súradnicové meracie stroje (CMM z anglického *Coordinate Measuring Machine*). Rýchly vývoj a rozšírenie uplatnenia CMM v praxi súvisí s potrebou spoločností držať krok procesu kontroly so spresňovaním a zrýchľovaním výrobných procesov. Tieto meracie stroje vynikajú vysokou produktivitou, presnosťou, univerzálnym použitím a možnosťou vysokého stupňa automatizácie merania a kontroly súčastí. Použitie CMM umožňuje zmerať takmer všetky typy výrobkov, vrátane tvarovo veľmi komplikovaných dielov.

Meranie špecifikácií produktov na CMM prebieha s podporou špecializovaných počítačových softvérov. Jedným z takýchto softvérov je aj program Calypso od spoločnosti ZEISS, ktorý slúži na podporu merania so súradnicovými meracími strojmi značky ZEISS. Pred samotným meraním na CMM je v rámci týchto softvérov potrebné vytvoriť program merania, na základe ktorého bude súradnicový stroj snímať body na povrchu súčastí v CNC režime. Pri tvorbe programu merania definuje užívateľ jednotlivé elementy určené k snímaniu, stanovuje požadované charakteristiky týchto elementov a nastavuje mnoho ďalších faktorov merania. Proces programovania meracích operácií výrazne ovplyvňuje presnosť merania. Z toho dôvodu by mal byť pri tvorbe programu kladený dôraz na správnosť zvoleného postupu. Najzásadnejší vplyv na presnosť výsledku merania má voľba stratégie snímania a vyhodnotenia jednotlivých elementov.

V rámci tejto práce je vytvorený program na meranie a vyhodnotenie charakteristík testovacieho obrobku HSC frézy od spoločnosti DATRON. Tento testovací obrobok obsahuje geometrické prvky, na základe ktorých sa testuje spôsobilosť HSC obrábacích strojov. Po vykonaní merania podľa vytvorených programov na 3D súradnicovom stroji ZEISS ECLIPSE 1000 sú namerané hodnoty spracované a vyhodnotené. V rámci vybraných charakteristík obrobku je znázornené aj štatistické vyhodnotenie nameraných hodnôt spolu s posúdením zhody so špecifikáciou podľa normy ČSN EN ISO 14253-1:2023.

2 SÚČASNÝ STAV POZNANIA

2.1 Geometrická špecifikácia produktu ISO GPS

Systém ISO GPS (*Geometrical Product Specifications*) je medzinárodne uznávaný koncept pokrývajúci všetky požiadavky uvedené na technickom výkrese. Používa sa k popisu charakteristík súčasti počas rôznych etáp jeho životného cyklu. Zahŕňa všetky súvisiace zásady overovania požadovaných vlastností, vrátane meracích prístrojov a ich kalibrácie. V súčasnosti pozostáva z deviatich základných geometrických vlastností: [1]

- 1 rozmer,
- 2 vzdialenosť,
- 3 tvar,
- 4 orientácia,
- 5 umiestnenie,
- 6 hádzanie,
- 7 profil textúry povrchu,
- 8 plocha textúry povrchu,
- 9 nedokonalosti povrchu.

Koncepcia ISO GPS je realizovaná prostredníctvom ISO noriem vzťahujúcich sa k jednotlivým geometrickým vlastnostiam. Tieto normy sú zoskupené do súboru deviatich kategórií, kde každá kategória zahŕňa všetky normy ISO GPS vzťahujúce sa ku konkrétnej geometrickej vlastnosti. Jednotlivé kategórie je možné rozdeliť do reťazcov noriem, kde každý reťazec obsahuje všetky normy vzťahujúce sa na konkrétnu sekciu kategórie geometrických vlastností. Normy týkajúce sa konkrétnej funkcie v špecifikácii alebo overenia geometrických vlastností sa nazývajú články reťazca. V súčasnosti existuje sedem článkov reťazca, ktoré sú označované písmenami A až G: [1]

- článok reťazca A: Značky a indikácie,
- článok reťazca B: Požiadavky prvku,
- článok reťazca C: Vlastnosti prvku,
- článok reťazca D: Zhoda a nezhoda,
- článok reťazca E: Meranie,
- článok reťazca F: Meracie zariadenie,
- článok reťazca G: Kalibrácia.

Súbor deviatich kategórií geometrických vlastností a siedmich článkov reťazca vytvára maticový model noriem ISO GPS (zobrazený v tab. 1). Jeden reťazec predstavuje všetky vzájomne závislé normy, ktoré sa týkajú jednej geometrickej vlastnosti. Každá norma týkajúca sa ISO GPS je súčasťou určitého článku reťazca a musí obsahovať tabuľku maticového modelu noriem ISO GPS s vyznačenou polohou pôsobnosti. Maticový zápis predstavuje prehľadný spôsob značenia, ktorých článkov reťazca, respektíve geometrických vlastností sa daná norma týka. [1]

Tab. 1) Maticový model noriem ISO GPS [1]

Geometrická vlastnosť	Článok reťazca						
	A Značky a indikácie	B Požiadavky prvku	C Vlastnosti prvku	D Zhoda a nezhoda	E Meranie	F Meracie zariadenie	G Kalibrácia
Rozmer							
Vzdialenosť							
Tvar							
Orientácia							
Umiestnenie							
Hádzanie							
Profil textúry povrchu							
Plocha textúry povrchu							
Nedokonalosti povrchu							

Normy ISO GPS sa rozdeľujú do troch základných skupín: [1]

- základné normy – normy definujúce pravidlá a zásady, ktoré sa vzťahujú na všetky kategórie a články reťazca v matici ISO GPS,
- všeobecné normy – normy vzťahujúce sa na jednu alebo viacero kategórií geometrických vlastností a na jeden alebo viac článkov reťazca,
- doplnkové normy – normy vzťahujúce sa k výrobným procesom alebo k strojným prvkom.

2.1.1 Tolerancie

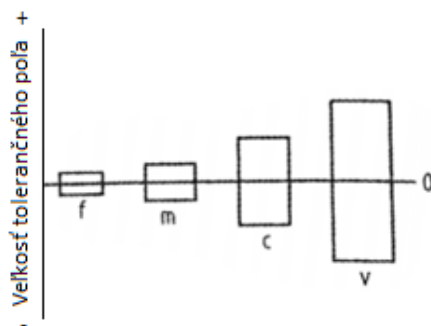
Variabilita je pri realizácii produktov nevyhnutelná, nakoľko nie je možné vyrobiť dokonale presné súčasti. V dizajnovvej fáze tvorby produktu musia konštruktéri okrem špecifikácie ideálnej geometrie stanoviť aj limity variability (tolerancie), ktoré musia jednotlivé prvky súčastí spĺňať, aby bola zachovaná ich správna funkcia. [2]

Tolerancia je rozdiel medzi horným medzným rozmerom a dolným medzným rozmerom. Tolerančné pole predstavuje priestor charakterizovaný toleranciou a určený jednou alebo dvomi geometricky ideálnymi čiarami, respektíve povrchmi. Tento priestor môže byť vymedzený kruhom, medzikružím, valcom, guľou, priestorom medzi dvoma rovnobežnými priamkami, rovnobežnými rovinami, súosovými valcami, ekvidistantnými čiarami alebo ekvidistantnými plochami. Tolerancie sa vo všeobecnosti rozdeľujú na všeobecné, závislé a nezávislé. [3]

Všeobecné tolerancie

Všeobecné tolerancie geometrických charakteristík sa vzťahujú na prvky súčastí, ktoré nemajú predpísané konkrétne tolerancie. Na takéto prvky nie je požadovaná špecifická presnosť, keďže sa zvyčajne priamo nepodieľajú na funkcii súčasti a nie sú v priamom kontakte s inými súčastami.

Všeobecné tolerancie pre dĺžkové a uhlové rozmery udávajú medzné odchýlky pre dĺžkové a uhlové rozmery, u ktorých nie je predpísaná tolerancia menovitej hodnoty. Pre dĺžkové a uhlové rozmery rozlišujeme štyri triedy presnosti všeobecných tolerancií (obr. 1), a to: f – jemná; m – stredná; c – hrubá; v – veľmi hrubá. Medzné odchýlky jednotlivých tried sú symetrické k menovitému rozmeru prvku. Použitie všeobecných geometrických a rozmerových tolerancií je nutné uviesť v popisnom poli výkresu alebo v jeho blízkosti. [6]



Obr. 1) Triedy presnosti všeobecných tolerancií dĺžkových a uhlových rozmerov [6]

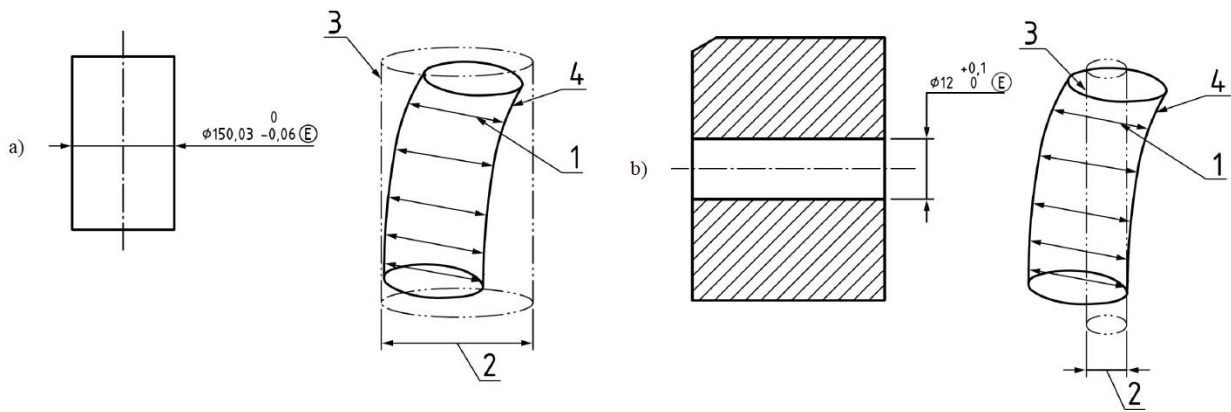
Závislé tolerancie

K zabezpečeniu funkcie a zameniteľnosti súčastí je možné predpísanie vzájomnej závislosti rozmerových a geometrických tolerancií, inak povedané použitie závislých tolerancií. Táto závislosť je na výkresoch súčastí predpísaná pomocou modifikátorov. K závislým toleranciám patrí: [6]

a) Požiadavka obalovej plochy (E)

Predpis požiadavky obalovej plochy stanovuje závislosť medzi toleranciou rozmeru a toleranciou tvaru. Požaduje kontrolovať obalovú plochu, ktorá má ideálny geometrický tvar a jej rozmer je rovný rozmeru kontrolovaného prvku na maxime materiálu. U vonkajších rozmerových prvkov (prvky s charakterom hriadeľa) je pri požiadavke obalovej plochy nutná kontrola horného medzného rozmeru pomocou opísanej obalovej plochy presného geometrického tvaru. U vnútorných rozmerových prvkov (prvky s charakterom diery) je naopak pri požiadavke obalovej plochy nutná kontrola dolného medzného rozmeru pomocou vpísanej obalovej plochy presného geometrického tvaru. Požiadavka obalovej plochy sa najčastejšie predpisuje na prvky súčastí tvoriace po montáži uloženie. [4, 6]

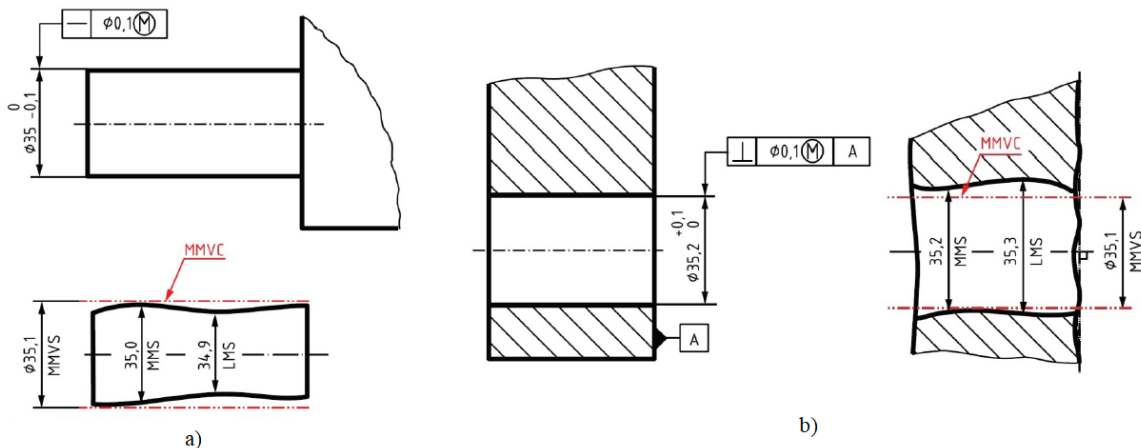
Na obr. 2) vidno, že špecifikácia požiadavky obalovej plochy sa predpisuje veľkým písmenom E v krúžku. Na zobrazení interpretácie sú znázornené dvojbodové rozmery (1), priemer valcovej obálky (2), valcová obálka (3) a extrahovaný integrálny prvok (4).



Obr. 2) Špecifikácia a interpretácia požiadavky obalovej plochy pre: a) vonkajší prvok, b) vnútorný prvok (upravené podľa [4])

b) Požiadavka maxima materiálu (M)

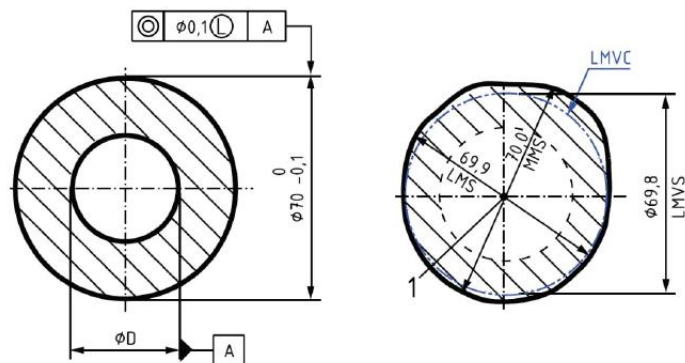
Požiadavka maxima materiálu, označovaná aj ako MMR (*maximum material requirement*), umožňuje v závislosti na skutočnom rozmere prvku zväčšenie predpísanej geometrickej tolerancie pri zachovaní zameniteľnosti súčasti. Princíp spočíva v tom, že ak skutočný rozmer nedosahuje rozmeru maxima materiálu, môže sa geometrická tolerancia rozmerových prvkov zväčšiť na úkor rozmerovej tolerancie. Predpísaná hodnota sa môže zvýšiť o hodnotu rozdielu medzi skutočným rozmerom a hranicou maxima materiálu. Na obr. 3) sú uvedené príklady možného zápisu MMR a k nim zodpovedajúce grafické znázornenie ich interpretácie. Využitie požiadavky maxima materiálu vedie k uľahčeniu výroby, pričom nie je ohrozená zameniteľnosť a zmontovateľnosť súčiastok. [6]



Obr. 3) Príklad použitia indikácie požiadavky MMR na výkrese a jej interpretácia: a) vonkajší valcový prvok, b) vnútorný valcový prvok (upravené podľa [7])

c) Požiadavka minima materiálu (L)

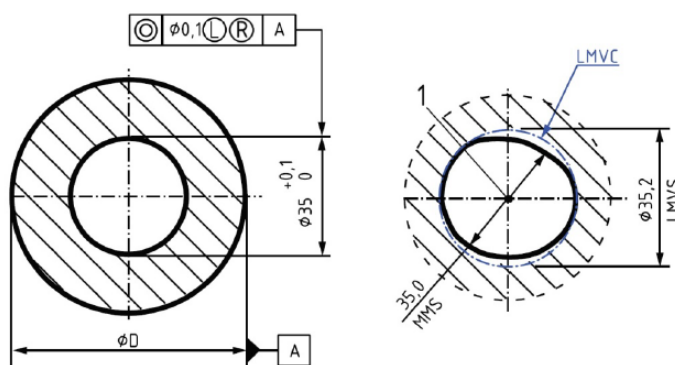
Požiadavka minima materiálu, označovaná aj ako LMR (*least material requirement*), povoľuje podobne ako MMR zväčšenie geometrickej tolerancie. Ak skutočný rozmer nedosahuje rozmeru minima materiálu, je možné predpísanú geometrickú toleranciu zväčšiť o hodnotu zodpovedajúcu rozdielu medzi skutočným rozmerom prvku a rozmerom na minime materiálu. Príklad zápisu a zodpovedajúca interpretácia je graficky znázornená na obr. 4). [6]



Obr. 4) Príklad použitia indikácie požiadavky LMR na výkrese a jej interpretácia [7]

d) Požiadavka reciprocitu (R)

Požiadavka reciprocitu, označovaná aj ako RPR (*reciprocity requirement*), sa používa ako doplnkový modifikátor za požiadavkou maxima materiálu alebo minima materiálu. RPR možno charakterizovať ako inverznú funkciu k požiadavke maxima alebo minima materiálu. Využíva sa v prípadoch, kedy je s ohľadom na funkciu súčasti dovolené zväčšenie tolerancie rozmeru. Toleranciu rozmeru je možné zväčšiť o rozdiel medzi predpísanou geometrickou toleranciou tvaru alebo polohy a skutočnou geometrickou odchýlkou. Príklad zápisu požiadavky reciprocitu a jej grafická interpretácia je zobrazená na obr. 5). [6]



Obr. 5) Príklad použitia indikácie požiadavky RPR na výkrese a jej interpretácia [7]

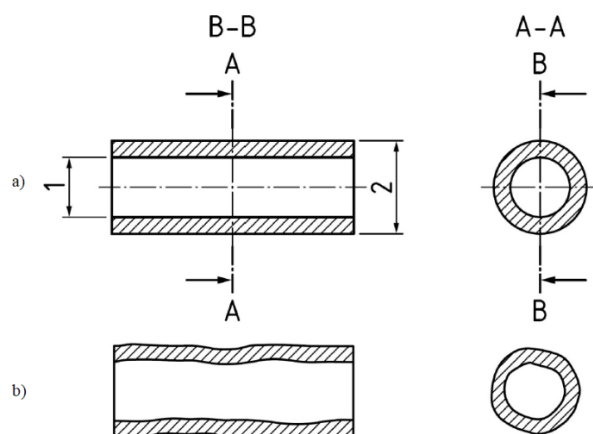
Nezávislé tolerancie

Vzťahy medzi rozmerovými a geometrickými toleranciami vymedzuje princíp nezávislosti, na základe ktorého sa rozmerové a geometrické tolerancie merajú a vyhodnocujú celkom nezávisle.

2.1.2 Rozmerové tolerancie

Rozmer

Rozmer je definovaný ako vlastná charakteristika rozmerového prvku, ktorá môže byť určená na menovitom alebo priradenom prvku. Rozmer je lineárny alebo uhlový. Lineárny rozmer zodpovedá priemeru valcového prvku alebo vzdialenosti dvoch paralelných protiľahlých rovín, protiľahlých priamok alebo sústredných kružníc. Uhlový rozmer predstavuje rozmer kužeľa, rozmer medzi dvoma protiľahlými priamkami alebo medzi dvoma protiľahlými nerovnoběžnými rovinami. Na obr. 6) je znázornený ideálny tvar súčasti v kontraste s extrahovaným integrálnym prvkom. Lineárny rozmer môže byť vyjadrený ako miestna alebo globálna charakteristika. [4, 5]



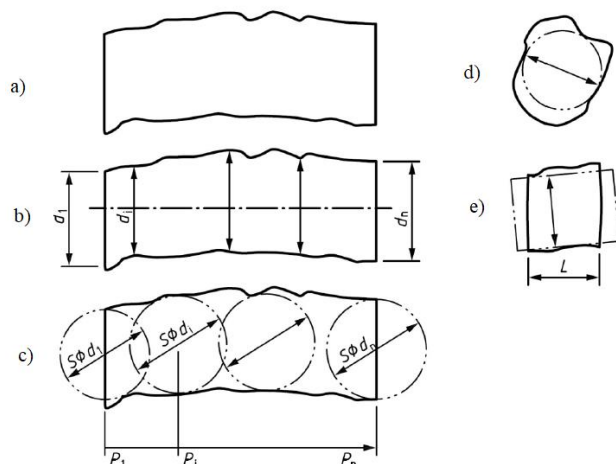
Obr. 6) Príklad lineárneho rozmerového prvku zostaveného z valca:
a) menovitý rozmerový prvok, b) extrahovaný prvok [4]

Miestna rozmerová charakteristika nemá z definície jedinečný výsledok hodnotenia pozdĺž alebo okolo rozmerového prvku. Pre daný prvok existuje nekonečne mnoho výsledkov. K miestnym lineárnym rozmerom, zobrazeným na obr. 7), patria: [4]

- dvojbodový rozmer – vzdialenosť medzi dvoma protíahlými bodmi na extrahovanom integrálnom prvku,
- rozmer prierezu – globálny rozmer pre daný pričný prierez extrahovaného integrálneho prvku,
- čiastkový rozmer – globálny rozmer danej časti extrahovaného prvku,
- sférický rozmer – priemer maximálnej vpísanej gule.

K miestnym uhlovým rozmerom patria: [5]

- dvojčiarový rozmer – uhol medzi dvoma priamkami zostrojenými z dvoch extrahovaných čiar získaných z prieniku priesečnou rovinou a uhlového prvku,
- čiastkový rozmer – globálny uhlový rozmer danej časti extrahovaného prvku.



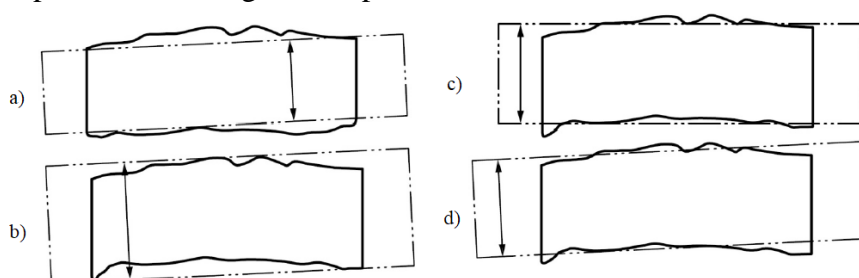
Obr. 7) Miestne rozmery: a) extrahovaný prvok, b) dvojbodové rozmery,
c) sférické rozmery, d) rozmer prierezu, e) čiastkový rozmer [4]

Globálna rozmerová charakteristika má z definície jedinečnú hodnotu pozdĺž a okolo tolerovaného rozmerového prvku. Globálne rozmery pozostávajú z priamych globálnych rozmerov a nepriamych globálnych rozmerov. Priamy globálny rozmer sa rovná rozmeru priradeného integrálneho prvku, ktorý má rovnaký geometrický typ ako rozmerový prvok.

Priradený integrálny prvok vytvorený z extrahovaného integrálneho prvku je tvarovo totožný s ideálnym rozmerovým prvkom. [4]

Typy priamych globálnych lineárnych rozmerov (zobrazených na obr. 8): [4]

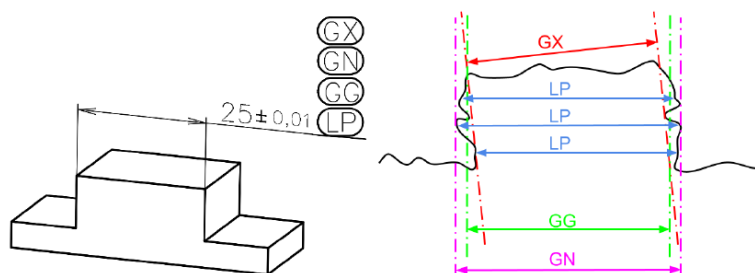
- rozmer daný najmenšími štvorcami (TLS rozmer) – rozmer určený na základe minimalizácii súčtu štvorcov vzdialeností medzi priradeným integrálnym prvkom a extrahovaným integrálnym prvkom,
- rozmer maximálny vpísaný – maximálny rozmer priradeného integrálneho prvku, ktorý je možné vpísať do extrahovaného integrálneho prvku,
- rozmer minimálny opísaný – minimálny rozmer priradeného integrálneho prvku, ktorý je možné opísať okolo extrahovaného integrálneho prvku,
- minimax rozmer (Čebyševov rozmer) – rozmer určený minimalizáciou maximálnej hodnoty súboru vzdialeností medzi bodmi extrahovaného a priradeného integrálneho prvku.



Obr. 8) Znáznornenie priameho globálneho lineárneho rozmeru: a) rozmer maximálny vpísaný, b) rozmer minimálny opísaný, c) TLS rozmer, d) minimax rozmer [4]

Nepriamy globálny rozmer je určený na základe vlastnej charakteristiky prvku a určitého vzťahu. Rozmer získaný použitím matematického vzorca, ktorý spája vlastnú charakteristiku prvku s ďalšími rozmermi daného prvku sa nazýva vypočítaný rozmer. K vypočítaným rozmerom patrí priemer z obvodu, priemer z plochy a priemer z objemu. Rozmerová charakteristika definovaná matematicky z homogénneho súboru hodnôt miestneho rozmeru nameraných pozdĺž alebo okolo tolerovaného prvku sa nazýva formalizovaný rozmer. K formalizovaným rozmerom patrí napríklad maximálny rozmer, priemerný rozmer, medián rozmeru, stredný rozmer rozpätia, rozpätie rozmeru, smerodajná odchýlka rozmeru. [4]

Jednotlivé typy rozmerov je možné na výkrese prepísať vo forme modifikátorov. Každý modifikátor zodpovedá konkrétnemu typu rozmeru a má svoj symbol. Použitím takéhoto symbolu sa stanovuje požiadavka na spôsob vyhodnotenia rozmerovej charakteristiky. Príklady zápisu vybraných modifikátorov a k nim zodpovedajúce spôsoby vyhodnotenia sú zobrazené na obr. 9). Symbol GX predstavuje rozmer maximálny vpísaný, GN rozmer minimálny opísaný, GG rozmer daný najmenšími štvorcami a LP rozmery dvojbodové získané pomocou dvojice bodov.



Obr. 9) Rozmer v závislosti na modifikátoroch a ich zápis [14]




















Vzdialenosť

Vzdialenosť je definovaná ako rozmer medzi dvoma geometrickými prvkami, ktoré nie sú považované za rozmerový prvok. Vzdialenosť je lineárna, udávaná v dĺžkových jednotkách, alebo uhlová, udávaná v uhlových jednotkách. Môže byť definovaná medzi dvoma integrálnymi prvkami, integrálnym a odvodeným prvkom alebo medzi dvoma odvodenými prvkami. Integrálny prvok predstavuje prvok tvoriaci danú súčasť. Odvodený prvok, napríklad os diery, je odvodený z integrálneho prvku. [5]

2.1.3 Geometrické tolerancie

Geometrické tolerancie pozostávajú zo štyroch základných skupín geometrických vlastností: tvar, orientácia, umiestnenie a hádzanie. Každá skupina je ďalej delená na jednotlivé charakteristiky. Prehľad skupín geometrických tolerancií a k nim prislúchajúcich charakteristík je zobrazený v tab. 2).

Tab. 2) Prehľad geometrických tolerancií a charakteristík [3]

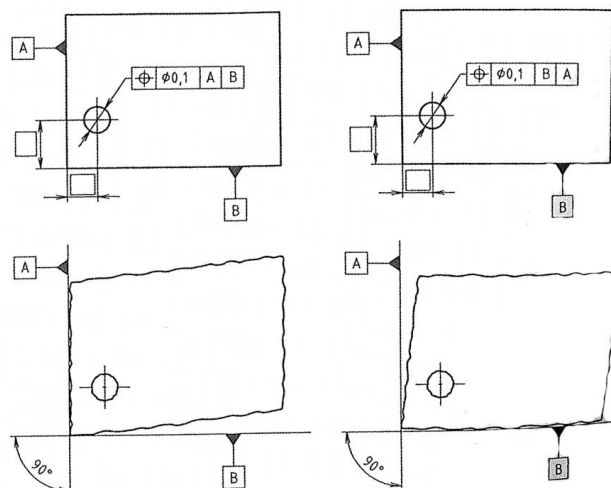
Špecifikácia	Charakteristika	Značka	Potrebná základňa
Tvar	Priamosť		nie
	Rovinnosť		nie
	Kruhovitosť		nie
	Valcovitosť		nie
	Profil čiary		nie
	Profil povrchu		nie
Orientácia	Ravnobežnosť		áno
	Kolmosť		áno
	Sklon		áno
	Profil čiary		áno
	Profil povrchu		áno
Umiestnenie	Poloha		áno/nie
	Sústrednosť		áno
	Súosovosť		áno
	Súmernosť		áno
	Profil čiary		áno
	Profil povrchu		áno
Hádzanie	Obvodové hádzanie		áno
	Celkové hádzanie		áno

Geometrické odchýlky prvkov produktu môžu mať negatívny vplyv na funkciu jednotlivých súčastí ako aj celých strojov. Môžu byť príčinou vyššieho opotrebenia, nepresností, hlučného chodu, nadmerných vibrácií strojov a v najhoršom prípade straty funkcie súčastí, respektíve celého stroja. Taktiež môžu ovplyvniť zameniteľnosť jednotlivých dielov,

ktorá je podmienená odchýlkami rozmerov, štruktúrou povrchu a práve geometrickými odchýlkami funkčných plôch. Na zaistenie zameniteľnosti nesmú odchýlky presiahnuť účelne stanovené medzné hodnoty, čiže súčasti musia byť vyrobené v predpísaných toleranciách. Predpísané geometrické tolerancie sa môžu vzťahovať k jednému alebo k viacerým prvkom, ktoré predstavujú body, čiary alebo povrchy. Geometrická tolerancia priradená ku konkrétnemu prvku udáva tolerančné pole, v rámci ktorého sa tento prvok musí nachádzať. Tolerančné pole vymedzuje minimálne jedna geometricky dokonalá čiara alebo povrch, a jeho šírku stanovuje hodnota predpísanej tolerancie. [3, 6]

Základne

Základne a sústavy základní sa pri geometrickom tolerovaní používajú ako prostriedok pre vytvorenie geometrických vzťahov medzi príslušnými prvkami. Základňa je teoreticky presný geometrický prvok (napríklad os, rovina, priamka), ku ktorému sa vzťahujú geometrické tolerancie tolerovaného prvku. Základňu môže tvoriť jeden alebo viacero prvkov. Pri sústave základní záleží na poradí predpísania jednotlivých základní, ktoré udáva ich dôležitosť z funkčného hľadiska a určuje postupnosť odoberania stupňov voľnosti súčasti. Rozdiel v zmene poradia jednotlivých základní je graficky znázornený na obr. 10). [6]



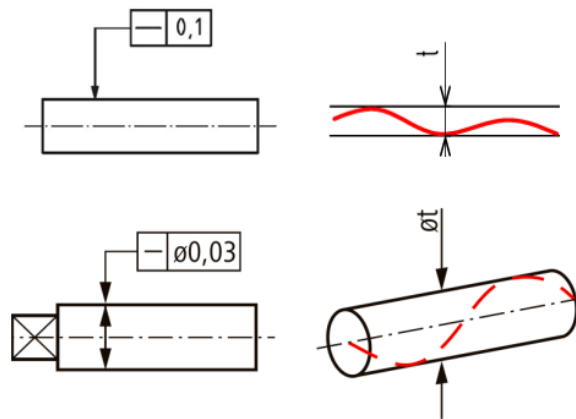
Obr. 10) Dôležitosť poradia základní v sústave základní [6]

Tolerancie tvaru

Tolerancie tvaru stanovujú najväčšie dovolené hodnoty odchýlky skutočného tvaru súčasti od navrhovaného menovitého tvaru uvedeného na výkrese. Všeobecne sa odchýlka tvaru vyhodnocuje ako maximálna vzdialenosť bodov skutočnej plochy alebo profilu od obalovej plochy alebo profilu. [9]

Priamosť

Tolerancia priamosti vymedzuje oblasť ohraničenú dvomi rovnobežnými priamkami vzdialenými od seba o hodnotu stanovenej tolerancie t , medzi ktorými musí tolerovaná priamka ležať. V prípade, ak je pred hodnotou tolerancie priamosti značka priemeru, tak tolerančné pole predstavuje valec, ktorého priemer je rovný stanovenej tolerancii t . Znázornenie tolerančného poľa a možnej indikácie tolerancie priamosti je zobrazené na obr. 11). [6]



Obr. 11) Geometrické tolerovanie priamosti (upravené podľa [3, 10, 11])

Na vyhodnotenie priamosti je možné použiť metódy: [10]

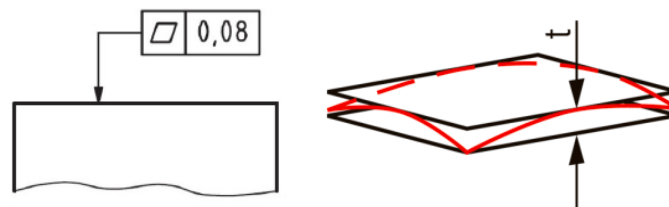
- LSS (Gaussova metóda) – zosnímané body sú preložené referenčnou priamkou profilu tak, aby bol súčet kvadrátov vzdialeností jednotlivých bodov od priamky minimálny. Vyhodnocuje sa najväčšia vzdialenosť dvoch bodov profilu v kolmom smere od priamky.
- MZS (Čebyševova metóda) – podstatou je vytvorenie minimálnej novej zóny z dvoch rovnobežných priamok, v ktorej sú obsiahnuté všetky zosnímané body. Vyhodnocuje sa vzdialenosť dvoch vytvorených priamok v kolmom smere.

Rovinnosť

Tolerancia rovinnosti vymedzuje oblasť v priestore ohraničenú dvomi rovnobežnými rovinami vzdialenými od seba o hodnotu tolerancie t . Príklad zápisu indikácie tolerovania rovinnosti a grafické znázornenie tolerančného poľa je zobrazené na obr. 12). [6]

Na vyhodnotenie rovinnosti je možné použiť metódy: [10]

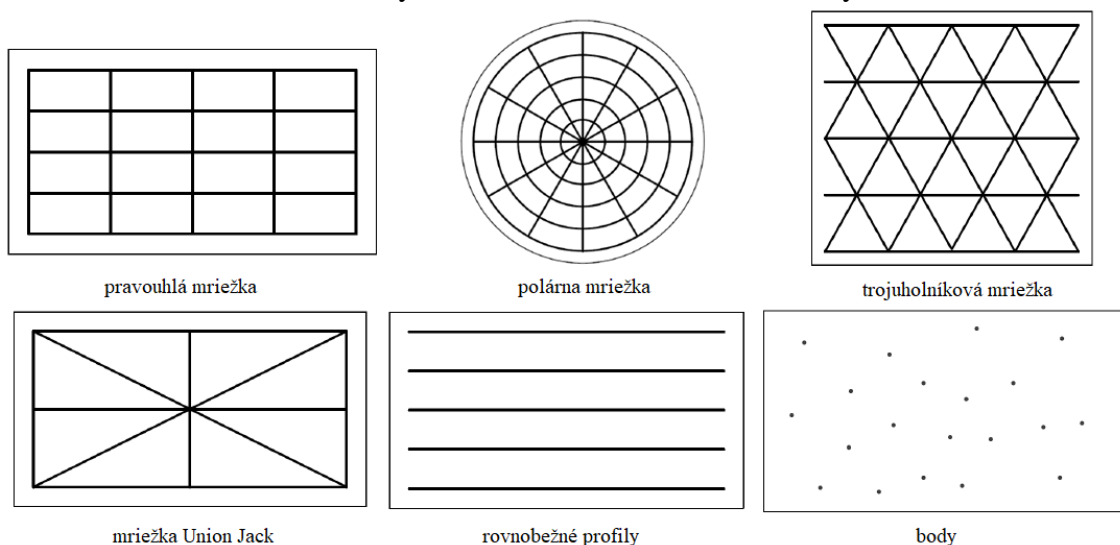
- LSS (Gaussova metóda) – zosnímané body sú preložené referenčnou rovinou oblasti tak, aby bol súčet kvadrátov vzdialeností jednotlivých bodov od roviny minimálny. Vyhodnocuje sa najväčšia vzdialenosť dvoch bodov oblasti v kolmom smere od roviny.
- MZS (Čebyševova metóda) – podstatou je vytvorenie minimálnej novej zóny z dvoch rovnobežných rovín, v ktorej sú obsiahnuté všetky zosnímané body. Vyhodnocuje sa vzdialenosť dvoch vytvorených rovín v kolmom smere.



Obr. 12) Geometrické tolerovanie rovinnosti (upravené podľa [3, 10])

Na súradnicovom meracom stroji je možné meranie odchýlok rovinnosti nasnímaním vhodného počtu bodov na povrchu meranej roviny. Spôsob získania reprezentatívnej sady bodov na meranom povrchu závisí od zvolenej stratégie extrahovania. Možnosti stratégií extrahovania uvedené v norme ČSN EN ISO 12781-2:2011, zobrazené aj na obr. 13), sú: [14, 15]

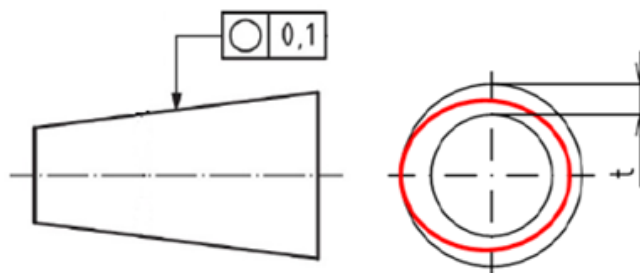
- extrahovanie pravouhlou mriežkou – rovnomerne rozložené profily priamosti v dvoch ortogonálnych smeroch,
- extrahovanie polárnou mriežkou – rovnomerne rozložené sústredné kruhové profily okolo stanoveného stredu vrátane rovnomerne uhlovo rozložených radiálnych profilov,
- extrahovanie špecifikovanou mriežkou – rovnomerne rozložené profily priamosti v troch smeroch s odklonením o 60° (trojuholníková mriežka) alebo séria mriežok s tromi profilmi priamosti v oboch smeroch spolu s dvomi profilmi cez hlavné diagonály (mriežka Union Jack),
- extrahovanie rovnobežnými profilmi – rovnomerne rozložené profily priamosti v jednom smere,
- extrahovanie zvolenými bodmi – náhodne zvolené body.



Obr. 13) Grafické znázornenie stratégií extrahovania pri meraní rovinnosti [15]

Kruhovitost'

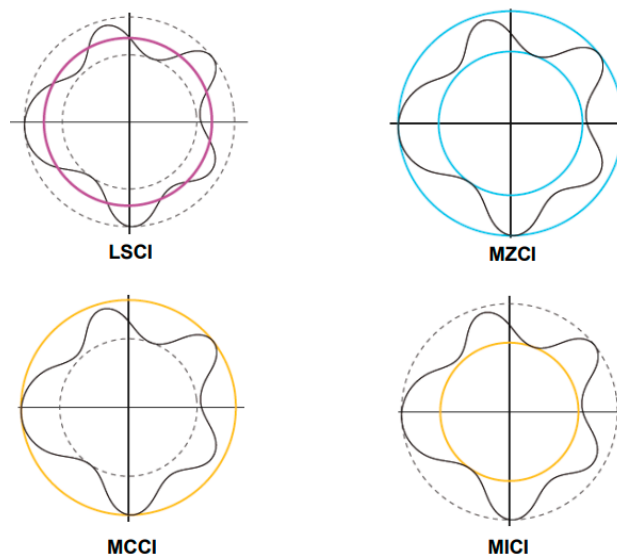
Tolerancia kruhovitosti vymedzuje oblasť v rovne prierezu kolmej na os rotačnej plochy dvomi sústrednými kružnicami vzdialenými od seba o šírku medzikružia, ktorá sa rovná hodnote tolerancie t . Obvodový profil každého prierehového rezu musí ležať medzi týmito sústrednými kružnicami. Úplný extrahovaný povrch z rezu valca alebo kužeľa nesmie prekročiť predpísané tolerančné pole bez ohľadu na rozmer. Ukážka možnej indikácie tolerovania kruhovitosti a grafické znázornenie tolerančného poľa je zobrazené na obr. 14). [3, 6]



Obr. 14) Geometrické tolerovanie kruhovitosti (upravené podľa [3, 11])

Na vyhodnotenie kruhovitosti je možné použiť metódy (zobrazené na obr. 15): [8]

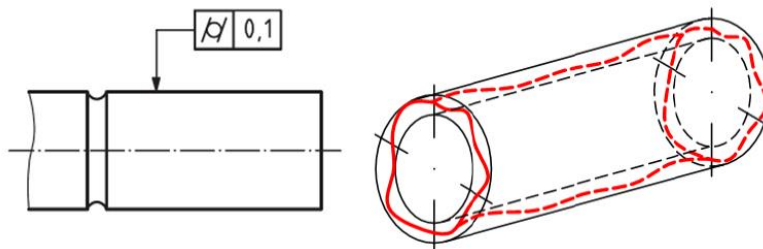
- MICI (maximálna vpísaná kružnica) – referenčnou kružnicou je najväčšia možná kružnica vpísaná do zosnímaného profilu,
- MCCI (minimálna opísaná kružnica) – referenčnou kružnicou je najmenšia možná kružnica opísaná okolo zosnímaného profilu,
- MZCI (referenčné kružnice minimálnej zóny) – referenčnú zónu tvoria dve sústredné kružnice zachytávajúce zosnímaný profil pri čo najmenšom rozdiel svojej polomerov,
- LSCI (Gaussova referenčná kružnica) – referenčná kružnica je vytvorená zo zosnímaného profilu metódou najmenších štvorcov.



Obr. 15) Metódy vyhodnotenia kruhovitosti [10]

Valcovitosť

Tolerancia valcovitosti vymedzuje oblasť v priestore ohraničenú dvomi súosovými valcami vzdialenými od seba o hodnotu tolerancie t . Skutočná valcová plocha musí ležať medzi týmito súosovými valcami. Príklad indikácie tolerovania valcovitosti a grafické znázornenie tolerančného poľa je zobrazené na obr. 16). [6]



Obr. 16) Geometrické tolerovanie valcovitosti (upravené podľa [3, 11])

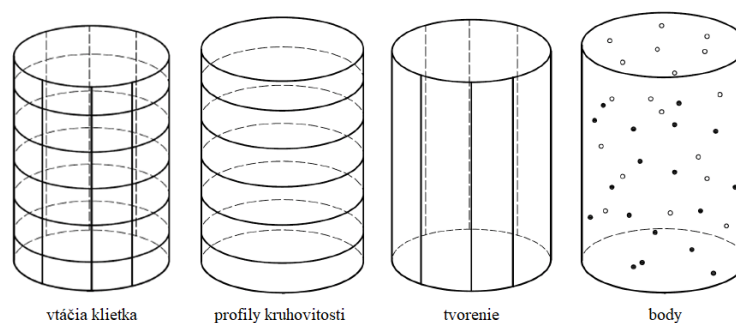
Na vyhodnotenie valcovitosti je možné použiť metódy: [10]

- MICY (maximálny vpísaný valec) – referenčným valcom je najväčší možný valec vpísaný do zosnímanej oblasti,
- MCCY (minimálny opísaný valec) – referenčným valcom je najmenší možný valec opísaný okolo zosnímanej oblasti,

- MZCY (referenčné valce minimálnej zóny) – referenčnú zónu tvoria dva sústredné valce zachytávajúce zosnímanú oblasť pri čo najmenšom rozdielne svojich polomerov,
- LSCY (Gaussov referenčný valec) – referenčný valec je vytvorený zo zosnímaného profilu metódou najmenších štvorcov.

Na získanie vhodných reprezentatívnych bodov meranej plochy je pri snahe dosiahnutia spoľahlivého posúdenia valcovitosti požadované využitie vhodnej stratégie extrahovania. Základné stratégie extrahovania, graficky zobrazené na obr. 17), sú: [13, 16]

- extrahovanie vtáčou klietkou,
- extrahovanie profilmi kruhovitosti,
- extrahovanie tvorením,
- extrahovanie bodmi.



Obr. 17) Grafické znázornenie stratégií extrahovania pri meraní valcovitosti [16]

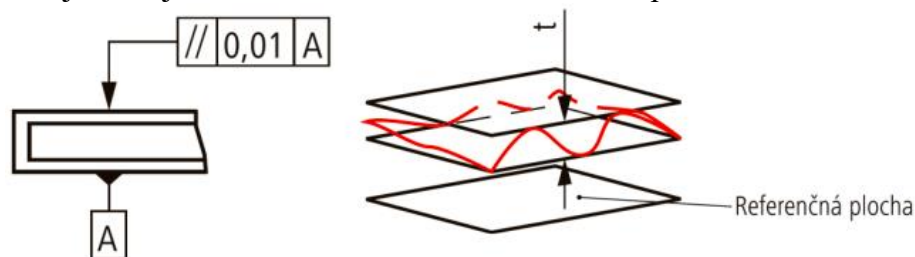
Najdôveryhodnejší výsledok je dosiahnutý použitím stratégie extrahovania vtáčou klietkou. Ostatné metódy extrahovania poskytujú zredukované informácie o posudzovanej valcovitosti. [13]

Tolerancie orientácie

Tolerancie orientácie patria k vzťahným toleranciam – plochy tolerovaných prvkov sa musia vzťahovať k iným prvkom súčasti alebo k ich osám. Tieto tolerancie vymedzujú orientáciu a šírku tolerančného poľa tolerovaného prvku vzhľadom k orientácii zvolených základní. [6, 10]

Rovnoběžnost'

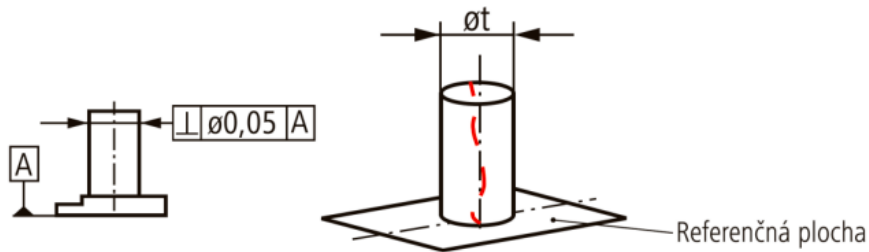
Tolerancia rovnobežnosti vymedzuje oblasť ohraničenú dvomi rovnobežnými rovinami, ktoré sú od seba vzdialené o hodnotu tolerancie t a zároveň sú rovnobežné s definovanou základňou. Znázornenie tolerančného poľa a možnej indikácie tolerancie rovnobežnosti je zobrazené na obr. 18). V prípade, ak je pred hodnotou tolerancie rovnobežnosti značka priemeru, tak tolerančné pole predstavuje valec, ktorého priemer je rovný stanovenej tolerancii rovnobežnosti t a jeho os je rovnobežná so základňou tvorenou priamkou. [6]



Obr. 18) Geometrické tolerovanie rovnobežnosti [10]

Kolmosť

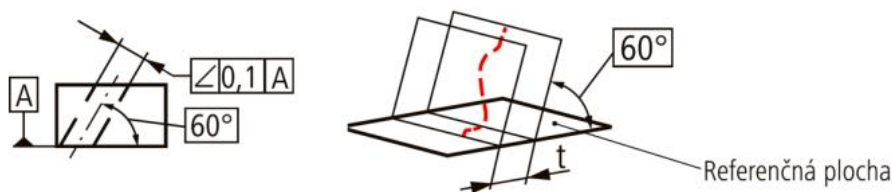
Tolerancia kolmosti vymedzuje oblasť ohraničenú dvomi rovnobežnými rovinami, ktoré sú od seba vzdialené o hodnotu tolerancie t a zároveň sú kolmé na definovanú základňu. Značka priemeru pred hodnotou tolerancie kolmosti značí, že tolerančné pole má tvar valca. Príklad možnej indikácie tolerancie kolmosti a znázornenie tolerančného poľa v tvare valca je zobrazené na obr. 19). [6]



Obr. 19) Geometrické tolerovanie kolmosti [10]

Sklon

Tolerancia sklonu vymedzuje oblasť ohraničenú dvomi rovnobežnými rovinami, ktoré sú od seba vzdialené o hodnotu tolerancie t a súčasne zvierajú s definovanou základňou teoreticky presný uhol. Možná indikácia tolerancie sklonu a jej interpretácia je zobrazená na obr. 20). [6]



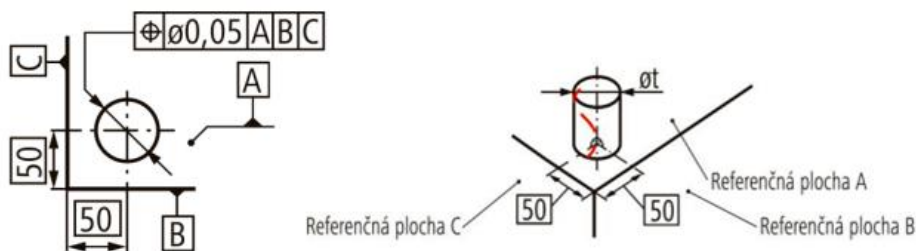
Obr. 20) Geometrické tolerovanie sklonu [10]

Tolerancie umiestnenia

Tolerancie umiestnenia patria rovnako ako tolerancie orientácie k vzťahným toleranciám. Predpisujú veľkosť a umiestnenie tolerančného poľa tolerovaného prvku vzhľadom k zvoleným základniam. [6]

Poloha

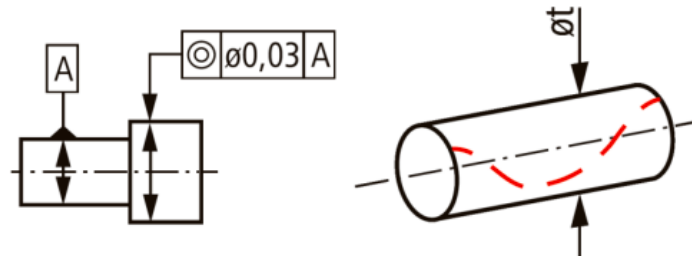
Tolerancia polohy definuje medze polôh skutočných prvkov navzájom alebo ich polohu vzhľadom k jednej alebo viacerým základniam. Ak je pred hodnotou tolerancie umiestnenia značka priemeru, tak tolerančné pole určuje valec s priemerom rovným hodnote tolerancie t a poloha osi je stanovená teoreticky presnými rozmermi vzhľadom k definovaným základniam. Príklad takto definovaného tolerančného poľa a k nemu prislúchajúca indikácia tolerancie umiestnenia je zobrazená na obr. 21). [6, 9]



Obr. 21) Geometrické tolerovanie umiestnenia [10]

Sústrednosť a súosovosť

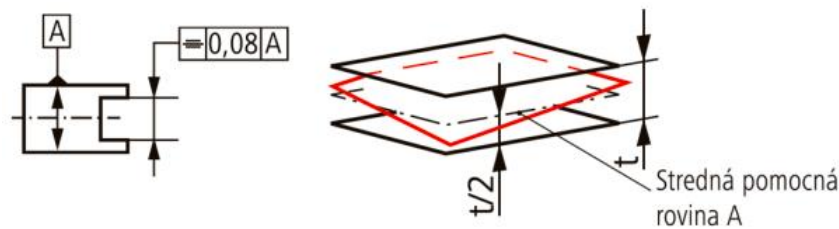
Tolerancia sústrednosti vymedzuje tolerančné pole v podobe kružnice s priemerom daným hodnotou tolerancie t a stredom v definovanom základnom bode. Pri tolerancii súosovosti vymedzuje polohu všetkých bodov tolerovaného prvku cylindrická oblasť, ktorej stredová os je zároveň vzťažnou základňou (príklad zobrazený na obr. 22). Priemer cylindrickej oblasti je rovný hodnote tolerancie t . [3, 9]



Obr. 22) Geometrické tolerovanie súosovosti [10]

Súmernosť

Tolerancia súmernosti vymedzuje oblasť ohraničenú dvomi rovnobežnými rovinami, ktoré sú od seba vzdialené o hodnotu tolerancie t a zároveň sú súmerne umiestnené k základnej rovine alebo osi súmernosti. Možná indikácia tolerancie súmernosti a grafická interpretácia tolerančného poľa je zobrazená na obr. 23). [6]



Obr. 23) Geometrické tolerovanie súmernosti [10]

Tolerancie hádzania

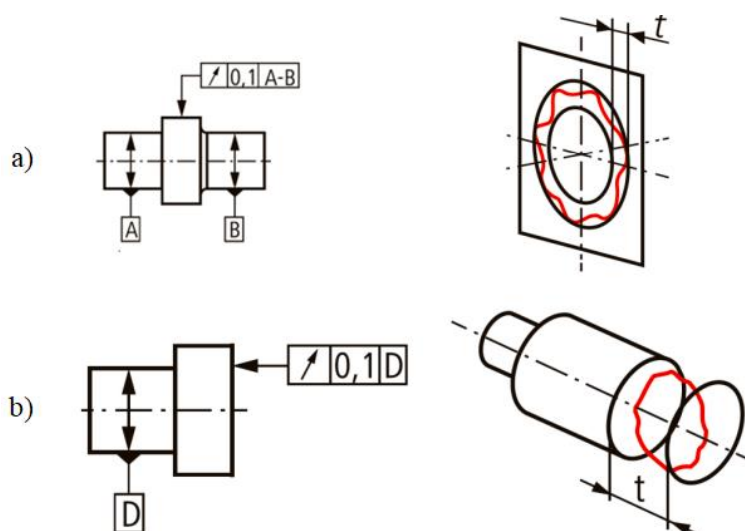
Tolerancia hádzania patrí taktiež k vzťažným toleranciám a vždy je vzťahovaná k osi rotácie. Vo všeobecnosti sa hádzanie týka opisu plôch súčastí so symetrickým rotačným tvarom a určovaniu ich odchýlok od teoreticky presného kruhového tvaru. Miesto indikácie značky tolerancie hádzania na výkrese určuje, či sa jedná o predpis obvodového alebo čelného hádzania. [9]

Kruhové hádzanie

Kruhové obvodové hádzanie vymedzuje oblasť v ktorejkoľvek rovine kolmej k osi, ktorá je ohraničená dvomi sústrednými kružnicami. Tieto kružnice sú od seba vzdialené o hodnotu tolerancie t a ich stredy ležia na základnej osi. [6]

Kruhové čelné hádzanie vymedzuje oblasť ohraničenú dvomi kružnicami vzdialenými od seba o hodnotu tolerancie t v ktorejkoľvek radiálnej polohe na valci, ktorého osa je totožná so základnou osou. [6]

Príklad indikácií oboch druhov kruhového hádzania, vrátane im prislúchajúcim tolerančných polí, je zobrazený na obr. 24). Tolerancia kruhového hádzania je považovaná za vyhovujúcu, ak hodnota hádzania neprekročí stanovenú hodnotu tolerancie ani v jednej rovine, respektíve mieste merania počas jednej otáčky okolo základnej osi. [6]

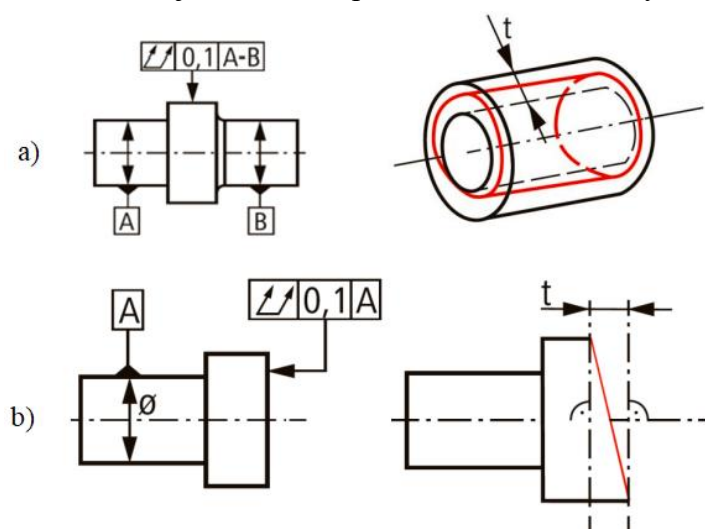


Obr. 24) Geometrické tolerovanie kruhového hádzania: a) obvodového, b) čelného [10]

Celkové hádzanie

Celkové obvodové hádzanie vymedzuje oblasť ohraničenú dvomi sústrednými valcami, ktoré sú od seba vzdialené o hodnotu tolerancie t a ich osa je identická so základnou osou. Celkové čelné hádzanie vymedzuje oblasť ohraničenú dvomi rovnobežnými rovinami, ktoré sú od seba vzdialené o hodnotu tolerancie t a zároveň sú kolmé k základnej ose. [6]

Možné indikácie oboch druhov celkového hádzania a im prislúchajúce tolerančné polia sú zobrazené na obr. 25). Tolerancia celkového obvodového hádzania je považovaná za vyhovujúcu, ak hodnota hádzania na skutočnom povrchu tolerovaného prvku neprekročí stanovenú hodnotu tolerancie ani v jednom bode počas merania niekoľkých otáčok. [6]



Obr. 25) Geometrické tolerovanie celkového hádzania: a) obvodového, b) čelného [10]

Tolerancie profilu

V norme ČSN ISO 1101:2020 je definované tolerovanie profilu čiary a profilu povrchu v rámci troch kategórií geometrických vlastností. Tolerancia tvaru profilu čiary alebo povrchu sa týka iba tvaru alebo podoby prvkov na súčasti. Pri tomto type tolerancií sa vymedzuje iba odchýlka od teoreticky presného tvaru. Ak sa tolerancia profilu vzťahuje k jednej alebo viacerým základniám, ide o toleranciu orientácie, respektíve umiestnenia. [9]

Profil číary

Tolerancia profilu číary vymedzuje oblasť ohraničenú dvomi čiarami, ktoré tvoria obálku k skupine imaginárnych kružníc s priemerom daným hodnotou tolerancie t . Všetky kružnice sú umiestnené v rovine a ich stredy ležia na teoreticky presnom geometrickom tvare profilu číary. Skutočný tvar profilu musí ležať v takto vymedzenom tolerančnom poli, a to v každom priereze súčasti rovnobežnom s priemetom, kde je tolerancia predpísaná. Možná indikácia a tolerančné pole tolerovania profilu číary ako geometrickej tolerancie tvaru bez predpísaných základní je znázornená na obr. 26). V prípade, ak sú stanovené vzťahy k jednej alebo viacerým základniám, musí skutočný profil prvku navyše spĺňať požiadavky na orientáciu alebo umiestnenie. [9]



Obr. 26) Geometrické tolerovanie profilu číary [10]

Profil povrchu

Tolerancia profilu povrchu vymedzuje oblasť ohraničenú dvomi plochami, ktoré tvoria obálku k skupine imaginárnych gúl s priemerom daným hodnotou tolerancie t . Skutočný tvar tolerovaného profilu musí ležať v takto vymedzenej oblasti. Odchýlku profilu povrchu predstavuje odchýlka bodov od menovitej plochy v smere normály. Taktiež platí, že ak sú stanovené vzťahy k jednej alebo viacerým základniám, musí skutočný profil prvku navyše spĺňať požiadavky na orientáciu alebo umiestnenie. Na obr. 27) je zobrazené tolerovanie profilu povrchu ako súčasť geometrickej tolerancie tvaru bez stanovených vzťahov k iným prvkom súčasti. [9]



Obr. 27) Geometrické tolerovanie profilu povrchu [10]

2.2 Metodika vyhodnotenia výsledkov merania

Meranie predstavuje súbor experimentálnych úkonov, ktorých cieľom je prostredníctvom meracích prostriedkov určiť skutočnú hodnotu meranej veličiny. Do procesu merania vstupujú okrem meranej veličiny, ktorej hodnota je predmetom merania, aj veličiny ovplyvňujúce. Ovpľyňujúce veličiny nie sú predmetom merania, avšak ovplyvňujú hodnotu meranej veličiny alebo indikáciu meradla. Majú svoj pôvod v okolitom prostredí alebo v použitých meracích prostriedkoch. K veličinám ovplyvňujúcim hodnotu meranej veličiny patrí napríklad teplota okolia, teplota meradla a meraného objektu, tlak, vlhkosť a tak ďalej. Proces merania a výsledky merania sa často viažu na určité konkrétne hodnoty ovplyvňujúcich veličín, ktoré sa označujú ako referenčné hodnoty. Pri vyšších požiadavkách na presnosť merania je potrebné poznať ovplyvňujúce veličiny, aby bolo možné zaviesť príslušné korekcie. Aj napriek

snahe zmiernenia nepriaznivých okolností a faktorov pôsobiacich na meranú veličinu, nikdy nie je možné dosiahnuť dokonalú presnosť merania. Nameraná hodnota veličiny tak nikdy nebude totožná s pravou hodnotou. Z toho dôvodu je pri interpretácii výsledku merania nutné uvádzať chybu alebo neistotu merania v závislosti od použitého prístupu vyhodnotenia. Pri vyhodnocovaní merania sa v praxi používajú dva možné prístupy – chybový a neistotový prístup. [17]

2.2.1 Chybový prístup

Chybový prístup je založený na klasickej teórii chýb a jeho základy siahajú až do 17. storočia. Základným predpokladom chybového prístupu je existencia jedinej, nepoznatelnej pravej hodnoty meranej veličiny a účelom merania je stanovenie čo možno najpresnejšieho odhadu tejto hodnoty. Presnosť merania je stanovená tesnosťou zhody medzi nameranou hodnotou veličiny a pravou (skutočnou) hodnotou meranej veličiny. Rozdiel medzi nameranou hodnotou a pravou hodnotou veličiny predstavuje absolútnu chybu merania. Je teda možno konštatovať, že čím je meranie presnejšie, tým bude chyba merania menšia. Pri chybovom prístupe je výsledok merania X zapisovaný vo forme (1): [14]

$$X = \bar{x} \pm \delta = (\bar{x} - \delta; \bar{x} + \delta) \quad (1)$$

kde \bar{x} je aritmetický priemer nameraných hodnôt a δ predstavuje chybu. Jednotlivé chyby pri meraní, ktoré sa podieľajú na absolútnej chybe merania, možno rozdeliť do troch skupín: [17]

Hrubé chyby

Hrubé chyby sú chyby spôsobené najčastejšie nesprávne zvolenou meracou metódou, nespôsobilosťou operátora, extrémne nevhodnými podmienkami merania alebo nefunkčným, poškodeným, nevhodne nastaveným, nekalibrovaným meradlom a podobne. Namerané hodnoty ovplyvnené hrubou chybou sú nepoužiteľné, preto sa často s hrubou chybou ani neuvažuje ako s dielčou zložkou absolútnej chyby. Vo väčšine prípadov sú zdroje hrubých chýb odhaliteľné a odstrániteľné, avšak treba dbať na ich včasnú detekciu a hodnoty zaťažené hrubou chybou zo súboru nameraných hodnôt vylúčiť. [17]

Systematické chyby

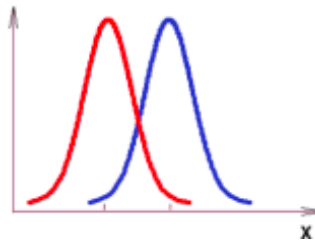
Systematická chyba predstavuje zložku chyby merania, ktorá v prípade opakovaných meraní rovnakej veličiny zostáva konštantná alebo sa mení predvídateľným spôsobom. Systematická chyba určuje správnosť merania, ktorá v chybovom prístupe predstavuje charakteristiku polohy výsledku merania. Správnosť merania je tesnosť zhody medzi aritmetickým priemerom nekonečného počtu opakovaných nameraných hodnôt a referenčnou hodnotou veličiny. Aritmetický priemer nekonečného počtu opakovaných nameraných hodnôt je možné štatisticky odhadnúť podľa vzťahu (2): [14, 17]

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

kde x_i je nameraná hodnota i -tého merania a n je celkový počet meraní. Potom je systematickú chybu zodpovedajúcu charakteristike polohy merania možno vyjadriť podľa vzťahu (3): [14]

$$\Delta = \bar{x} - X_R \quad (3)$$

kde X_R je prijatá referenčná hodnota.



Obr. 28) Grafické znázornenie správnosti merania [14]

Na obr. 28) je zobrazená správnosť merania určená systematickou chybou. Modrý priebeh predstavuje rozloženie variability popri polohe referenčnej hodnoty, červený priebeh zobrazuje rozloženie nameraných hodnôt. Rozdiel medzi týmito priebehmi je spôsobený práve systematickými chybami.

Systematické chyby a ich zdroje môžu byť známe alebo neznáme. Pri známych chybách je na zvýšenie presnosti merania možné použiť vhodné korekcie. Systematické chyby nie je možné charakterizovať na základe opakovaných meraní. Ich existencia a veľkosť sa dajú stanoviť porovnávacím meraním s porovnávacím meradlom. [17]

Náhodné chyby

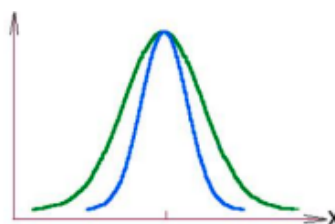
Náhodná chyba predstavuje zložku chyby merania, ktorá sa v prípade opakovaných meraní rovnakej veličiny mení nepredvídateľným spôsobom. Referenčnou hodnotou náhodnej chyby merania je aritmetický priemer získaný z teoreticky nekonečného počtu opakovaných meraní. Náhodná chyba určuje precíznosť (zhodnosť) merania, ktorá v chybovom prístupe predstavuje charakteristiku variability výsledku merania. Precíznosť merania je tesnosť zhody medzi nameranými hodnotami veličiny pri opakovaných meraniach na rovnakom objekte za rovnakých, špecifikovaných podmienok. Spravidla je vyjadrená číselnou mierou - smerodajnou odchýlkou, rozptylom alebo variačným koeficientom. Smerodajnú odchýlku s_x je možné stanoviť podľa vzťahu (4): [14, 17]

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n - 1)}} \quad (4)$$

Náhodné chyby nie sú opakovateľné a nie je možné ich vylúčenie. Ich absolútna hodnota vrátane znamienka sa mení na základe rozdelenia pravdepodobnosti, a preto sa charakteristiky náhodných chýb dajú stanoviť štatisticky. Náhodná chyba merania súboru opakovaných meraní vytvára rozdelenie, ktoré je možné vyjadriť očakávanou strednou hodnotou rovnajúcou sa nule a rozptylom. Rozptyl je vyjadrený vzťahom (5): [14]

$$R = x_{max} - x_{min} \quad (5)$$

kde x_{max} je maximálna nameraná hodnota veličiny a x_{min} je minimálna nameraná hodnota veličiny.



Obr. 29) Grafické znázornenie precíznosti merania [14]

Na obr. 29) je zobrazená precíznosť merania určená náhodnými chybami. Modrý priebeh predstavuje rozloženie variability popri polohe referenčnej hodnoty, zelený priebeh zobrazuje rozloženie nameraných hodnôt. Rozdiel vo variabilite medzi týmito priebehmi je spôsobený náhodnými chybami.

2.2.2 Neistotový prístup

Neistotový prístup vznikol na základe potreby uvádzania kvantitatívneho údaju o kvalite výsledku merania vo forme neistoty. Neistotový prístup vychádza z myšlienky, že neexistuje jediná pravá hodnota meranej veličiny, ale existuje skôr súbor pravých hodnôt. Účelom stanovenia neistoty merania je určenie intervalu hodnôt okolo výsledku merania, ktorý je možno odôvodnene priradiť k hodnote nameranej veličiny. Neistota výsledku merania sa skladá z viacerých zložiek, ktoré je možné rozdeliť do dvoch skupín: [14, 17]

Štandardná neistota typu A

Štandardná neistota typu A u_A je stanovená výpočtami z opakovane vykonaných meraní danej veličiny. Mierou neistoty typu A je výberová smerodajná odchýlka výberového priemeru vypočítaná podľa vzťahu (6): [14]

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (6)$$

Štandardná neistota typu A je spôsobená kolísaním nameraných hodnôt. Charakteristickou vlastnosťou neistoty typu A je klesanie jej hodnoty s rastúcim počtom opakovaných meraní. Na zabezpečenie spoľahlivosti vzťahu na výpočet štandardnej neistoty typu A je vhodné opakovať meranie aspoň desaťkrát. V prípade menšieho počtu meraní je hodnota u_A určená zo vzťahu (6) málo spoľahlivá, a preto je nutné jej rozšírenie o koeficient K podľa vzťahu (7): [14]

$$u_A = K * s(\bar{x}) \quad (7)$$

Hodnoty koeficientu K sú v závislosti na počte meraní n uvedené v tab. 3).

Tab. 3) Hodnoty koeficientu K [14]

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

Štandardná neistota typu B

Na rozdiel od štandardnej neistoty typu A, pri ktorej sa príčiny neistôt všeobecne považujú za neznáme, štandardné neistoty typu B sú viazané na známe (identifikovateľné a kvantifikovateľné) zdroje. Štandardná neistota typu B je stanovená iným spôsobom než štatistickým vyhodnotením série meraní. Je určená z možných zdrojov neistôt na základe: [18]

- údajov a skúseností z predchádzajúcich meraní,
- skúsenosťami s chovaním a vlastnosťami materiálov a meracieho vybavenia,
- údajov výrobcov meradiel,
- údajov uvedených v kalibračných listoch,
- metódy použitého merania,
- neistôt z referenčných údajov v príručkách a iných dokladov.

Pri stanovení štandardnej neistoty typu B sa vytipujú možné zdroje neistôt a pre každý zdroj sa odhadne rozsah odchýlok od menovitej hodnoty veličiny z_{jmax} , ktorých prekročenie je málo pravdepodobné. Následne sa určí priebeh pravdepodobnosti odchýlok v tomto intervale a určí sa k nemu najvýhodnejšia aproximácia. Štandardná neistota typu B jednotlivých zdrojov $u_B(z_j)$ sa určí podľa vzťahu (8): [18]

$$u_B(z_j) = \frac{z_{jmax}}{\chi} \quad (8)$$

kde χ je koeficient zvolenej aproximácie rozdelenia pravdepodobnosti zdroja neistoty (pre normálne rozdelenie je $\chi = 2$, respektíve 3, pre rovnomerné rozdelenie $\chi = \sqrt{3}$ a tak ďalej). Pri nedostatočných vstupných informáciách predstavuje rovnomerné rozdelenie primerané štatistické vyjadrenie rozdelenia pravdepodobnosti. [18]

Výsledná neistota typu B pozostáva z jednotlivých zdrojov neistôt a určuje sa pomocou vzťahu (9): [18]

$$u_B = \sqrt{\sum_{j=1}^n A_j^2 * u_B(z_j)^2} \quad (9)$$

kde A_j je koeficient citlivosti. Touto úpravou dostáva neistota typu B charakter smerodajnej odchýlky.

Kombinovaná neistota merania

Kombinovaná neistota u_C je výsledkom kombinácie štandardnej neistoty typu A a štandardnej neistoty typu B. Neistoty určené oboma metódami sú rovnocenné. Výslednú kombinovanú neistotu pre nekorelované veličiny je možné určiť zo vzťahu (10): [18]

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (10)$$

Rozšírená neistota merania

Výsledkom vyššie uvedeného vzťahu je kombinovaná štandardná neistota merania určená s pravdepodobnosťou $P = 68,3 \%$ a koeficientom rozšírenia $k = 1$. Takto vypočítaná neistota merania pokrýva asi 68,3 % možných variant výsledkov z čoho vyplýva, že mimo takto stanoveného pásma neistôt sa môže vyskytnúť až okolo 1/3 výsledkov merania. [18]

Na pokrytie výsledkov merania s vyššou pravdepodobnosťou je preto potrebné vynásobenie štandardnej kombinovanej neistoty koeficientom rozšírenia k . Z paralely s normálnym rozdelením sa v praxi najčastejšie používajú tieto základné koeficienty: [18]

- $k = 2$ pre pravdepodobnosť pokrytia 95,45 %,
- $k = 2,58$ pre pravdepodobnosť pokrytia približne 99 %,
- $k = 3$ pre pravdepodobnosť pokrytia 99,73 %.

Rozšírená neistota merania U je vypočítaná pomocou vzťahu (11):

$$U = k * u_C \quad (11)$$

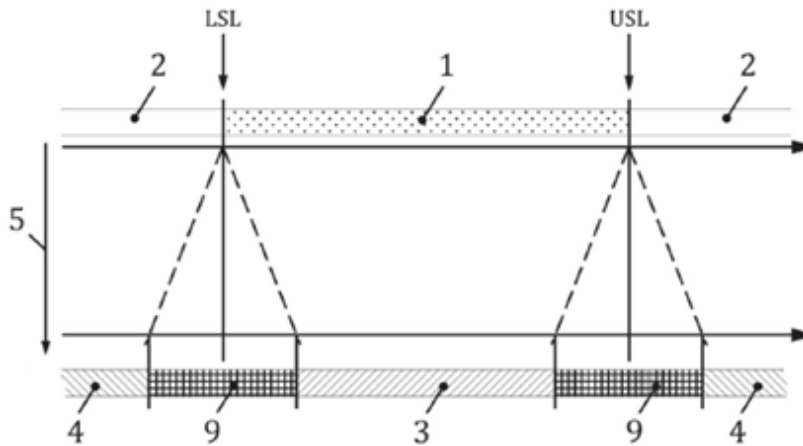
Pri neistotovom prístupe je výsledok merania X zapisovaný vo forme (12):

$$X = \bar{x} \pm U \quad (12)$$

Interval $\langle \bar{x} - U; \bar{x} + U \rangle$ obsahuje súbor pravých hodnôt meranej veličiny X s pravdepodobnosťou pokrytia určenou koeficientom rozšírenia k .

2.3 Posudzovanie zhody so špecifikáciou

Každé meranie je ovplyvnené určitými neistotami merania. Nie je možné poznať pravú hodnotu veličiny, ale s preddefinovanou pravdepodobnosťou pokrytia sa očakáva, že pravá hodnota spadá do intervalu pokrytia. Rozhodnutie o zhode so špecifikáciou na základe nameraných hodnôt zahrňujúcich neistotu merania je vystavené riziku, že bude falošné. [19]



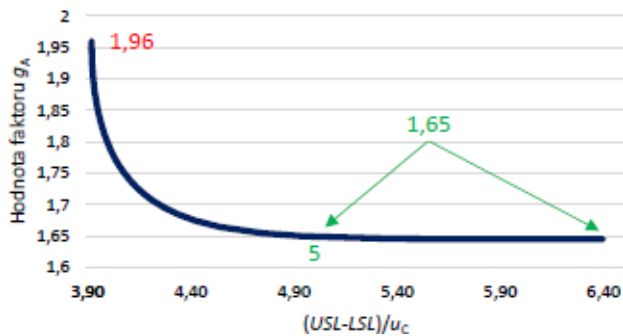
Obr. 30) Prechod z fáze špecifikácie do fázy overovania zhody [19]

Na obr. 30) je znázornený prechod zo špecifikačnej fázy, v ktorej sa nevyskytujú žiadne neistoty do fázy overovania, v ktorej neistoty zavádzajú ochranné pásma. Horná časť obrázka zobrazuje fázu špecifikácie, v ktorej sú špecifikované dolné medze (LSL) a horné medze (USL) určujúce špecifikačné pole (1) a pole mimo špecifikačného poľa (2). So zväčšujúcou sa neistotou merania dochádza k zmenšovaniu poľa prijatia a poľa odmietnutia. Táto neistota je vo fáze overovania zhody vyjadrená v rámci poľa neistoty (9), ktoré zužuje pole s overením zhody (3), respektíve pole s overením nezahody (4). [19]

Vo všeobecnosti platí, že zhoda so špecifikáciou je overená, ak nameraná hodnota spadá do poľa prijatia. Pole prijatia predstavuje špecifikačné pole zmenšené o ochranné pásmo s ohľadom na medze pravdepodobnosti zhody. Pravdepodobnosť zhody predstavuje pravdepodobnosť, s ktorou pravá hodnota spadá do špecifikačného poľa. Ochranné pásmo zabraňuje nesprávnym rozhodnutiam pri posudzovaní zhody nameraných hodnôt ležiacich blízko špecifikovaných medzí. Ochranné pásma sú určené na základe hustoty pravdepodobnosti výsledku merania a dohodnutou medzou pravdepodobnosti. Veľkosť ochranného pásma závisí na kombinovanej neistote merania a na veľkosti pomeru $(USL-LSL)/u_C$ podľa závislosti zobrazenej na obr. 31). Za predpokladu normálneho rozdelenia hustoty pravdepodobnosti nameraných hodnôt so smerodajnou odchýlkou výrazne menšou ako veľkosť špecifikačného poľa odpovedá východzia medza pravdepodobnosti zhody 95 % koeficientu ochranného pásma $g_A = 1,65$. Najvyššia hodnota koeficientu ochranného pásma g_A môže nadobudnúť hodnotu 1,96. [14, 19]

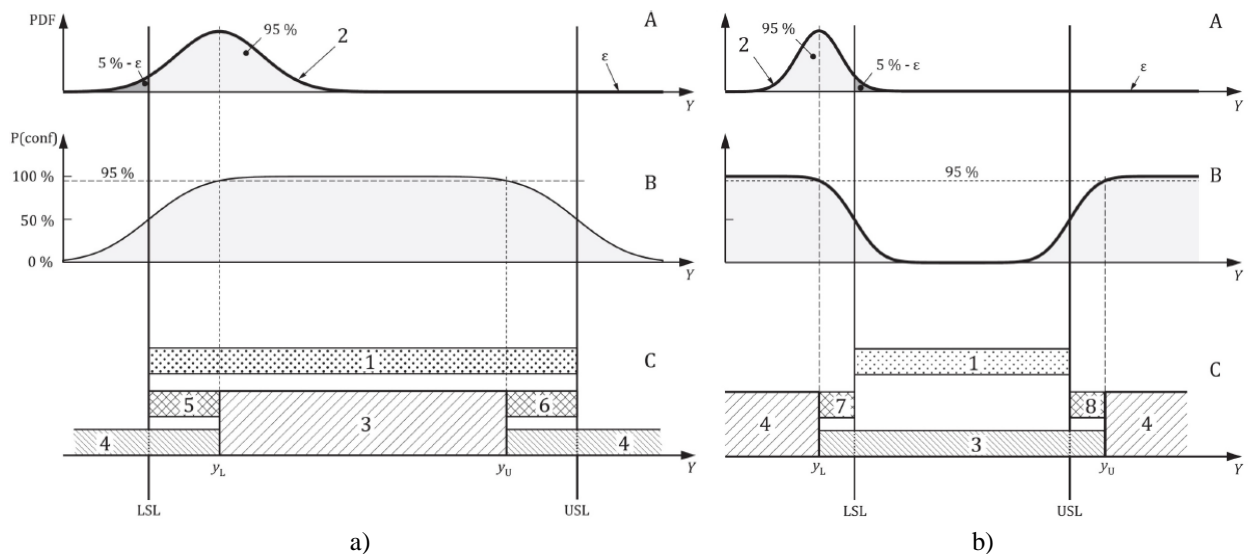
Výsledná veľkosť ochranného pásma je určená súčinom kombinovanej neistoty merania u_C a koeficientu ochranného pásma g_A , vid' vzťah (13):

$$U = g_A * u_C \quad (13)$$



Obr. 31) Závislosť hodnoty faktoru ochranného pásma na pomere $(USL - LSL)/u_C$ (upravené podľa [19, 18])

Na obr. 32) vľavo je zobrazené overovanie zhody so špecifikáciou pri dodržaní východzej medze pravdepodobnosti 95 %. Vrchný graf označený písmenom A zobrazuje hustotu pravdepodobnosti meranej hodnoty $y_L = LSL + g_{LA}$. Stredný graf označený písmenom B zobrazuje pravdepodobnosť zhody P. Spodný graf označený písmenom C zobrazuje pole špecifikácie (označené číslom 1), pole prijatia (označené číslom 3), polia odmietnutia (označené číslom 4), ochranné pásma u dolnej medze g_{LA} (označené číslom 5) a ochranné pásma u hornej medze g_{UA} (označené číslom 6). Hodnoty y_L a y_U označujú najmenšiu, respektíve najväčšiu hodnotu, pre ktorú je možné overenie zhody so špecifikáciou. [19]



Obr. 32) Overovanie: a) zhody so špecifikáciou, b) nezahody so špecifikáciou [19]

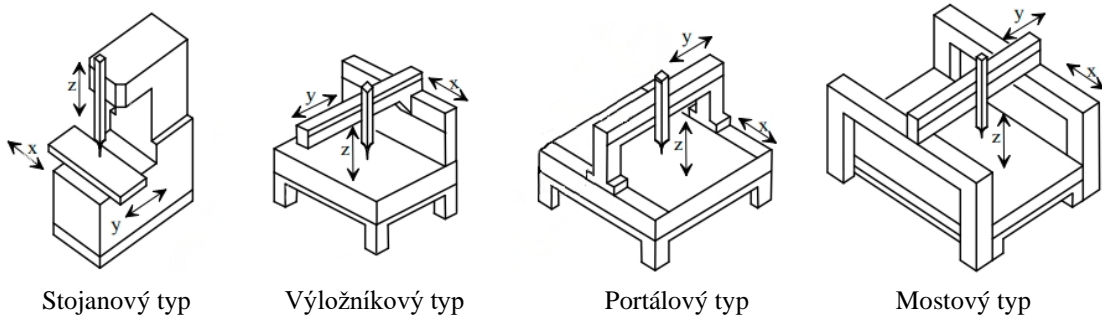
Na obr. 32) vpravo je zobrazené overovanie nezahody so špecifikáciou. Nezhoda so špecifikáciou sa považuje za overenú, ak nameraná hodnota spadá do poľa odmietnutia. Graf označený písmenom A zobrazuje hustotu pravdepodobnosti meranej hodnoty $y_L = LSL - g_{LR}$. Graf označený písmenom B zobrazuje pravdepodobnosť nezahody P. Spodný graf označený písmenom C zobrazuje pole špecifikácie (označené číslom 1), pole prijatia (označené číslom 3), polia odmietnutia (označené číslom 4), ochranné pásma u dolnej medze g_{LR} (označené číslom 7) a ochranné pásma u hornej medze g_{UR} (označené číslom 8). [19]

2.4 Súradnicový merací stroj (CMM)

Súradnicový merací stroj je zariadenie, ktoré meria geometriu meraných objektov pomocou snímania bodov na povrchu meraného objektu. Princíp merania spočíva v stanovení priestorových súradníc nasnímaných bodov, z ktorých sa určuje geometria prvkov meraného objektu. Trojsúradnicové meracie stroje (3D CMM) umožňujú meranie v priestore, teda v troch navzájom kolmých rovinách X, Y, Z. Súradnicové meracie stroje umožňujú univerzálne a automatizované meranie aj tvarovo zložitých a komplexných súčastí. CMM pracuje s dvomi súradnicovými systémami – súradnicovým systémom stroja a súradnicovým systémom meraného objektu. [21]

V dnešnej dobe ponúkajú výrobcovia veľké množstvo rôznych typov CMM v rôznych prevedeniach. Až na zopár výnimiek využívajú všetky konštrukčné prevedenie s polohovaním v karteziánskom súradnicovom systéme. V norme ČSN EN ISO 10360-1:2001 zaoberajúcej sa súradnicovými meracími strojmi je objasnených 10 typov CMM. V súlade s touto normou je možné ich rozdelenie do štyroch základných usporiadaní, zobrazených na obr. 33): [10]

- stojanový typ,
- výložníkový typ,
- portálový typ,
- mostový typ.



Obr. 33) Základné usporiadania CMM [12]

Stojanový typ využíva polohovací stôl pohybujúci sa v osiach X a Y, na ktorom je upnutý meraný objekt. Pohyb v smere osi Z je zabezpečený meracou pinolou so snímacím systémom. Táto konfigurácia disponuje vysokou tuhosťou, vďaka čomu sa jedná o najpresnejšie usporiadanie CMM. Nevýhodou je však menší rozsah merania. [10]

Výložníkový typ využíva meraciu pinolu pohybujúcu sa v smere osi Y umiestnenú na výložníku, ktorý vykonáva pohyb v smere osi X. Výhodou tejto konfigurácie je presúvanie relatívne malých hmôt, čím dochádza k zlepšenej dynamike zariadenia. [20] Na druhej strane sa v smere osi Y mení vyloženie pinoly od vodiacej plochy, kvôli čomu je nutné vyvažovanie a z dôvodu tuhosti je rozsah v tejto osi pomerne malý. [21]

Portálový typ je najrozšírenejším usporiadaním 3D súradnicových meracích strojov určených k stredným a veľkým rozsahom merania. Charakteristickou črtou je vysoká tuhosť konštrukcie, ktorá zabezpečuje pomerne presné meranie aj veľkých súčastí. Portálový typ CMM býva v prevedení s pohyblivým portálom alebo pevným portálom. V prevedení s pohyblivým portálom sa v smere osi X pohybuje portál nad pevným stolom. Pri prevedení s pevným portálom vykonáva pohyb v smere osi X pohybujúci sa stôl a portál tvorí pevnú súčasť rámu. [21]

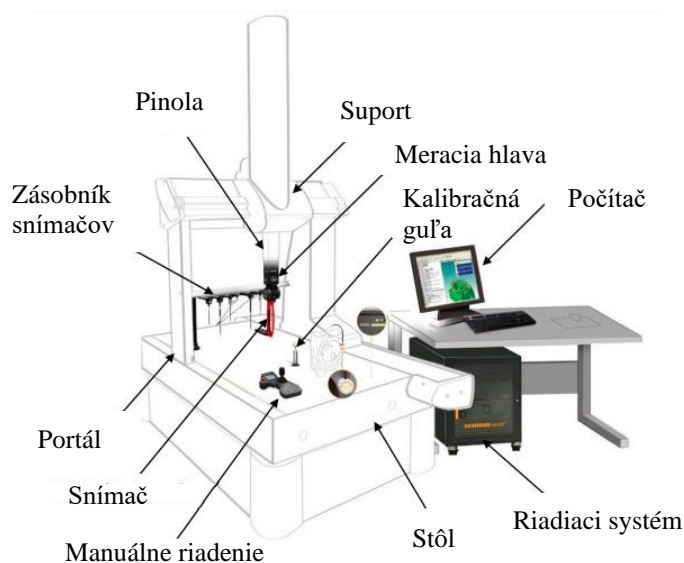
Mostový typ disponuje najväčšími rozsahmi merania a je charakteristický svojou veľkosťou. Súradnicové meracie stroje mostového typu nachádzajú svoje uplatnenie predovšetkým v automobilovom a leteckom priemysle na meranie nadrozmerných objektov. Okrem klasického mostového usporiadania existuje aj usporiadanie s mostom v tvare L. [10]

2.4.1 Základné mechanické prvky CMM

Základné mechanické prvky vytvárajúce konštrukciu súradnicového meracieho stroja sa líšia v závislosti od jednotlivých typov usporiadania stroja. Takmer všetky CMM obsahujú rám, stôl a pinolu. Použitie ďalších prvkov, ako napríklad stojana, stĺpov, výložníka, portálu, mostovej konštrukcie, suportu sa líši v závislosti od konkrétneho typu stroja. Na všetky prvky vo všeobecnosti platí požiadavka vysokej tuhosti, rozmerovej stálosti a tvarovej stálosti. [13] Základné časti portálového súradnicového meracieho stroja sú zobrazené na obr. 34).

Rám tvorí základ stroja, na ktorý sú inštalované ďalšie prvky mechanického systému. Obvykle sa jedná o zváranú konštrukciu s čo najväčšou tuhosťou, keďže práve tuhosť je najdôležitejšou požiadavkou na rám CMM. Pri extrémne veľkých strojoch (primárne CMM mostového typu) je rám nahradený základovou doskou inštalovanou do podlahy. [13]

Stôl, nazývaný aj pracovná doska, predstavuje základňu na osadenie a upnutie meraného objektu. Stôl obvykle pozostáva z prírodného kameňa (žuly) alebo umelého kameňa (granitu). Na funkčné plochy pracovnej dosky sú kladené vysoké požiadavky na rovinnosť, a preto je horná plocha dosky brúsená. Pracovná doska obsahuje obvykle otvory so závitmi, ktoré slúžia na fixáciu meraného objektu pomocou skrutiek a upínok. Stôl CMM musí disponovať predovšetkým objemovou stálosťou, minimálnou teplotnou rozťažnosťou a vysokou životnosťou. [21]



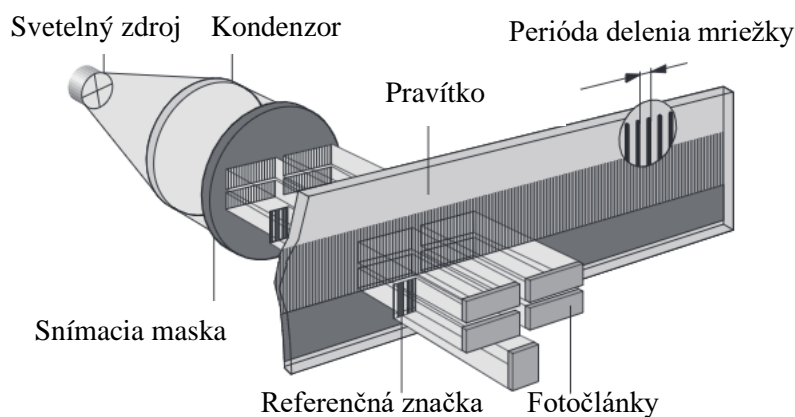
Obr. 34) Časti súradnicového meracieho stroja (upravené podľa [10])

Pinolu tvorí obvykle tyč kruhového alebo štvorcového profilu z liatiny, duralu, prírodného kameňa alebo keramiky. Pinola je pri väčšine súradnicových meracích strojoch vo vertikálnej konfigurácii, avšak existujú aj stroje s horizontálnou orientáciou pinoly. Pri horizontálnej orientácii pôsobí na pinolu od jej vlastnej hmotnosti a hmotnosti snímacieho systému zaťaženie na ohyb, ktoré môže viesť k vzniku priehybu. Na kompenzáciu prípadných priehybov a minimalizáciu chýb spôsobených rozdielnou dĺžkou vysunutia pinoly slúži vyvažovacie zariadenie pozostávajúce z dvoch súmerných závaží. [21]

Odmeriavacie systémy CMM

Odmeriavacie systémy predstavujú základ merania na CMM, keďže umožňujú získanie súradníc snímaných bodov. Tieto systémy ovplyvňujú presnosť merania, keďže rozlišovacia schopnosť a periodická chyba pravítka majú vplyv na výsledok merania. V súradnicových meracích strojoch môžeme nájsť rôzne druhy odmeriavacích systémov, ako napríklad rotačné enkodéry, indukčné, magnetické snímače, laserové interferometre a tak ďalej. Najviac rozšíreným je však odmeriavací systém založený na pravítke a fotoelektrickom snímaní, zobrazený na obr. 35). Tento systém môže pracovať na báze absolútneho alebo inkrementálneho odmeriavania. [22]

Sklenené pravítko je opatrené mriežkou, ktorá pozostáva z polí neprepúšťajúcich svetlo a medzier prepúšťajúcich svetlo na jednej stope. Tieto polia a medzery majú rovnakú šírku a perióda delenia mriežky býva obvykle 10 alebo 20 mikrometrov. Na súdežnej stope sú umiestnené referenčné značky. Súčasťou snímačej hlavy je zdroj svetla, kondenzor, snímacia maska a fotočlánky. Pri pohybe snímačej hlavy dochádza striedavo k prekryvaniu polí a medzier skleneného pravítka a snímačej masky. Fotočlánky zaznamenávajú periodické kolísanie intenzity svetla. Na základe týchto zmien následne generujú elektrický signál, z ktorých sú určované súradnice polohy. Výstupom sú dva sínusové signály navzájom posunuté o 90° a referenčný signál. Perióda signálu zodpovedá perióde mriežky pravítka. Zvýšenie rozlíšiteľnosti celého odmeriavacieho systému je možné dosiahnuť natočením skenovacej mriežky vzhľadom k základnej mriežke pravítka o malý uhol. [22]



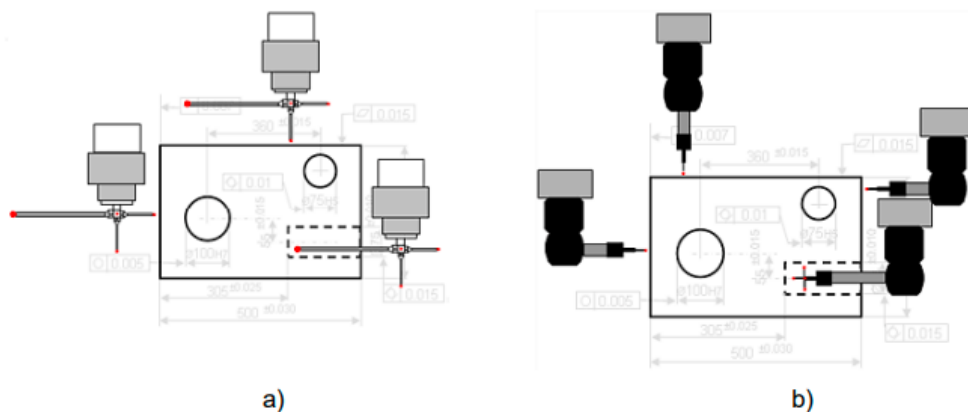
Obr. 35) Fotoelektrické snímanie polohy (upravené podľa [22])

Okrem vyššie uvedenej varianty fotoelektrického snímania je možné použitie ďalších odmeriavacích systémov založených na rovnakom princípe. Iný typ fotoelektrického odmeriavania používa oceľovú stupnicu s mriežkou tvorenou odrazovými čiarami zaisťujúcimi odraz žiarenia a medzerami pohlcujúcimi žiarenie. Pri vzájomnom pohybe snímačej hlavy a oceľového pravítka dochádza na základe detekcie odrazeného svetla od stupnice fotočlánkami k vzniku periodického elektrického signálu. Ďalší typ zase pracuje s ohybom a interferenciou svetelného toku. V tomto variante obsahuje sklenené pravítko nasvetlovaciu fázovú mriežku s výškou stupňov okolo 0,2 mikrometra. Snímacia maska je taktiež vybavená mriežkou a pri relatívnom pohybe masky a pravítka dochádza k lomu a interferencii svetla. Detekciu žiarenia fotočlánkami sa opäť generuje sínusový signál. [22]

2.4.2 Snímacie systémy CMM

Snímacie systémy predstavujú neoddeliteľnú súčasť CMM slúžiacu na snímanie bodov meraného objektu. Snímací systém je umiestnený v pinole stroja a jeho základnou súčasťou je snímacia hlava so sondou a snímacím dotykom. [21]

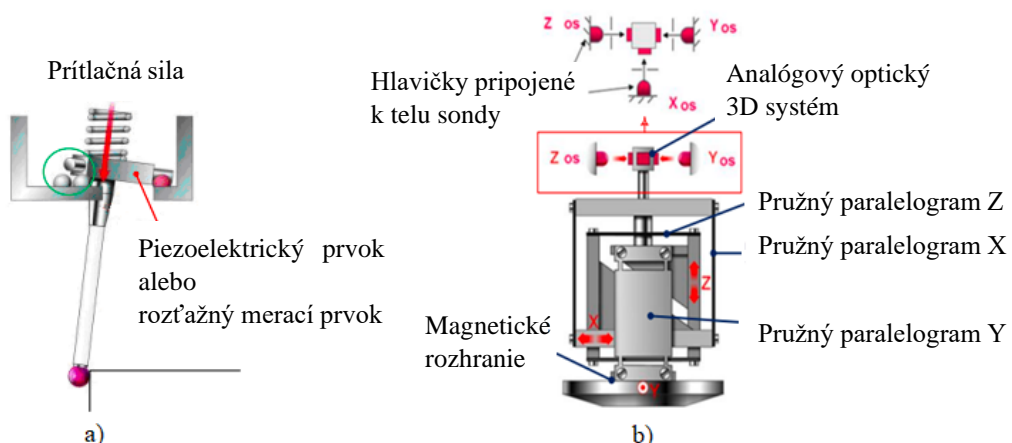
Snímacia hlava predstavuje prvok snímacieho systému slúžiaci na polohovanie sondy k meranému objektu. Snímacie hlavy môžu mať podobu pevných alebo indexovateľných hlavíc. Porovnanie procesu snímania bodov pomocou pevnej hlavice a indexovateľnej hlavice je zobrazený na obr. 36). Pevné hlavice dosahujú vyšších presností, avšak neumožňujú priestorové natáčanie snímačej sondy. Indexovateľné hlavice umožňujú natáčanie snímačej sondy v jednotlivých osiach a jej zaistenie v požadovanej pozícii, vďaka čomu zabezpečujú polohovanie sondy v pracovnom priestore stroja. Indexovateľné hlavice sa podľa spôsobu polohovania delia na motorické a manuálne. Výhodou indexovateľných hlavíc je možnosť merania tvarovo komplikovaných objektov s jediným dotykom, čo pri pevných hlaviciach nemusí byť vždy možné. [10, 21]



Obr. 36) Snímanie bodov: a) pevnou hlavicom, b) indexovateľnou hlavicom [10]

Spôsoby snímania na CMM

Snímanie bodov na CMM môže byť realizované kontaktné alebo bezkontaktné. V prípade kontaktného merania sa snímacia hlava dotýka meranej súčasti prostredníctvom hrotu, ktorý tvorí dotyk s povrchom meraného objektu. Kontaktné snímacie systémy potrebujú na získanie informácií o meraných prvkoch fyzický kontakt s meraným objektom. Podľa princípu funkcie sa delia do dvoch skupín – systémy spínacieho typu a systémy snímacieho typu (zobrazené na obr. 37). [21]



Obr. 37) Kontaktný systém: a) spínací, b) snímací (upravené podľa [10])

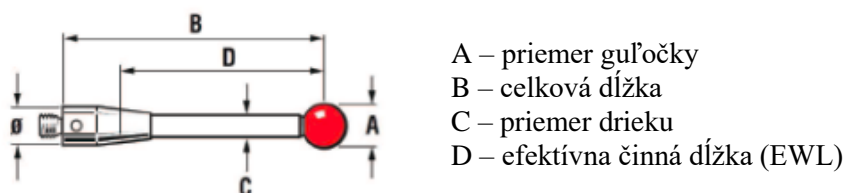
V spínacích systémoch dochádza v okamihu dotyku s meraným objektom k vychýleniu meracieho hrotu, čo vedie k zopnutiu kontaktov v sonde. Na základe zopnutia kontaktov dochádza k vyslaniu signálu na zastavenie pohybu a následne k odčítaniu súradníc z odmeriavacieho systému CMM. Zo spínacej sondy sú získavané diskkrétne hodnoty, čiže sa jedná o kontaktné diskkrétne snímanie. Spínacie sondy neumožňujú spojité snímanie súradníc, inak nazývané skenovanie. Spínacia sonda je zaskrutkovaná do hlavice a skladá sa z tela sondy, modulu a dotyku. Modul je k telu sondy pripojený magneticky, vďaka čomu je umožnená automatická výmena modulu alebo meracieho dotyku a zároveň je sonda chránená pred poškodením pri prípadnom náraze. Spínacie sondy pracujú na elektromechanickom alebo piezoelektrickom princípe. [21]

Snímacie systémy môžu pracovať v režime s neustálym kontaktom medzi hrotom a meraným objektom. V okamihu zaznamenania kontaktu medzi hrotom a meraným objektom vypína riadiaci systém dotlačacie zariadenie vyvodzujúce nastavenú meraciu silu a zapína servopohony pre jednotlivé osy. Tento postup zabezpečuje počas merania trvalý kontakt hrotu a meraného objektu s dotláčaním hrotu vopred stanovenou meracou silou. Snímacie systémy umožňujú snímanie v statickom režime s diskkrétnymi hodnotami alebo v dynamickom režime s možnosťou spojitého snímania – skenovania. Jedná sa o konštrukčne zložitejší typ kontaktného systému skladajúci sa z tela sondy v puzdre snímacej hlavy, ktoré je uložené v dvojitém alebo trojitom paralelograme. Každý z nich môže byť vychýľovaný, pričom sú všetky výchylky merané a zaznamenávané. [21]

Bezkontaktné snímacie systémy nevyžadujú fyzický kontakt s meraným objektom. Pri 3D meraniach ide v podstate o skenery poskytujúce 3D digitalizáciu. Bezkontaktné snímače pracujú na rozličných fyzikálnych princípoch snímania. Najobvyklejšie využívaným princípom spomedzi bezkontaktných snímačov je optický systém v podobe laserového a kamerového snímania. Laserové systémy využívajú dva rovnobežné laserové lúče pretínajúce sa v presne stanovenej vzdialenosti. Dotyk je zaznamenaný v mieste, v ktorom sa prienik týchto dvoch lúčov dotkne meraného objektu. Kamerové systémy prevádzajú optický signál na digitálny obraz, ktorý je spracovaný vo vyhodnocovacom programe na výpočet meraných bodov. [10]

Snímacie dotyky CMM

Snímacie dotyky sú súčasťou snímacieho systému a slúžia na sprostredkovanie kontaktu medzi povrchom meraného objektu a sondou. Základné parametre priameho dotyku sú zobrazené na obr. 38). Vlastnosti použitého dotyku (napríklad typ, materiál, rozmery) závisia na snímanom objekte ako aj na jeho prístupnosti v rámci pracovného priestoru stroja. [21]



Obr. 38) Rozmery dotyku (upravené podľa [21])

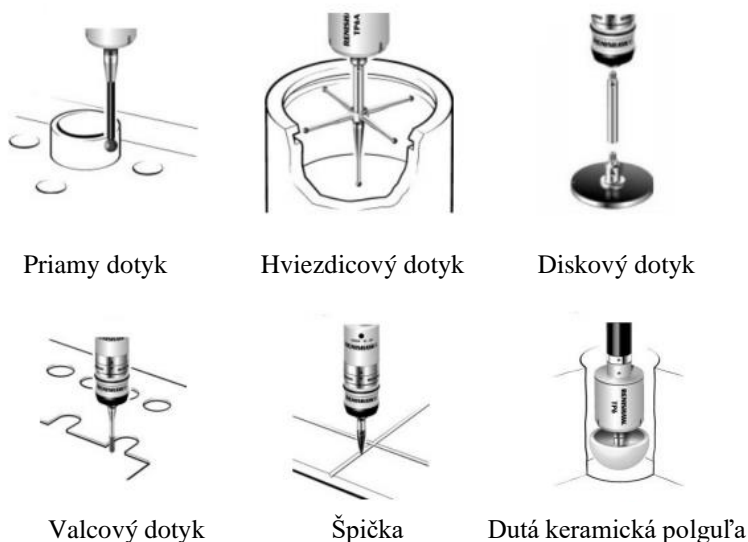
Na predĺženie dotyku slúžia predlžovacie nástavce, ktoré umožňujú meranie aj v ťažko dostupných miestach meraného objektu (napríklad hlboké otvory). Použitie predlžovacích nástavcov však znižuje tuhosť dotyku, s čím súvisí zníženie presnosti merania. Ďalšou možnosťou prispôsobenia dotyku predstavuje kĺbový adaptér, ktorým je možné podľa charakteru meraného prvku nastaviť dotyk v dvoch osiach. Kĺbový adaptér je používaný

primárne pri pevných meracích hlaviciach. Najdôležitejšou charakteristikou dotyku je jeho tuhosť a dokonalý tvar meracej guľôčky. Na dosiahnutie čo možno najvyššej presnosti merania je vhodné voliť dotyk pri dodržaní nasledujúcich zásad: [21]

- minimálna možná dĺžka dotyku (na zamedzenie vzniku priehybu),
- obmedzenie použitia predlžovacích nástavcov,
- vhodný priemer guľôčky podľa charakteru meraných prvkov.

Z hľadiska konštrukcie sa dotyky rozdeľujú na (zobrazené na obr. 39): [10]

- Priamy – základný typ dotyku pozostávajúci z guľôčky a drieku.
- Hviezdicový – dotyk pozostávajúci z konfigurácie viacerých hrotov pripravených k stredovému dielu. Tento typ umožňuje snímanie tvarovo zložitých prvkov meraného objektu.
- Diskový – dotyk používaný pri snímaní zápichov a drážok, ktoré nie je možné snímať hviezdicovým dotykom.
- Dotyky na špeciálne účely – patrí sem valcový dotyk používaný k snímaniu tvarových prvkov tenkých plechov a závitov, špička používaná ku kontrole závitov, definovaných bodov, rysiek a dutá keramická polguľa používaná ku kontrole hlbokých otvorov.



Obr. 39) Typy dotykov [21]

Dôležitým prvkom dotyku je meracia guľôčka, ktorá môže byť vyrobená z nasledujúcich materiálov (zobrazených na obr. 40): [21]

- Rubín – najpoužívanejší materiál, ktorý je vďaka svojim vlastnostiam (vysoká tvrdosť, hladký povrch, odolnosť voči mechanickému opotrebovaniu) vyhovujúci pri väčšine meracích aplikácií. Výnimku tvorí snímanie hliníkových materiálov, pri ktorých môže dochádzať k adhéznemu oteru s usadzovaním hliníku na povrchu guľôčky a snímanie liatinových povrchov, ktoré môžu spôsobiť opotrebovanie povrchu guľôčky oterom.
- Nitrid kremíka – nitrid kremíka má obdobné vlastnosti ako rubín, avšak pri kontakte s oceľovými povrchmi vykazuje výraznú mieru opotrebovania. Jeho použitie je ideálne na hliníkové materiály, pri ktorých zastupuje nevhodný rubín.

- Oxid zirkoničitý – veľmi pevný keramický materiál, ktorý je vďaka svojim vlastnostiam vhodný na snímanie liatinových súčastí. Svojimi charakteristikami tvrdosti a opotrebovania sa približuje ku kvalitám rubínu.
- Diamant – diamant prevyšuje vyššie uvedené materiály takmer vo všetkých smeroch. Disponuje extrémnou tvrdosťou a minimálnym opotrebovaním v dôsledku trenia. Svojou univerzálnosťou je vhodný na takmer všetky meracie aplikácie, vrátane hliníkových a liatinových povrchov.



Obr. 40) Materiály meracích guľičiek [21]

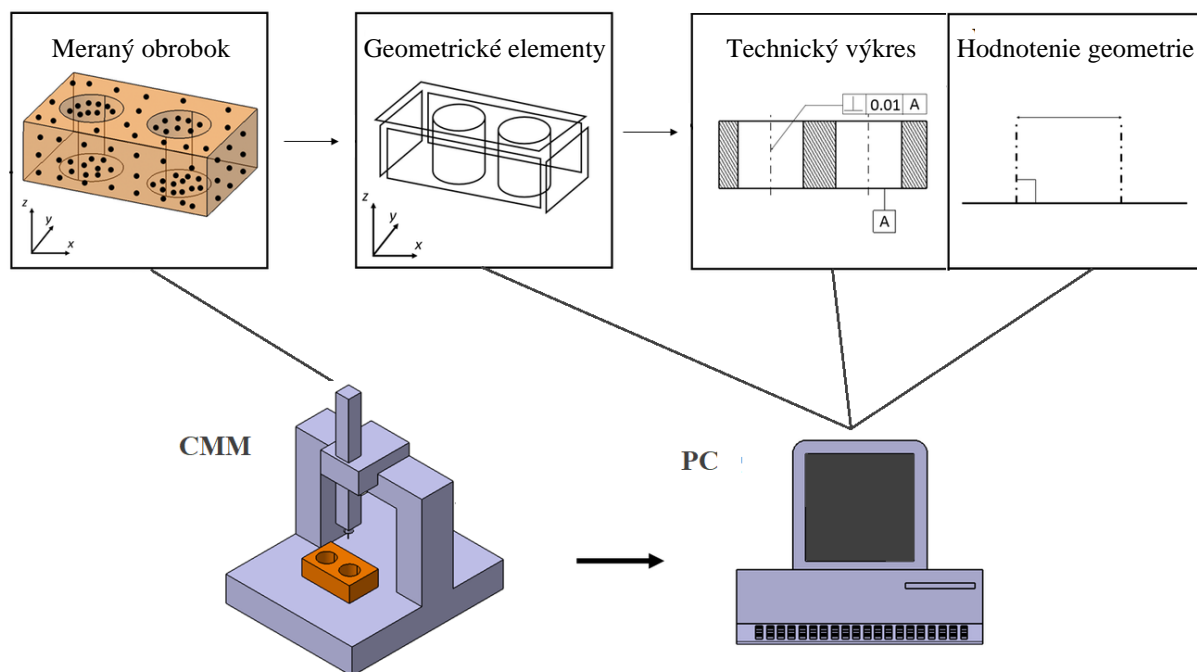
Ďalším dôležitým prvkom snímacieho dotyku je driek, ktorý môže byť zhotovený z nasledujúcich materiálov: [21]

- Oceľ – nemagnetická, nerezová oceľ je vzhľadom na pomer tuhosti a hmotnosti stopky používaná predovšetkým na dotuky s dĺžkou do 30 mm a guľôčkou o priemere 2 mm a viac.
- Karbid volfrámu – predstavuje ideálny variant na požiadavku maximálnej tuhosti s minimálnym priemerom stopky. Využíva sa obvykle pri dĺžke stopky do 50 mm a pri priemere guľôčky pod 1 mm.
- Keramika – stopky z keramiky poskytujú pri priemere guľôčky nad 3 mm a pri dĺžke nad 30 mm tuhosť porovnateľnú s oceľou. V prípade kolízií zabezpečujú svojím roztrieštením ochranu sondy.
- Uhlíkové vlákna – tento materiál vyniká skvelým pomerom vysokej tuhosti a nízkej hmotnosti u dotykov s dĺžkou nad 50 mm. Stopka z uhlíkových vlákien je optimálnym riešením na vysoko presné sondy využívajúce tenzometrický systém snímania, keďže disponujú skvelou charakteristikou tlmenia vibrácií a minimálnym koeficientom tepelnej rozťažnosti.

2.5 Programovanie meracích operácií

Princíp merania na súradnicových meracích strojoch pozostáva vo všeobecnosti z troch hlavných krokov, schematicky zobrazených na obr. 41): [25]

- a) detekcia bodov na povrchu meraných súčastí podľa vopred stanoveného plánu merania,
- b) matematické priradenie nasnímaných bodov na meranom povrchu k požadovanej nominálnej geometrii,
- c) vyhodnotenie rozmerových a geometrických charakteristík vzhľadom k predpísaným špecifikáciám.



Na zabezpečenie vyššie uvedených krokov je v rámci prípravy meracieho plánu používaný špecializovaný softvér. Jednotliví výrobcovia CMM obvykle disponujú vlastným softvérom určeným primárne k svojim meracím zariadeniam. Tieto programy pracujú vo všeobecnosti na podobnom princípe, avšak odlišujú sa v určitých funkciách, moduloch, užívateľskom rozhraní a podobne. Jedným zo softvérov určených k programovaniu a riadeniu merania na súradnicovom meracom stroji je Calypso od spoločnosti ZEISS. Calypso je univerzálny softvér slúžiaci na meranie geometrie pravidelných aj všeobecných tvarových prvkov kompatibilný so všetkými typmi súradnicových meracích strojov od spoločnosti ZEISS. Softvér Calypso umožňuje vykonávanie všetkých meracích úloh v rámci jedného softvérového balíka. Ponúka intuitívne rozhranie na časovo úsporné vytváranie a správu meracieho programu bez nutnosti zložitého a časovo náročného textového programovania kódu. K prezentácii výsledkov merania je využívaná integrovaná funkcia ZEISS PiWeb, ktorá umožňuje podrobnú vizualizáciu protokolov merania podľa potrieb užívateľa.

K základnej verzii programu, ktorá sama o sebe poskytuje množstvo možností a funkcií merania, poskytuje ZEISS možnosť zaobstarania rôznych opcií slúžiacich na zlepšenie a zefektívnenie procesu merania. K ponúkaným opciám týkajúcich sa programovania meracích operácií v prostredí Calypso patria napríklad: [26]

- Plánovač (*Planner*) – doplnok umožňujúci vytváranie meracích programov offline.
- Simulácia (*Simulation*) – doplnok umožňujúci simuláciu vytvoreného meracieho programu.
- Voľný tvar (*Freeform*) – doplnok na meranie, kontrolu a analýzu obrobkov s neštandardnými 3D geometriami a na vykonávanie analýzy povrchu.
- Krivka (*Curve*) – doplnok na meranie a analýzu 2D kriviek, 3D kriviek, zdvihových kriviek, známych a neznámych kontúr, a symetrických kriviek.
- Meranie rúrok (*Tube measurement*) – doplnok na meranie a analýzu zakrivených rúr, hadíc, drôtov a kĺbových ramien.

- PCM (*Parameter Coded Measurement*) – doplnok na skrátenie času potrebného na meranie obrobkov z rovnakej skupiny dielov s podobným tvarom líšiacimi sa len niekoľkými rozmermi.
- Drsnosť (*Roughness*) – doplnok na určovanie a grafické zobrazovanie parametrov drsnosti povrchu.
- DMIS import/export – doplnok umožňujúci import a export meracieho plánu v štandardnom formáte DMIS, s ktorým pracuje mnoho výrobcov súradnicových meracích strojov.

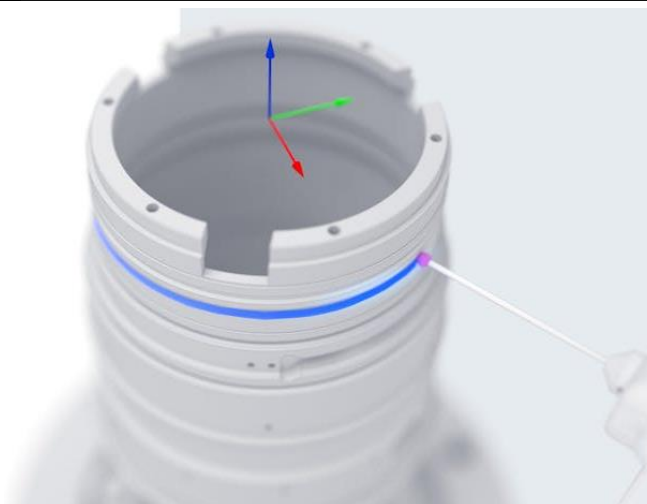
K opciám vylepšujúcim výkon a zvyšujúcim efektivitu merania patria napríklad: [26]

- VAST sondovanie (*probing*) – doplnok umožňujúci skrátenie času pri detekcii meraného bodu a čas snímania pri meraní diskretných bodov so zachovaním presnosti,
- VAST navigátor (*navigator*) – doplnok umožňujúci vylepšenie skenovacích operácií kruhových dráh zlepšením presnosti a výrazným skrátením času merania,
- VAST výkon (*performance*) – doplnok umožňujúci zjednodušenie tvorby programu a zvýšenie rýchlosti skenovania nespojitých dráh so zachovaním presnosti. Pri zariadeniach s automatickou výmenou snímacieho systému umožňuje rýchlejšiu výmenu.

2.5.1 Offline programovanie

Prostredníctvom opcie Calypso *Planner* je používateľom umožnené vytváranie kompletných meracích plánov na počítači, ktorý nie je nakonfigurovaný a pripojený k žiadnemu súradnicovému meraciemu stroju. V takzvanom offline programovaní je teda počítač nezávislý od súradnicového meracieho stroja. Na programovanie meracích operácií v offline režime je potrebný CAD model meraného objektu importovaný do prostredia Calypso v jednom z podporovaných formátov. Meracie plány vytvorené v rámci offline programovania je možné kedykoľvek otvoriť a spustiť na akomkoľvek súradnicovom meracom stroji ZEISS. Nespornou výhodou takéhoto režimu je eliminácia neproduktívneho času CMM súvisiaceho s programovaním meracieho plánu v dobe nečinnosti stroja. Samotný súradnicový merací stroj tak nie je blokovaný programovaním a môže byť využívaný takmer výlučne iba na meranie. [26]

Prostredníctvom opcie Calypso *Simulation* je používateľom umožnené simulovanie vytvoreného meracieho plánu vrátane dráh pohybu snímacieho systému. Softvér pri simulácii (graficky znázornenej na obr. 42) zobrazuje pohyb snímacieho systému počas automatického chodu vytvoreného programu v prostredí s CAD modelom meraného objektu. Týmto spôsobom môže užívateľ sledovať presné pohyby snímača počas CNC chodu, vďaka čomu môže následne optimalizovať vytvorený plán merania. Vizualizácia v prostredí s CAD modelom odhaľuje taktiež prípadné kolízie, ktoré je po ich identifikovaní potrebné eliminovať. Takáto kontrola slúži ako prevencia pred fyzickou kolíziou snímača, pri ktorej by mohlo dôjsť k výrazným finančným škodám. V rámci simulácie pohybu vyžaduje Calypso úplný geometrický model snímacieho systému, ktorý je možný definovať v softvéri *Stylus System Creator* od spoločnosti ZEISS. Tento softvér predstavuje databázu rôznych typov snímacích hláv, sond a dotykov, ktoré sa dajú vzájomne poskladať do kompletného snímacieho systému. Takto zložený snímací systém je možno importovať do prostredia softvéru Calypso. [26]



Obr. 42) Znáznorenie simulácie v offline programe [26]

2.5.2 Metódy programovania meracích operácií

Vytvorenie programu merania je možné v zásade 3 rôznymi spôsobmi – metódou „teach in“, prostredníctvom CAD modelu a pomocou PMI dát. Nižšie sú jednotlivé metódy rozobrané bližšie.

Programovanie „teach in“

Táto metóda pozostáva z ručného snímania bodov na meranom objekte, na základe ktorých generuje program Calypso jednotlivé snímané elementy. Podľa počtu bodov a ich umiestnenia rozoznáva softvér automaticky ideálnu geometriu snímaného elementu. Zoznam základných elementov a k nim prislúchajúci minimálny počet snímaných bodov je uvedený v tab. 4). Po vytvorení zoznamu elementov musí užívateľ špecifikovať ich nominálne hodnoty, keďže snímané body na skutočnej súčasti obsahujú odchýlky od ideálnych charakteristík. [28]

Tab. 4) Minimálny počet potrebných bodov na snímanie geometrických elementov [28]

Element	Minimálny počet snímaných bodov
Bod	1
2D priamka	2
Rovina	3
Kružnica	3
Valec	5
Kužel'	6
Guľa	4
Rovina symetrie	4
Elipsa	5
Obdĺžnik	5
Pozdĺžny otvor	5

Program vytvorený pomocou metódy „teach in“ je možné uložiť a používať ho opakovane na ďalšie merania rovnakých súčastí. Táto metóda sa používa primárne v prípadoch, kedy nie je k dispozícii CAD model meraného predmetu.

Programovanie prostredníctvom CAD modelu

Programovanie prostredníctvom CAD modelu znižuje v porovnaní s predchádzajúcou metódou komplikovanosť a čas tvorby meracieho plánu. V tejto metóde užívateľ vytvára jednotlivé elementy priamo z CAD modelu meranej súčiastky, ktorá je importovaná do prostredia softvéru Calypso. Generovanie požadovaných elementov je možné výberom plôch modelu, prípadne výberom jednotlivých bodov na jeho povrchu, z ktorých program automaticky určuje tvar elementov. [28]

Programovanie prostredníctvom PMI dát

PMI dáta predstavujú modernejšiu formu využitia CAD modelu pri programovaní meracích operácií. Jedná sa o bezvýkresovú formu predávania informácií o súčiastiach s cieľom takmer automatického generovania meracieho plánu a výraznej časovej úspory pri tvorbe programu. PMI dáta sú digitálne informácie obsahujúce geometrické špecifikácie produktu a rôzne ďalšie požiadavky na produkt. Pri importe takéhoto modelu v programe Calypso by malo dôjsť k automatickému vygenerovaniu meraných elementov a k nim prislúchajúcich charakteristík, čo by výrazne znížilo čas strávený programovaním meracích operácií. [28] V súčasnosti je však problém so správnym a úplným prenosom PMI dát medzi softvérmi, a preto sa táto metóda tvorby programu merania v praxi využíva iba zriedkavo.

2.5.3 Tvorba meracieho programu

Postup tvorby plánu merania a programovania meracích operácií sa vo všeobecnosti skladá z nižšie uvedených krokov.

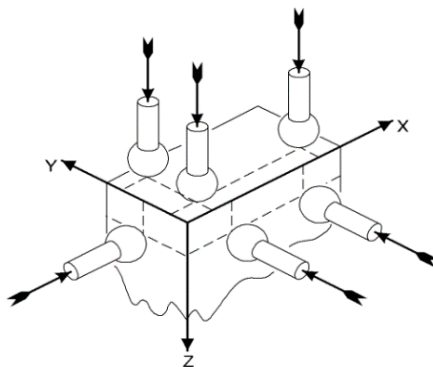
Analýza výkresovej dokumentácie

Prvým podstatným krokom pri vytváraní programu merania je dôkladná analýza výkresovej dokumentácie meraného produktu. Špecifikácie predpísané na výkrese súčasti ovplyvňujú všetky ďalšie kroky v procese merania. Z toho dôvodu by mali byť údaje na výkrese faktorom pri rozhodovaní o ďalších činnostiach. Na základe analýzy predpísaných tolerancií jednotlivých prvkov je možné stanoviť ideálne upnutie súčasti, zvoliť snímací dotyk a vytvoriť efektívny merací program. Geometrickým špecifikáciám produktu merateľných na súradnicových meracích strojoch je v rámci tejto práce venovaná celá podkapitola 2.1. [25]

Vyrovnanie súčasti a vytvorenie základného systému

Vyrovnanie súčasti vymedzuje polohu a orientáciu meraného objektu v rámci pracovného priestoru stroja. Cieľom vyrovnania je fixácia objektu v priestore pomocou odobrania všetkých šiestich stupňov voľnosti súčasti (tri translácie v osiach X, Y, Z a tri rotácie okolo osí X, Y, Z). V rámci vyrovnania súčasti je definovaný základný lokálny súradnicový systém meraného produktu. K základnému systému sú vzťahované všetky ďalšie merané elementy. Na vyrovnanie súčasti je možné použiť jeden z nasledujúcich spôsobov: štandardná metóda 3-2-1, metóda 3D pripasovania (*3D Best Fit*), metóda RPS a metóda P6. [28]

Štandardná metóda pozostáva v programe Calypso z piatich vyrovnávajúcich referencií. Primárna referencia obmedzuje 2 rotačné stupne voľnosti, zatiaľ čo sekundárna referencia obmedzuje tretí rotačný stupeň voľnosti. Tri terciárne referencie určujú translačné obmedzenia a ich priesečník určuje počiatok súradnicového systému. Skutočnú polohu meranej súčasti v pracovnom priestore stroja je v tomto spôsobe zarovnania možno definovať pomocou metódy 3-2-1, ktorá je znázornená na obr. 43). Nasnímaním troch bodoch sa určí primárna referencia (napríklad rovina), ďalšie dva body určujú sekundárnu referenciu (napríklad priamka) a posledný bod stanoví terciárnu referenciu. [28]



Obr. 43) Schéma vyrovnania súčasti metódou 3-2-1 [27]

Metóda 3D pripasovania je využívaná pri zarovnaní súčastí, ktoré nemajú jednoznačne definované žiadne vzťahné elementy. Takáto situácia nastáva pri súčastiach všeobecných tvarov. Na vyrovnanie je možné použiť neobmedzený počet bodov alebo geometrických prvkov so špecifikovanou geometriou. Zarovnanie sa mení, až pokiaľ nie je optimalizovaná hodnota súčtu chýb medzi špecifikovanými a skutočnými nasnímanými bodmi. Skutočné body sú zarovnávané s nominálnymi bodmi podľa metódy najmenších štvorcov. [28]

Metóda RPS má v programe CALYSO 2 varianty – RPS 321 a RPS voľný tvar. Obe vychádzajú z predchádzajúcich metód, avšak sú vzťahnuté na systém referenčných bodov. Jednotlivé body zarovnania sú špecifikované na výkrese meranej súčasti. Zarovnanie tak podlieha pravidlám a nie je plne definovateľné užívateľom. [28]

Metóda P6 je vhodná primárne na vyrovnanie trubiek. Vyrovnanie je definované pomocou 3 bodov, kde prvý bod definuje počiatok v osiach X, Y, Z, druhý definuje hlavnú os a tretí otáčanie okolo hlavnej osi. Zvyčajne sa volí počiatok lokálneho súradnicového systému na čele a zároveň v osi rotácii telesa. [28]

Bezpečnostný kváder

Bezpečnostný kváder predstavuje fiktívny kváder vytvorený okolo meranej súčasti, ktorý slúži na ochranu snímacieho systému pred prípadnou kolíziou. Snímací systém pri prechode merania z jedného elementu na ďalší vychádza mimo definovaný bezpečnostný kváder na jeho hranu, čím je zabránené kolízii s meraným objektom alebo s inými prekážkami. Pri práci s CAD modelom umožňuje program Calypso po určení veľkosti odstupu bezpečnostných rovín od modelu automatické vygenerovanie bezpečnostného kvádra. Pri vytváraní programu bez CAD modelu sa bezpečnostný kváder určuje číselným definovaním súradníc jednotlivých rovín. [28]

Tvorba elementov

Elementy slúžia v programe Calypso na definíciu prvkov meraného objektu, ktoré sú primárne predmetom merania, prípadne slúžia k ich vyhodnoteniu alebo k definícii základného systému. Elementy obsahujú informácie o nominálnej geometrii prvkov, ktoré sú neskôr použité na účely výpočtu odchýlok vlastností skutočnej súčasti od ideálneho stavu. Okrem fyzických prvkov na súčasti je možné definovať aj takzvané konštrukčné elementy. Konštrukčné elementy nie je možné priamo snímať, avšak sú definované pomocou matematických vzťahov z fyzických prvkov. [28]

V rámci definície elementov nastavuje užívateľ stratégie snímania jednotlivých prvkov. Tento krok predstavuje významnú súčasť tvorby plánu merania, keďže zvolená stratégia snímania výrazne ovplyvňuje presnosť výsledkov merania. Okrem stratégií snímania je možné definovať aj stratégie vyhodnotenia nasnímaných bodov. Stratégiám merania je venovaná podkapitola 2.5.4.

Definícia charakteristík a ich vyhodnotenie

Špecifikácie meranej súčasti zadané vo výkresovej dokumentácii sa v programe Calypso definujú pomocou charakteristík. V rámci definície charakteristík volí užívateľ veľkosť tolerančného poľa a rovnako ako pri definícii elementov, aj v rámci jednotlivých charakteristík môže zvoliť stratégie vyhodnotenia nasnímaných bodov. Charakteristiky umožňujú kontrolovať stanovené tolerančné medze, ktoré musia merané prvky spĺňať. Jednotlivé charakteristiky sú naviazané na elementy vytvorené v predchádzajúcom kroku. Z nasnímaných bodov sú určené hodnoty jednotlivých charakteristík a ich odchýlky od nominálnej geometrie. Po vykonaní plánu merania je zobrazený protokol s údajmi o všetkých definovaných charakteristikách. V zozname vytvorených charakteristík v programe Calypso sú jednotlivé charakteristiky za účelom rýchleho prehľadu zafarbené na zeleno v prípade zhody, respektíve na červeno v prípade nezahody so špecifikáciou. Okrem toho je možné aj grafické zobrazenie nameraných bodov. [28]

Kvalifikácia a kalibrácia snímacieho systému

Pred spustením vytvoreného programu na súradnicovom meracom stroji je potrebné zaistiť, aby boli všetky snímače použité v pláne merania kvalifikované. Kvalifikácia snímacieho systému spočíva v zameraní kalibračnej gule referenčným snímačom stroja a následne snímačmi určenými na meranie. Kalibračná guľa je zhotovená s mimoriadnou presnosťou a so známym priemerom, ktorý je zavedený v softvéri stroja. Táto guľa slúži ako prostriedok na naviazanie použitých snímačov na referenčný snímač so známymi rozmermi zavedenými v softvéri stroja. Nasnímané hodnoty polohy a priemeru kalibračnej gule sú použité na určenie korekcií kvalifikovaných snímačov. Tento proces má výrazný vplyv na výsledky merania, preto by mala byť zabezpečená čistota povrchu kalibračnej gule a snímacích dotykov. Kvalifikácia snímacieho systému je potrebná pri inštalácii nového systému, po značnej zmene podmienok merania, prípadne po kolízii snímača. Prvá kvalifikácia snímača musí byť vykonaná manuálne. Ak už bol snímač aspoň raz kvalifikovaný, môže byť rekvalifikácia vykonaná automaticky. [28]

2.5.4 Stratégie merania

Stratégia merania predstavuje súhrn definícií určujúcich metódy snímania bodov na povrchu súčasti a metódy vyhodnotenia nameraných hodnôt. V nastavení stratégie snímania určuje užívateľ spôsob, akým bude vybraný prvok snímaný. Ku každému prvku je možné priradiť jednu alebo viacero stratégií. K základným parametrom stratégie snímania patrí:

- miesto a dráha snímania bodov na elemente,
- použitý snímač,
- počet snímaných bodov, respektíve krok medzi dvoma snímanými bodmi,
- rýchlosť snímania.

Program Calypso ponúka pre základné elementy výber preddefinovaných stratégií snímania, ktoré je možné ľubovoľne modifikovať. Tieto predvolené stratégie sa líšia od tvaru elementu a ponúkajú užívateľovi rýchly spôsob konfigurácie merania. V tab. 5) je zobrazený príklad preddefinovaných stratégií pre element roviny a valca v programe Calypso. Okrem týchto preddefinovaných možností má užívateľ možnosť definície vlastnej stratégie snímania.

Tab. 5) Príklady preddefinovaných stratégií pre element roviny a valca

Element	Názov stratégie	Význam
Rovina	Mriežka	Rovina je snímaná mriežkou s užívateľom definovaným rozstupom.
	Množina bodov	Rovina je snímaná množinou samostatných bodov.
	Polylína	Rovina je snímaná polylíniou.
	Kruhovú dráhu	Rovina je snímaná kruhovou dráhou.
	Viacnásobná polylína	Rovina je snímaná niekoľkými polylíniami.
Valec	2 kruhové dráhy	Valec je snímaný 2 kružnicami – jednou na vrchu a druhou na spodku valca. Výška a počet snímaných kružníc sú nastaviteľné.
	1 kruhová dráha	Valec je snímaný 1 kružnicou v strede valca. Výška a počet snímaných kružníc sú nastaviteľné.
	Povrchové čiary	Valec je snímaný skupinou čiar. Počet, štartovacia a cieľová dĺžka snímaných čiar sú nastaviteľné.
	Špirálová dráha	Valec je snímaný dráhou v tvare špirály. Sklon, počet otáčok, počiatkový uhol a smer otáčania sú nastaviteľné.

Metodika vyhodnotenia elementu definuje matematický model spracovania nasnímaných bodov. Zvolené parametre vyhodnotenia určujú spôsob, akým budú vyhodnotené namerané hodnoty. Vyhodnotenie ovplyvňujú primárne nasledujúce parametre: [28]

- metóda a rozsah vyhodnotenia,
- filtrácia nameraných hodnôt,
- eliminácia odľahlých hodnôt.

Metóda vyhodnotenia

Na vyhodnotenie nasnímaného geometrického elementu je možné použitie viacerých metód vyhodnotenia, pričom každá z nich vedie k mierne odlišnému výsledku. V tab. 6) je zobrazený prehľad použiteľných metód priradenia geometrie k nasnímaným bodom pre jednotlivé typy elementov v programe Calypso. Na vyhodnotenie je možné zvoliť jednu z nasledujúcich metód: [28]

- metóda najmenších prvkov (Gaussova metóda)
- metóda minimax (Čebyševova metóda)
- metóda minimálneho opísaného elementu
- metóda maximálneho vpísaného elementu
- metóda tangenciálneho elementu
- metóda elementu L1 – mimo normy ČSN ISO 1101:2020.

Tab. 6) Prehľad použiteľných metód vyhodnotenia podľa typu elementu [28]

Metóda \ Element	Gauss Ⓞ	Minimax Ⓞ	Minimálny opísaný Ⓝ	Maximálny vpísaný Ⓧ	Tangenc. Ⓣ	Element L1
2D Priamka	X	X			X	X
3D Priamka	X	X				X
Rovina	X	X			X	X
Kružnica	X	X	X	X	X	X
Guľa	X	X	X	X	X	X
Valec	X	X	X	X	X	X
Kužeľ	X	X	X	X	X	X
Elipsa	X					
Obdĺžnik	X					
Torus	X	X				X
Bod	X				X	

V Gaussovej metóde je nasnímaným bodom priradený element na základe výpočtu najmenšieho súčtu štvorcov odchýlok bodov od priradzovanej geometrie ideálneho tvaru. Gaussova metóda je nenáchylná na odľahlé hodnoty a vedie k pomerne dôveryhodným výsledkom pri nízkej výpočtovej náročnosti. Pri malom počte bodov predstavuje štandard metódy vyhodnotenia. [28]

Čebyševova (minimax) metóda vypočítava priradený element na základe najmenšej zóny dvoch ideálnych tvarov elementu, v ktorých sú obsiahnuté všetky nasnímané body. Čebyševova metóda je výrazne citlivá na odľahlé hodnoty. Z toho dôvodu je pri využití tejto metódy odporúčaný veľký počet bodov a použitie eliminácie odľahlých hodnôt alebo nízko-pásmovej filtrácie. [28]

Metóda minimálneho opísaného elementu priradzuje nasnímaným bodom najmenší možný element ideálneho tvaru, v ktorom sa nachádzajú všetky nasnímané body. Metóda maximálneho vpísaného elementu priradzuje nasnímaným bodom najväčší možný element ideálneho tvaru, v ktorom neleží ani jeden nasnímaný bod. Obe metódy sú výrazne náchylné na odľahlé hodnoty, keďže vyhodnotenie oboch metód je založené na extrémnych hodnotách merania. Predpokladom na využitie týchto metód je veľký počet nasnímaných bodov a odporúča sa eliminácia odľahlých hodnôt alebo nízko-pásmová filtrácia. Tieto metódy sa využívajú pri vyhodnotení párových rozmerov a vyhodnotení referencií v prípade tolerancií polohy. [28]

V metóde tangenciálneho elementu leží priradený element mimo materiál. Snímaným bodom je priradený najväčší element ideálneho tvaru, v ktorom nie je umiestnený žiadny bod alebo najmenší element, v ktorom sú umiestnené všetky nasnímané body. Táto metóda si taktiež vyžaduje veľký počet bodov a elimináciu odľahlých hodnôt alebo nízko-pásmovú filtráciu. [28]

Posledná metóda L1 elementu nie je na rozdiel od vyššie uvedených metód definovaná v norme ČSN ISO 1101:2020 o systéme ISO GPS. Táto metóda vyhodnotenia priradzuje nasnímaným bodom element s ohľadom na minimalizáciu sumy absolútnych hodnôt odchýlok bodov od priradzovanej geometrie ideálneho tvaru. Táto metóda nie je citlivá na odľahlé hodnoty. [28]

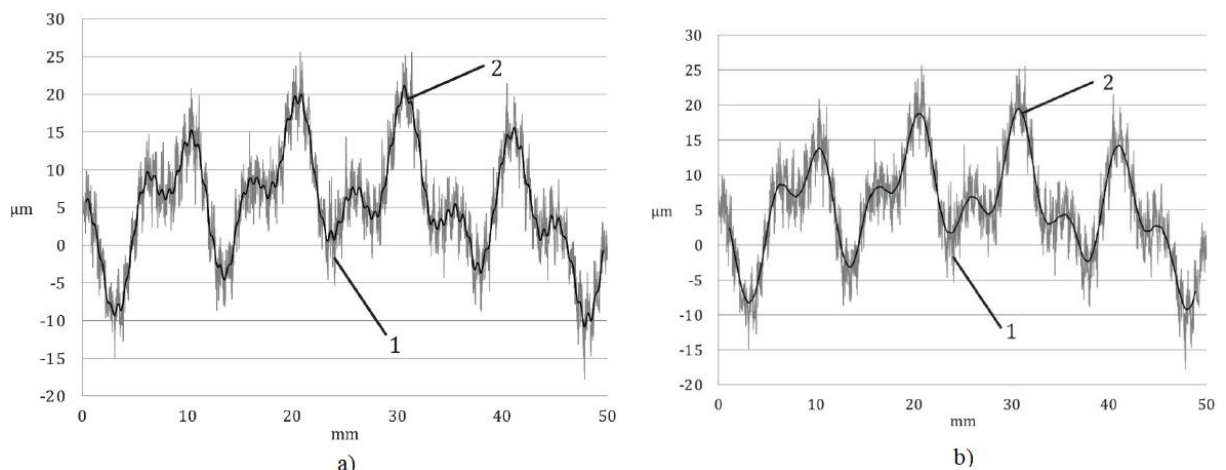
Filtrácia nameraných hodnôt

Filtrácia nameraných hodnôt umožňuje potlačenie určitej skupiny nameraných bodov, ktoré by mohli spôsobovať nežiadúce ovplyvnenie výsledkov merania. Správne nastavenie filtrov umožňuje oddelenie tvaru profilu od parametrov textúry povrchu. Odchýlky tvaru sú výrazne závislé na zvolenej hodnote použitého filtra. Filtre sa používajú z dôvodu snahy maximalizovať presnosť merania. Nesprávne použitie filtrácie však môže viesť k odfiltrovaní bodov, ktoré sa skutočne podieľajú na tvare súčasti, čím môže dôjsť k negatívnemu skresleniu výsledkov merania. [8]

Existuje mnoho rozličných filtrov, avšak takmer všetky fungujú vo všeobecnosti na veľmi podobnom princípe. Profil elementu rozdeľujú na časť krátkych a časť dlhých vln, pričom jednu skupinu následne potlačia. Parameter filtrácie určuje prechodový bod medzi prepustenou a potlačenou časťou. Ukážka najpoužívanejšieho Gaussovho filtra je znázornená na obr. 44), kde šedý priebeh 1 zodpovedá nefiltrovanému profilu a čierny priebeh 2 zodpovedá profilu po filtrácii. [3]

Filtráciu je v program Calypso možné využiť pri nasnímaní minimálne siedmich bodov elementu. Na použitie filtrácie je však odporúčané o mnoho väčšie množstvo snímaných bodov. Program Calypso disponuje tromi typmi použiteľných filtrov: [28]

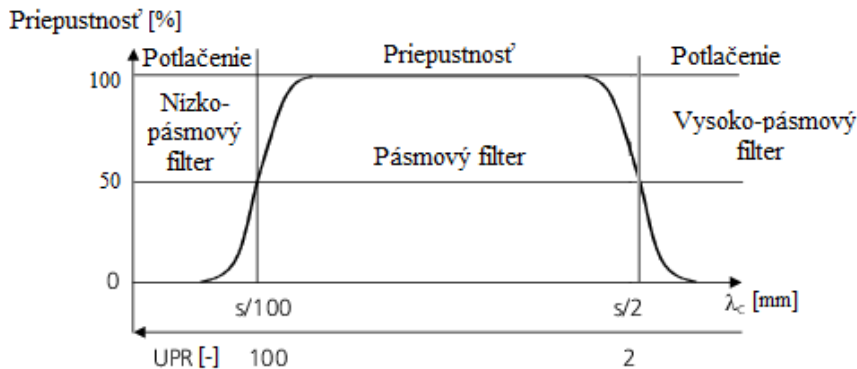
- Gaussov filter – najpoužívanejší filter a štandard na filtrovanie 2D profilov,
- Spline filter – novší filter nezávislý na odľahlých hodnotách,
- 2RC filter – staršia metóda filtrovania, ktorá sa v súčasnosti už neodporúča.



Obr. 44) Gaussov filter s dĺžkou: a) 0,8 mm, b) 2,5 mm [3]

Filtre slúžia na zamedzenie vybraných úrovní podrobností z elementov. Parameter filtrácie je vyjadrený pomocou vlnenia na otáčku UPR v prípade kruhových prvkov, respektíve vlnovej dĺžky λ_C v prípade lineárnych prvkov. Podľa typu priepustnosti sa filtre delia na (zobrazené na obr. 45): [28]

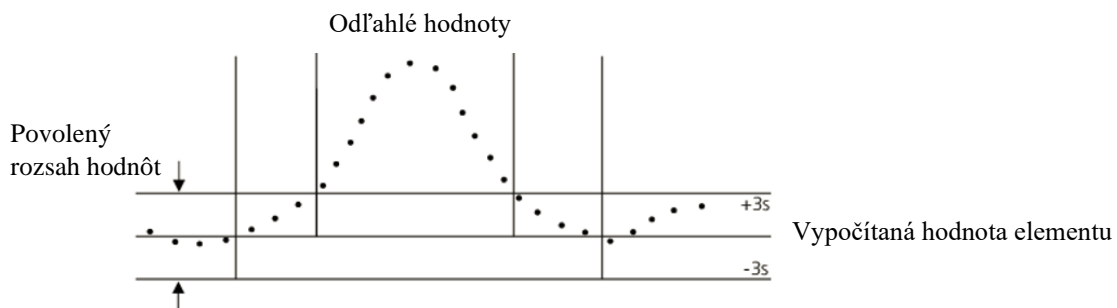
- nízko-pásmový filter – filtruje zložky s vysokými frekvenciami, čím dochádza k potlačeniu vplyvov drsnosti povrchu,
- vysoko-pásmový filter – filtruje zložky s nízkymi frekvenciami, čím dochádza k potlačeniu vlnitosti povrchu,
- pásmový filter – kombinácia vyššie uvedených filtrov filtrujúca zložky v určitom rozsahu, čím dochádza k potlačeniu drsnosti aj vlnitosti povrchu.



Obr. 45) Typy filtrov podľa priepustnosti (upravené podľa [28])

Eliminácia odľahlých hodnôt

Odľahlé hodnoty predstavujú namerané body, ktoré sa výrazne odchyľujú od geometrického tvaru určeného prostredníctvom ostatných meraných bodov. Eliminácia takýchto hodnôt vychádza z normálneho rozdelenia, ktoré umožňuje odstránenie hodnôt nachádzajúcich sa mimo štatistické limity pre daný súbor vyhodnocovaných dát. V programe Calypso určuje užívateľ povolený rozsah hodnôt vo forme počtu smerodajných odchýlok nameraných dát. Odporúčaná hodnota sa pohybuje v rozmedzí ± 2 až 3 smerodajné odchýlky. Pri použití eliminácie odľahlých hodnôt s parametrom ± 3 smerodajné odchýlky budú k vyhodnoteniu elementu využité nasnímané hodnoty spadajúce do 97,73 % rozsahu nameraných hodnôt. Takto vykonaná eliminácia nemá výrazný vplyv na výsledok merania, pričom dôjde k odstráneniu hodnôt, ktoré môžu byť ovplyvnené nečistotami, malými povrchovými nedokonalosťami alebo ďalšími na funkciu nepodstatnými vplyvmi. Princíp eliminácie odľahlých hodnôt je zobrazený na obr. 46). Eliminácia odľahlých hodnôt funguje ideálne pri meraní lineárnych alebo kruhových prvkov, avšak nie je vhodná pri malom počte nasnímaných bodov. [8, 28]



Obr. 46) Eliminácia odľahlých hodnôt (upravené podľa [28])

Program Calypso umožňuje nastavenie viacerých parametrov eliminácie odľahlých hodnôt. Patrí k nim napríklad odstránenie určitého počtu susedných bodov spolu s nájdenými odľahlými hodnotami. Obvykle sa nežiadúci jav na meranom objekte prejaví postupným

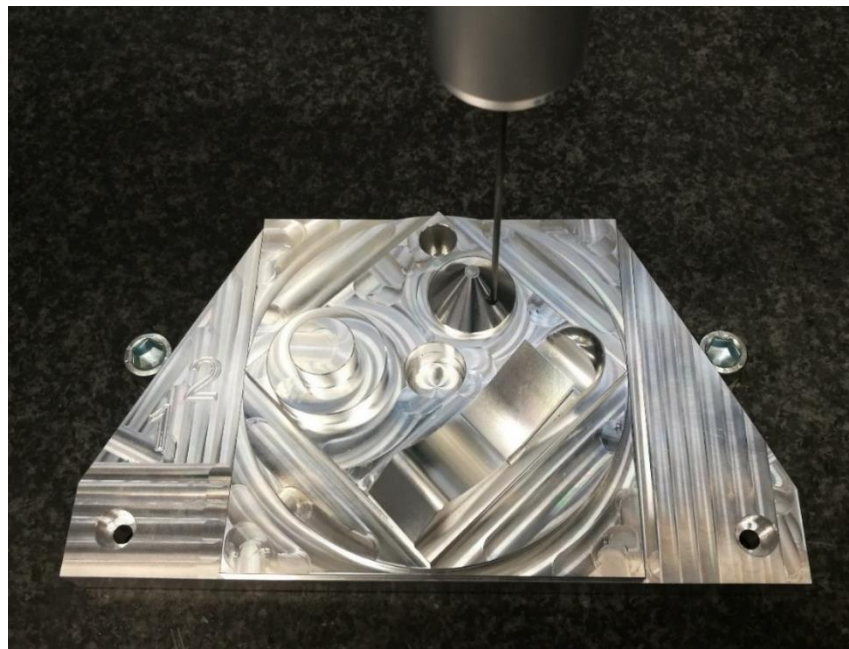
zvyšovaním odchýlky nameraných bodov vedúcej až k odľahlej hodnote. Nastavením eliminácie susedných bodov odľahlej hodnoty dochádza k výraznejšiemu potlačeniu vplyvu odľahlých hodnôt na výsledok merania. Spoločnosť ZEISS odporúča odstránenie 5 susedných bodov odľahlých hodnôt. Táto hodnota určuje počet bodov, ktoré sú pri vyhodnocovaní odstránené na každej strane nájdenej odľahlej hodnoty. To znamená, že pri 1 odľahlej hodnote dôjde pri takomto nastavení k odstráneniu 11 bodov. [28]

Pri veľkých tvarových odchýlkach meraných prvkov by mohlo použitím eliminácie odľahlých hodnôt dôjsť k veľkému skresleniu výsledných hodnôt. Predfiltrom sa pri eliminácii zohľadňuje skutočný tvar prvku. Využíva sa pásmový filter, pomocou ktorého sa pri výpočte ignorujú extrémne nízke a extrémne vysoké hodnoty. Spoločnosť ZEISS odporúča použitie rozmedzia filtra 10-5000 UPR pri kruhových prvkoch, respektíve 0-10 mm vlnovej dĺžky pri lineárnych prvkoch. [28]

Ďalšiu možnosť predstavuje viacnásobná iterácia eliminácie odľahlých bodov. Odstránením odľahlých hodnôt dôjde k zmenšeniu smerodajnej odchýlky nameraných bodov, čo môže spôsobiť, že mimo povolený rozsah budú patriť ďalšie body. Pri aktivovaní viacnásobnej eliminácie by došlo k opätovným odstráneniam nových odľahlých hodnôt podľa požadovaného počtu iterácií. Iterácia eliminácie odľahlých hodnôt sa používa zvyčajne iba pri odstraňovaní odľahlých hodnôt bez susedných bodov. Pri použití iterácie eliminácie spolu s odstránením susedných bodov by došlo k výraznému odstraňovaniu validných dát. [28]

3 SYSTÉMOVÝ ROZBOR RIEŠENEJ PROBLEMATIKY

Predmetom merania v tejto diplomovej práci je obrobok navrhnutý spoločnosťou DATRON a.s. na testovanie HSC frézovacieho stroja DATRON M8Cube. Snímka fyzického obrobku je zobrazená na obr. 47). Návrh riešeného obrobku je inšpirovaný normou VDI/NCG 5211:2013, a to konkrétne prvou časťou tejto trojdielnej normy, ktorá sa venuje špecificky testovaniu frézkam a obrábacím centram pre trojosové obrábanie.



Obr. 47) Testovací obrobok spoločnosti DATRON

3.1 Testovací obrobok HSC strojov podľa normy VDI/NGC 5211:2013

Norma VDI/NGC 5211:2013 uvádza pokyny k testovaniu a k testovacím obrobkom pre vysokorýchlostné obrábanie (HSC). Ide o metódu obrábania vyznačujúcu sa vyššími posuvmi, rýchlosťami a väčším dynamickým výkonom v porovnaní s konvenčnými metódami obrábania. Vysokorýchlostné obrábanie umožňuje výrazné zvýšenie rýchlosti posuvu pri rovnakej hrúbke rezu a reznej sile, čo vedie k zníženiu času obrábania. Pri rovnakej časovej kapacite je možné so zvyšujúcou sa rýchlosťou znížiť hrúbku rezu, čím dochádza k zníženiu rezných síl. Zvýšením rýchlosti posuvu je teplo vzniknuté pri obrábaní rozptýlené na väčšiu plochu základného materiálu, čím sa minimalizuje ohrev obrobku. Väčšina tepla sa pri HSC v dôsledku rýchleho odoberania materiálu rozptyľuje v trieskach. Pre takýto spôsob obrábania už nie sú staršie testovacie a akceptačné obrobky dostatočné na dôveryhodné posúdenie HSC strojov. Z toho dôvodu bola vytvorená norma VDI/NGC 5211:2013, ktorá špecifikuje nový testovací obrobok určený k testovaniu HSC strojov. [29]

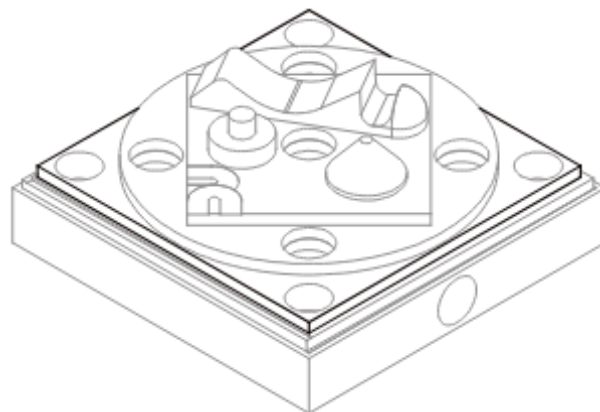
Testovací obrobok obsahuje základné prvky geometrie, ktoré vypovedajú o dynamickom výkone stroja, jeho rýchlosti, presnosti a vzájomnej interakcii medzi jednotlivými komponentami stroja. Vlastnosti obrábacieho stroja sa odrážajú v kvalite a presnosti vyhotovenia geometrických prvkov testovacieho obrobku. Výsledky merania obrobku možno použiť na posúdenie stavu stroja pri akceptačných testoch, porovnávacích testoch alebo na hodnotenie zmien vlastností stroja pri periodických testoch. [29]

Za účelom minimalizácie vplyvu odlišností procesu výroby na testovací obrobok sú stanovené požiadavky na proces obrábania. Pre testovacie prvky obrobku určené k dokončovacím operáciám je pri hrubovaní ponechaný prídavok s veľkosťou 0,2 mm. V rámci frézovania preddokončovacích operácií by mali byť na finálne dokončovacie operácie ponechané prídavky s veľkosťou 0,05 mm k nominálnym hodnotám. Na elimináciu vplyvu odchýlok a napätia uvoľneného v dôsledku tepla by mala byť medzi hrubovacími a dokončovacími operáciami zabezpečená pauza na ochladenie, uvoľnenie a opätovné upnutie obrobku. Súčasťou normy je aj sekvencia obrábania a zoznam odporúčaných nástrojov spolu s rýchlosťami posuvov na otáčku, respektíve na zub pre každý nástroj. [29]

Testovací obrobok definovaný v norme VDI/NGC 5211:2013, zobrazený na obr. 48), obsahuje 12 elementov určených ku kontrole rozmerov, tvaru, orientácie a umiestnenia pomocou vhodných meracích zariadení. Ku každému elementu je definovaná požadovaná stratégia obrábania, ako aj charakteristiky určené k meraniu a kontrole. Elementy definované v norme sú spolu s požadovanými charakteristikami uvedené v tab. 7). Značka N pri názve elementu značí voliteľnosť použitia týchto elementov.

Tab. 7) Zoznam elementov a požadovaných charakteristík [29]

Číslo	Názov	Požadované charakteristiky
1	valcové stupne	kruhovitosť a priemer každého stupňa
2	45° kváder	priamosť, kolmosť a rovnobežnosť
3	valec	kruhovitosť a sústrednosť k stredovému otvoru
4	90° kváder	priamosť, kolmosť a rovnobežnosť
5	pár hrán 0,5° (N)	priamosť a uhol
6	skosenie 0,5° (N)	priamosť a uhol
7	vzor vrtania	kruhovitosť stredového otvoru, vzdialenosť medzi stredmi otvorov a sústrednosť stredového otvoru k elementu 3
8	zrezaný kužeľ	priamosť bočných čiar v prechodoch kvadrantov, kruhovitosť na niekoľkých úrovniach a meranie času
9	tvarová plocha	geometrická presnosť, drsnosť povrchu a meranie času
10	sférický segment	geometrická presnosť
11	bočné otvory (N)	poloha otvorov k vzoru vrtania
12	prekrytie povrchu	vzdialenosť medzi hodnotami v Z osi na oboch povrchoch

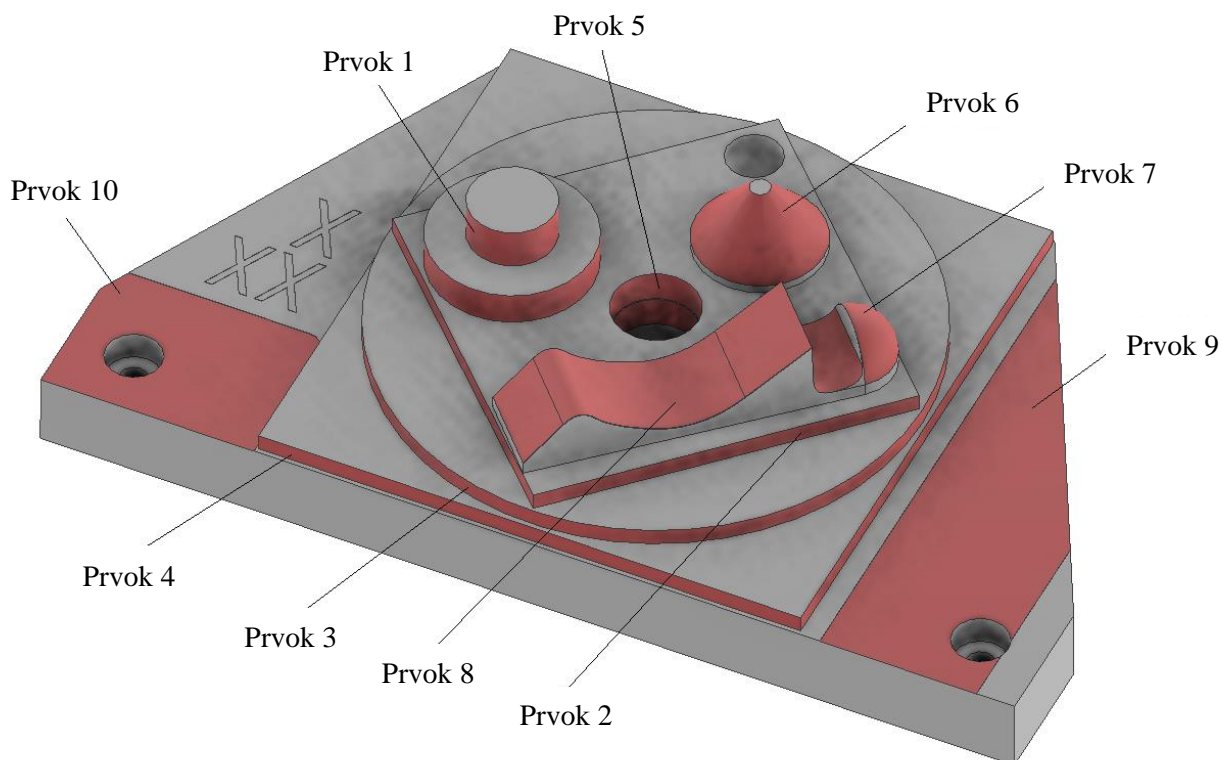


Obr. 48) Testovací obrobok HSC strojov podľa normy VDI/NGC 5211:2013 [29]

3.2 Testovací obrobok spoločnosti DATRON

Spoločnosť DATRON pri návrhu obrobku na testovanie HSC frézovacieho stroja DATRON M8Cube vychádza z normy VDI/NGC 5211:2013, avšak neodrží sa striktného postupu tejto normy. Proces obrábania, rozmery obrobku aj zoznam vytvorených elementov sa líšia od definícií v norme. Jednotlivé elementy testovacieho kusu určené k meraniu a kontrole sú graficky zobrazené na obr. 49). Výkres súčasti spolu s 3D modelom meraného obrobku sú súčasťou prílohy tejto práce. V rámci opakovaného procesu frézovania testovacích kusov na HSC stroji DATRON M8Cube HSC na fakultnej dielni bolo na meranie k dispozícii viacero kusov testovacích obrobkov, z ktorých boli vybrané 3 kusy:

- testovací kus po dokončovacích operáciách vyrobený na stroji pred kompenzáciou (ďalej označovaný ako obrobok 1),
- testovací kus po dokončovacích operáciách vyrobený na stroji po kompenzácii (ďalej označovaný ako obrobok 2),
- testovací kus po hrubovaní (ďalej označovaný ako obrobok 3).



Obr. 49) Model obrobku s vyznačenými prvkami

3.2.1 Materiál obrobku

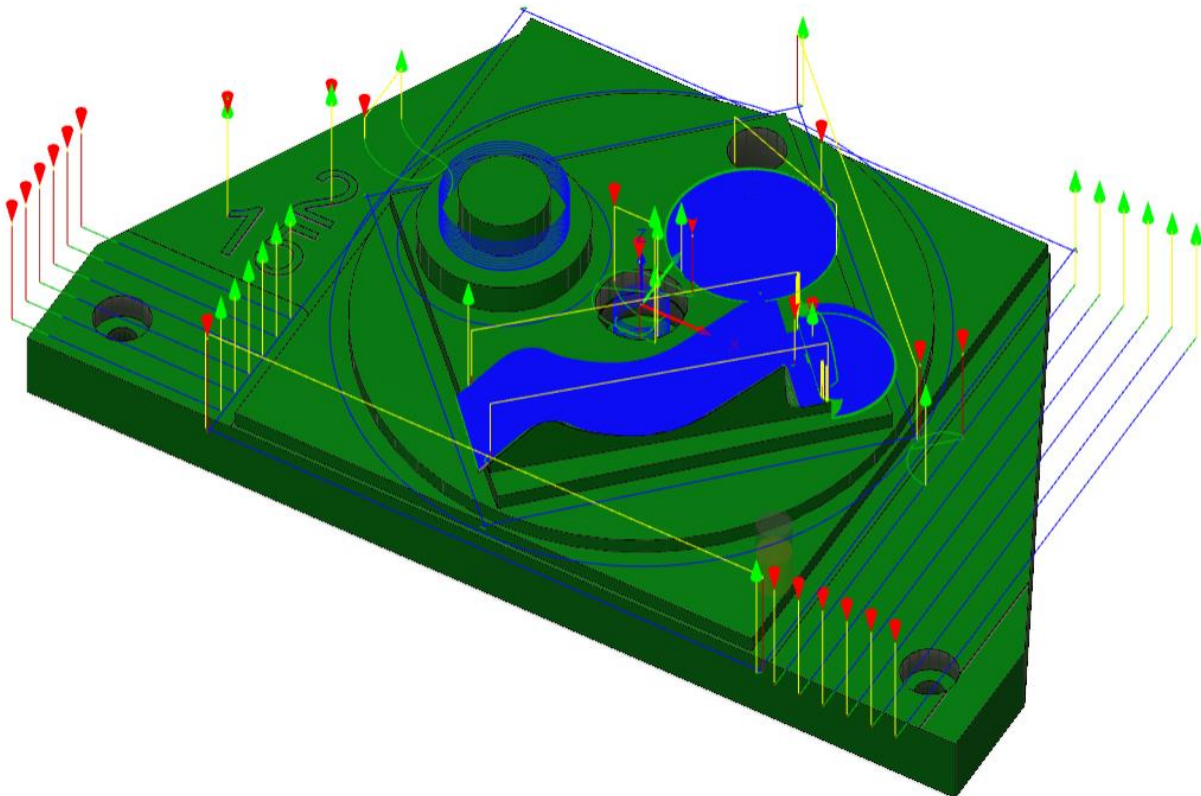
Testovací obrobok je vyrobený z hliníkovej zliatiny EN AW 5083 (AlMg4,5Mn0,7). Jedná sa o hliníkovú zliatinu s legovacími prvkami horčíku a mangánu. Táto zliatina je prirodzene tvrdá, nevytvrditeľná a chemicky stála. Ide o dobre obrábateľný, tváriteľný, eloxovateľný a leštiteľný materiál so zaručenou dobrou zvariteľnosťou. Tento materiál je vysoko odolný voči morskej vode a priemyselným chemickým prostrediam. Vybrané mechanické a fyzikálne vlastnosti zliatiny EN AW 5083 sú uvedené v tab. 8). [31]

Tab. 8) Vybrané vlastnosti materiálu EN AW 5083 [30, 31]

Veličina	Jednotka	Typické hodnoty
Medza klzu $R_{p0,2}$	[MPa]	110-125
Pevnosť v ťahu R	[MPa]	270
Ťažnosť A ₅₀	[%]	14-16
Hustota	[g/cm ³]	2,6
Modul pružnosti	[GPa]	71
Elektrická vodivosť	[m/Ω.mm ²]	16-19
Koeficient teplotnej rozťažnosti	[K ⁻¹ .10 ⁻⁶]	23,8
Tepeľná vodivosť	[W/m.K]	110-140

3.2.2 Postup obrábania

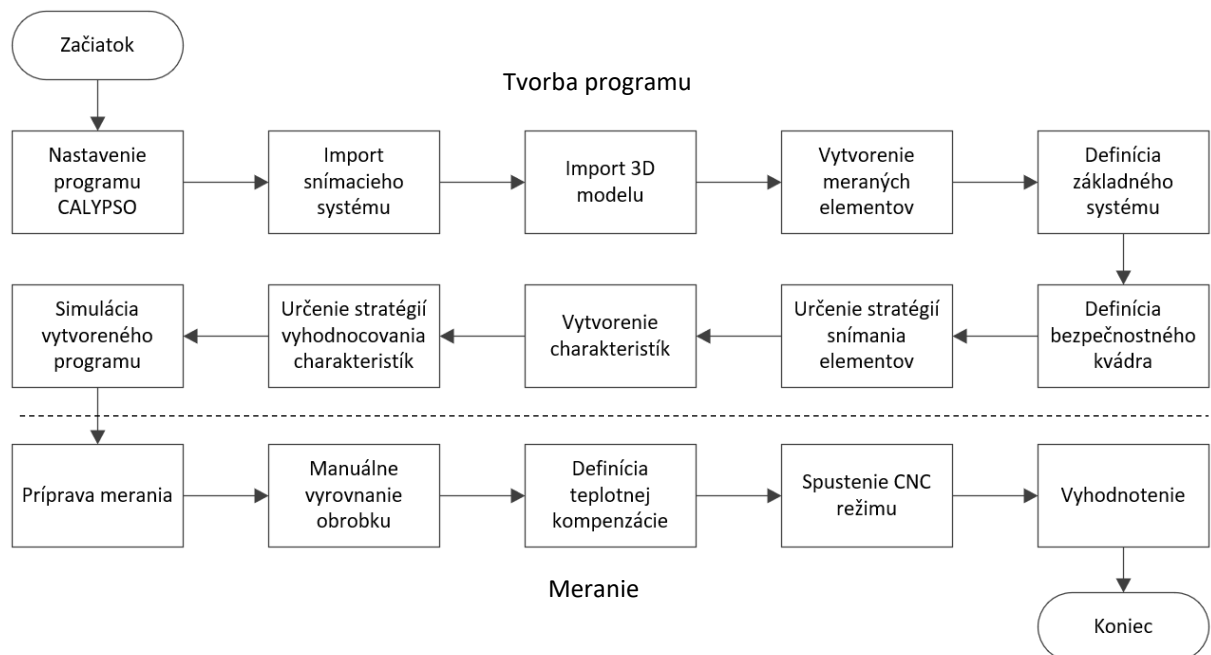
Na základe poskytnutého NC programu z prostredia Autodesk Fusion bol vytvorený postup frézovania testovacieho obrobku DATRON po upnutí, ktorý je súčasťou prílohy tejto práce. Polotovár na obrobenie je kváder s rozmermi 234x134x49 mm. Celý proces frézovania pozostáva z hrubovacích operácií, po ktorých nasledujú dokončovacie operácie zvolených elementov. Pri hrubovaní je využité chladenie hmlou, pri dokončení sa využíva chladenie prúdom chladiacej kvapaliny. Celý obrobok je frézovaný v súslednom smere. Jednotlivé dráhy nástroja pri frézovaní dokončovacích operácií sú zobrazené na obr. 50). [32]



Obr. 50) Dráhy nástroja pri dokončovacích operáciách [32]

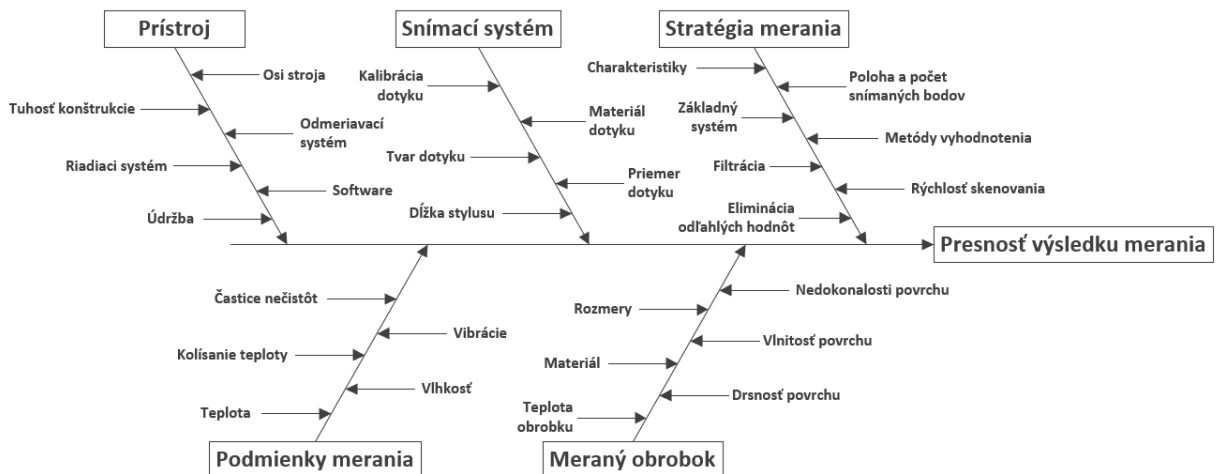
3.3 Tvorba plánu merania na CMM

Tvorba plánu merania v programe Calypso pozostáva z viacerých krokov. Na obr. 51) je uvedený postup tvorby plánu merania, ako aj priebeh fyzického merania na CMM.



Obr. 51) Postup tvorby programu a merania na CMM

Presnosť a dôveryhodnosť merania na 3D súradnicovom meracom stroji ovplyvňuje veľa rôznych faktorov, ktoré je nutné zohľadniť pri programovaní meracích operácií a tvorbe plánu merania. Faktory ovplyvňujúce presnosť výsledkov merania sú zobrazené vo forme Ishikawa diagramu na obr. 52).



Obr. 52) Faktory ovplyvňujúce meranie na CMM

3.4 Návrh postupu riešenia

Program merania bude vytvorený pomocou možnosti offline programovania v softvéri Calypso 2021. Naprogramované plány merania budú po vytvorení prenesené na počítač pripojený k 3D súradnicovému meraciemu stroju ZEISS ECLIPSE 1000, na ktorom prebehne meranie. Na programovanie meracích operácií bude využitý CAD model meraného obrobku.

V rámci faktorov ovplyvňujúcich presnosť merania zobrazených na obr. 52) je pri programovaní meracích operácií možné najviac ovplyvniť vplyv stratégií merania. Voľba stratégií merania jednotlivých prvkov obrobku súvisí priamo s ich rozmermi, geometriou a kvalitou povrchu. Pri testovacom obrobku spoločnosti DATRON, ktorý je predmetom merania tejto práce, budú charakteristiky volené na základe požiadaviek normy VDI/NGC 5211:2013. Stratégie snímania a vyhodnotenia budú volené na základe odporúčaní spoločnosti ZEISS v dokumente „Kuchařka: Strategie dotykového měření pro souřadnicovou měřící techniku“. Základné kritéria voľby stratégií merania jednotlivých elementov sú: [33]

- kruhové prvky – pomer priemeru k hĺbke alebo výške, priemer, funkcia,
- lineárne prvky – drsnosť povrchu, dĺžka,
- obecné tvarové prvky – tvar, drsnosť povrchu.

Detaily o zvolených stratégiách snímania a vyhodnotenia jednotlivých elementov sú uvedené v nasledujúcej kapitole. Voľba stratégií merania môže výrazne ovplyvniť výsledok merania. Na určenie odchýlok výsledkov pri rôznych stratégiách bude vytvorený separátny program s vybranými prvkami, na ktorých bude testovaný vplyv voľby odlišných stratégií na výsledné hodnoty merania.

Kompletný program merania bude vytvorený v dvoch verziách. Jedna verzia bude určená na meranie testovacích obrobkov po dokončovacích operáciách, druhá verzia na meranie obrobku po hrubovaní. V programe určenom na meranie hrubovaného kusu budú zmenené nominálne hodnoty o prídavky na dokončovacie operácie. Na vybraných prvkoch bude pri zvolenom obrobku vykonané posúdenie zhody so špecifikáciou podľa normy ČSN EN ISO 14253-1:2023.

3.5 ZEISS ECLIPSE 1000

Meranie bude vykonané na stroji ZEISS ECLIPSE 1000. Ide o súradnicový merací stroj portálového typu so stacionárnym stolom, pohyblivým portálom a parametrami uvedenými v tab. 9). Vodiace dráhy sú vyrobené z keramických materiálov, ktoré sa vyznačujú nízkou citlivosťou na kolísanie teploty, vlhkosť a kontamináciu. Pohyb je zabezpečený vysokovýkonnými servopohonmi s elektrickým monitorovaním a obmedzením prítlačnej sily vo všetkých osiach. Uloženie pohyblivých častí stroja je zabezpečené predpätými vzduchovými ložiskami s obopínajúcim vedením. Stroj obsahuje pasívny antivibračný systém a os Z je vybavená taktiež pneumatickým vyvažovaním. O trojosové vektorové riadenie sa stará samostatná riadiaca jednotka s CNC mikroprocesorovým riadením. Odmeriavací systém na meranie súradníc funguje na princípe pravítka a fotoelektrického snímania odrazeného svetla s rozlíšením 0,5 mikrometra. Súčasťou ZEISS ECLIPSE 1000 je štandardný ovládací panel s dvoma joystickmi na manuálne ovládanie CMM a s potenciometrom na reguláciu rýchlosti pohonov. [23]

ZEISS ECLIPSE 1000 umiestnený v dielni fakulty je po repasovaní, počas ktorého bol zmenšený rozsah merania v osi Z z pôvodných 580 mm na 500 mm. Tento stroj disponuje pasívnou snímacou sondou VAST XXT umožňujúcou pomerne presné skenovanie.

Tab. 9) Parametre súradnicového meracieho stroja ZEISS ECLIPSE 1000 [23]

Rozmery a hmotnosti			
Rozsah merania	X	mm	1000
	Y	mm	1000
	Z	mm	500
Rozmery CMM	Šírka	mm	1700
	Dĺžka	mm	1860
	Výška	mm	2570
Pracovný priestor (X, Y)		mm	1219x1321
Hmotnosť CMM		kg	1800
Maximálna hmotnosť meranej súčiastky		kg	925
Údaje o meraní			
Rozlíšenie odmeriavacích systémov		μm	0,5
Dovolená chyba merania dĺžky/rozmeru MPE		μm	4,2+L/200
Dovolená chyba snímání MPE		μm	4,9
Pracovné rýchlosti			
Režim nastavenia		mm/s	0-70
Režim série	Os	mm/s ²	do 200
	Vektor	mm/s ²	do 340
Maximálne zrýchlenie	Os	mm/s ²	do 1000
	Vektor	mm/s ²	do 1700
Požiadavky podmienok okolia			
Vlhkosť		%	40-60
Teplota		°C	od +17 do +35
Teplotný rozsah, v ktorom je zaručená stanovená neistota merania dĺžky	Teplota okolia	°C	18-26
	Výkyvy teploty	°C/h	0,8 (za hodinu)
		°C/d	1,1 (za deň)
	Gradient teploty	°C/m	1,0 (na meter)

Dňa 8.12.2022 prešiel merací stroj posúdením zhody so špecifikáciou, počas ktorého bola zdokumentovaná nadväznosť na štátne etalóny realizujúce merné jednotky v súlade s medzinárodnou sústavou jednotiek SI. Posúdenie metrologických vlastností súradnicového meracieho stroja podlieha požiadavkám normy ČSN EN ISO 10360. Meranie dĺžok na určenie chyby pri meraní dĺžok E_0 bolo vykonané pomocou snímání stupňových mierok. Chyba tvaru dotyku P_{FTU} a chyba snímání pri skenovaní THP boli určené snímáním skúšobnej gule

o priemere $d = 25$ mm. Chyba merania tvaru pre kruhovitosť RONt (MZCI) bola určená meraním kalibračného krúžku o priemere $d = 50$ mm režimom skenovania. Počas tohto posúdenia zhody boli stanovené nasledujúce informácie: [24]

- stroj spĺňal špecifikácie uvedené vo výrobnom certifikáte,
- spôsobilosť stroja bola osvedčená,
- maximálna dovolená chyba pri meraní dĺžky $E_{0, MPE} = \pm (4,9 + 5,00 * L) \mu\text{m}$,
- grafy chyby merania dĺžok v jednotlivých osiach,
- chyba tvaru dotyku $R3 = 1,3 \mu\text{m}$,
- chyba merania kruhovitosti v rovine X/Y $t = 0,9 \mu\text{m}$,
- chyba merania kruhovitosti v rovine X/Z $t = 2,0 \mu\text{m}$,
- chyba merania kruhovitosti v rovine Y/Z $t = 0,9 \mu\text{m}$,
- výsledky merania boli platné v dobe, kedy bolo meranie vykonané a platné iba pre miesto inštalácie a pri nastavení stroja v čase posudzovania zhody.

4 MERANIE VYBRANÝCH PARAMETROV OBROBKU

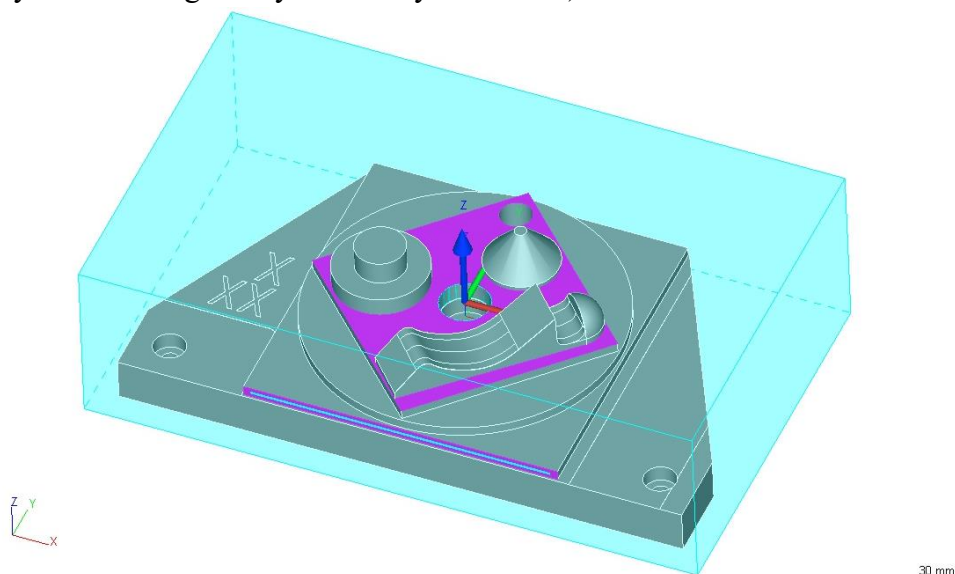
Výber meraných charakteristík obrobku v tejto práci vychádza z požiadaviek normy VDI/NCG 5211:2013 na kontrolu testovacieho obrobku. Stratégie merania jednotlivých parametrov testovacieho obrobku sú vo väčšine prípadov navrhnuté na základe odporúčaných pravidiel pre meranie na 3D súradnicovom stroji stanovených spoločnosťou ZEISS v dokumente „Kuchařka: Strategie dotykového měření pro souřadnicovou měřicí techniku“. [33] Plán merania bol vytvorený v rámci offline režimu v programe ZEISS Calypso 2021 programovaním meracích operácií pomocou CAD modelu. Vzhľadom na geometriu a materiál obrobku (hliníková zliatina) bol v rámci výberu snímacieho systému zvolený priamy snímač o dĺžke 40 mm s guľôčkou z nitrídu kremíka o priemere 2 mm.

4.1 Programy merania

Pred samotným programovaním meracích operácií bolo nevyhnutné nastaviť prostredie softvéru Calypso. Tento systém vyžaduje aj pri offline programovaní vytvorenie virtuálneho spojenia so strojom, preto bolo potrebné nastaviť parametre stroja ZEISS ECLIPSE 1000 a snímačej sondy. Po vytvorení spojenia bol do systému importovaný použitý snímací systém vytvorený v prostredí *Stylus System Creator*.

4.1.1 Program merania obrobku po dokončovacích operáciách

Prvým krokom tvorby samotného programu predstavoval import CAD modelu testovacieho obrobku do prostredia ZEISS Calypso. Na tomto modeli boli následne definované elementy potrebné k priebehu merania. Pomocou definovaných elementov bol vytvorený základný systém, ku ktorému sa vzťahujú všetky vyhodnocované charakteristiky, a ktorý slúži na vyrovnanie súčasti v pracovnom priestore stroja. Zvolený základný systém pozostáva z roviny vo vrchnej časti obrobku, priamky na prvku 4 (kváder 90°) a horného valca s priemerom 20 mm na prvku 5 (stredový otvor). Zvolená rovina slúži na vymedzenie otáčania súčasti v priestore a ako nulový bod v osi Z. Priamka stanovuje otočenie súčasti v rovine a stred valca stredového otvoru určuje nulový bod súčasti v osiach X a Y. Základný systém je spolu bezpečnostným kvádom graficky zobrazený na obr. 53).

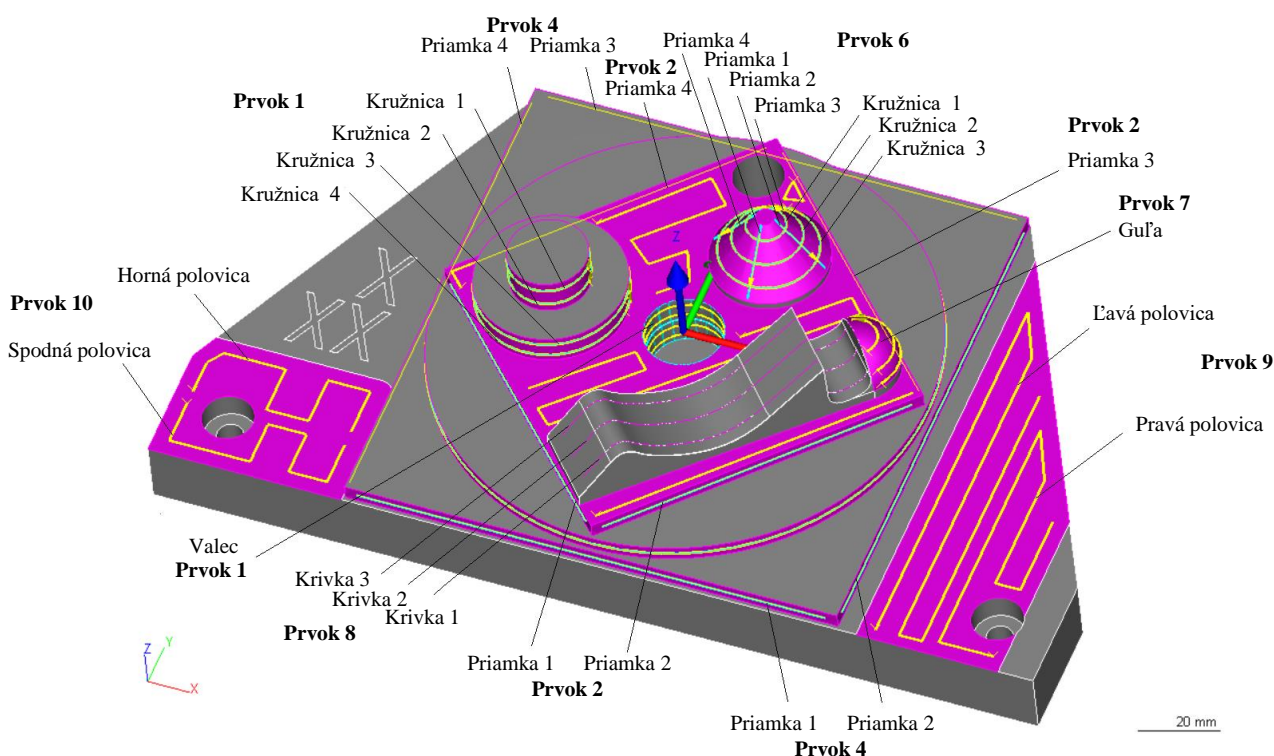


Obr. 53) Základný systém a bezpečnostný kváder obrobku

Bezpečnostný kváder bol vytvorený automaticky pomocou CAD modelu so stanovenou vzdialenosťou 10 mm od súčasti. Na takto vytvorenom kvádri bola upravená hodnota v zápornom smere osi Z na -31 mm, čo zodpovedá vzdialenosti počiatku súradnicového systému k najspodnejšej časti obrobku. Najdôležitejší parameter bezpečnostného kvádra však predstavuje hodnota v kladnom smere osi Z, nakoľko u všetkých snímaných elementov je bezpečnostná skupina v osi +Z. Tento parameter bol upravený na hodnotu 40 mm, čo je o 22 mm vyššie ako najvyššia časť obrobku.

Vytváranie elementov

Po základných krokoch uvedených v odseku vyššie boli definované stratégie snímania vytvorených elementov. Ku každému elementu bola definovaná dráha skenovania, rýchlosť skenovania, počet snímaných bodov alebo krok snímania, prípadne ďalšie parametre ako rozsah skenovania, rozsah vyhodnotenia, dodatočné bezpečnostné dáta a tak ďalej. Dráhy skenovania jednotlivých elementov sú zobrazené na obr. 54).



Obr. 54) Dráhy skenovania jednotlivých elementov

Vo všetkých elementoch sú nasnímané body modifikované korekciou polomeru snímača a predvoľbou k vyhodnoteniu elementov je Gaussova metóda vyhodnotenia. U elementov tvoriacich základný systém je navyše už pri elementoch aktivovaný nízko-pásmový Gaussov filter a eliminácia odľahlých hodnôt s faktorom ± 3 smerodajné odchýlky s elimináciou 3 susedných bodov.

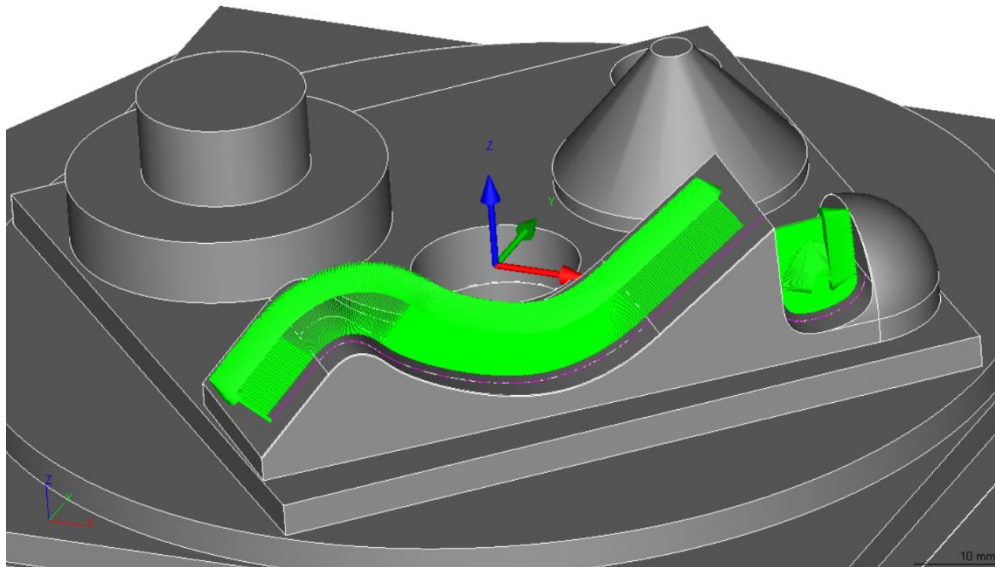
Všetky dráhy skenovania sú vytvorené s určitým odsadením od hrán jednotlivých elementov. Veľkosť zvoleného odsadenia sa pohybuje vo väčšine prípadov od 2 do 5 mm. Skenovanie všetkých kruhových dráh v programe je v uhlovom rozsahu 360° . Podrobnejšie informácie o zvolených stratégiách snímania jednotlivých elementov sú uvedené v tab. 10).

Tab. 10) Prehľad zvolenej stratégie snímania

Č.	Prvok	Elementy	Skenovanie	Počet bodov/krok	Rýchlosť [mm/s]
1	Valcové stupne	2x kružnica Ø20 mm	2 kruhové dráhy vo výške 10,5 a 15,5 mm	600 b	2
		2x kružnica Ø38 mm	2 kruhové dráhy vo výške 2 a 6 mm	1300 b	
2	Kváder 45°	4x 2D priamka	4 priamky s dĺžkou 82 mm vo výške -2 mm	0,31 mm	10
3	Valec	Kružnica Ø126 mm	Kruhová dráha vo výške -6 mm	4250 b	3
4	Kváder 90°	4x 2D priamka	4 priamky s dĺžkou 122 mm vo výške -10 mm	0,31 mm	10
5	Stredový otvor	Valec Ø20 mm	2 kruhové dráhy umiestnené 2 mm od hrán oboch valcov	600 b na kružnicu	3
		Valec Ø19,5 mm			
6	Zrezaný kužeľ	3x kružnica na kuželi	3 kruhové dráhy vo výške 5, 9,5 a 14 mm	1300 b, 900 b, 450 b	2
		4x 2D priamka	4 priamky po stranách kužeľa pootočené o 90°		3
7	Sférický segment	Guľa	3 kruhové dráhy vo výške 1,5, 5 a 9 mm a uhlovým rozsahom 170°	0,1 mm	2
8	Tvarová plocha	3x 2D krivka	2 segmenty na každú krivku definovanú pomocou 643 nominálnych bodov		3
9	Pravá plocha	Rovina na ľavej polovici	1 polylnia na každú rovinu	0,31 mm	10
		Rovina na pravej polovici			
10	Ľavá plocha	Rovina na hornej polovici			
		Rovina na spodnej polovici			
-	Horná plocha	Rovina	5 polylníí rozmiestnených po celej ploche		

Na tvarovom prvku č. 8 bola spočiatku vytvorená nominálna krivka po celej dĺžke plochy pomocou 700 nominálnych bodov. Prvých 25 bodov bolo z merania odstránených, čím sa zabezpečilo odsadenie dráhy skenovania od ľavej hrany elementu. Ďalšie body v okolí ostrej hrany boli vynechané z vyhodnotenia elementu. Snímacia dráha bola následne rozdelená do

dvoch segmentov, ktoré rozdeľovali práve body vynechané z vyhodnotenia elementu. Medzi jednotlivé segmenty boli na zamedzenie vzniku prípadnej kolízie vložené bezpečnostné dáta. Týmito krokmi sa zabránilo prejazdu snímača cez ostrú hranu, ktorá by mohla výrazným spôsobom skresliť výsledné namerané hodnoty. Na obr. 55) je graficky zobrazená definovaná dráha a vektory snímaných bodov jednej krivky prvku 8.



Obr. 55) Dráha a vektory snímaných bodov 2D krivky

Definícia charakteristík

K jednotlivým elementom boli následne vytvorené požadované charakteristiky určené k vyhodnoteniu. V rámci tohto kroku boli v nastaveniach charakteristík definované metódy vyhodnotenia, parametre filtrácie a eliminácie odľahlých hodnôt, prípadne stanovené referenčné elementy. Prehľad zvolených charakteristík jednotlivých elementov spolu so zvolenými stratégiami vyhodnocovania je uvedený v tab. 11). Ku každej charakteristike bola taktiež definovaná veľkosť tolerančného poľa. Jednotlivé charakteristiky sú z dôvodu zvýšenia prehľadnosti číselne označené.

Pri použití filtrácie a eliminácie odľahlých hodnôt sú v pláne merania vo všetkých prípadoch použité nasledujúce parametre:

- Gaussov filter,
- prefilter eliminácie u lineárnych prvkov: 0-10 mm,
- prefilter eliminácie u kruhových prvkov: 10-2500 UPR,
- parameter eliminácie odľahlých hodnôt: $\pm 3\sigma$,
- eliminácia 3 susedných bodov odľahlej hodnoty.

Posledným krokom pred fyzickým meraním na 3D súradnicovom stroji bolo spustenie simulácie vytvoreného programu merania. V rámci simulácie bola skontrolovaná bezkolíznosť plánu meraniu a overená správnosť naprogramovaných dráh snímača.

Tab. 11) Prehľad navrhnutých charakteristík merania a stratégií vyhodnocovania

Č.	Prvok	Elementy	Ozn.	Charakteristiky	Metóda	Filter	Eliminácia hodnôt
1	Valcové stupne	2x kružnica Ø20 mm	1 2	2x priemer 2x kruhovitosť	GG, GN C, N	50 UPR	áno
		2x kružnica Ø38 mm	3 4	2x priemer 2x kruhovitosť	GG, GN C, N		
2	Kváder 45°	4x 2D priamka	5	4x priamosť	G, C GG, GC	2,5 mm	
			6,7	2x kolmosť			
			8,9	2x rovnobežnosť			
			10	2x vzdialenosť			
3	Valec	Kružnica Ø126 mm	11	priemer	GG, GN	500 UPR	
			12	kruhovitosť	C, N		
			13	sústrednosť	C, G		
4	Kváder 90°	4x 2D priamka	14	4x priamosť	G, C GG, GC	2,5 mm	
			15, 16	2x kolmosť			
			17, 18	2x rovnobežnosť			
			19	2x vzdialenosť			
5	Stredový otvor	Valec Ø20 mm	20	priemer	GG, GX	50 UPR	
			21	valcovitosť	C, X		
		Valec Ø19,5 mm	22	priemer	GG, GX		
			23	valcovitosť	C, X		
6	Zrezaný kužel	3x kružnica na kuželi	24	3x kruhovitosť	C, N	50 UPR 50 UPR 150 UPR	
			4x 2D priamka	25	4x priamosť	G, C	0,8 mm
		26		uhol	GG, GC		
		7	Sférický segment	Guľa	27	rádus	GG, GC
28	profil plochy				G, C		
8	Tvarová plocha	3x 2D krivka	29	3x profil čiary	G		
9	Pravá plocha	2x rovina	30	2x rovinnosť	G, C	2,5 mm	áno
			31	2x vzdialenosť Z	GG, GC		
10	Ľavá plocha	2x rovina	32	2x rovinnosť	G, C		
			33	2x vzdialenosť Z	GG, GC		

4.1.2 Ostatné programy merania

V rámci tejto práce boli okrem hlavného programu na meranie testovacieho obrobku po dokončovacích operáciách, opísaného v kapitole 4.1.1, vytvorené ďalšie 3 programy:

- program merania obrobku po hrubovaní,
- program s vybranými elementami na opakované merania,
- program na analýzu vplyvu voľby stratégie.

Všetky vyššie uvedené programy vychádzajú z programu opísaného v kapitole 4.1.1.

Program merania obrobku po hrubovaní

Program merania obrobku po hrubovaní je takmer identický s programom určeným na meranie testovacieho obrobku po dokončovacích operáciách. Jedinú zmenu predstavuje posun nominálnych hodnôt jednotlivých elementov o prídavok určený na dokončenie súčasti. Posunom nominálnych hodnôt dochádza automaticky aj k zmene naprogramovaných dráh snímača počas skenovania elementov o rozdiel medzi týmito hodnotami.

Program s vybranými elementami na opakované merania

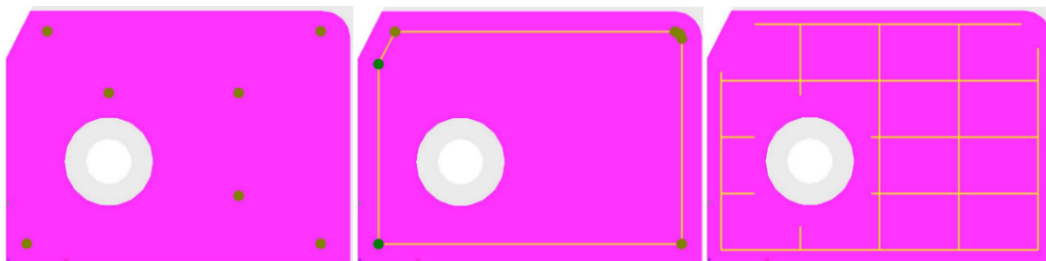
V rámci programu určeného na opakované merania boli okrem elementov tvoriacich základný systém vybrané ďalšie 3 prvky, na ktorých bolo neskôr vykonané posúdenie zhody so špecifikáciou. K zvoleným elementom patria:

- kružnica o priemere 20 mm na prvku 1 (valcové stupne),
- zvyšné 3 priamky na prvku 4 (kváder 90°),
- 2 roviny na prvku 10 (ľavá plocha).

Program na analýzu vplyvu voľby stratégie

Posledný program obsahuje okrem elementov podieľajúcich sa na základnom systéme 1 kružnicu o priemere 20 mm na prvku 1 (valcové stupne) a rovinu na prvku 10 (ľavá plocha). Na tejto rovine boli vytvorené 4 elementy so 4 rozdielnymi stratégiami snímania bodov. Pri prvom elemente bola rovina snímaná iba prostredníctvom siedmych bodov rozmiestnených po celej ploche prvku. V druhom a treťom elemente bola rovina skenovaná jednou polylíniou kopírujúcou obvod roviny s odsadením 5 mm od hrán. Tieto dva elementy sa líšia počtom zosnímaných bodov – 50 v prípade druhého elementu, respektíve 495 bodov v prípade tretieho elementu. Štvrtý element bol vytvorený skenovaním mriežky v rámci celej plochy roviny. Vytvorené stratégie sú graficky zobrazené na obr. 56).

K ostatných definovaných elementov boli vytvorené mnohé kombinácie metód vyhodnotenia spolu s parametrami filtrácie a eliminácie odľahlých hodnôt. Výsledné hodnoty z tohto programu slúžia na ukážku vplyvu zvolenej stratégie snímania, metódy vyhodnotenia, parametrov filtrácie a eliminácie odľahlých hodnôt, ako aj využitia závislých tolerancií.



Obr. 56) Varianty snímania roviny prvku 10 na analýzu vplyvu stratégie snímania

4.2 Vplyv stratégie na výsledné hodnoty merania

Táto časť práce je venovaná analýze vplyvu zvolených stratégií na výsledné hodnoty meraných charakteristík. Porovnávanie je vykonané v rámci merania kružnice v stredovom otvore, kružnice na valcových stupňoch a roviny umiestnenej na ľavej časti obrobku. Meranie bolo vykonané na obrobku po dokončovacích operáciách pred kompenzáciou stroja.

Vplyv stratégie snímania a počtu nasnímaných bodov

Na skúmanie vplyvu stratégie snímania a počtu nasnímaných bodov boli vytvorené 4 elementy roviny na prvku 10, ktoré sú opísané v predchádzajúcej kapitole 4.1.2. Výsledné hodnoty rovinnosti rozličných stratégií snímania uvedené v tab. 12) sú bez filtrácie a eliminácie odľahlých hodnôt.

Tab. 12) Vplyv stratégie snímania na výsledok rovinnosti prvku 10

[μm]	Diskrétné body 7 bodov	Polylína po obvode 50 bodov	Polylína po obvode 495 bodov	Mriežka 815 bodov
G	6,8	14,0	22,0	22,2
C	6,2	13,2	18,4	21,4
L1	8,4	14,8	21,7	22,6
T	6,4	13,2	18,4	21,4

Vplyv filtrácie a eliminácie odľahlých hodnôt

Vplyv filtrácie a eliminácie odľahlých hodnôt bol skúmaný na kružnici v stredovom otvore o priemere 20 mm, ktorá je snímaná kruhovou dráhou pozostávajúcou z 600 snímaných bodov. Pri konštantnej stratégii snímania bodov sú v rámci charakteristík nastavené rozdielne parametre filtrov a eliminácie odľahlých hodnôt. V rámci skúmania ich vzájomnej interakcie a vplyvu na nameraný výsledok kruhovitosti boli vytvorené kombinácie pozostávajúce z 3 parametrov smerodajnej odchýlky pri eliminácii odľahlých hodnôt a 3 parametrov filtrácie. Namerané hodnoty sú zaznamenané v tab. 13).

Tab. 13) Vplyv parametrov filtrácie a eliminácie odľahlých hodnôt na kruhovitosť

[μm]	Bez eliminácie odľahlých hodnôt			Eliminácia odľahlých hodnôt $\sigma = 2$			Eliminácia odľahlých hodnôt $\sigma = 3$		
	Bez filtra	Gauss UPR 50	Spline UPR 50	Bez filtra	Gauss UPR 50	Spline UPR 50	Bez filtra	Gauss UPR 50	Spline UPR 50
G	12,5	8,8	9,1	7,9	6,9	7,0	9,6	8,3	8,6
C	10,0	7,5	7,7	7,5	6,3	6,3	8,8	7,3	7,5
N	10,4	8,1	9,1	8,8	8,0	8,1	9,7	8,1	9,1
X	10,3	8,0	8,2	7,9	6,6	6,6	9,3	7,8	8,0

Vplyv metód vyhodnotenia na rozmerovú charakteristiku

Vplyv zvolenej metódy vyhodnotenia rozmerových charakteristík je skúmaný na kružnici v stredovom otvore a valcovom prvku o priemere 20 mm. V rámci elementu snímaného rovnakou stratégiou sú vytvorené charakteristiky so rozličnými metódami vyhodnotenia bez použitia filtrácie a eliminácie odľahlých hodnôt. Výsledné hodnoty sú uvedené v tab. 14).

Tab. 14) Vplyv metód vyhodnotenia na odchýlku rozmerovej charakteristiky

[μm]	LP min	LP max	E min	E max	GG	GC	GN	GX
Kružnica D20 (vnútorný valec)	7,1	-12,1	7,1	-12,6	-0,7	-2,7	7,2	-12,6
Kružnica D20 (vonkajší valec)	-11,1	-30,7	-9,1	-30,7	-17,7	-19,4	-9,1	-30,9

Vplyv požiadaviek závislých tolerancií

Vplyv využitia závislých tolerancií je analyzovaný na charakteristike polohy medzi stredovým otvorom a kružnicou na prvku 1. V jednotlivých charakteristikách sú definované požiadavky polohy bez závislých tolerancií, požiadavky polohy s maximom materiálu u tolerovaného elementu a požiadavky polohy s maximom materiálu pri tolerovanom aj pri referenčnom elemente. V tab. 15) sú uvedené výsledné hodnoty merania, ako aj veľkosti tolerančného poľa charakteristík. Veľkosť stanovenej tolerancie bola 0,01 mm, no využitie požiadavky maxima materiálu vedie k jej rozšíreniu na úkor rozmeru.

Tab. 15) Vplyv požiadaviek závislých tolerancií na polohu stredového otvoru

[μm]		RFS k RFS	MMC k RFS	MMC k MMC
G	odchýlka	16,1	16,1	3,9
	tolerancia	10,0	19,3	19,3
C	odchýlka	13,0	13,0	0,4
	tolerancia	10,0	17,3	17,3

4.3 Meranie vybraných parametrov obrobkov

Kompletný plán merania bol vykonaný na troch obrobkoch, ďalej označovaných ako:

- obrobok 1 – testovací kus po dokončovacích operáciách vyrobený na stroji pred kompenzáciou,
- obrobok 2 – testovací kus po dokončovacích operáciách vyrobený na stroji po kompenzácii,
- obrobok 3 – testovací kus po hrubovaní.

Meranie bolo vykonané vo fakultnej dielni na stroji ZEISS ECLIPSE 1000. Meranie testovacích obrobkov 1 a 2 po dokončovacích operáciách bolo uskutočnené dňa 15.4.2024 pri teplote 22,0 °C. Meranie testovacieho obrobku po hrubovaní pred dokončovacími operáciami bolo vykonané dňa 24.4.2024 pri teplote 21,0 °C. Pri všetkých troch meraniach bola aktivovaná teplotná kompenzácia pravítka vo všetkých troch osiach, ako aj kompenzácia teploty súčasti s koeficientom teplotnej rozťažnosti $23,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Čistý čas merania jedného plánu sa pohyboval okolo 19 minút. Všetky protokoly z merania sú súčasťou prílohy tejto práce.

Prvok 1 – valcové stupne

Valcové stupne sa na testovacom obrobku spoločnosti DATRON líšia spôsobom frézovania dokončovacej operácie. Valec s $\varnothing 38 \text{ mm}$ je frézovaný pomocou 2 záberov cez 2D kontúru, kdežto valec s $\varnothing 20 \text{ mm}$ je frézovaný po skrutkovi. Namerané hodnoty charakteristík na prvku 1 sú uvedené v tab. 16).

Tab. 16) Namerané hodnoty charakteristík prvku 1

	Valec Ø20 mm / Ø20,4 mm				Valec Ø38 mm / Ø38,4 mm			
	Kružnica 1		Kružnica 2		Kružnica 3		Kružnica 4	
	1, 3 – Priemer [mm]							
	GG	GN	GG	GN	GG	GN	GG	GN
Obrobok 1	19,9828	19,9873	19,9833	19,9874	37,9787	37,9829	37,9790	37,9834
Obrobok 2	19,9789	19,9839	19,9791	19,9847	37,9891	37,9946	37,9816	37,9868
Obrobok 3	20,4119	20,4238	20,3928	20,3985	38,3887	38,4185	38,3896	38,4181
	2, 4 – Kruhovitost' [µm]							
	C		N		C		N	
	C	N	C	N	C	N	C	N
Obrobok 1	5,8	6,8	5,3	5,5	5,6	6,1	5,2	5,3
Obrobok 2	4,7	5,8	5,2	5,9	6,0	6,2	5,6	5,8
Obrobok 3	18,5	20,0	8,5	9,0	35,1	46,8	32,7	40,4

Prvok 2 – kváder 45°

Prvkom 2, kvádom natočeným o 45° vzhľadom k lokálnemu súradnicovému systému, je testovaná presnosť dráhy stroja v rámci lineárnej interpolácie v dvoch osiach pri použití rovnakej rýchlosti pre každú os stroja. Rozdiel medzi zosilnením servomotorov jednotlivých osí sa prejaví v odchýlkach od súmernosti hrán. Priamosť hrán určuje mieru synchronizácie pohybov osí X a Y. [29] Namerané hodnoty charakteristík prvku 2 sú uvedené v tab. 17).

Tab. 17) Namerané hodnoty charakteristík prvku 2

	Kváder 45° (88 mm / 88,4 mm)							
	5 – Priamosť [µm]							
	Priamka 1		Priamka 2		Priamka 3		Priamka 4	
	G	C	G	C	G	C	G	C
Obrobok 1	5,6	5,1	3,3	3,2	3,9	3,8	6,8	6,3
Obrobok 2	3,7	3,5	4,3	4,3	4,4	4,4	3,0	3,0
Obrobok 3	4,7	4,5	6,4	5,8	5,6	5,6	5,4	5,4
	8, 9 – Rovnobežnosť [µm]				6, 7 – Kolmost' [µm]			
	Priamka 1 a 3		Priamka 2 a 4		Priamka 1 a 4		Priamka 2 a 3	
	G	C	G	C	G	C	G	C
Obrobok 1	7,7	7,7	6,5	6,5	8,8	8,8	4,6	4,6
Obrobok 2	5,0	5,0	3,9	3,9	6,9	6,9	6,9	6,9
Obrobok 3	4,6	4,6	4,3	4,3	9,6	9,8	13,1	13,1
	10 – Vzdialenosť protiľahlých strán [mm]							
	GG	GC	GG	GC				
Obrobok 1	87,9750	87,9756	87,9754	87,9747				
Obrobok 2	87,9757	87,9759	87,9808	87,9809				
Obrobok 3	88,3768	88,3769	88,3836	88,3828				

Prvok 3 – valec

Prvok 3 slúži na určenie kvality kompenzácie chyby pretáčania osí a prispôsobenia hnacích prvkov stroja. [29] Výsledné hodnoty charakteristík prvku 3 sú uvedené v tab. 18).

Tab. 18) Namerané hodnoty charakteristík prvku 3

	Valec Ø126 mm / Ø126,4 mm					
	11 – Priemer [mm]		12 – Kruhovitosť [µm]		13 – Sústrednosť [µm]	
	GG	GN	C	N	C	G
Obrobok 1	125,9649	125,9727	7,6	8,4	3,5	2,4
Obrobok 2	125,9687	125,9781	9,1	10,9	5,3	5,1
Obrobok 3	126,3615	126,3756	15,0	18,2	8,3	7,7

Prvok 4 – kváder 90°

Prvkom 4 je testovaná presnosť stroja pri lineárnom pohybe v jednej osi pri konštantnej rýchlosti. Cieľom je zisk údajov o geometrii stroja s ohľadom na kolmosť osí X a Y. [29] Hodnoty z merania charakteristík prvku 4 sú uvedené v tab. 19).

Tab. 19) Namerané hodnoty charakteristík prvku 4

	Kváder 90° (128 mm / 128,4 mm)							
	14 – Priamosť [µm]							
	Priamka 1		Priamka 2		Priamka 3		Priamka 4	
	G	C	G	C	G	C	G	C
Obrobok 1	1,1	1,1	1,7	1,6	3,2	3,0	2,4	2,3
Obrobok 2	0,9	0,8	2,0	1,9	3,0	2,9	1,5	1,3
Obrobok 3	1,5	1,5	6,6	5,8	1,4	1,3	1,5	1,5
	17, 18 – Rovnobežnosť [µm]				15, 16 – Kolmosť [µm]			
	Priamka 1 a 3		Priamka 2 a 4		Priamka 1 a 4		Priamka 2 a 3	
	G	C	G	C	G	C	G	C
Obrobok 1	3,4	3,4	4,3	4,3	3,8	4,6	5,1	5,1
Obrobok 2	0,9	0,9	3,2	3,2	2,1	2,1	2,7	2,7
Obrobok 3	3,8	3,8	7,0	7,0	7,4	7,4	3,1	3,1
	19 – Vzdialenosť protíľahlých strán [mm]							
	GG	GC	GG	GC				
Obrobok 1	127,9649	127,9648	127,9619	127,9620				
Obrobok 2	127,9774	127,9770	127,9613	127,9612				
Obrobok 3	128,3758	128,3759	128,3599	128,3608				

Prvok 5 – stredový otvor

Prvok 5 nachádzajúci sa na testovacom obrobku spoločnosti DATRON nepatrí k prvkom definovaným v rámci normy VDI/NCG 5211:2013. Prvok 5 predstavuje stredový otvor pozostávajúci z dvoch valcových stupňov s rozdielnymi priermi, čím sa výrazne podobá prvku 1 – valcovým stupňom. V rámci kontroly prvku na skúmanom obrobku bolo navrhnuté vyhodnotenie priemeru a kruhovitosti každého úseku otvoru. Výsledky merania charakteristík na prvku 5 sú uvedené v tab. 20).

Tab. 20) Namerané hodnoty charakteristík prvku 5

	Valec Ø20 mm / Ø19,6 mm		Valec Ø19,5 mm / Ø19,1 mm	
	20, 22 – Priemer [mm]			
	GG	GX	GG	GX
Obrobok 1	19,9997	19,9915	19,5035	19,4985
Obrobok 2	20,0033	19,9974	19,4962	19,4876
Obrobok 3	19,5104	19,4712	19,0174	18,9923
	21, 23 – Valcovitosť [µm]			
	C	X	C	X
Obrobok 1	7,8	9,1	5,4	5,5
Obrobok 2	6,0	8,1	9,0	9,7
Obrobok 3	41,1	44,0	30,2	34,3

Prvok 6 – zrezaný kužel

V rámci prvku 6, zrezaného kužela, vyžaduje norma VDI/NCG 5211:2013 kontrolu priamosti bočných čiar v prechodov kvadrantov a kruhovitosti na niekoľkých úrovniach kužela. Tento prvok slúži na posúdenie dynamického výkonu stroja a riadenia. Priamosť bočných čiar určuje presnosť interpolácie. [29] Výsledné hodnoty merania prvku 6 sú uvedené v tab. 21).

Tab. 21) Namerané hodnoty charakteristík prvku 6

	25 – Priamosť [µm]							
	Priamka 1		Priamka 2		Priamka 3		Priamka 4	
	G	C	G	C	G	C	G	C
Obrobok 1	13,6	12,9	14,2	13,5	7,4	7,0	5,0	4,7
Obrobok 2	5,8	5,6	10,1	9,4	9,7	8,7	3,8	3,7
Obrobok 3	6,5	6,4	8,5	8,4	5,2	4,6	6,6	5,8
	24 – Kruhovitosť [µm]						26 – Uhol [°]	
	Kružnica 1		Kružnica 2		Kružnica 3		Priamky 1-4	
	C	N	C	N	C	N	GG	GC
Obrobok 1	10,5	13,7	8,5	9,4	23,1	23,1	80,0265	80,0667
Obrobok 2	8,9	10,2	6,4	7,3	18,4	18,4	80,0225	80,0538
Obrobok 3	16,8	21,7	17,2	21,3	18,9	24,2	80,0205	80,0245

Prvok 7 a 8 – sférický segment a tvarová plocha

Pri kontrole prvku 7, sférického segmentu, je podľa normy VDI/NCG 5211:2013 požadované vyhodnotenie geometrickej presnosti prvku. Tento segment slúži na kontrolu presnosti interpolácie, ktorá ovplyvňuje presnosť mapovania obrysu. [29]

Prvok 8, tvarová plocha, je v norme rozdelená do 3 úsekov frézovaných rozdielnymi rýchlosťami, z ktorých sa určuje tendencia stroja na klepanie pri rôznych rýchlostiach. [29] Na testovacom kuse spoločnosti DATRON je táto plocha frézovaná pri rovnakej rýchlosti. Meranie 3 kriviek teda slúži iba na určenie opakovateľnosti operácie. Výsledné hodnoty charakteristík prvkov 7 a 8 sú uvedené v tab. 22).

Tab. 22) Namerané hodnoty charakteristík prvku 7 a 8

	Sférický segment – R10,5 / R10,7 mm				Tvarová plocha		
	27 – Rádus [mm]		28 – Profil plochy [μm]		29 – Profil čiary [μm]		
	GG	GC	G	C	Krivka 1	Krivka 2	Krivka 3
Obrobok 1	10,5078	10,5076	43,8	43,8	55,7	55,1	54,0
Obrobok 2	10,5052	10,5030	60,1	60,1	54,4	54,0	53,5
Obrobok 3	10,5915	10,5985	206,2	206,2	182,4	181,0	178,5

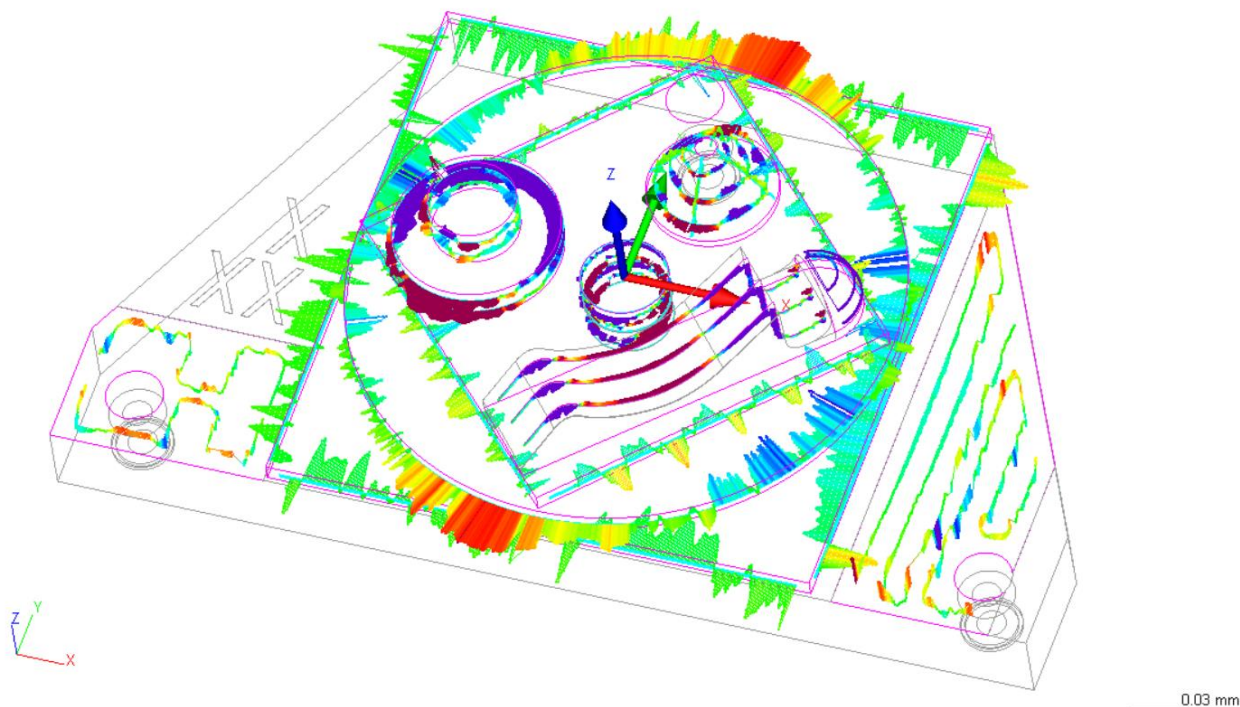
Prvok 9 a 10 – pravá a ľavá plocha

Prvky 9 a 10 nie sú súčasťou normy VDI/NCG 5211:2013, avšak testovací obrobok navrhnutý spoločnosťou DATRON tieto plochy obsahuje. Obe plochy sú dokončované v 2 fázach. Na oboch rovinách je na začiatku dokončovacích operácií obrobena prvá polovica a na konci celého procesu frézovania druhá polovica. Predpokladá sa, že účelom týchto prvkov je zistenie vplyvu teplotnej rozťažnosti vretena počas procesu frézovania ostatných prvkov. V rámci analýzy týchto prvkov bolo navrhnuté vyhodnotenie rovinnosti a vzdialenosti v smere osi Z od počiatku súradnicového systému. Výsledky z merania týchto rovín sú uvedené v tab. 23).

Tab. 23) Namerané hodnoty charakteristík prvku 9 a 10

	Pravá plocha				Ľavá plocha			
	Ľavá polovica		Pravá polovica		Spodná polovica		Horná polovica	
	30, 32 – Rovinnosť [μm]							
	G	C	G	C	G	C	G	C
Obrobok 1	10,2	9,4	5,8	4,9	1,8	1,6	1,0	1,0
Obrobok 2	7,8	7,5	3,2	2,8	1,7	1,5	1,8	1,7
Obrobok 3	12,2	9,5	9,6	9,2	8,9	8,7	8,3	8,1
	31, 33 – Vzdialenosť Z [μm] – odchýlka							
	GG	GC	GG	GC	GG	GC	GG	GC
Obrobok 1	56,4	58,0	36,7	37,6	21,4	21,6	29,7	29,5
Obrobok 2	67,9	68,9	48,4	48,6	36,9	36,6	44,6	44,3
Obrobok 3	25,6	29,7	25,7	24,8	11,5	10,8	5,1	4,3

Na záver každého plánu merania boli okrem vygenerovaných protokolov merania uložené aj namerané body priamo do príslušného programu v softvéri Calypso. Uloženie nasnímaných bodov umožňuje dodatočné upravovanie výsledných charakteristík a opätovné vygenerovanie upraveného protokolu, prípadne rôzne zobrazenia nameraných bodov priamo na CAD modeli. Ukážka takéhoto zobrazenia je znázornená pri meraní obrobku 3 na obr. 57).



Obr. 57) Zobrazenie nameraných bodov na CAD modeli

4.4 Posúdenie zhody vybraných parametrov obrobku

Z kompletného plánu merania boli vybrané 4 elementy, na ktorých bolo vykonané opakované meranie za účelom zberu dostatku dát na štatistické vyhodnotenie jednotlivých charakteristík a posúdenie zhody so špecifikáciou. Tieto merania boli vykonané dňa 24.4.2024 pri teplote 21,0 °C so zapnutou kompenzáciou teploty v programe Calypso. Priebeh jedného merania trval približne 5 minút a 10 sekúnd. Opakované merania boli vykonané na testovacom obrobku 1 – obrobku po dokončení vyrobenom na stroji pred kompenzáciou.

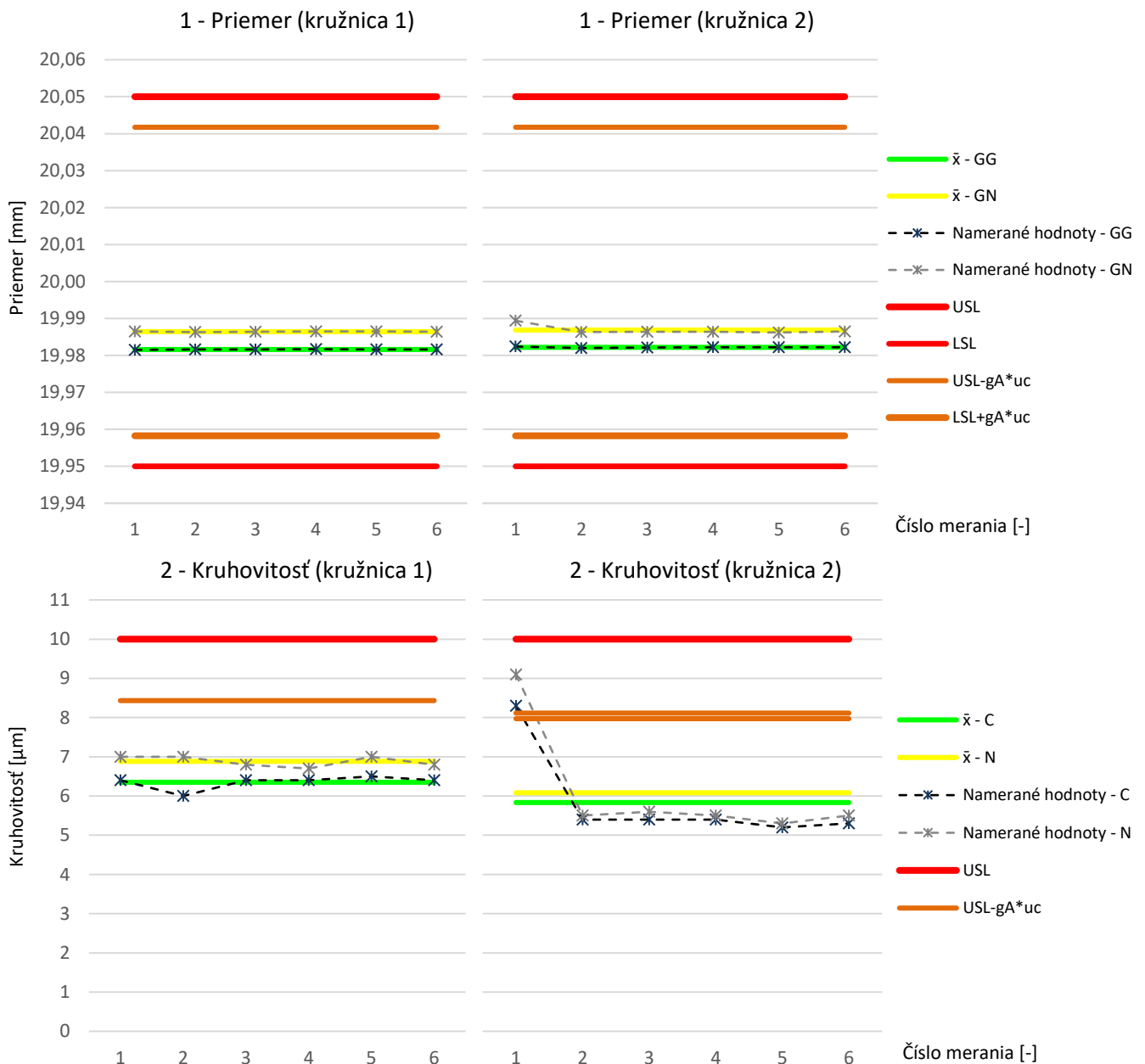
Tento zredukovaný program merania bol vykonaný celkovo 6-krát. Prvé 3 merania boli vykonané v rámci počiatočného manuálneho vyrovnania obrobku v pracovnom priestore stroja. Po vykonaní prvých troch meraní bola súčasť mierne posunutá, po čom bolo vykonané druhé manuálne vyrovnanie obrobku. V rámci takto vytvorené nového zarovnania boli vykonané ďalšie 3 opakovania plánu merania.

V rámci vyhodnotenia jednotlivých charakteristík sú pri neistote typu B uvažované príspevky od rozlišovacej schopnosti stroja a údaje uvedené v protokole o vyhlásení zhody so špecifikáciou stroja (viď podkapitolu 3.5). Vzhľadom k tomu, že zmienené posúdenie zhody bolo vykonané ešte v roku 2022 pri ideálnych podmienkach pred prevozom stroja, je neistota typu B u rozmerových charakteristík počítaná s maximálnou dovolenou chybou merania dĺžky. Vplyv rozdielu teploty od 20 °C nie je uvažovaný z dôvodu zapnutej teplotnej kompenzácie pri počítačovom spracovaní nasnímaných bodov. V rámci ďalších príspevkov výslednej neistoty typu B by mohol byť uvažovaný napríklad vplyv rozdielu teplôt 3D súradnicového stroja

a meraného obrobku, neistoty z kalibrácie použitého teplomera vzduchu, prípadne vplyv kalibrácie dotyku. Tieto údaje však neboli k dispozícii, preto sa s nimi pri vyhodnocovaní charakteristík v tejto práci neuvažuje.

Pri vyhodnotení nameraných hodnôt sú použité vzťahy uvedené v kapitole 2.2, ktorá pojednáva o metodike vyhodnocovania výsledkov merania. Posúdenie zhody so špecifikáciou je vykonané na základe normy ČSN EN ISO 14253-1:2023, ktorá je bližšie rozobraná v kapitole 2.3. Všetky namerané hodnoty sú spracované v programe Microsoft Excel, ktorý je spolu s tabuľkami nameraných a vyhodnotených hodnôt vybraných charakteristík súčasťou prílohy práce.

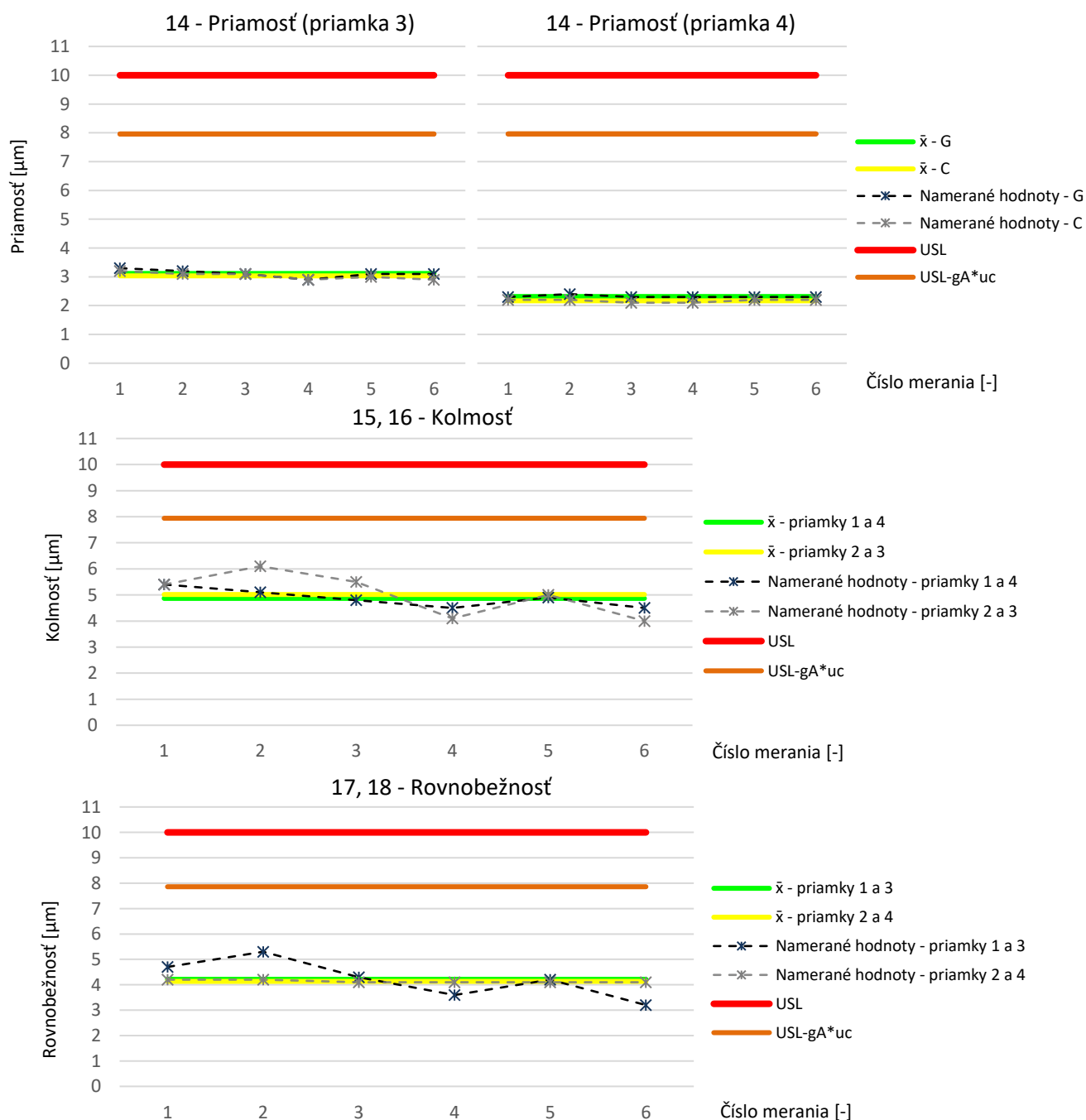
Prvok 1 – valcové stupne (valec D20)



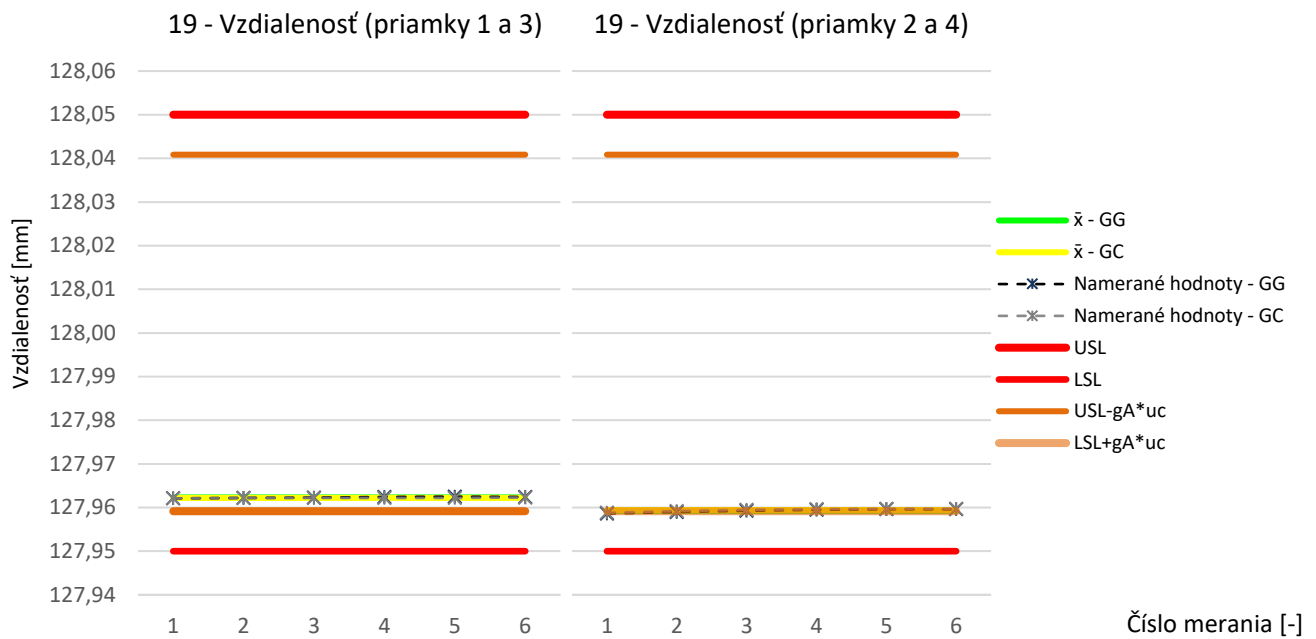
Obr. 58) Posúdenie zhody so špecifikáciou prvku 1 – priemer a kruhovitost'

Na obr. 58) je graficky znázornené posúdenie zhody so špecifikáciou charakteristík prvku 1. Z obrázku vyplýva, že aritmetický priemer nameraných hodnôt všetkých charakteristík spadá do polí prijatia, ktoré predstavujú tolerančné polia zmenšené o ochranné pásmo. Pri priemere je stanovená špecifikácia $20,00 \pm 0,05$ mm. Po zavedení ochranného pásma má pole prijatia veľkosť približne $83 \mu\text{m}$. Z grafov priemeru oboch kružníc vidno, že namerané hodnoty sú mierne posunuté od nominálnej hodnoty smerom k LSL, avšak všetky spadajú do polí prijatia s veľkou rezervou. Pri kruhovitosti má jednostranné tolerančné pole veľkosť $10 \mu\text{m}$. Prvé meranie kružnice 2 dosahuje výrazne odlišný výsledok v porovnaní so zvyšnými meraniami, preto by bolo vhodné overiť správnosť tohto merania. Aj napriek tejto odchýlke však aritmetické priemery u všetkých charakteristík kruhovitosti spadajú do polí prijatia.

Prvok 4 – kváder



Obr. 59) Posúdenie zhody so špecifikáciou prvku 4 – priamosť, kolmosť a rovnobežnosť



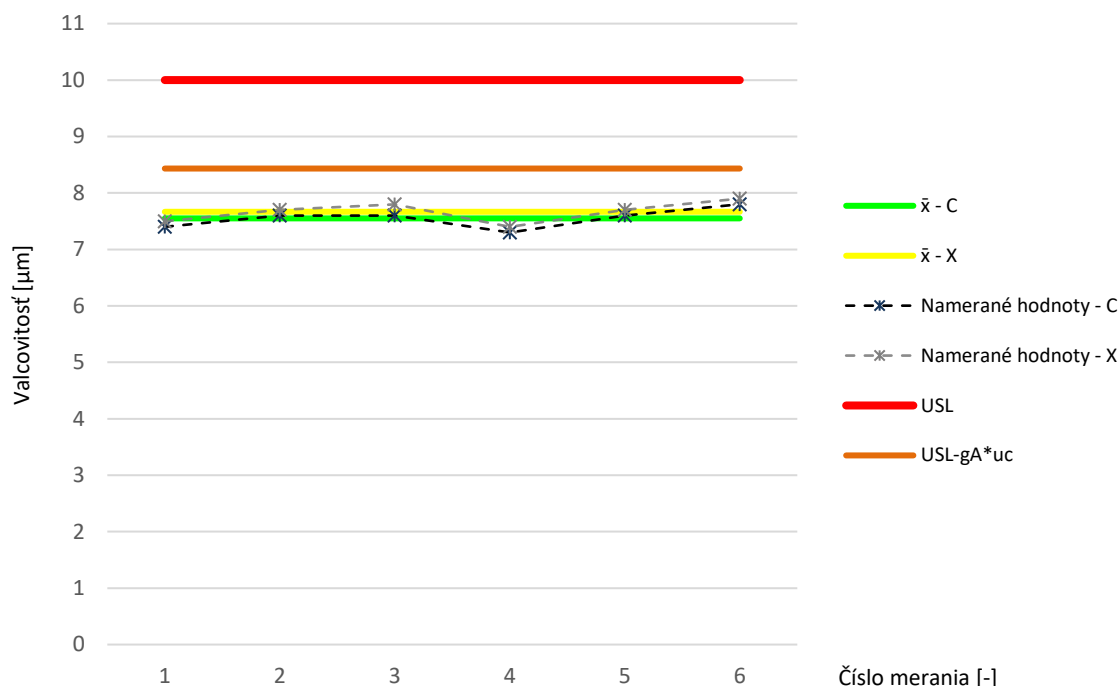
Obr. 60) Posúdenie zhody so špecifikáciou prvku 4 – vzdialenosť

Na obr. 59) a obr. 60) je graficky znázornené vyhodnotenie charakteristík prvku 4. Jedná sa konkrétne o priamosť jednotlivých priamok, vzájomnú kolmosť susedných priamok, rovnobežnosť a vzdialenosť protiahlých priamok. Pri geometrických toleranciách je stanovené jednostranné tolerančné pole o veľkosti 10 μm . Pri konštantnej neistote typu B určuje variabilita nameraných hodnôt jednotlivých charakteristík rozdiely vo veľkostiach polí prijatia jednotlivých charakteristík. Vzhľadom k relatívne malej variabilite nameraných hodnôt je neistota merania typu A pomerne malá. To má za následok, že veľkosť poľa prijatia sa pri jednotlivých charakteristikách pohybuje v relatívne úzkom rozmedzí od 7,84 μm do 7,96 μm . Do týchto polí prijatia spadajú všetky namerané hodnoty posudzovaných charakteristík.

Pri vzdialenosti je špecifikovaná hodnota $128 \pm 0,05$ mm. Z grafu na obr. 60) vidno, že priemerné vzdialenosti oboch dvojíc protiahlých strán sú veľmi posunuté od nominálnej hodnoty smerom k LSL a sú vo veľmi tesnej blízkosti hranice poľa prijatia. Predovšetkým vzdialenosť medzi priamkami 2 a 4 leží v poli prijatia len o pár desiatín mikrometrov. Pri uvažovaní všetkých zdrojov neistoty typu B by sa priemery týchto charakteristík ocitli mimo poľa prijatia v poli neistoty, a nebolo by tak možné posúdiť ich zhodu so špecifikáciou.

Prvok 5 – stredový otvor D20

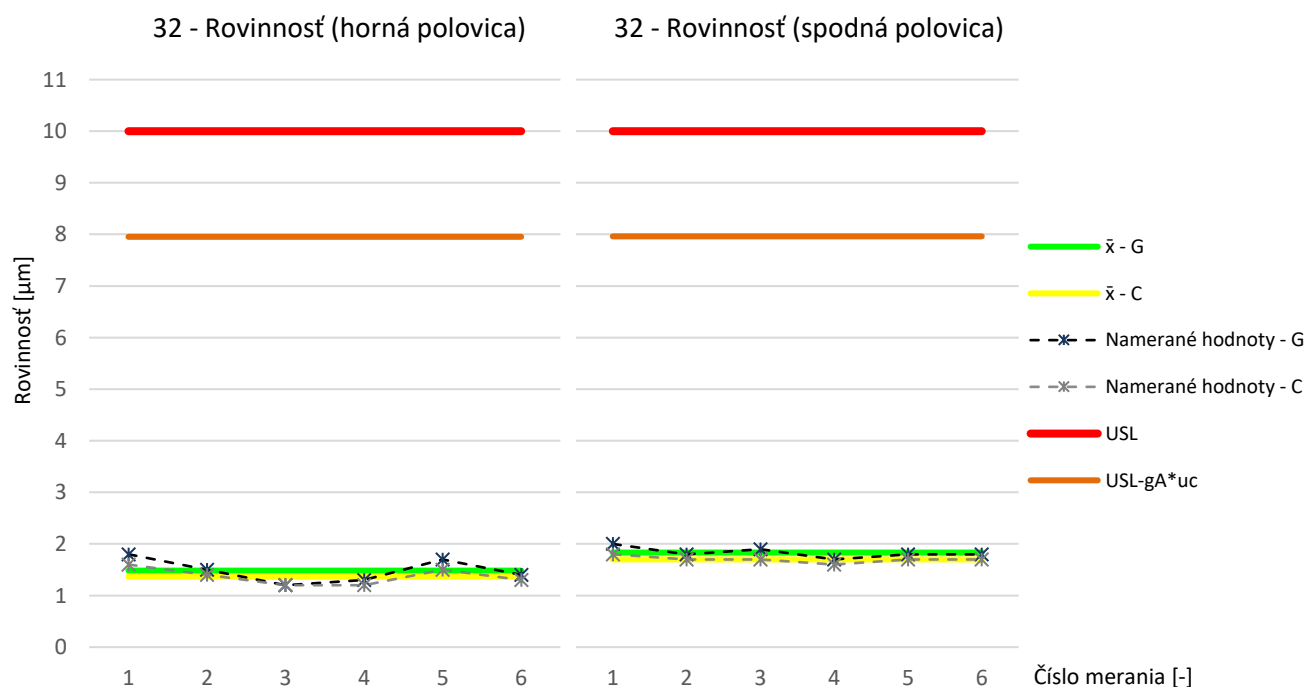
21 - Valcovitosť



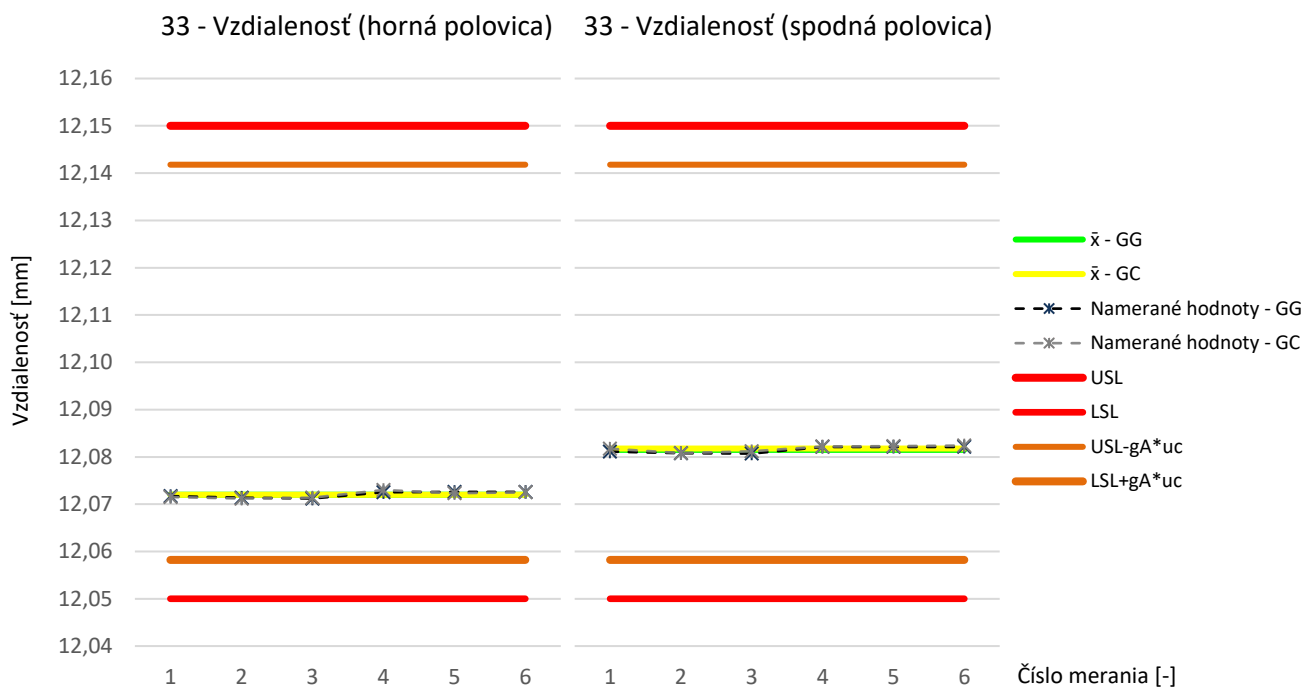
Obr. 61) Posúdenie zhody so špecifikáciou prvku 5 – valcovitosť

Na obr. 61) je graf posúdenia zhody so špecifikáciou valcovitosti prvku 5. Tolerančné pole má veľkosť 10 μm, zatiaľ čo pole prijatia má veľkosť 8,43 μm. Z uvedeného grafu vyplýva, že všetky namerané hodnoty spadajú do poľa prijatia, preto je možné prehlásiť posúdenie zhody so špecifikáciou.

Prvok 10 – Ľavá plocha



Obr. 62) Posúdenie zhody so špecifikáciou prvku 10 – rovinnosť



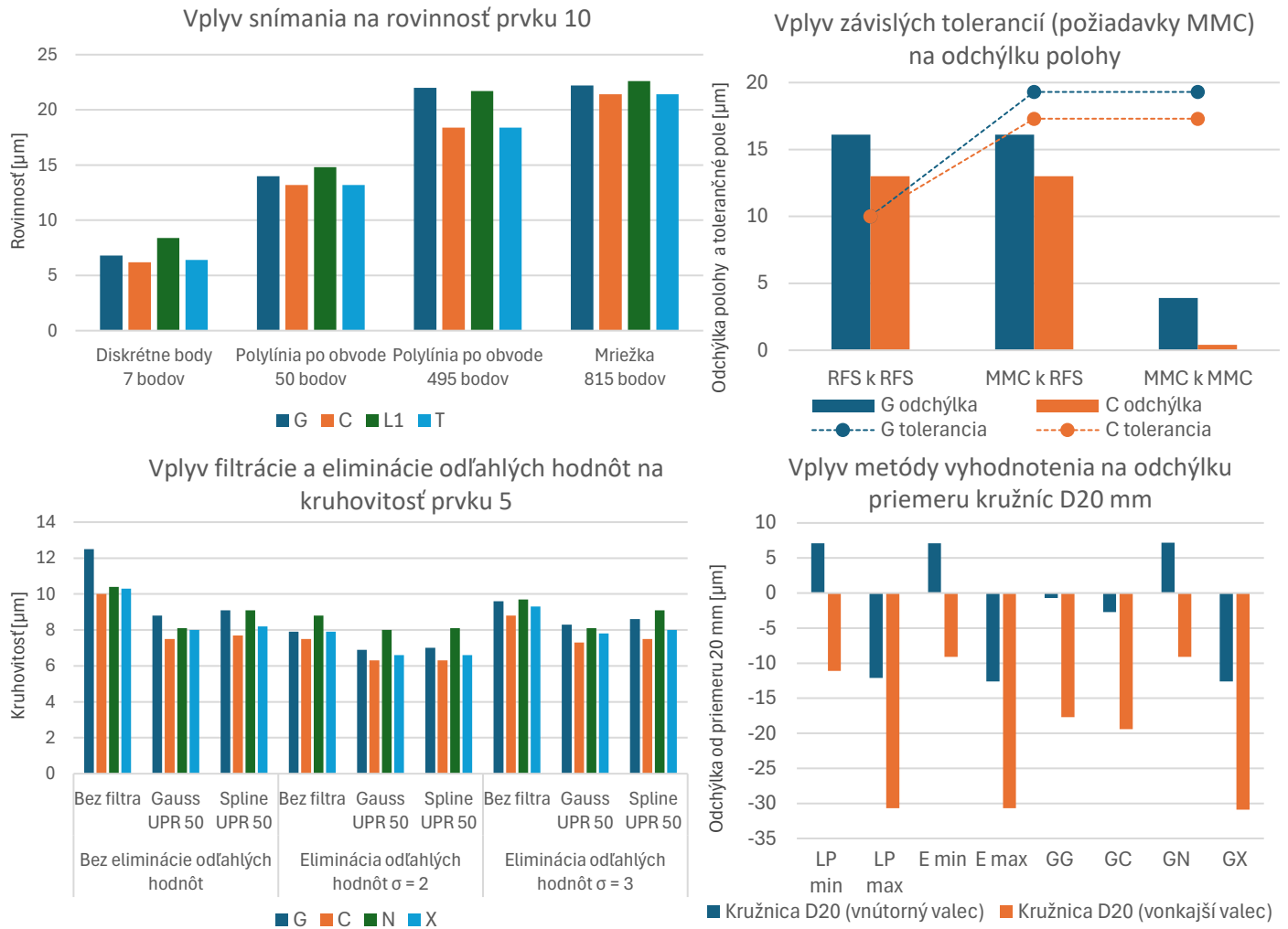
Obr. 63) Posúdenie zhody so špecifikáciou prvku 10 – vzdialenosť

Na obr. 62) je graf znázorňujúci posúdenie zhody so špecifikáciou prvku 10, a to konkrétne charakteristiky rovinnosti. Z uvedeného grafu vyplýva, že namerané hodnoty rovinnosti sú na oboch poloviciach plochy veľmi nízke a bez problémov s veľkou rezervou spadajú do poľa prijatia, ktorého veľkosť je približne 8 μm .

Posúdenie zhody charakteristík vzdialenosti oboch polovíc plochy od hornej roviny testovacieho obrobku je zobrazené na obr. 63). Špecifikácia tejto charakteristiky je $12,1 \pm 0,05$ mm. Priemer nameraných hodnôt je mierne posunutý smerom k LSL, avšak v oboch prípadoch spĺňa požiadavky na posúdenie zhody so špecifikáciou.

5 POSÚDENIE DOSIAHNUTÝCH VÝSLEDKOV

V rámci porovnania rozdielnych stratégií merania bol preukázaný výrazný vplyv odlišných stratégií a zvolených parametrov merania na výsledné hodnoty charakteristík. Na obr. 64) sú zobrazené grafy výsledných hodnôt zvolených porovnaní.



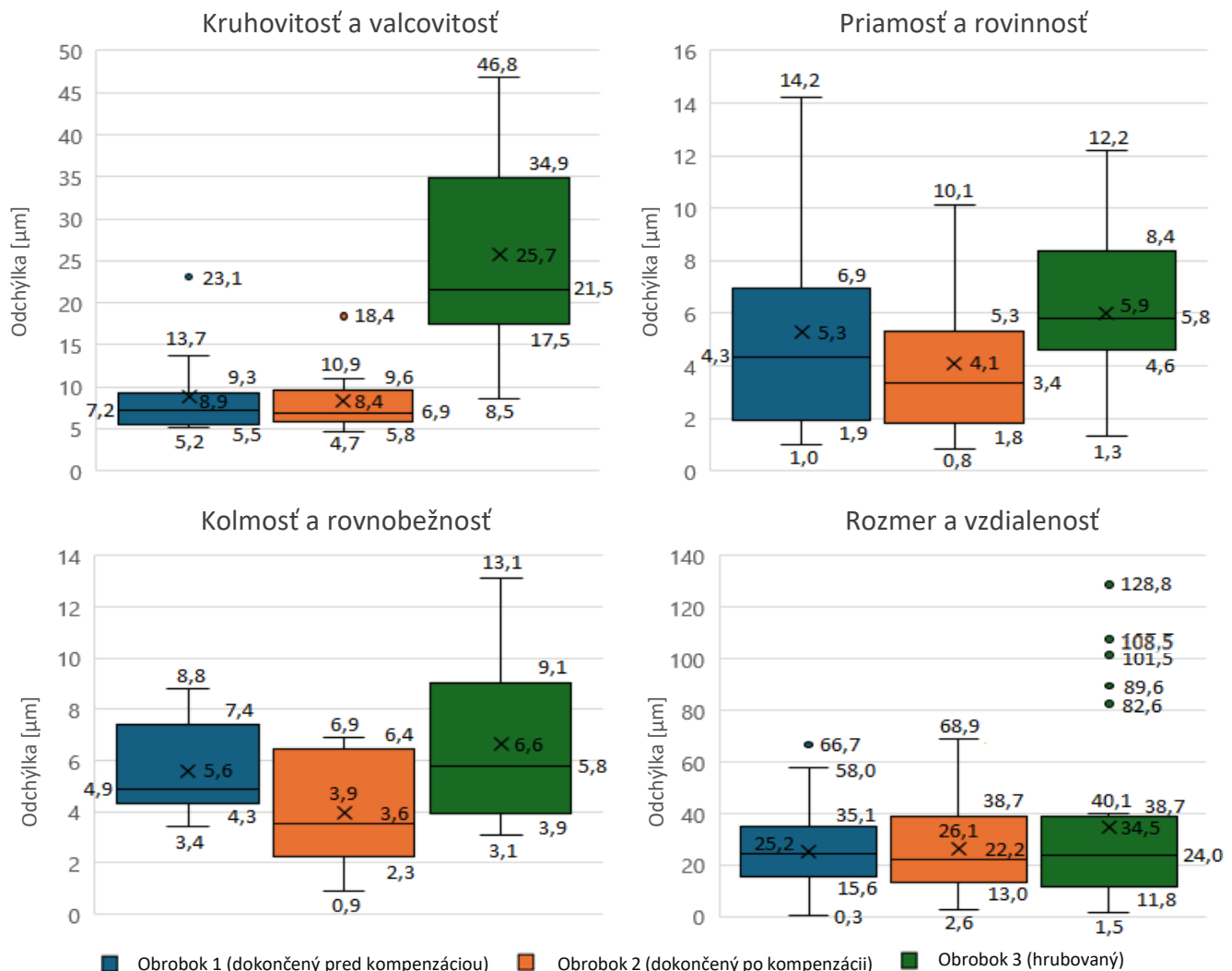
Obr. 64) Grafy vplyvu rozličných stratégií na výsledok merania

Z prvého grafu zobrazujúceho vplyv snímania na rovinnosť prvku 10 je zrejmé, že stratégia snímania má výrazný vplyv na presnosť výsledných hodnôt meraní. Malý počet bodov môže viesť k veľmi skresľujúcim výsledkom. Ideálne je preto snímanie veľkého počtu bodov rovnomerne rozmiestnených po celom povrchu meraného prvku. Druhý graf zobrazuje vplyv požiadavky maxima materiálu na odchýlku polohy. Z tohto grafu vidno, že použitím požiadavky MMC dochádza v programe Calypso k automatickému prepočítavaniu odchylok geometrických tolerancií, respektíve veľkosti ich tolerančného poľa na úkor rozmerových charakteristík. Tretí graf zobrazuje vplyv filtrácie a eliminácie odľahlých hodnôt. Z tohto grafu je zrejmé, že použitie filtra a eliminácie odľahlých hodnôt znižuje výsledné odchýlky od ideálnej geometrie. So znižujúcim sa parametrom σ rastie počet eliminovaných hodnôt, preto je potrebné voliť tento parameter s veľkou obozretnosťou. Výsledné hodnoty kruhovitosti pri použití Gaussovho filtra a filtra Spline nevykazujú výrazné rozdiely. Na poslednom grafe je

možno vidieť veľmi výrazné rozdiely vo voľbe metód vyhodnotenia na odchýlku priemeru kružníc s priemerom 20 mm. Zároveň je tu dobre vidieť podstatu princípu vyhodnotenia s požiadavkou obálky (E) na 2 rozličné typy prvkov – vnútorný a vonkajší prvok.

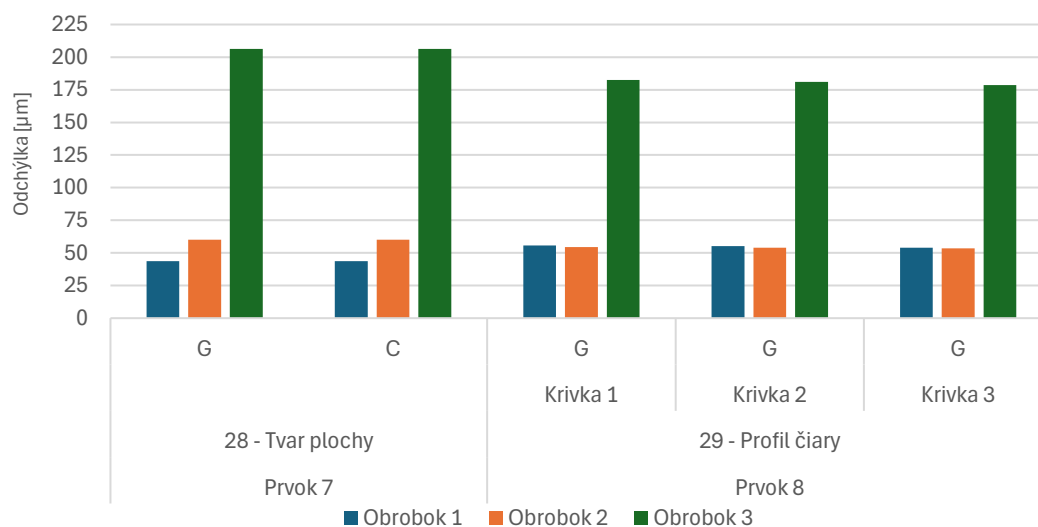
Analýzou vplyvu rozličných stratégií na výsledné hodnoty merania sa zaoberá aj starší odborný článok „*The Influence of Measurement Strategy on the Uncertainty of CMM-Measurements*“ z Univerzity Erlangen-Nuremberg, ktorý taktiež poukazuje na rozdiely výsledkov pri rozličných stratégiách merania. [34] V uvedenej štúdií dospeli autori pri zrovnaní výsledkov merania získaných rozličnými stratégiami k obdobným záverom.

Meranie kompletného programu na 3 vybraných obrobkoch preukázalo, že namerané odchýlky charakteristík testovacieho kusu po hrubovaní (obrobok 3) sú výrazne vyššie ako odchýlky u testovacích kusoch po dokončení. Pri porovnaní výsledných hodnôt charakteristík kusov po dokončovacích operáciách vyrobených na frézke pred kompenzáciou (obrobok 1), respektíve po kompenzácii (obrobok 2), nie sú preukázané výraznejšie rozdiely. O niečo menšie odchýlky boli namerané pri obrobku frézovanom po vykonaní kompenzácie frézky. Grafické zobrazenia nameraných hodnôt jednotlivých prvkov a ich charakteristík sú súčasťou prílohy práce.



Obr. 65) Krabicové diagramy vybraných skupín charakteristík všetkých prvkov

Na krabicových diagramoch zobrazených na obr. 65) sú uvedené namerané hodnoty odchyľok tvaru kruhových charakteristík (kruhovitosť a valcovitosť), lineárnych charakteristík (priamosť a rovinnosť), orientácie (kolmosť a rovnobežnosť) a rozmerových charakteristík meraných obrobkov. Rozmerové odchyľky hrubovaného kusu (obrobok 3) sú vyjadrené k nominálnym hodnotám zahŕňajúcim prídavky na obrábanie. Tieto grafy obsahujú údaje o kvartiloch nameraných hodnôt jednotlivých skupín charakteristík, kde zakreslené krabice ohraničuje 1. a 3. kvartil, línia v krabiciach zobrazuje medián a symbol X označuje aritmetický priemer. Línie vychádzajúce z krabíc vyjadrujú variabilitu nameraných dát pod 1. a nad 3. kvartilom. Krajné body týchto línií určujú hodnoty 1,5-násobku medzikvartilového rozpätia pod 1. kvartilom, respektíve nad 3. kvartilom. Odľahlé hodnoty sú zobrazené vo forme krúžkov. Namerané odchyľky tvarových prvkov (sférický segment a tvarová plocha), ktoré nie sú súčasťou krabicových diagramov, sú zobrazené na obr. 66).



Obr. 66) Grafické zobrazenie odchyľok charakteristík tvarových prvkov

Na základe grafov nameraných hodnôt zobrazených na obr. 65) a obr. 66) môžeme konštatovať, že hodnoty odchyľok hrubovaného kusu (obrobku 3) sú vyššie predovšetkým pri geometrických toleranciách tvaru kruhových charakteristík a tvarových prvkov. Na krabicovom diagrame rozmerových charakteristík vidno, že 6 hodnôt je odľahlých s výrazne vyššou hodnotou odchyľky v porovnaní s ostatnými rozmerovými charakteristikami. Jedná sa o priemery stredového otvoru a rádius sférického segmentu pri oboch metódach vyhodnotenia. Odhliadnuc od týchto prvkov sú odchyľky rozmerových charakteristík hrubovaného kusu zrovnateľné s odchyľkami obrobkov po dokončení.

Meranie a vyhodnotenie charakteristík vybraných prvkov na posúdenie zhody so špecifikáciou obrobku 1 je rozobrané v predchádzajúcej kapitole. V rámci všetkých zvolených charakteristík a k nim priradených veľkostí tolerančných polí bola preukázaná zhoda so špecifikáciou. Z dôvodu úspory času merania na súradnicovom meracom stroji, a s tým súvisiacim ekonomickým aspektom vyhodnocovania testovacieho kusu bolo meranie namiesto odporúčaných 10 opakovaní vykonané iba 6-krát. Menší počet meraní je kompenzovaný koeficientom rozšírenia $K = 1,3$, ktorý zväčšuje neistotu merania typu A. To má za následok zúženie polí prijatia jednotlivých charakteristík. Vzhľadom k veľmi malej variabilite hodnôt v rámci opakovaných meraní je však toto zúženie spôsobené menším počtom hodnôt v našom prípade takmer zanedbateľné.

6 DOPORUČENIE PRE PRAX

Proces tvorby programu merania na CMM má výrazný vplyv na presnosť získaných výsledkov. Na zabezpečenie čo možno najpresnejších výsledkov by mali operátori programujúci meracie operácie dodržiavať odporúčané postupy stanovené výrobcami súradnicových strojov, prípadne by sa mali držať jednotlivých noriem systému ISO GPS. Pri vytváraní programu merania v softvéri Calypso by mali byť dodržané tieto zásady:

- Voliť čo možno najmenší počet dotykov a najmenšiu dĺžku snímača.
- Voliť tvar, materiál a priemer dotykov podľa geometrie a materiálu meranej súčasti.
- Pred meraním očistiť meraný objekt a použité dotyky.
- Pravidelne kalibrovať použité dotyky pomocou kalibračnej gule.
- Upnúť meraný objekt tak, aby bolo možné zosnímanie všetkých požadovaných bodov v jednej polohe.
- Základný systém by mal pozostávať ideálne z čo možno najpresnejších a najstabilnejších elementov.
- Pri definovaní bezpečnostných rovín uvažovať okrem meraného objektu aj prvky slúžiace na jeho upnutie, prípadne iné prekážky v pracovnom priestore.
- Pri teplote odlišnej od 20 °C aktivovať teplotnú kompenzáciu.
- Meracie základne by sa mali zhodovať s konštrukčnými základňami.
- Obmedziť snímanie iba na prvky požadované k vyhodnoteniu.
- Snímané body by mali byť rovnomerne rozložené po celej ploche meraného prvku.
- Obmedziť snímanie bodov v tesnej blízkosti hrán jednotlivých prvkov.
- Voliť rýchlosť snímania a dostatočne veľký počet nasnímaných bodov na základe geometrie jednotlivých prvkov.
- Voliť vhodnú metódu vyhodnotenia vzhľadom k funkčnosti meraných prvkov (napríklad maximálnu vpísanú kružnicu pri vnútorných povrchoch typu diery, minimálnu opísanú kružnicu pri vonkajších povrchoch typu hriadel).
- Používať filtráciu a elimináciu odľahlých hodnôt s veľkou opatrnosťou, podľa noriem alebo odporúčaní výrobcu.
- Pred meraním skontrolovať správnosť nastavenia bezpečnostných skupín jednotlivých prvkov.
- Znázorniť namerané hodnoty graficky na odhalenie prípadných systematických chýb.
- Prvé v poradí merať prvky s najužším tolerančným poľom, prípadne problematické prvky na základe skúseností z predchádzajúcich meraní.

Na zabezpečenie presnosti merania a predchádzaniu nezrovnalostí vo vyhodnotení nameraných výsledkov je potrebné zabezpečiť, aby bola výkresová dokumentácia vytváraná konštrukčnými oddeleniami jednoznačná a špecifikovala požiadavky na spôsob merania a vyhodnotenia jednotlivých parametrov produktu. K tomu slúžia rôzne značky, skratky a označenia výkresovej dokumentácie špecifikujúce požiadavky na meranie. Takto vytvorená dokumentácia pomáha predchádzať problémom s výraznou variabilitou výsledkov získaných rôznymi operátormi pri meraní rovnakej súčasti.

7 ZÁVER

Meranie dielov tvorí v súčasnom priemysle neoddeliteľnú súčasť výrobného procesu. Táto práca sa zaoberá problematikou jednej z najpoužívanejších metód merania, a to síce meraniu na 3D súradnicových meracích strojoch.

Prvá časť práce je venovaná systému ISO GPS, ktorý charakterizuje všetky geometrické špecifikácie produktov a tým ovplyvňuje celý proces merania súčastí. Následne boli rozobrané základné technické parametre používaných 3D súradnicových strojov a základné princípy tvorby programu merania so zameraním na softvér Calypso od spoločnosti ZEISS.

Hlavným cieľom práce bolo vytvorenie meracieho programu k vybranému obrobku, meranie zvolených charakteristík a vyhodnotenie nameraných výsledkov. Predmetom merania bol obrobok slúžiaci na testovanie HSC strojov vyrobený na frézke DATRON M8Cube. Tento testovací kus je inšpirovaný normou VDI/NCG 5211:2013, ktorá stanovuje pokyny k testovaniu HSC strojov. K testovaciemu obrobku bol vytvorený program merania v softvéri Calypso, ktorý bol použitý k meraniu 3 odlišných vzoriek testovacieho kusu na stroji ZEISS ECLIPSE 1000 umiestneného v dielni Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně. Po vykonaní merania boli namerané hodnoty spracované a vyhodnotené. Výsledky merania dokazujú, že vo väčšine charakteristík dosahuje testovací kus po hrubovaní výrazne horšie geometrické vlastnosti ako testovacie kusy po dokončovacích operáciách. V rámci porovnania kusov po dokončovacích operáciách vyrobených na frézke pred kompenzáciou, respektíve po kompenzácii, nie sú preukázané výraznejšie rozdiely. V rámci 111 vyhodnocovaných charakteristík nespadá do stanovených tolerančných polí 11 charakteristík pri oboch dokončených obrobkoch, respektíve 32 charakteristík pri hrubovanom obrobku.

Z kompletného plánu merania boli vybrané 4 prvky, na ktorých bolo vykonané opakované meranie celkovo 6-krát. Namerané hodnoty slúžili k štatistickému vyhodnoteniu výsledkov a k posúdeniu zhody so špecifikáciou jednotlivých charakteristík. V rámci tohto vyhodnotenia bola u všetkých skúmaných charakteristík preukázaná zhoda so stanovenou špecifikáciou.

Na ukážku vplyvu voľby stratégií na výsledok merania boli pri jednotlivých charakteristikách vytvorené dvojice metód vyhodnotenia. Okrem toho bol vytvorený separátny program, v ktorom boli vytvorené rôzne kombinácie snímania, filtrácie, eliminácie odľahlých hodnôt a metód vyhodnotenia vybraných prvkov. V rámci dosiahnutých výsledkov bolo preukázané, že výsledné hodnoty jednotlivých charakteristík sú výrazne ovplyvnené procesom tvorby meracieho plánu a voľbou stratégií merania. Rozdielne prístupy k programovaniu meracích operácií môžu mať výrazný vplyv na presnosť výsledkov merania.

Problém s nejednoznačnosťou výsledkov môže nastať aj pri vyhodnocovaní parametrov testovacieho obrobku HSC strojov podľa normy VDI/NCG 5211:2013. Táto norma síce stanovuje zoznam požadovaných charakteristík jednotlivých prvkov, avšak nestanovuje spôsob akým pristupovať k ich meraniu. Nedefinovanie presného spôsobu merania a voľby stratégií môže viesť aj pri vyhodnocovaní identického obrobku k nejednotnosti výsledkov a k vzniku odlišných záverov testovania HSC strojov.

8 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] ČSN EN ISO 14638. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Maticový model*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2021. Třídící znak 014104.
- [2] MORSE, Edward; DANTAN, Jean-Yves; ANWER, Nabil; SÖDERBERG, Rikard; MORONI, Giovanni et al. Tolerancing: Managing uncertainty from conceptual design to final product. Online. CIRP Annals. 2018, roč. 67, č. 2, s. 695-717. ISSN 00078506. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.05.009>. [cit. 2023-12-15].
- [3] ČSN EN ISO 1101. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Geometrické tolerování - Tolerance tvaru, orientace, umístění a házení*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2020. Třídící znak: 014120.
- [4] ČSN EN ISO 14405-1. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Tolerování rozměrů - Část 1: Lineární rozměry*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2022. Třídící znak: 014115.
- [5] ČSN EN ISO 14405-2. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Tolerování rozměrů - Část 2: Rozměry jiné než lineární a úhlové rozměry*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2022. Třídící znak: 014115.
- [6] SVOBODA, Pavel; BRANDEJS, Jan a DVOŘÁČEK, Jiří. *Základy konstruování*. Vydání šesté. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2015. ISBN 978-80-7204-921-9.
- [7] ČSN EN ISO 2692. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Geometrické tolerování - Požadavek maxima materiálu (MMR), požadavek minima materiálu (LMR) a požadavek reciprocity (RPR)*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2022. Třídící znak: 014123.
- [8] KRITIKOS, Michaela. *Prepojenie konštrukcie a metrologie v praxi (Meranie na súradnicových meracích strojoch)*. Online. Dostupné z: https://vzdelavanie-vt.mtf.stuba.sk/?page_id=857. [cit. 2023-12-17].
- [9] MAŠČENIK, Jozef. *Technická dokumentácia - Geometrické tolerovanie*. Online. Dostupné z: <https://knmts.fvt.tuke.sk/media/documents/37a66a25e68447df4a0935f9df22aeb1.pdf>. [cit. 2023-12-18].
- [10] DRBÚL, Mário; ŠAJGALÍK, Michal; ŠEMCER, Ján; PETŘKOVSKÁ, Lenka a ČEPOVÁ, Lenka. *Strojárska metrologia a kvalita povrchov vytvorených technológiami obrábania*. Online. 2014. Dostupné z: <https://projekty.fs.vsb.cz/064/docs/metrologie.pdf>. [cit. 2023-12-19].
- [11] *Geometrické tolerance*. Online. E-konstruktor. 2014. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/geometricke-tolerance>. [cit. 2023-12-19].
- [12] *What is a CMM?* Online. VERISURF. Dostupné z: <https://www.verisurf.com/blog/article/what-is-a-cmm/>. [cit. 2024-05-10].
- [13] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0671-1.
- [14] JANKOVÝCH, Róbert. *Praktická metrologie*. Prezentácie. Brno: Vysoké učení technické v Brně: Fakulta strojního inženýrství, 2022.
- [15] ČSN EN ISO 12781-2. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Rovinnost - Část 2: Operátory specifikace*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2011. Třídící znak: 014146.
- [16] ČSN EN ISO 12180-2. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Válcovitost - Část 2: Operátory specifikace*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2011. Třídící znak: 014156.

- [17] PETRÍK, Jozef. *Metrológia v riadení kvality*. Košice: Technická univerzita, Hutnícka fakulta, Katedra integrovaného manažerstva, 2005. ISBN 8080732590.
- [18] ŠRÁMEK, Jan. *Nejistoty měření v praxi - souhrn*. Online. Brno: Český metrologický institut Brno, 2013. [cit. 2023-12-28].
- [19] ČSN EN ISO 14253-1. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Kontrola součástí a měřicího vybavení měřením - Část 1: Rozhodovací pravidla pro ověření shody nebo neshody se specifikacemi*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2023. Třídící znak: 014100.
- [20] CHUDÝ, Vladimír. *Meranie technických veličín*. Edícia vysokoškolských učebníc. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 1999. ISBN 80-227-1275-2.
- [21] ČEPOVÁ, Lenka a PETŘKOVSKÁ, Lenka. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch*. Studijní opora. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2011.
- [22] HOCKEN, Robert J. a PEREIRA, Paulo H. *Coordinate Measuring Machines and Systems*. Online. 2nd Edition. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2011. ISBN 9780429114229. Dostupné z: <https://doi.org/10.1201/b11022>. [cit. 2024-02-18].
- [23] CARL ZEISS. *ECLIPSE Specifications*. Online. Dostupné z: https://www.atechauthority.com/storage/img/pdocuments/Eclipse_specs.pdf. [cit. 2024-04-11].
- [24] CARL ZEISS SPOL. S R.O. *Protokol o posouzení shody se specifikací stroje*. 2022.
- [25] SYAM, Wahyudin. *General procedures to operate a tactile CMM*. Online. Wasy Research. 2022. Dostupné z: <https://www.wasyresearch.com/general-procedures-to-operate-a-tactile-coordinate-measuring-machine-tactile-cmm/>. [cit. 2024-04-11].
- [26] ZEISS. *ZEISS Calypso software options*. Online. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology/products/software/calypso-overview.html>. [cit. 2024-04-13].
- [27] FLACK, David. *Measurement Good Practice Guide No. 41 - CMM measurement strategies*. Online. Issue 2. National Physical Laboratory, 2014. ISSN 1368-6550. Dostupné z: https://www.npl.co.uk/special-pages/guides/gpg41_cmm.pdf?ext=. [cit. 2024-04-13].
- [28] ZEISS. *Calypso basic: Operating Instructions*. Online. 2021. [cit. 2024-04-15].
- [29] VDI/NCG 5211. *Testing guidelines and testing workpieces for high speed cutting (HSC): Milling machines and machining centres for 3-axis machining*. Düsseldorf: Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure, 2013.
- [30] LEICHTMETALL. *Data sheet EN AW-5083*. Online. Dostupné z: <https://www.leichtmetall.eu/app/uploads/leichtmetall-data-sheet-EN-AW-5083.pdf>. [cit. 2024-04-15].
- [31] ATLAS STEELS. *Aluminium Alloy Data Sheet 5083*. Online. 2013. Dostupné z: https://www.atlassteels.com.au/documents/Atlas_Aluminium_datasheet_5083_rev_Oct_2013.pdf. [cit. 2024-04-15].
- [32] DATRON AG. NC program: Accuracy Part_MR v9. Online. 2023.
- [33] CARL ZEISS INDUSTRIELLE MESSTECHNIK GMBH. *KUCHAŘKA: Strategie dotykového měření pro souřadnicovou měřicí techniku*. 8. vydání. 2017.
- [34] WECKENMANN, A.; KNAUER, M. a KUNZMANN, H. The Influence of Measurement Strategy on the Uncertainty of CMM-Measurements. Online. *CIRP Annals*. 1998, roč. 47, č. 1, s. 451-454. ISSN 00078506. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62872-8](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62872-8). [cit. 2024-05-21].

9 ZOZNAM SKRATIEK, SYMBOLOV A TABULIEK

9.1 Zoznam skratiek a symbolov

ISO	Medzinárodná organizácia pre normalizáciu (International Organization for Standardization)
GPS	Geometrické špecifikácie produktu (Geometrical product specifications)
ČSN	Česká technická norma
MMR	požiadavka maxima materiálu (maximum material requirement)
LMR	požiadavka minima materiálu (least material requirement)
RPR	požiadavka reciprocity (reciprocity requirement)
MMS	rozmer maxima materiálu
LMS	rozmer minima materiálu
MMVS	virtuálny rozmer maxima materiálu
LMVS	virtuálny rozmer minima materiálu
MMVC	virtuálna podmienka maxima materiálu
LMVC	virtuálna podmienka minima materiálu
d	priemer
L	meraný rozmer
t	tolerančné pole
X	výsledok merania
\bar{x}	aritmetický priemer
δ	chyba merania
x_i	nameraná hodnota i -tého merania
n	počet meraní
Δ	systematická chyba
X_R	referenčná hodnota
S_x	smerodajná odchýlka
R	rozptyl
x_{max}	maximálna nameraná hodnota
x_{min}	minimálna nameraná hodnota
u_A	neistota merania typu A
K	koeficient počtu meraní
u_B	neistota merania typu B
χ	koeficient rozdelenia pravdepodobnosti
Z_{jmax}	rozsah odchýlok od menovitej hodnoty
A_j	koeficient citlivosti

u_C	kombinovaná neistota merania
P	pravdepodobnosť
k	koeficient rozšírenia
U	rozšírená neistota merania
g_A	koeficient ochranného pásma
USL	horná medzná hodnota
LSL	dolná medzná hodnota
g_{LA}	ochranné pásmo pri LSL
g_{UA}	ochranné pásmo pri USL
y_L	najmenšia hodnota na overenie zhody/nezhody so špecifikáciou
y_U	najväčšia hodnota na overenie zhody/nezhody so špecifikáciou
g_{LR}	ochranné pásmo pri LSL
g_{UR}	ochranné pásmo pri USL
CMM	súradnicový merací stroj (coordinate-measuring machine)
3D	trojrozmerný
CNC	číslicové riadenie počítačom (computer numeric control)
MPE	maximálna dovolená chyba
THP	chyba snímania pri skenovaní
E_0	chyba merania dĺžky
P_{FTU}	chyba tvaru dotyku
CAD	počítačom podporované navrhovanie (computer-aided design)
PMI	informácie o výrobe produktu (product manufacturing information)
RPS	systém referenčných bodov (reference point system)
UPR	počet vln na otáčku
λ	vlnová dĺžka
HSC	vysokorýchlostné obrábanie (high speed cutting)
b	počet bodov
G	prvok najmenších štvorcov (Gaussov prvok)
C	minimax prvok (Čebyševov prvok)
N	minimálny opísaný prvok
X	maximálny vpísaný prvok
T	dotyčný prvok
MMC	podmienka maxima materiálu (maximum material condition)
RFS	bez ohľadu na rozmer (regardless feature size)
σ	smerodajná odchýlka

9.2 Zoznam tabuliek

TAB. 1)	MATICOVÝ MODEL NORIEM ISO GPS [1]	18
TAB. 2)	PREHLAD GEOMETRICKÝCH TOLERANCIÍ A CHARAKTERISTÍK [3]	24
TAB. 3)	HODNOTY KOEFICIENTU K [14].....	36
TAB. 4)	MINIMÁLNY POČET POTREBNÝCH BODOV NA SNÍMANIE GEOMETRICKÝCH ELEMENTOV [28]	49
TAB. 5)	PRÍKLADY PREDDEFINOVANÝCH STRATÉGIÍ PRE ELEMENT ROVINY A VALCA	53
TAB. 6)	PREHLAD POUŽITELNÝCH METÓD VYHODNOTENIA PODĽA TYPU ELEMENTU [28]..	54
TAB. 7)	ZOZNAM ELEMENTOV A POŽADOVANÝCH CHARAKTERISTÍK [29]	60
TAB. 8)	VYBRANÉ VLASTNOSTI MATERIÁLU EN AW 5083 [30, 31].....	62
TAB. 9)	PARAMETRE SÚRADNICOVÉHO MERACIEHO STROJA ZEISS ECLIPSE 1000 [23].....	65
TAB. 10)	PREHLAD ZVOLENEJ STRATÉGIE MERANIA	69
TAB. 11)	PREHLAD NAVRHNUTÝCH CHARAKTERISTÍK MERANIA A STRATÉGIÍ VYHODNOCOVANIA	71
TAB. 12)	VPLYV STRATÉGIE SNÍMANIA NA VÝSLEDOK ROVINNOSTI PRVKU 10.....	73
TAB. 13)	VPLYV PARAMETROV FILTRÁCIE A ELIMINÁCIE ODEAHLÝCH HODNÔT NA KRUHOVITOSŤ.....	73
TAB. 14)	VPLYV METÓD VYHODNOTENIA NA ODCHÝLKU ROZMEROVEJ CHARAKTERISTIKY.	74
TAB. 15)	VPLYV POŽIADAVIEK ZÁVISLÝCH TOLERANCIÍ NA POLOHU STREDOVÉHO OTVORU	74
TAB. 16)	NAMERANÉ HODNOTY CHARAKTERISTÍK PRVKU 1.....	75
TAB. 17)	NAMERANÉ HODNOTY CHARAKTERISTÍK PRVKU 2.....	75
TAB. 18)	NAMERANÉ HODNOTY CHARAKTERISTÍK PRVKU 3.....	76
TAB. 19)	NAMERANÉ HODNOTY CHARAKTERISTÍK PRVKU 4.....	76
TAB. 20)	NAMERANÉ HODNOTY CHARAKTERISTÍK PRVKU 5.....	77
TAB. 21)	NAMERANÉ HODNOTY CHARAKTERISTÍK PRVKU 6.....	77
TAB. 22)	NAMERANÉ HODNOTY CHARAKTERISTÍK PRVKU 7 A 8.....	78
TAB. 23)	NAMERANÉ HODNOTY CHARAKTERISTÍK PRVKU 9 A 10	78

9.3 Zoznam obrázkov

OBR. 1) TRIEDY PRESNOSTI VŠEOBECNÝCH TOLERANCIÍ DĹŽKOVÝCH A UHLOVÝCH ROZMEROV [6].....	19
OBR. 2) ŠPECIFIKÁCIA A INTERPRETÁCIA POŽIADAVKY OBALOVEJ PLOCHY PRE: A) VONKAJŠÍ PRVOK, B) VNÚTORNÝ PRVOK (UPRAVENÉ PODĽA [4]).....	20
OBR. 3) PRÍKLAD POUŽITIA INDIKÁCIE POŽIADAVKY MMR NA VÝKRESE A JEJ INTERPRETÁCIA: A) VONKAJŠÍ VALCOVÝ PRVOK, B) VNÚTORNÝ VALCOVÝ PRVOK (UPRAVENÉ PODĽA [7]).....	20
OBR. 4) PRÍKLAD POUŽITIA INDIKÁCIE POŽIADAVKY LMR NA VÝKRESE A JEJ INTERPRETÁCIA [7].....	21
OBR. 5) PRÍKLAD POUŽITIA INDIKÁCIE POŽIADAVKY RPR NA VÝKRESE A JEJ INTERPRETÁCIA [7].....	21
OBR. 6) PRÍKLAD LINEÁRNEHO ROZMEROVÉHO PRVKU ZOSTAVENÉHO Z VALCA: A) MENOVIITÉ ROZMEROVÉ PRVKY, B) EXTRAHOVANÝ PRVOK [4].....	22
OBR. 7) MIESTNE ROZMERY: A) EXTRAHOVANÝ PRVOK, B) DVOJBODOVÉ ROZMERY, C) SFÉRICKE ROZMERY, D) ROZMER PRIEREZU, E) ČIASTKOVÝ ROZMER [4].....	22
OBR. 8) ZNÁZORNENIE PRIAMEHO GLOBÁLNEHO LINEÁRNEHO ROZMERU: A) ROZMER MAXIMÁLNY VPÍSANÝ, B) ROZMER MINIMÁLNY OPÍSANÝ, C) TLS ROZMER, D) MINIMAX ROZMER [4].....	23
OBR. 9) ROZMER V ZÁVISLOSTI NA MODIFIKÁTOROCH A ICH ZÁPIS [14].....	23
OBR. 10) DÔLEŽITOSŤ PORADIA ZÁKLADNÍ V SÚSTAVE ZÁKLADNÍ [6].....	25
OBR. 11) GEOMETRICKÉ TOLEROVANIE PRIAMOSTI (UPRAVENÉ PODĽA [3, 10, 11]).....	26
OBR. 12) GEOMETRICKÉ TOLEROVANIE ROVINNOSTI (UPRAVENÉ PODĽA [3, 10]).....	26
OBR. 13) GRAFICKÉ ZNÁZORNENIE STRATÉGIÍ EXTRAHOVANIA PRI MERANÍ ROVINNOSTI [15].....	27
OBR. 14) GEOMETRICKÉ TOLEROVANIE KRHOVITOSTI (UPRAVENÉ PODĽA [3, 11]).....	27
OBR. 15) METÓDY VYHODNOTENIA KRHOVITOSTI [10].....	28
OBR. 16) GEOMETRICKÉ TOLEROVANIE VALCOVITOSTI (UPRAVENÉ PODĽA [3, 11]).....	28
OBR. 17) GRAFICKÉ ZNÁZORNENIE STRATÉGIÍ EXTRAHOVANIA PRI MERANÍ VALCOVITOSTI [16].....	29
OBR. 18) GEOMETRICKÉ TOLEROVANIE ROVNOBEŽNOSTI [10].....	29
OBR. 19) GEOMETRICKÉ TOLEROVANIE KOLMOSTI [10].....	30
OBR. 20) GEOMETRICKÉ TOLEROVANIE SKLONU [10].....	30
OBR. 21) GEOMETRICKÉ TOLEROVANIE UMIESTNENIA [10].....	30
OBR. 22) GEOMETRICKÉ TOLEROVANIE SÚOSOVIŠTI [10].....	31
OBR. 23) GEOMETRICKÉ TOLEROVANIE SÚMERNOSTI [10].....	31
OBR. 24) GEOMETRICKÉ TOLEROVANIE KRHOVÉHO HÁDZANIA: A) OBVODOVÉHO, B) ČELNÉHO [10].....	32
OBR. 25) GEOMETRICKÉ TOLEROVANIE CELKOVÉHO HÁDZANIA: A) OBVODOVÉHO, B) ČELNÉHO [10].....	32
OBR. 26) GEOMETRICKÉ TOLEROVANIE PROFILU ČIARY [10].....	33
OBR. 27) GEOMETRICKÉ TOLEROVANIE PROFILU POVRCHU [10].....	33
OBR. 28) GRAFICKÉ ZNÁZORNENIE SPRÁVNOSTI MERANIA [14].....	35
OBR. 29) GRAFICKÉ ZNÁZORNENIE PRECÍZNOSTI MERANIA [14].....	35
OBR. 30) PRECHOD Z FÁZE ŠPECIFIKÁCIE DO FÁZY OVEROVANIA ZHODY [19].....	38
OBR. 31) ZÁVISLOSŤ HODNOTY FAKTORU OCHRANNÉHO PÁSMU NA POMERE ($USL-LSL$)/ u_C (UPRAVENÉ PODĽA [19, 18]).....	39
OBR. 32) OVEROVANIE: A) ZHODY SO ŠPECIFIKÁCIU, B) NEZHODY SO ŠPECIFIKÁCIU [19].	39

OBR. 33)	ZÁKLADNÉ USPORIADANIA CMM [12]	40
OBR. 34)	ČASTI SÚRADNICOVÉHO MERACIEHO STROJA (UPRAVENÉ PODĽA [10]).....	41
OBR. 35)	FOTOELEKTRICKÉ SNÍMANIE POLOHY (UPRAVENÉ PODĽA [22])	42
OBR. 36)	SNÍMANIE BODOV: A) PEVNOU HLAVICOU, C) INDEXOVATEĽNOU HLAVICOU [10] ...	43
OBR. 37)	KONTAKTNÝ SYSTÉM: A) SPÍNACÍ, B) SNÍMACÍ (UPRAVENÉ PODĽA [10]).....	43
OBR. 38)	ROZMERY DOTYKU (UPRAVENÉ PODĽA [21])	44
OBR. 39)	TYPY DOTYKOV [21]	45
OBR. 40)	MATERIÁLY MERACÍCH GULIČIEK [21]	46
OBR. 41)	SCHÉMA PRINCÍPU MERANIA NA CMM (UPRAVENÉ PODĽA [25])	47
OBR. 42)	ZNÁZORNENIE SIMULÁCIE V OFFLINE PROGRAME [26]	49
OBR. 43)	SCHÉMA VYROVNANIA SÚČASTI METÓDOU 3-2-1 [27]	51
OBR. 44)	GAUSSOV FILTER S DĹŽKOU: A) 0,8 MM, B) 2,5 MM [3]	55
OBR. 45)	TYPY FILTROV PODĽA PRIEPUSTNOSTI (UPRAVENÉ PODĽA [28]).....	56
OBR. 46)	ELIMINÁCIA ODEAHLÝCH HODNÔT (UPRAVENÉ PODĽA [28]).....	56
OBR. 47)	TESTOVACÍ OBROBOK SPOLOČNOSTI DATRON.....	59
OBR. 48)	TESTOVACÍ OBROBOK HSC STROJOV PODĽA NORMY VDI/NGC 5211:2013 [29].....	60
OBR. 49)	MODEL OBROBKU S VYZNAČENÝMI PRVKAMI	61
OBR. 50)	DRÁHY NÁSTROJA PRI DOKONČOVACÍCH OPERÁCIÁCH [32]	62
OBR. 51)	POSTUP TVORBY PROGRAMU A MERANIA NA CMM.....	63
OBR. 52)	FAKTORY OVPLYVŇUJÚCE MERANIE NA CMM.....	63
OBR. 53)	ZÁKLADNÝ SYSTÉM A BEZPEČNOSTNÝ KVÁDER OBROBKU	67
OBR. 54)	DRÁHY SKENOVANIA JEDNOTLIVÝCH ELEMENTOV	68
OBR. 55)	DRÁHA A VEKTORY SNÍMANÝCH BODOV 2D KRIVKY	70
OBR. 56)	VARIANTY SNÍMANIA ROVINY PRVKU 10 NA ANALÝZU VPLYVU STRATÉGIE SNÍMANIA.....	72
OBR. 57)	ZOBRAZENIE NAMERANÝCH BODOV NA CAD MODELI	79
OBR. 58)	POSÚDENIE ZHODY SO ŠPECIFIKÁCIOU PRVKU 1 – PRIEMER A KRUHOVITOSŤ	80
OBR. 59)	POSÚDENIE ZHODY SO ŠPECIFIKÁCIOU PRVKU 4 – PRIAMOSŤ, KOLMOSTŤ A ROVNOBEŽNOSŤ	81
OBR. 60)	POSÚDENIE ZHODY SO ŠPECIFIKÁCIOU PRVKU 4 – VZDIALENOSŤ	82
OBR. 61)	POSÚDENIE ZHODY SO ŠPECIFIKÁCIOU PRVKU 5 – VALCOVITOSŤ	83
OBR. 62)	POSÚDENIE ZHODY SO ŠPECIFIKÁCIOU PRVKU 10 – ROVINNOSŤ	83
OBR. 63)	POSÚDENIE ZHODY SO ŠPECIFIKÁCIOU PRVKU 10 – VZDIALENOSŤ	84
OBR. 64)	GRAFY VPLYVU ROZLIČNÝCH STRATÉGIÍ NA VÝSLEDOK MERANIA	85
OBR. 65)	KRABICOVÉ DIAGRAMY VYBRANÝCH SKUPÍN CHARAKTERISTÍK VŠETKÝCH PRVKOV.....	86
OBR. 66)	GRAFICKÉ ZOBRAZENIE ODCHÝLOK CHARAKTERISTÍK TVAROVÝCH PRVKOV	87

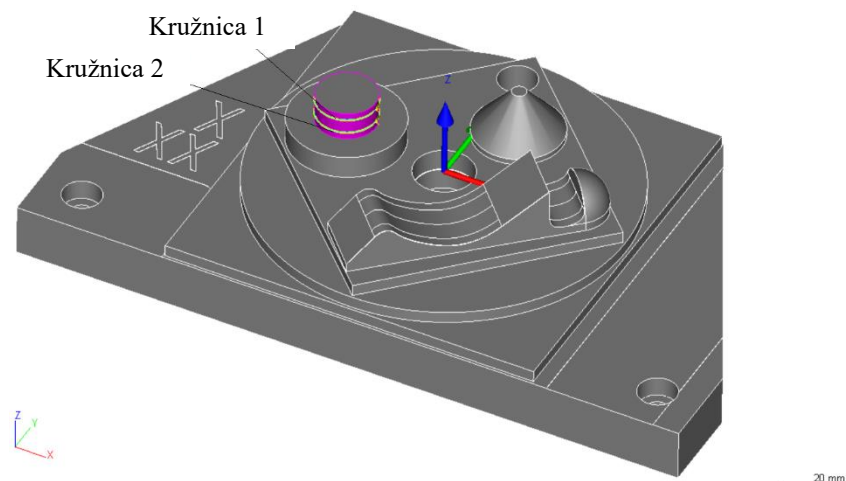
10 ZOZNAM PRÍLOH

Príloha A	Tabuľky nameraných hodnôt a ich vyhodnotenie podľa ČSN EN ISO 14253-1:2023
Príloha B	Postup frézovania testovacieho obrobku po upnutí
Príloha C	Grafy nameraných hodnôt jednotlivých prvkov
Príloha D	Výkres testovacieho obrobku
Príloha E	3D model testovacieho obrobku
Príloha F	Program merania dokončeného testovacieho obrobku
Príloha G	Program merania hrubovaného testovacieho obrobku
Príloha H	Program merania vybraných prvkov
Príloha I	Program merania na analýzu vplyvu stratégie
Príloha J	Excel súbor s vyhodnotením nameraných hodnôt
Príloha K	Protokol merania obrobku 1
Príloha L	Protokol merania obrobku 2
Príloha M	Protokol merania obrobku 3
Príloha N	Protokol merania na analýzu vplyvu stratégie
Príloha O	Protokoly opakovaných meraní vybraných prvkov

PRÍLOHA A

Tab. A1 Vyhodnotenie nameraných hodnôt priemeru a kruhovitosti prvku 1

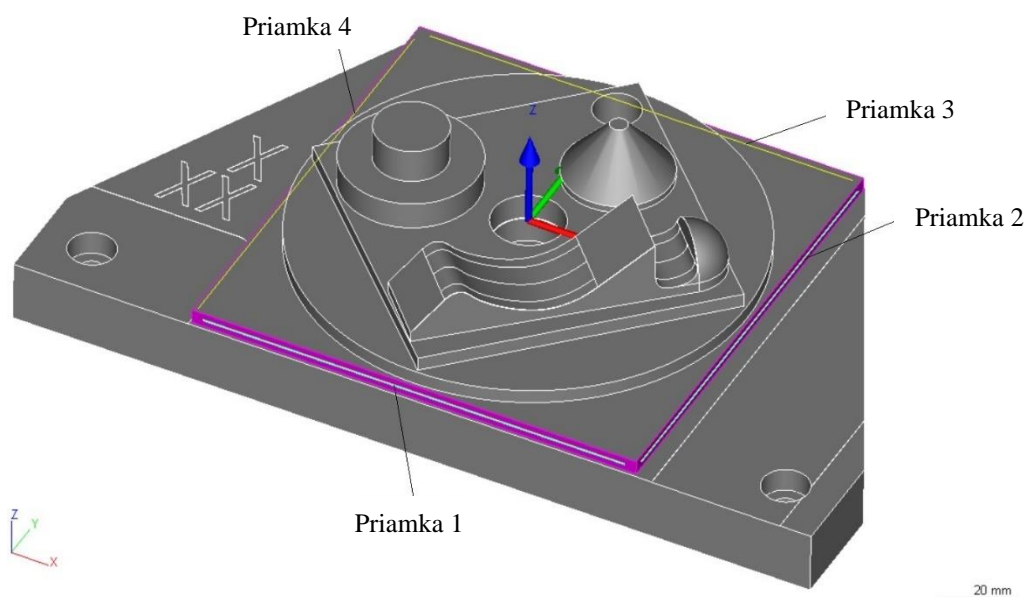
	1 – Priemer [mm]				2 – Kruhovitost' [μm]			
	Kružnica 1		Kružnica 2		Kružnica 1		Kružnica 2	
	GG	GN	GG	GN	C	N	C	N
Meranie 1	19,9815	19,9865	19,9824	19,9894	6,4	7,0	8,3	9,1
Meranie 2	19,9816	19,9863	19,9820	19,9863	6,0	7,0	5,4	5,5
Meranie 3	19,9816	19,9864	19,9821	19,9864	6,4	6,8	5,4	5,6
Meranie 4	19,9817	19,9865	19,9822	19,9864	6,4	6,7	5,4	5,5
Meranie 5	19,9816	19,9865	19,9822	19,9862	6,5	7,0	5,2	5,3
Meranie 6	19,9816	19,9864	19,9822	19,9865	6,4	6,8	5,3	5,5
\bar{x}	19,9816	19,9864	19,9822	19,9869	6,350	6,883	5,833	6,083
$s(\bar{x})$	0,0001	0,0001	0,0001	0,0012	0,176	0,133	1,211	1,481
u_A	0,0000	0,0000	0,0001	0,0007	0,093	0,071	0,643	0,786
u_B	0,0050	0,0050	0,0050	0,0050	0,945	0,945	0,945	0,945
u_C	0,0050	0,0050	0,0050	0,0051	0,950	0,948	1,143	1,229
$U (k = 2)$	0,0100	0,0100	0,0100	0,0101	1,900	1,896	2,286	2,459
Výsledok	19,9816±0,0100	19,9864±0,0100	19,9822±0,0100	19,9869±0,0101	6,35±1,90	6,88±1,90	5,83±2,29	6,08±2,46
USL	20,050	20,050	20,050	20,050	10,000	10,000	10,000	10,000
LSL	19,950	19,950	19,950	19,950	0,000	0,000	0,000	0,000
USL-LSL/ u_C	19,966	19,966	19,966	16,865	10,529	10,551	8,749	8,135
g_A	1,650	1,650	1,650	1,650	1,650	1,650	1,650	1,650
$g_A * u_C$	0,0082	0,0082	0,0083	0,0083	1,567	1,564	1,886	2,028
Záver	19,9816 ∈ (19,9583; 20,0417) vyhovuje	19,9864 ∈ (19,9583; 20,0417) vyhovuje	19,9822 ∈ (19,9583; 20,0417) vyhovuje	19,9869 ∈ (19,9583; 20,0417) vyhovuje	6,35<8,43 vyhovuje	6,88<8,44 vyhovuje	5,83<8,11 vyhovuje	6,08<7,97 vyhovuje



Obr. A1 Vyhodnocované kružnice na prvku 1

Tab. A2 Vyhodnotenie nameraných hodnôt priamosti prvku 4

	14 - Priamosť [μm]							
	Priamka 1		Priamka 2		Priamka 3		Priamka 4	
	G	C	G	C	G	C	G	C
Meranie 1	1,4	1,4	1,7	1,7	3,3	3,2	2,3	2,2
Meranie 2	1,4	1,3	1,8	1,7	3,2	3,1	2,4	2,2
Meranie 3	1,2	1,1	1,9	1,8	3,1	3,1	2,3	2,1
Meranie 4	1,1	1,0	1,7	1,7	2,9	2,9	2,3	2,1
Meranie 5	1,0	1,0	1,7	1,7	3,1	3,0	2,3	2,2
Meranie 6	1,1	1,1	1,8	1,7	3,1	2,9	2,3	2,2
\bar{x}	1,200	1,150	1,767	1,717	3,117	3,033	2,317	2,167
$s(\bar{x})$	0,167	0,164	0,082	0,041	0,133	0,121	0,041	0,052
u_A	0,089	0,087	0,043	0,022	0,071	0,064	0,022	0,027
u_B	1,234	1,234	1,234	1,234	1,234	1,234	1,234	1,234
u_C	1,237	1,237	1,235	1,234	1,236	1,236	1,234	1,235
$U (k = 2)$	2,475	2,475	2,470	2,469	2,472	2,472	2,469	2,469
Výsledok	1,20±2,48	1,15±2,48	1,77±2,47	1,72±2,47	3,18±2,47	3,03±2,47	2,32±2,47	2,17±2,47
USL	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000
LSL	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
USL-LSL/ u_C	8,081	8,082	8,097	8,101	8,089	8,091	8,101	8,100
g_A	1,650	1,650	1,650	1,650	1,650	1,650	1,650	1,650
$g_A * u_C$	2,042	2,042	2,038	2,037	2,040	2,039	2,037	2,037
Záver	1,20<7,96 vyhovuje	1,15<7,96 vyhovuje	1,77<7,96 vyhovuje	1,72<7,96 vyhovuje	3,18<7,96 vyhovuje	3,03<7,96 vyhovuje	2,32<7,96 vyhovuje	2,17<7,96 vyhovuje



Obr. A2 Vyhodnocované priamky na prvku 4

Tab. A3 Vyhodnotenie nameraných hodnôt kolmosti a rovnobežnosti prvku 4

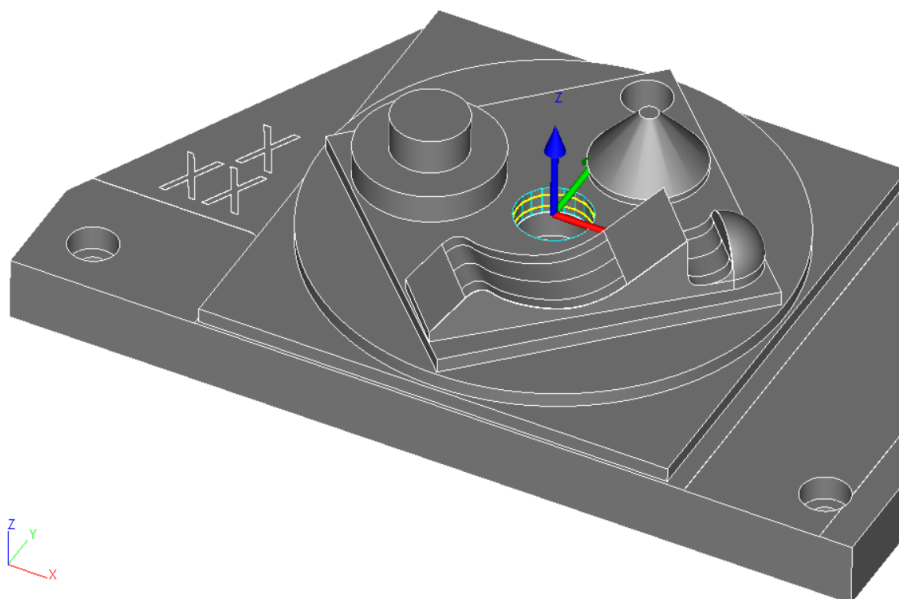
	15, 16 - Kolmost' [μm]		17, 18 - Rovnobežnosť [μm]	
	Priamky 1 a 4	Priamky 2 a 3	Priamky 1 a 3	Priamky 2 a 4
	G	G	G	G
Meranie 1	5,4	5,4	4,7	4,2
Meranie 2	5,1	6,1	5,3	4,2
Meranie 3	4,8	5,5	4,3	4,1
Meranie 4	4,5	4,1	3,6	4,1
Meranie 5	4,9	5,0	4,2	4,1
Meranie 6	4,5	4,0	3,2	4,1
\bar{x}	4,867	5,017	4,217	4,133
$s(\bar{x})$	0,350	0,828	0,752	0,052
u_A	0,186	0,439	0,399	0,027
u_B	1,234	1,234	1,234	1,234
u_C	1,248	1,310	1,297	1,235
$U (k = 2)$	2,496	2,620	2,594	2,469
Výsledok	4,87±2,50	5,02±2,62	4,22±2,59	4,13±2,47
USL	10,000	10,000	10,000	10,000
LSL	0,000	0,000	0,000	0,000
USL-LSL/ u_C	8,012	7,633	7,709	8,100
g_A	1,650	1,650	1,650	1,650
$g_A * u_C$	2,059	2,162	2,140	2,037
Záver	4,87<7,94 vyhovuje	5,02<7,84 vyhovuje	4,22<7,86 vyhovuje	4,13<7,96 vyhovuje

Tab. A4 Vyhodnotenie nameraných hodnôt vzdialenosti protiľahlých strán prvku 4

	19 -Vzdialenosť protiľahlých strán [mm]			
	Priamky 1 a 3		Priamky 2 a 4	
	GG	GC	GG	GC
Meranie 1	127,9621	127,9621	127,9586	127,9588
Meranie 2	127,9622	127,9622	127,9590	127,9592
Meranie 3	127,9623	127,9622	127,9593	127,9595
Meranie 4	127,9624	127,9622	127,9595	127,9596
Meranie 5	127,9625	127,9622	127,9596	127,9597
Meranie 6	127,9624	127,9623	127,9596	127,9597
\bar{x}	127,9623	127,9622	127,9593	127,9594
$s(\bar{x})$	0,0001	0,0001	0,0004	0,0004
u_A	0,0001	0,0000	0,0002	0,0002
u_B	0,0055	0,0055	0,0055	0,0055
u_C	0,0055	0,0055	0,0056	0,0056
$U (k = 2)$	0,0111	0,0111	0,0111	0,0111
Výsledok	127,9623±0,0111	127,9622±0,0111	127,9593±0,0111	127,9594±0,0111
USL	128,050	128,050	128,050	128,050
LSL	127,950	127,950	127,950	127,950
USL-LSL/ u_C	18,0243	18,0258	18,0130	18,0157
g_A	1,650	1,650	1,650	1,650
$g_A * u_C$	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092
Záver	127,9623 € (127,9592; 128,0408) vyhovuje	127,9622 € (127,9592; 128,0408) vyhovuje	127,9593 € (127,9592; 128,0408) vyhovuje	127,9594 € (127,9592; 128,0408) vyhovuje

Tab. A5 Vyhodnotenie nameraných hodnôt valcovitosti prvku 5

	21 - Valcovitosť [μm]	
	C	X
Meranie 1	7,4	7,5
Meranie 2	7,6	7,7
Meranie 3	7,6	7,8
Meranie 4	7,3	7,4
Meranie 5	7,6	7,7
Meranie 6	7,8	7,9
\bar{x}	7,550	7,667
$s(\bar{x})$	0,176	0,186
u_A	0,093	0,099
u_B	0,945	0,945
u_C	0,950	0,950
$U (k = 2)$	1,900	1,901
Výsledok	7,55±1,90	7,68±1,90
USL	10,000	10,000
LSL	0,000	0,000
USL-LSL/ u_C	10,529	10,523
g_A	1,650	1,650
$g_A * u_C$	1,567	1,568
Záver	7,55<8,43 vyhovuje	7,68<8,43 vyhovuje

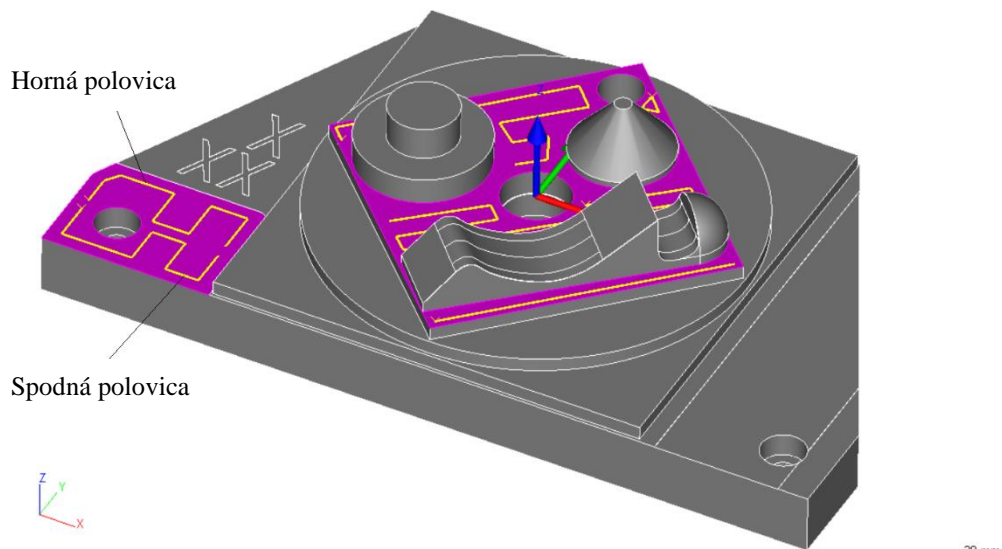


Obr. A3 Horný valec stredového otvoru s priemerom 20 mm

20 mm

Tab. A6 Vyhodnotenie nameraných hodnôt rovinnosti a vzdialenosti prvku 10 od hornej roviny

	33 Z vzdialenosť od hornej roviny [mm]				32 Rovinnosť [μm]			
	Horná polovica		Spodná polovica		Horná polovica		Spodná polovica	
	GG	GC	GG	GC	G	C	G	C
Meranie 1	12,0717	12,0715	12,0811	12,0817	1,8	1,6	2,0	1,8
Meranie 2	12,0714	12,0712	12,0808	12,0808	1,5	1,4	1,8	1,7
Meranie 3	12,0712	12,0714	12,0807	12,0812	1,2	1,2	1,9	1,7
Meranie 4	12,0725	12,0730	12,0821	12,0822	1,3	1,2	1,7	1,6
Meranie 5	12,0726	12,0723	12,0821	12,0823	1,7	1,5	1,8	1,7
Meranie 6	12,0726	12,0725	12,0821	12,0824	1,4	1,3	1,8	1,7
\bar{x}	12,0720	12,0720	12,0815	12,0818	1,483	1,367	1,833	1,700
$s(\bar{x})$	0,0006	0,0007	0,0007	0,0007	0,232	0,163	0,103	0,063
u_A	0,0003	0,0004	0,0004	0,0003	0,123	0,087	0,055	0,034
u_B	0,0050	0,0050	0,0050	0,0050	1,234	1,234	1,234	1,234
u_C	0,0050	0,0050	0,0050	0,0050	1,240	1,237	1,235	1,235
$U (k = 2)$	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100	2,481	2,475	2,471	2,469
Výsledok	12,0720 ±0,010	12,0720 ±0,010	12,0815 ±0,010	12,0818 ±0,010	1,48±2,48	1,37±2,48	1,83±2,47	1,70±2,47
USL	12,150	12,150	12,150	12,150	10,000	10,000	10,000	10,000
LSL	12,050	12,050	12,050	12,050	0,000	0,000	0,000	0,000
USL-LSL/ u_C	20,0781	20,0660	20,0711	20,0764	8,062	8,082	8,094	8,099
g_A	1,65	1,65	1,65	1,65	1,650	1,650	1,650	1,650
$g_A * u_C$	0,0082	0,0082	0,0082	0,0082	2,047	2,042	2,038	2,037
Záver	12,0720 ∈ (12,0582; 12,1418) vyhovuje	12,0720 ∈ (12,0582; 12,1418) vyhovuje	12,0815 ∈ (12,0582; 12,1418) vyhovuje	12,0818 ∈ (12,0582; 12,1418) vyhovuje	1,48 < 7,95 vyhovuje	1,37 < 7,96 vyhovuje	1,83 < 7,96 vyhovuje	1,70 < 7,96 vyhovuje



Obr. A4 Prvok 10 zložený z dvoch rovín – hornej a spodnej polovice

PRÍLOHA B

Tab. B1 Prehľad použitých nástrojov (vytvorené podľa [32])

Ozn.	Typ frézy	Priemer	Zaoblenie hrany	Dĺžka britu	Celková dĺžka	Počet britov	ID výrobcu (DATRON)
T1	Valcová fréza	10 mm	0 mm	25 mm	70 mm	2	0068042
T2	Torusová fréza	8 mm	1 mm	9 mm	60 mm	2	0068080
T3	Valcová fréza	6 mm	0 mm	21 mm	55 mm	1	0068086X
T4	Zahľubovacia fréza	6 mm	0 mm	3 mm	50 mm	3	0068479
T5	Guľová fréza	6 mm	3 mm	10 mm	50 mm	2	0068406
T6	Guľová fréza	2 mm	1 mm	4 mm	40 mm	2	0068402
T7	Valcová fréza	7,975 mm	0 mm	11 mm	60 mm	2	FE0016
T8	Valcová fréza	7,98 mm	0 mm	1,5 mm	60 mm	2	FE0017

Tab. B2 Postup frézovania testovacieho obrobku po upnutí (vytvorené podľa [32])

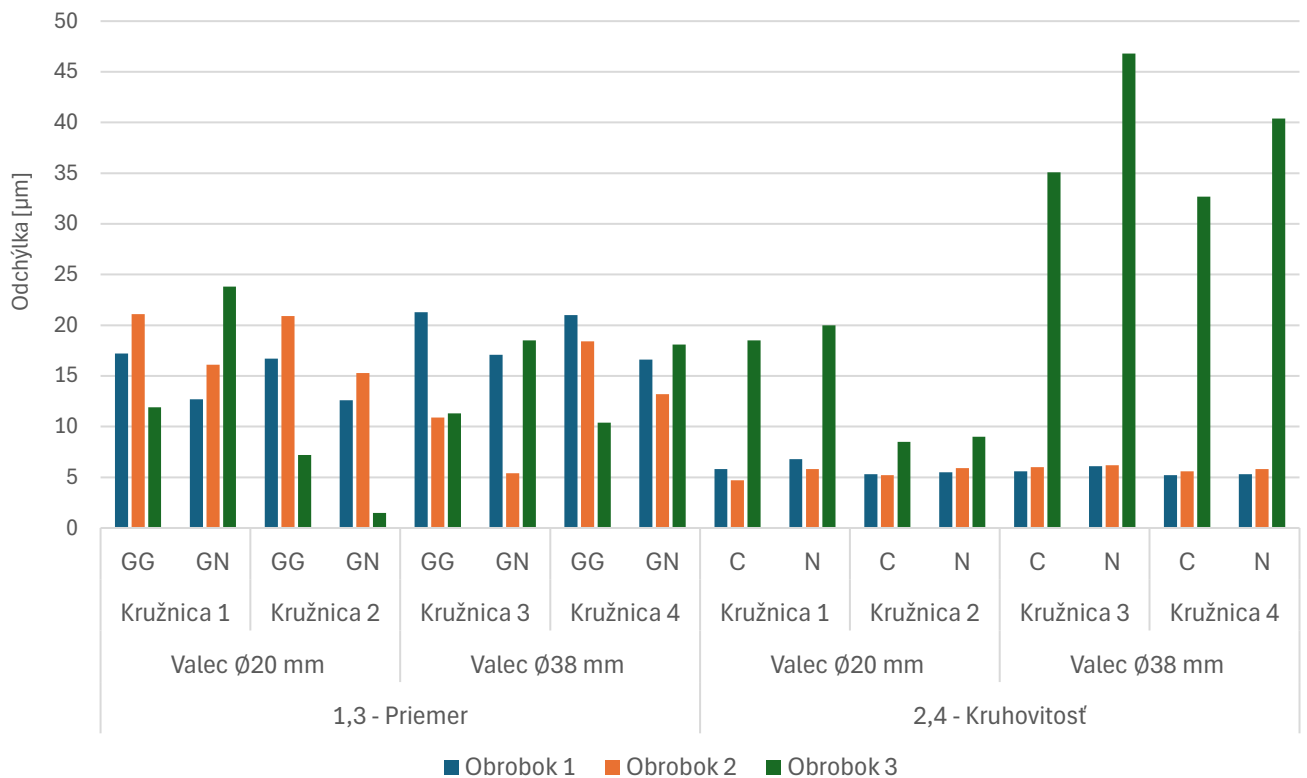
Hrubovanie				
Krok	Nástroj	Popis	Parametre	Rezné podmienky
1	T1	Obrobenie spodnej strany obrobku Funkcia: Adaptívne obrábanie	Tolerancia – 0,1 mm Optim. záber – 5 mm	n = 36000 otáčok/min v _f = 5600 mm/min v _c = 1130 m/min
2		Obrobenie šikmých plôch na bočných stranách obrobku Funkcia: Adaptívne obrábanie	Tolerancia – 0,1 mm Optim. záber – 0,6 mm Rad. prídavok – 3 mm	
3		Obrobenie obvodu obrobku na cieľový rozmer + skosenie hrán Funkcia: 2D Kontúra	Tolerancia – 0,001 mm Max. krok – 2 mm Dokončovací krok – 0,2 mm	
4	T3	Vyvrtanie vnútorných častí kruhov na položenie obrobku Funkcia: Vyvrtanie	Tolerancia – 0,01 mm Rozteč – 0,5 mm	n = 34000 otáčok/min v _f = 1500 mm/min v _c = 640 m/min
5		Vyvrtanie otvorov na upnutie zo spodnej strany obrobku Funkcia: Vyvrtanie	Tolerancia – 0,01 mm Rozteč – 0,4 mm	
6	T4	Skosenie hrán na spodnej strane obrobku Funkcia: 2D Skosenie	Tolerancia – 0,01 mm Šírka skosenia – 0,1 mm Odsadenie špičky – 0,5 mm	n = 34000 otáčok/min v _f = 2500 mm/min v _c = 640 m/min
7	T1	Hrubovanie vrchnej časti obrobku po výšku -4 mm v osi Z Funkcia: Adaptívne obrábanie	Tolerancia – 0,05 mm Optim. záber – 0,6 mm Rad. prídavok – 0,3 mm Ax. prídavok – 0,3 mm	n = 36000 otáčok/min v _f = 5000 mm/min v _c = 1130 m/min

8	T1	Hrubovanie vrchnej časti obrobku po výšku -12 mm v osi Z Funkcia: Adaptívne obrábanie	Tolerancia – 0,05 mm Optim. záber – 0,6 mm Rad. prídavok – 0,3 mm Ax. prídavok – 0,3 mm	n = 35000 otáčok/min v _f = 5000 mm/min v _c = 1099 m/min
9		Vyvrtanie otvorov na upnutie z vrchnej strany obrobku Funkcia: Vyvrtanie	Tolerancia – 0,03 mm Rozteč – 0,4 mm	n = 36000 otáčok/min v _f = 5600 mm/min v _c = 1130 m/min
10		Vyvrtanie hornej polovice stredového otvoru na upnutie z vrchnej strany obrobku Funkcia: Vyvrtanie	Tolerancia – 0,03 mm Rozteč – 0,8 mm	
11		Vyvrtanie spodnej polovice stredového otvoru na upnutie z vrchnej strany obrobku Funkcia: Vyvrtanie	Rad. prídavok – 0,2 mm	
12		Hrubovanie horných plôch elementov 2, 3, 4, 9 a 10 Funkcia: Vodorovné obrábanie	Tolerancia – 0,001 mm Odchýlka vyhladenia – 0,7 mm	
13		Hrubovanie elementu 1 (valcové stupne) Funkcia: Vodorovné obrábanie	Rad. prídavok – 0,2 mm	
14		Obrobenie bočných strán elementu 8 (tvarový povrch) a základnej plochy elementu 6 (kužeľ) Funkcia: 2D Kontúra	Tolerancia – 0,001 mm Dokončovací posuv – 1000 mm/min	
15		Hrubovanie elementov 2 (kváder 45°), 3 (valec) a 4 (kváder 90°), Funkcia: 2D Kontúra	Tolerancia – 0,001 mm Dokončovací posuv – 1000 mm/min Rad. prídavok – 0,2 mm	
16	T2	Hrubovanie elementu 6 (kužeľ) špirálovou dráhou Funkcia: Špirálové obrábanie	Tolerancia – 0,05 mm Stranový krok – 0,2 mm Výška schodu – 0,01 mm Rad. prídavok – 0,2 mm Ax. prídavok – 0,2 mm	
17		Hrubovanie elementu 8 (sférický segment) radiálnou dráhou Funkcia: Radiálne (lúčové) obrábanie	Tolerancia – 0,05 mm Uhlový krok – 2° Rad. prídavok – 0,2 mm Ax. prídavok – 0,2 mm	
18	T5	Hrubovanie pravej časti elementu 7 (tvarová plocha) do tvaru „U“ Funkcia: Adaptívne obrábanie	Tolerancia – 0,05 mm Optim. záber – 1,2 mm Rad. prídavok – 0,2 mm Ax. prídavok – 0,2 mm	n = 34000 otáčok/min v _f = 6000 mm/min v _c = 640 m/min

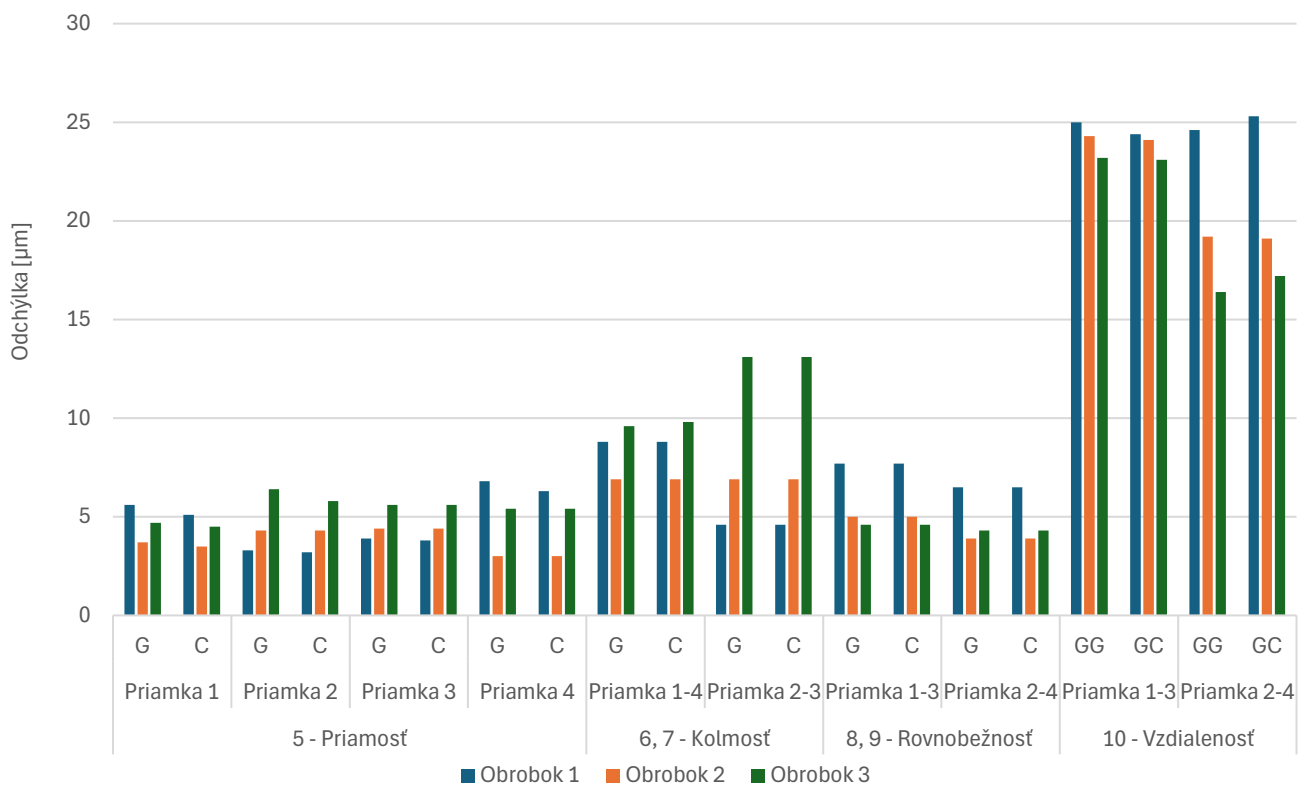
19	T5	Hrubovanie elementu 7 (tvarová plocha) Funkcia: Rovnobežné obrábanie	Tolerancia – 0,05 mm Smer záberu – 43° Stranový krok – 0,1 mm Výška schodu – 0,001 mm Rad. prídavok – 0,2 mm Ax. prídavok – 0,2 mm	n = 34000 otáčok/min v _f = 6000 mm/min v _c = 640 m/min
20	T6	Skosenie bočných hrán elementu 7 (tvarový povrch) Funkcia: Rovnobežné obrábanie	Tolerancia – 0,001 mm Stranový krok – 0,05 mm Výška schodu – 0,001 mm	n = 34000 otáčok/min v _f = 3000 mm/min v _c = 213 m/min
21	T4	Skosenie bočných hrán elementu 1, 2, 3, 4, 5 a otvorov na upínanie Funkcia: 2D Skosenie	Tolerancia – 0,001 mm Šírka skosenia – 0,3 mm Odsadenie špičky – 2,5 mm	n = 34000 otáčok/min v _f = 2500 mm/min v _c = 640 m/min
Dokončenie				
22	T7	Dokončenie ľavej polovice elementu 9 (plocha vpravo) pomocou 3 prejazdov Funkcia: 2D Kontúra	Tolerancia – 0,01 mm	n = 34000 otáčok/min v _f = 500 mm/min v _c = 851 m/min
23		Dokončenie hornej polovice elementu 10 (plocha vľavo) pomocou 3 prejazdov Funkcia: 2D Kontúra		
24		Dokončenie elementu 4 (kváder 90°) Funkcia: 2D Kontúra	Tolerancia – 0,001 mm Počet záberov – 2 Stranový krok – 0,025 mm	
25		Dokončenie elementu 3 (valec) Funkcia: 2D Kontúra	Tolerancia – 0,0005 mm Počet záberov – 2 Stranový krok – 0,025 mm	
26		Dokončenie elementu 2 (kváder 45°) Funkcia: 2D Kontúra	Tolerancia – 0,001 mm Počet záberov – 2 Stranový krok – 0,025 mm	
27		Dokončenie valca D38 elementu 1 (valcové stupne) Funkcia: 2D Kontúra	Tolerancia – 0,0005 mm Počet záberov – 2 Stranový krok – 0,025 mm	
28		Dokončenie valca D19,5 elementu 5 (stredový otvor) Funkcia: 2D Kontúra	Tolerancia – 0,0005 mm Počet záberov – 2 Stranový krok – 0,025 mm	
29		T8	Dokončenie valca D20 elementu 1 (valcové stupne) Funkcia: Vyvrtanie	

30	T8	Dokončenie valca D20 elementu 5 (stredový otvor) Funkcia: Vyvrtanie	Tolerancia – 0,0005 mm Rozteč – 1 mm Počet stranových krokov – 2 Stranový krok – 0,0125 mm	
31	T2	Dokončenie elementu 6 (kužel) Funkcia: Špirálové obrábanie	Tolerancia – 0,001 mm Stranový krok – 0,1 mm Výška schodu – 0,003 mm	n = 34000 otáčok/min v _f = 3000 mm/min v _c = 854 m/min
32		Dokončenie elementu 8 (sférický segment) Funkcia: Radiálne (lúčové) obrábanie	Tolerancia – 0,001 mm Uhlový krok – 0,2°	
33	T5	Vygravírovanie označenia obrobku Funkcia: 2D Kontúra	Tolerancia – 0,01 mm	n = 34000 otáčok/min v _f = 1500 mm/min v _c = 640 m/min
34		Dokončenie elementu 7 (tvarová plocha) Funkcia: Rovnobežné obrábanie	Tolerancia – 0,001 mm Smer záberu – 43° Stranový krok – 0,05 mm	n = 34000 otáčok/min v _f = 3000 mm/min v _c = 640 m/min
35	T7	Dokončenie pravej polovice elementu 9 (plocha vpravo) pomocou 3 prejazdov Funkcia: 2D Kontúra	Tolerancia – 0,01 mm	n = 34000 otáčok/min v _f = 500 mm/min v _c = 851 m/min
36		Dokončenie spodnej polovice elementu 10 (plocha vľavo) pomocou 3 prejazdov Funkcia: 2D Kontúra		

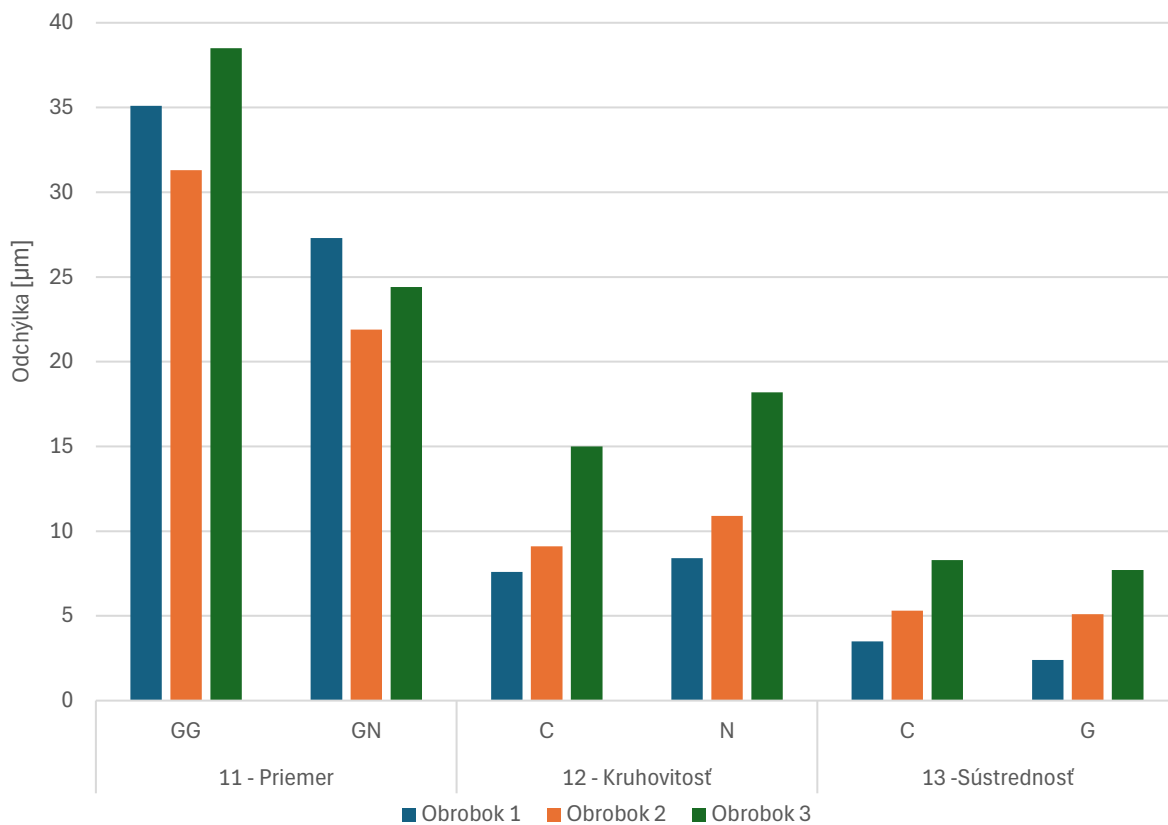
PRÍLOHA C



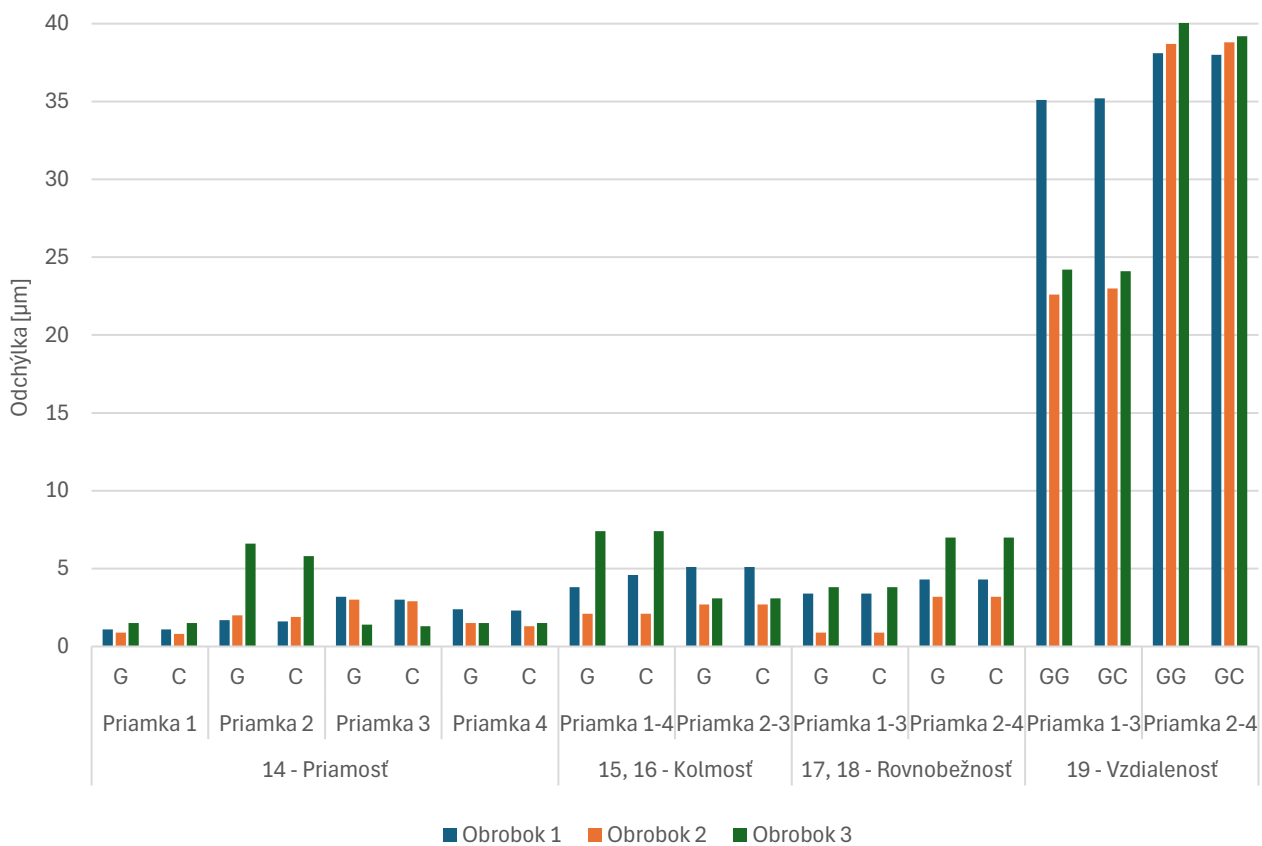
Obr. C1) Grafické zobrazenie odchylok charakteristík prvku 1 (valcové stupne)



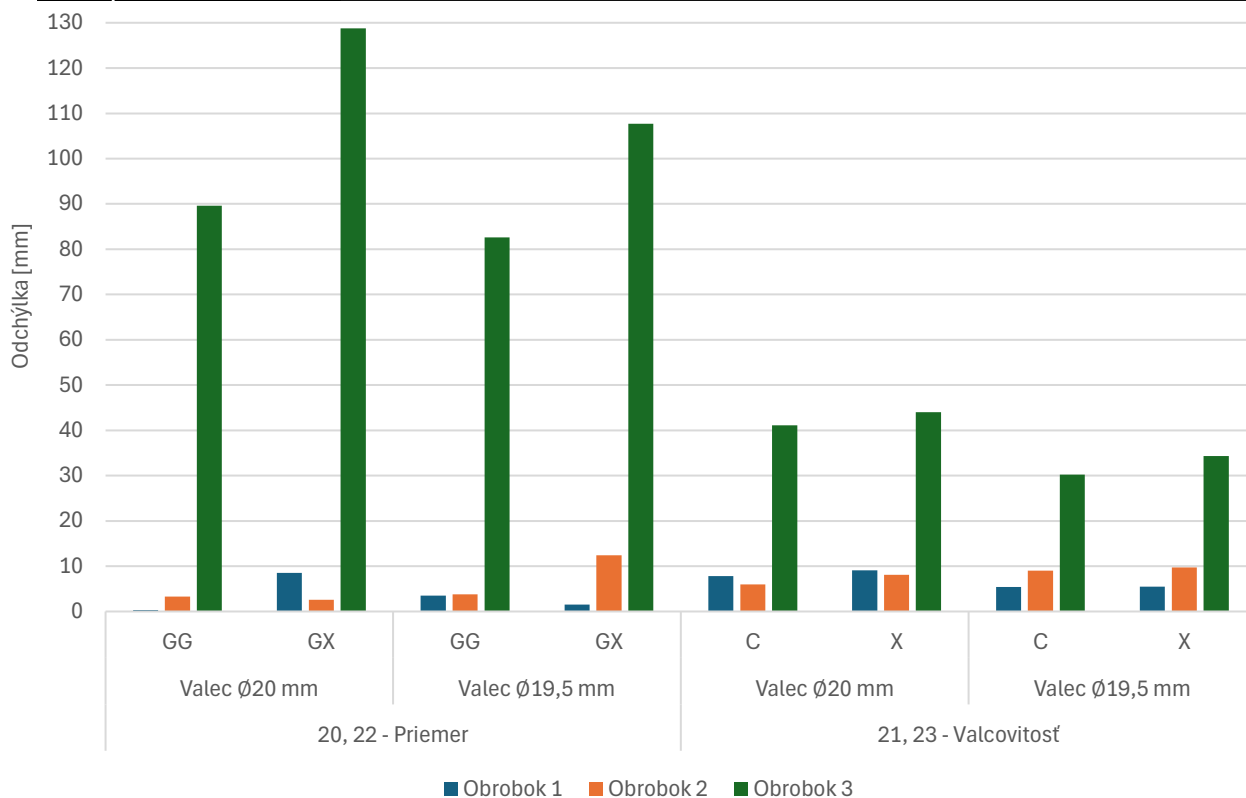
Obr. C2) Grafické zobrazenie odchylok charakteristík prvku 2 (kváder 45°)



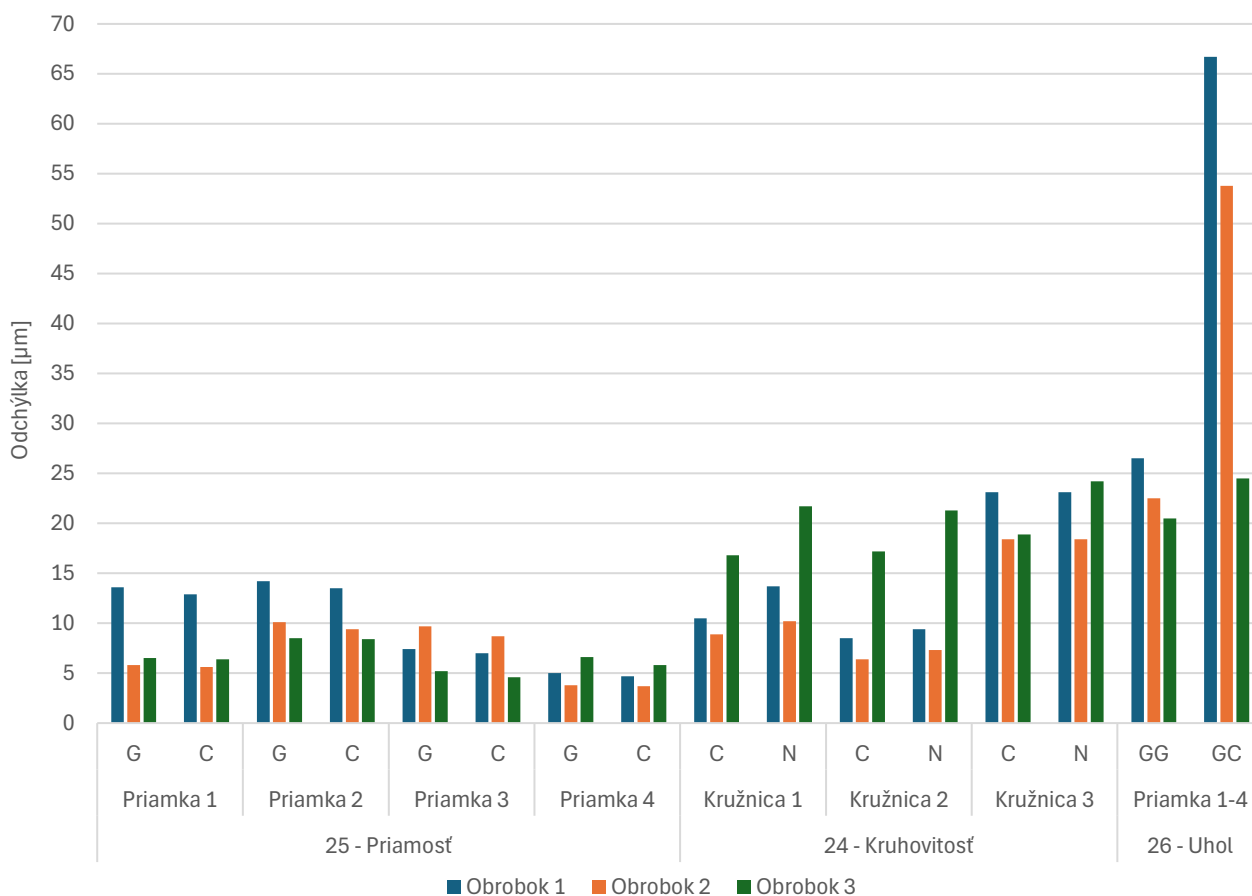
Obr. C3) Grafické zobrazenie odchýlok charakteristík prvku 3 (valec Ø126 mm)



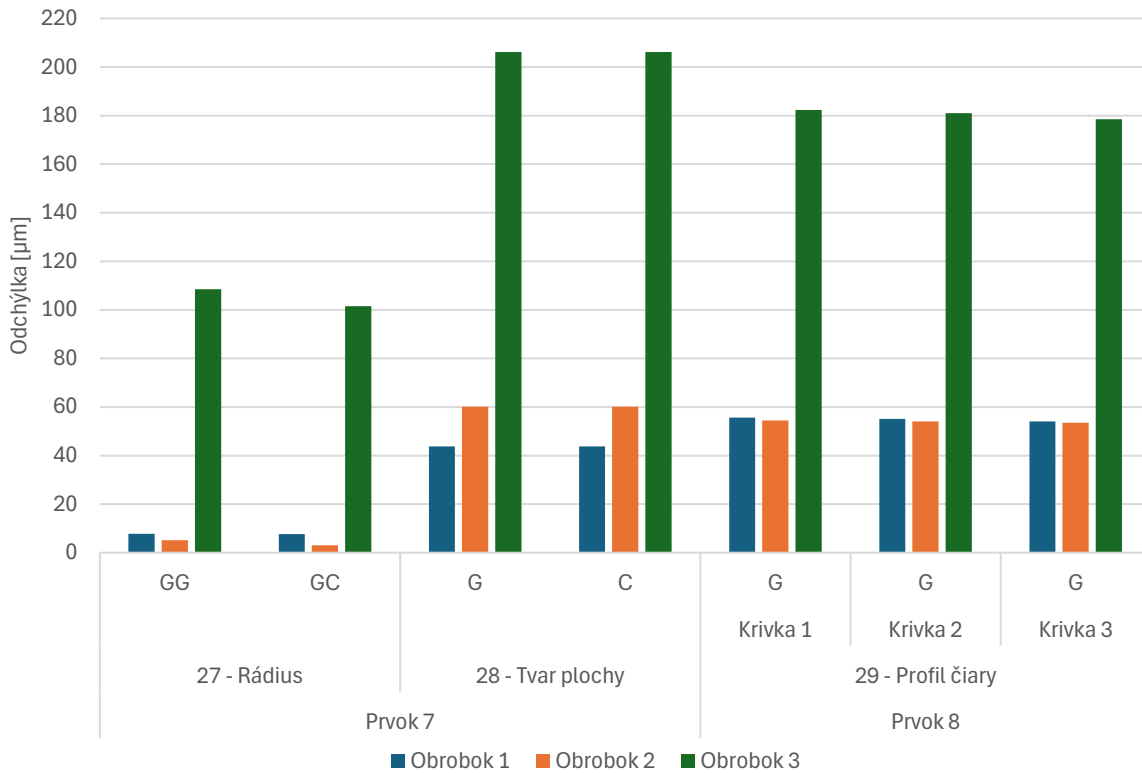
Obr. C4) Grafické zobrazenie odchýlok charakteristík prvku 4 (kváder 90°)



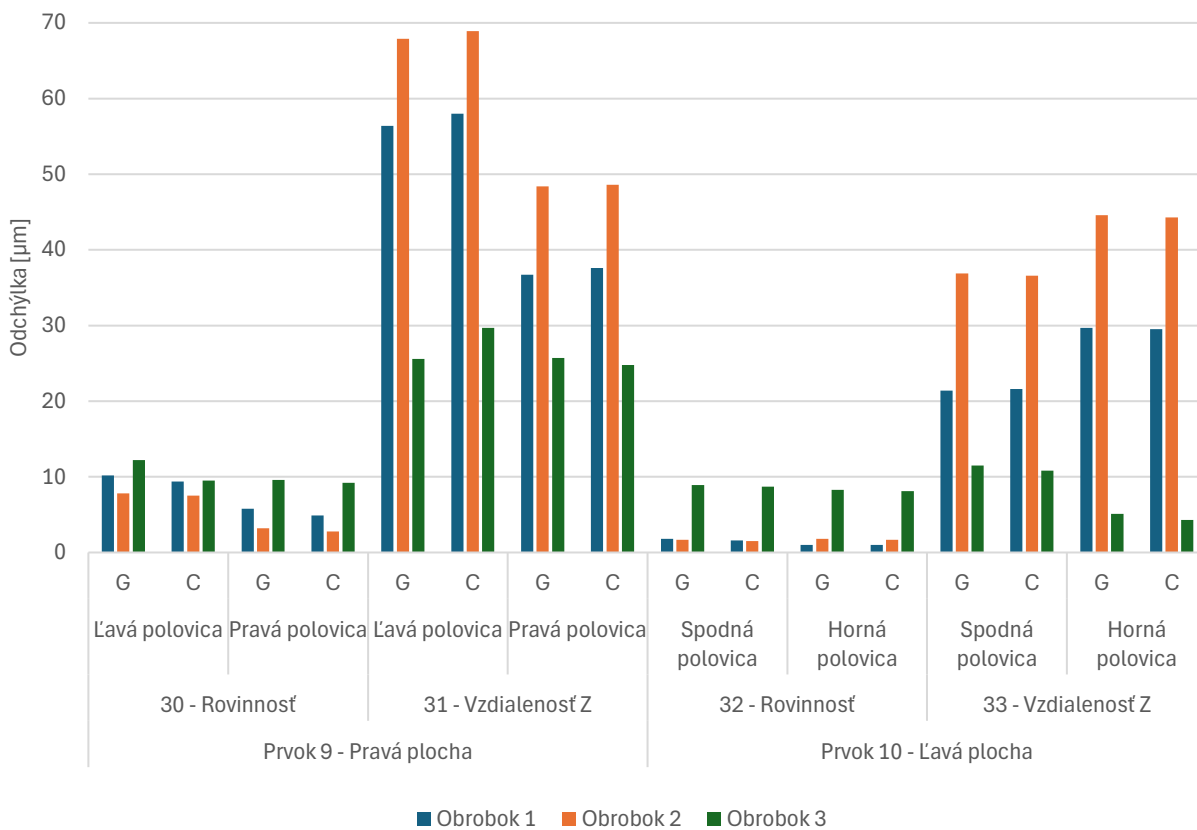
Obr. C5) Grafické zobrazenie odchýlok charakteristík prvku 5 (stredový otvor)



Obr. C6) Grafické zobrazenie odchýlok charakteristík prvku 6 (zrezaný kužeľ)



Obr. C7) Grafické zobrazenie odchyľok charakteristík prvku 7 (sférický segment) a prvku 8 (tvarová plocha)



Obr. C8) Grafické zobrazenie odchyľok charakteristík prvku 9 (pravá plocha) a prvku 10 (ľavá plocha)