

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A
METROLOGIE**



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**VLIV FILTRACE A METOD VYHODNOCENÍ NA VÝSLEDKY
MĚŘENÍ VYBRANÉHO DÍLU**

**EVALUATION AND FILTRATION METHODS INFLUENCE ON
MEASUREMENT RESULTS OF A PRODUCT**

AUTOR: Ondřej Gregor

STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Libor Beránek, Ph.D.

PRAHA 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Gregor** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **483349**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vliv filtrace a metod vyhodnocení na výsledky měření vybraného dílu

Název bakalářské práce anglicky:

Evaluation and filtration methods influence on measurement results of a product

Pokyny pro vypracování:

Systém ISO GPS.
Lineární a jiné než lineární rozměry, geometrické tolerance.
Postup kontroly GPS s využitím CMM.
Kontrola vybraného dílu a vliv filtrace a metod vyhodnocení na výsledky měření.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Libor Beránek, Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citovaných zdrojů. Dále souhlasím s využitím výsledků diplomové práce v rámci publikační činnosti, pokud budu uveden jako spoluautor.

V Praze dne:

.....

Podpis

Anotace

Tato bakalářská práce popisuje důležitost technické normalizace a způsob jejího fungování ve světě. V práci je blíže charakterizován systém geometrické specifikace výrobků ISO GPS, konkrétně základní principy, kterými se systém řídí, a dále jednotlivé metody, které systém definuje za účelem zajištění kompletní a jednoznačné specifikace požadavků kladených na výrobky. Práce dále zahrnuje vysvětlení způsobu fungování, popis jednotlivých konstrukčních provedení a popis průběhu měření na souřadnicových měřicích zařízeních, které slouží ke kontrole rozměrových a tvarových charakteristik vyráběných dílů. Práce rovněž zahrnuje kapitoly věnované statistické regulaci měřicího procesu. Experimentální část práce představuje jednotlivé etapy měření vybraného dílu od fáze analýzy výkresové dokumentace dílu, přes přípravy strategie měření v metrologickém softwaru, až po realizaci měření na souřadnicovém měřicím zařízení. Výstupem této práce je porovnání dvou rozdílných snímacích systémů využitých při měření na základě koeficientů způsobilosti procesu měření. V experimentální části práce je rovněž znázorněno, jakým způsobem se mění výsledky měření vybraného dílu v závislosti na použitých parametrech filtrace snímaných bodů a na použitých metodách vyhodnocení měřených prvků.

Klíčová slova

Technická normalizace, Systém ISO GPS, Rozměrové tolerance, Geometrické tolerance, Filtrování v GPS, Metody vyhodnocení, Měření na CMM, Způsobilost procesu, Způsobilost procesu měření

Annotation

This bachelor thesis outlines the significance of technical standardization and the way of its functioning. A system of geometrical product specification ISO GPS is further depicted in the thesis as well as its fundamental principles and particular methods which the system defines in order to ensure the product specification is complete and explicit. The thesis also describes particular designs of coordinate measuring machines which are used to monitor dimensional and geometrical characteristics of products, along with the way these machines work. Moreover, the thesis introduces methods of statistical control of a measurement process. Experimental section of the thesis introduces particular stages of measuring process including an analysis of drawing documentation, measuring strategy preparation using measuring software and execution of measurement itself. The main goal of the thesis is to make a comparison of two different sensor configurations depending on measuring process capability and to illustrate the impact of particular filtration parameters and evaluation methods on measurement results.

Keywords

Technical standardization, ISO GPS system, Dimensional tolerancing, Geometrical tolerancing, Filtration in GPS, Evaluation methods, CMM measurement, Process capability, Measuring process capability

Poděkování

V první řadě bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce, panu Ing. Liborovi Beránkovi Ph.D., za jeho ochotný a trpělivý přístup, stejně tak za zprostředkované poznatky z oblasti metrologické praxe, ke kterým bych se jinak dostal jen velmi obtížně. Rovněž mu vděčím za možnost realizace měření navzdory složitým epidemiologickým podmínkám. Dále bych chtěl poděkovat vedení a zaměstnancům firmy MPOWER Engineering, a.s. za zapůjčení dílu, který jsem v této práci použil jako předmět praktického měření, stejně tak za další poskytnuté informace pojící se s měřeným dílem. V poslední řadě chci poděkovat svým rodičům za veškerou podporu, které se mi z jejich strany dostává v rámci mého studia i mimo něj.

Seznam použitých zkratek

ANSI	...	American National Standards Institute (Americký národní standardizační institut)
BS	...	British Standards (Britské národní normy)
CAD	...	Computer-aided design (Počítačem podporované projektování)
CEN	...	European Committee for Standardization (evropská komise pro standardizaci)
CENELEC	...	European Committee for Electrotechnical Standardization (Evropský výbor pro normalizaci v elektrotechnice)
CMM	...	Coordinate measuring machine (Souřadnicové měřicí zařízení)
CNC	...	Computer numerical control (počítačové číslicové řízení)
CTN	...	Centrum technické normalizace
ČAS	...	Česká agentura pro standardizaci
ČSN	...	Česká technická norma (původně československá státní norma)
ČVUT	...	České vysoké učení technické v Praze
DIN	...	Deutsche Industrie-Norm (německá národní norma)
ETSI	...	European Telecommunications Standards Institute (Evropský ústav pro telekomunikační normy)
GOST	...	Gosudarstvennyy standart (státní standard Ruské federace)
GT	...	Geometrická tolerance
IEC	...	International Electrotechnical Commission (mezinárodní elektrotechnická komise)
ISO	...	International Organization for Standardization (mezinárodní organizace pro standardizaci)
ITU	...	International Telecommunication Union (mezinárodní telekomunikační unie)
JIS	...	Japanese Industrial Standards (Japonské průmyslové normy)
LSC	...	Least squares circle (metoda nejmenších čtverců)
LSL	...	Lower specification limit (dolní specifikační mez)
λ_c	...	Základní délka

λ_n	...	Vyhodnocovaná délka
MCC	...	Minimum circumscribed circle (metoda nejmenšího opsaného prvku)
MIC	...	Maximum inscribed circle (metoda největšího vepsaného prvku)
Ra	...	Střední aritmetická výšková úchylka profilu
RPS	...	Referenz punkte system (systém referenčních bodů)
R_{sm}	...	Střední aritmetická délková úchylka profilu
Rz	...	Průměrná výšková úchylka profilu
Rz_{1max}	...	Maximální výšková úchylka profilu
R&R	...	Repeability & Reproducibility (opakovatelnost a reprodukovatelnost)
T	...	Šířka tolerančního pole
TC	...	Technical Committee (technická komise)
TED	...	Theoretically exact dimensions (Teoreticky exaktní rozměry)
TNK	...	Technická normalizační komise
UPR	...	Undulations per revolution (počet vln na otáčku)
USA	...	United States of America (Spojené státy americké)
USL	...	Upper specification limit (horní specifikační mez)
ÚNMZ	...	Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví
W3C	...	World Wide Web Consortium (mezinárodní konsorcium pro celosvětovou internetovou síť)

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Technická normalizace	2
2.1	Hierarchie skupin norem.....	2
2.1.1	Mezinárodní normy	2
2.1.2	Evropské normy ISO.....	3
2.1.3	Národní technické normy	3
2.2	Komise TC 213	3
3	System ISO GPS	4
3.1	Základní principy.....	4
3.2	Rozměrové tolerance.....	6
3.2.1	Délkové rozměry	6
3.2.2	Úhlové rozměry	11
3.2.3	Úchylky netolerovaných délkových a úhlových rozměrů	12
3.3	Geometrické tolerance	13
3.3.1	Značky geometrických charakteristik.....	13
3.3.2	Geometrické tolerance tvaru	20
3.3.3	Geometrické tolerance orientace, umístění a házení	24
3.3.4	Základny geometrických tolerancí	32
3.3.5	Nejednoznačná interpretace v rámci rozměrového tolerování	35
3.3.6	Filtrování v GPS	37
3.3.7	Metody vyhodnocení přiřazených prvků v GPS.....	41
4	Souřadnicová měřicí technika.....	45
4.1	Princip měření na CMM	45
4.2	Výhody a nevýhody měření na CMM	45
4.3	Konstrukční varianty CMM.....	46
4.3.1	Kartézsky uspořádané souřadnicové měřicí stroje.....	46
4.3.2	Nekartézsky uspořádané CMM	49
4.3.3	Materiály používané pro konstrukci CMM.....	51
4.4	Snímací systémy CMM.....	52
4.4.1	Kontaktní snímací systémy.....	52
4.4.2	Bezkontaktní snímací systémy	53
4.5	Kontrola součásti na CMM.....	53
4.5.1	Analýza výkresové dokumentace	53
4.5.2	Definice upnutí.....	53
4.5.3	Konfigurace a klasifikace snímacího systému	54
4.5.4	Vyrovnaní součásti	54
4.5.5	Extrakce bodů a definice geometrických elementů	55
4.5.6	Výpočet geometrických charakteristik a vyhodnocení výsledků	55
5	Způsobilost procesu.....	56
5.1	Ukazatele způsobilosti procesu.....	56
5.1.1	Ukazatel způsobilosti C_p	56
5.1.2	Ukazatel způsobilosti C_{pk}	57
5.1.3	Ukazatel způsobilosti C_{pM}	58
6	Způsobilost procesu měření	59
6.1	Analýza chyb opakovatelnosti a reprodukovatelnosti	61
6.2	Ukazatele způsobilosti měřidla	62
6.2.1	Ukazatele způsobilosti měřidla C_g a C_{gk} dle metodiky Ford.....	63
6.2.2	Ukazatele způsobilosti měřidla C_g a C_{gk} dle metodiky Bosch.....	64

7	Realizace měření vybraného dílu	65
7.1	Popis funkce měřené součásti.....	65
7.2	Popis procesu výroby měřené součásti	66
7.3	Analýza výkresové dokumentace	66
7.4	Návrh kontroly vybraného dílu pomocí CMM	67
7.5	Cíle měření	72
7.5.1	Vliv konfigurace snímačů na způsobilost procesu měření	72
7.5.2	Vliv volby parametrů filtrace na výsledek měření GT tvaru	72
7.5.3	Vliv metody vyhodnocení na výsledky měření vybraného prvku	72
7.5.4	Vliv nedostatečného počtu snímaných bodů na fungování filtru.....	72
7.6	Vyhodnocení měření.....	73
8	Závěr	82
9	Použité zdroje a literatura	84
10	Seznamy	86
10.1	Seznam obrázků.....	86
10.2	Seznam tabulek	87
10.3	Seznam grafů	88
10.4	Seznam rovnic.....	88
10.5	Seznam příloh	89

1 Úvod

Podobně jako řečník, který sděluje své myšlenky pomocí slov, nebo jako malíř interpretující své pocity skrze obrazy, snaží se i konstruktér nějakým způsobem vyjádřit, jaké požadavky musí splňovat díly jím navrhované, aby správně a spolehlivě plnily svou funkci. Nosičem konstrukčních úvah a záměrů, který umožňuje zachytit a určitým způsobem kvantifikovat kladené požadavky, je technická dokumentace uvažovaného dílu. Ať už bude sloužit technická dokumentace jako zadání pro výrobu, nebo kontrolu již vyrobeného dílu, je zcela zásadní, aby byly jednotlivé požadavky interpretovány srozumitelně a jednoznačně. Vzhledem k technické vyspělosti dnešní doby, která umožňuje vyvíjet a vyrábět díly špičkové kvality, je nutné mít pod kontrolou i sebemenší detail, který by mohl správné fungování dílu ohrozit. Na výsledné kvalitě dílu je výrazně podepsána úroveň zpracování technického záměru ve formě technické dokumentace, stejně tak i úroveň nastavených procesů kontroly. Bližší představení významnosti těchto dvou pilířů, na nichž více či méně stojí každý výrobní i nevýrobní podnik, bylo hlavní motivací pro psaní této práce.

V úvodní kapitole této práce bude představen koncept technické normalizace, který je celosvětově realizován za účelem definování pravidel a doporučení v oblastech strojírenské výroby, ale i v řadě oblastí jiných. Následně bude blíže popsán systém ISO GPS, konkrétně základní principy, jimiž se systém řídí, stejně tak i metody, které systém definuje za účelem zajištění maximálně srozumitelné a jednoznačné specifikace a kvantifikace jednotlivých požadavků kladených na díly. Poté bude přiblížena problematika měření na souřadnicových měřicích zařízeních, zejména různé konstrukční varianty těchto strojů a způsob, jakým probíhá samotná kontrola předepsaných charakteristik ve výkresové dokumentaci dílu. Následující kapitoly budou věnovány popisu nástrojů sloužících ke statistické regulaci procesů, a sice koeficientům způsobilosti procesu a koeficientům způsobilosti procesu měření.

V experimentální části této práce bude jako první popsána příprava a realizace měření vybraného dílu. Připravený měřicí proces, konkrétně jeho dvě alternativy lišící se v použité konfiguraci snímačů, budou dále zhodnoceny a vzájemně srovnány na základě koeficientů způsobilosti procesu měření. Následně bude na vybraném dílu demonstrováno, jak se mohou lišit výsledky měření, jsou-li použity různé parametry filtrace. Stejně tak bude předvedeno, do jaké míry ovlivňuje výsledky měření aplikace konkrétních metod vyhodnocení.

2 Technická normalizace

Cílem technické normalizace je poskytování pravidel, směrnic a pokynů, díky kterým lze zajistit, aby konkrétní entity, jako například výrobky, materiály, služby nebo postupy, správně sloužily stanovenému účelu. V oblasti výrobků je hlavní snahou dosažení kompatibility řešení v co možná největším rozsahu, stejně tak zaručení bezpečnosti, spolehlivosti, kvality a opakovatelnosti výrobních postupů. Zajištění výše zmíněných kvalit může sloužit jako jeden z předpokladů pro odbourávání bariér mezi odběrateli a dodavateli z různých zemí světa, a tedy jako podpora mezinárodního obchodu. Za účelem dodržení těchto standardů jsou vytvářeny normy mezinárodního, evropského, či národního formátu. Hlavní cíle a myšlenky technické normalizace jsou realizovány skrze technické normy. Technické normy představují dokumentované dohody, které jsou tvořeny, upravovány a průběžně aktualizovány příslušnými orgány. Nicméně, dokumenty norem samy o sobě nepředstavují závazná nařízení, není-li stanoveno jinak zákony konkrétní země. [1], [2], [3]

V následujících podkapitolách bude blíže popsána hierarchie technických norem, spolu s procesem jejich tvorby příslušnými autoritami. Stejně tak budou přiblíženy kompetence technické komise TC 213, která zodpovídá za tvorbu, údržbu a aktualizaci norem v rámci systému ISO GPS, zabývajícím se standardy geometrické specifikace produktu a jejich ověřování.

2.1 Hierarchie skupin norem

Skupiny technických norem lze rozdělit dle rozsahu platnosti do několika úrovní. Nejširší množinou norem, které jsou vydávány s platností napříč všemi státy světa, jsou normy mezinárodní. Podmnožinou mezinárodních norem jsou normy evropské, které jsou uplatňovány ve většině evropských států. Je možné se setkat i se skupinami norem, které jsou vydávány normalizačními orgány konkrétních států, na jejichž území nabývají platnosti - takové technické normy se označují jako normy národní. V následujících kapitolách budou blíže charakterizovány jednotlivé skupiny norem. [3]

2.1.1 Mezinárodní normy

Mezinárodní technické normy jsou tvořeny, upravovány a průběžně aktualizovány organizací ISO (International Organization for Standardization). Tato organizace sídlící v Ženevě a fungující od roku 1946 se skládá z normalizačních orgánů zemí celého světa. Součástí organizace jsou technické komise (Technical Committee), které sdružují experty z konkrétních oblastí. Tyto komise se dále starají o tvorbu a údržbu mezinárodních norem a dalších dokumentů. Tvorba konkrétních norem a dokumentů je založena jak na teoretickém výzkumu, tak na poznatcích a zkušenostech expertů z praxe. Mimo organizaci ISO existují i další organizace mezinárodního formátu, které se starají o normalizaci v jiných oblastech. Patří mezi ně například organizace ITU (International Telecommunication Union), která se spravuje mezinárodní telekomunikační normy, dále organizace IEC (International Electrotechnical Commission) zodpovídající za mezinárodní elektrotechnické normy, nebo organizace W3C (World Wide Web Consortium) zaštiťující mezinárodní normy týkající se přístupnosti a použitelnosti světové internetové sítě. [1], [2], [3]

2.1.2 Evropské normy ISO

O tvorbu a údržbu evropských technických norem a dalších technických dokumentů se stará Evropský výbor pro normalizaci CEN (European Committee for Standardization). Jeho členy jsou národní normalizační orgány, zastupující konkrétní evropské země. Každý normalizační orgán členské země komise CEN má možnost vyjádřit se ke všem dokumentům, které jsou v rámci zasedání komise probírány. Dalším evropským normalizačním výborem, který se zabývá normalizací v oblasti elektrotechniky, je výbor CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization). Odpovědnost za standardizaci informačních a komunikačních technologií nese v Evropě ústav ETSI (European Telecommunications Standards Institute). [3], [4]

2.1.3 Národní technické normy

V České Republice vydával do roku 2018 české technické normy (ČSN) Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ). Od roku 2018 jeho roli převzala Česká agentura pro standardizaci (ČAS). Tento úřad může nové normy přímo vytvářet, aktualizovat vlastní normy podle vzoru norem vydaných orgány vyšší důležitosti (mezinárodní a evropské normy), nebo normy poskytované respektovanými orgány přímo přejímat. Proces přejímání a aktualizování norem vydaných organizacemi výše postavenými se nazývá harmonizací. Technickou normalizací se v České Republice zabývají technické normalizační komise (TNK) nebo centra technické normalizace (CTN), které fungují pod záštitou agentury ČAS. O samotnou tvorbu norem se starají CTN, které mohou zpracování nových norem delegovat na soukromé subjekty. Za následnou kontrolu takto vzniklých norem se zaručuje TNK. [3], [5], [6], [7]

Celosvětová snaha o harmonizaci technických norem pod záštitou organizace ISO se aplikuje napříč celým průmyslovým světem. Harmonizací procházejí také normy dříve nejvýznamnějších průmyslových velmocí, jakými jsou například USA (ANSI), Ruská federace (GOST), Německo (DIN), Velká Británie (BS) a Japonsko (JIS). [5]

2.2 Komise TC 213

Technická komise TC 213 je sdružením expertů, kteří se starají o tvorbu, údržbu a aktualizaci norem v systému ISO GPS. Vývoj norem, konkrétně jejich vznik, úprava, nebo zánik, není načasován nahodile. Je snaha, aby se normy vyvíjely spolu s celým světovým průmyslem a odpovídaly požadavkům výrobců a spotřebitelů. Právě z důvodu požadavku na aktuálnost je zastoupení odborníků z praxe v komisi žádané, lze tvrdit, že přímo nezbytné. Mezinárodní zastoupení v rámci komise zaručuje, že budou nově vznikající normy vyhovující a tudíž i široce užívané napříč průmyslovými zeměmi z celého světa. [2], [8], [8]

Vznik nové normy, nebo změna již existující normy, je záležitostí trvající v řádu let, a to zejména kvůli několikanásobnému a propracovanému procesu vývoje. Pracovní skupiny připraví na základě výzkumu návrh, který je dále předložen k diskusi a dalšímu připomínkování v rámci celé komise. Každá norma tedy musí být pečlivě přezkoumána a odhlasována řadou odborníků, než se vydá k dispozici pro veřejnost. [2], [3], [8]

3 Systém ISO GPS

Cílem tohoto systému je vytvořit pravidla, dle kterých lze jednoznačně, srozumitelně a zcela specifikovat požadavky kladené na vyráběné součásti, za účelem zajištění jejich funkčnosti. Tato pravidla jsou definována a blíže popsána v jednotlivých normách tohoto systému. Jednotlivé normy stejně tak popisují, jakým způsobem by mělo probíhat měření a následné vyhodnocení požadavků kladených na součásti. Veškeré požadavky kladené na součást musí být zaznamenány v technické dokumentaci součásti. Pokud součást stanoveným požadavkům vyhovuje, musí být považována za přijatelnou, a tudíž schopnou vykonávat svou funkci. Aby systém fungoval, jak má, je třeba dodržovat základní principy, které platí napříč všemi normami, které systém zaštiťuje. Tyto principy, kterými se řídí všechny normy systému ISO GPS, budou popsány v následujících kapitolách. Rovněž budou blíže představeny normy, které definují pravidla indikování požadavků na součásti ve výkresové dokumentaci. Představena bude rovněž problematika filtrace měřených prvků, spolu s metodami výpočtu, s jejichž pomocí bývají prvky vyhodnocovány. [9]

3.1 Základní principy

V rámci systému ISO GPS jsou definovány základní principy, které platí napříč všemi technickými normami, které do systému patří. Tyto principy představují základní pilíře, na nichž je postavena jednoznačná a srozumitelná interpretace výkresové dokumentace.

První ze základních principů definuje, jakým způsobem probíhá **realizace principů** v rámci celého systému ISO GPS. Tento princip říká, že pokud je v dokumentaci výrobku odkazováno na systém ISO GPS, uplatňuje se systém ISO GPS v celé jeho šíři. Účinnost celého systému je vyvolána užitím jeho části, například použitím některého operátoru specifikace ve výkresové dokumentaci. V případě, že výrobek podléhá ještě jiným normativním dokumentům mimo systém ISO GPS, je nezbytně nutné tyto dokumenty uvést v dokumentaci výrobku. [9]

V systému ISO GPS je pevně stanovena hierarchie norem. Jednotlivé skupiny norem jsou dle důležitosti seřazeny (sestupně) následovně: základní, globální, všeobecné a doplňkové. **Princip hierarchie GPS normy** zajišťuje, že pro danou skupinu norem platí vždy pravidla skupin norem vyšších úrovní. Pokud tento vztah zcela, nebo jen částečně neplatí, musí to být v příslušné normě nižší úrovně uvedeno. Může například dojít k tomu, že je některá skutečnost v doplňkové normě popsána podrobněji, a neshoduje se tak zcela s obecným popisem uvedeným v normách vyšší úrovně. V takovém případě je správnější řídit se pokyny z doplňkové normy. [9]

Princip konečného výkresu stanovuje, že mohou být uplatňovány pouze takové požadavky na výrobek, které jsou uvedeny na výkrese. Požadavky na výrobek mohou být na výkrese indikovány pomocí symboliky dle ISO GPS nebo symboliky dle jiných norem. Pojmem „výkres“ je myšlen celý soubor dokumentace specifikující výrobek. Pojmem „specifikace“ se obecně chápe vyjádření požadavku na zvolenou vlastnost. Konkrétní specifikace je na výkrese znázorněna konkrétní indikací. Obecně se všechny specifikace vztahují ke konečnému stavu výrobku. V situaci, kdy je na výkrese specifikováno více etap výroby jednoho výrobku, musí být tyto etapy jednoznačně popsány. V takovém případě se indikovaná specifikace váže k popsané výrobní etapě. [9]

Součásti bývají tvořeny geometrickými prvky s jednoznačně definovanými hranicemi. Hranice prvků jsou nejčastěji vymezeny hranami, nebo výraznými změnami povrchu součásti. Respektováním **principu prvku** je zajištěno, že se specifikace vztážená na konkrétní prvek, nebo vztah mezi prvky, vztahuje na celý prvek, resp. vztah prvků. V případě, že je nutné specifikovat

pouze vybranou část prvku, musí být tento požadavek popsán patřičnou indikací na výkrese. Existují i takové indikace, které umožňují specifikovat více prvků najednou. [9]

Důležitým předpokladem v systému ISO GPS je nezávislost jednotlivých specifikací, kterou zachycuje **princip nezávislosti**. Konkrétně to znamená, že se každá specifikace vztahená na prvek, resp. na vztah mezi prvky, vyhodnocuje nezávisle na jiné specifikaci. Existují však případy, kdy se tímto předpokladem vybrané specifikace neřídí. Takové specifikace jsou potom řízeny jinou normou, nebo speciálními indikátory. [9]

Jako **princip duality** je chápáno, že je operátor specifikace stanoven nezávisle na zvoleném měřícím postupu a použitém měřícím zařízení. Jinými slovy princip říká, že je specifikace volena nezávisle na následném procesu jejího ověřování. Doporučený postup ověřování jednotlivých specifikací popisuje operátor ověřování, který není závislý na operátoru specifikace, ale snaží se ho co nejlépe zrcadlit. Mohou však nastat případy, kdy nelze z nějakého důvodu přesně realizovat doporučený postup. V takových případech se dá zvolit postup jiný, avšak je nutné brát v úvahu, že se tím nejistota měření zvyšuje. [9]

Představa úplné specifikace součásti, kterou popisuje **princip funkčního ovládní**, je taková, že jsou všechny funkce součásti úplně popsány pomocí operátorů specifikace, které dále stanovují soubor měřených veličin součásti a s nimi související tolerance. Nicméně, ve většině případů nejde zaručit dokonalý popis funkčních vlastností pomocí operátorů specifikace, což může vést ke vzniku odchylek mezi popisem a skutečností, stejně tak jako k nejednoznačné interpretaci technické dokumentace. [9]

Je takřka nemožné zcela dokonale popsat funkci součásti ve výkresové dokumentaci pomocí specifikací. Stejně tak je téměř nemožné provést ověřování jednotlivých specifikací dokonale, bez jakýchkoliv chyb. Proto je nutné definovat blízkost operátoru specifikace k operátoru funkce, stejně tak jako blízkost operátoru ověřování k operátoru specifikace. Podle **principu odpovědnosti** by měla být blízkost operátoru ověřování k operátoru specifikace kvantifikována velikostí nejistoty měření. [9]

Výchozím principem je rozuměno, že v případě, kdy není na výkrese uveden žádný speciální operátor specifikace, předpokládá se, že platí výchozí operátor specifikace. Jako příklad lze uvést vyhodnocování lineárních rozměrů. Výchozí metodou je normou stanovena metoda rozměru mezi dvěma body. Pokud by měly být délkové rozměry na výkrese vyhodnocovány jinou metodou, bylo by nutné předepsat v blízkosti popisového pole speciální operátor specifikace, který by metodu vyhodnocení změnil. [9]

Pokud je v popisovém poli, nebo jeho blízkosti uvedena všeobecná specifikace GPS, bude se podle **principu všeobecné specifikace** vztahovat na každý prvek a vztah mezi prvky. Pokud v popisovém poli, nebo jeho blízkosti není uvedena všeobecná specifikace, platí pouze konkrétní uvedené specifikace GPS v technické dokumentaci výrobku. Pokud jsou v popisovém poli, nebo jeho blízkosti uvedeny takové specifikace, které jsou navzájem protichůdné, je nutné uvést vysvětlení, které zabrání vzniku nejasností ve specifikaci. [9]

Systém ISO GPS definuje tři principy, které stanovují základní podmínky, které na výkrese platí. **Desetinný princip** říká, že ve výchozím nastavení jsou neindikované desetinné hodnoty jmenovitých hodnot a hodnot předepsaných tolerancí rovny nule. Systém ISO GPS definuje podmínky okolí. **Princip referenční podmínky** stanovuje referenční teplotu, za které platí veškeré specifikace, rovnou 20 °C. **Princip tuhého obrobku** definuje, že součást popisovaná na výkrese musí být vnímána jako nekonečně tuhá a nijak deformovaná žádnými vnějšími silami (ani působením tíhové síly). [9]

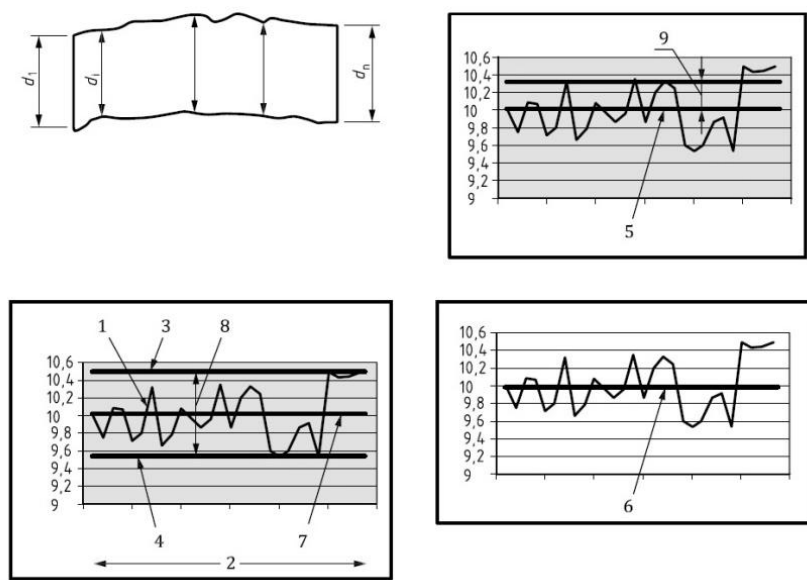
3.2 Rozměrové tolerance

Všechny reálné jevy podléhají nějakému stupni neurčitosti. Ani strojní součásti nejsou výjimkou, a proto je vždy nutné brát v úvahu, že skutečné součásti nikdy dokonale neodpovídají svými rozměry ani tvarem ideálním geometrickým prvkům zobrazeným na výkrese. Aby mohla být zajištěna správná funkce součásti, je nutné, aby zejména její funkční plochy splňovaly určité požadavky. Ke kvantifikaci těchto požadavků, konkrétně ke stanovení přijatelných mezí rozměrových a tvarových odchylek skutečných součástí od jmenovitých prvků zobrazených ve výkresové dokumentaci, slouží tolerance. Součást lze považovat za vyhovující, spadá-li její tolerovaný rozměrový či tvarový prvek do vymezeného tolerančního pole, jehož šířku vymezují specifikační meze. Základní rozměrové charakteristiky součásti, které musí odpovídat nějakým požadavkům, jsou délkové a úhlové rozměry.

V této kapitole budou délkové a úhlové rozměry blíže představeny. Hlavní důraz bude kladen na vysvětlení základních pojmů pro práci s těmito rozměry, představení nejdůležitějších metod jejich vyhodnocování a znázornění konkrétních způsobů indikace, kterým je hodno rozumět pro správnou interpretaci výkresové dokumentace.

3.2.1 Délkové rozměry

Délkové rozměry se dají zkoumat z hlediska místního nebo celkového. Místní rozměry odpovídají rozměru prvku součásti v jeho dané části, zatímco celkové rozměry, někdy také nazývané jako rozměry globální, souhrnně charakterizují rozměr celého prvku. V určitých případech je užitečné pracovat s takzvanými vypočítanými rozměry, jejichž velikost se určí výpočtem na základě matematických vztahů. Často je nutné pracovat nejen s jedním, ale s celou množinou lineárních rozměrů, které charakterizují jeden prvek součásti. Proto jsou zaváděny souhrnné charakteristiky, s jejichž pomocí je možné množinu rozměrů zhodnotit a popsat některou z jejich charakteristických vlastností. Na obrázku níže jsou uvedeny různé charakteristiky délkových rozměrů. [10]

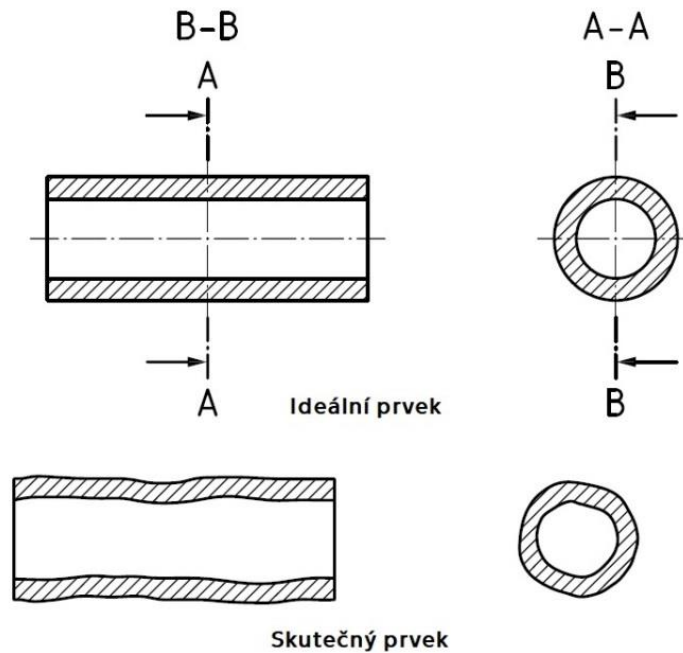


Legenda

- | | |
|--------------------------------|--------------------------|
| 1 sada hodnot místních rozměrů | 5 průměrný rozměr |
| 2 poloha podél osy | 6 střední rozměr |
| 3 maximální rozměr | 7 střední rozsah rozměru |
| 4 minimální rozměr | 8 rozsah rozměrů |
| d hodnoty místního rozměru | |

Obrázek 1: Charakteristiky délkových rozměrů [10]

Jak ukazuje **Obrázek 2**, je neustále nutné pracovat s předpokladem, že skutečné součásti svými rozměry ani tvarem nikdy neodpovídají ideálním prvkům. Z toho důvodu se zavádějí metody vyhodnocení (přiřazení), pomocí nichž lze dle stanovených kritérií přiřazovat skutečným prvkům součástí prvky ideální. Mezi ideální rozměrové prvky, pomocí kterých definujeme tvary skutečných součástí, a kterým se skutečné součásti svým tvarem snaží co nejvíce přiblížit, patří válec, kvádr, koule, kužel a anuloid. Z těchto těles se dále odvozují vyhodnocované délkové rozměry, jako jsou například vzdálenost dvou rovnoběžných rovin, průměr, sférický průměr nebo vzdálenost dvou soustředných kružnic. [10] [11]



Obrázek 2: Ideální a skutečný rozměrový prvek [10]

Po aplikaci některé vyhodnocovací metody na skutečnou součást je možné získat takzvaný celkový (globální) rozměr. Celkový rozměr může fungovat jako charakteristický rozměr, kterým nahradíme všechny lokální rozměry. Celkový rozměr se může lišit při aplikování různých metod vyhodnocení, třebaže je měřena stále stejná součást. [10] [11]

Na níže uvedeném obrázku je znázorněn princip metody vyhodnocení pomocí **maximálního vepsaného rozměru**. Tato metoda spočívá v nalezení největšího možného globálního rozměru ideálního prvku, který by se „vešel“ do skutečné součásti. Tato vyhodnocovací metoda může být vhodná pro vyhodnocování prvků součástí typu „díra“. Je díky ní možné zaručit, že díra nebude mít menší průměr než nalezený globální rozměr, a součást typu „hřídel“ o patřičném rozměru se do díry vždy vejde. Logika vyhodnocování děr touto metodou připomíná logiku kontroly rozměru děr pomocí válečkového kalibru. [10]



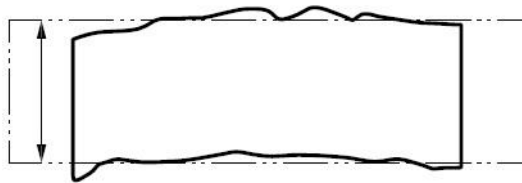
Obrázek 3: Metoda přiřazení maximálního vepsaného rozměru [10]

Následující vyhodnocovací metoda je podobná výše zmíněné metodě, s tím rozdílem, že se stanoví nejmenší možný celkový (globální) rozměr ideálního prvku, do něhož by se skutečná součást měla „vejít“. Použití metody vyhodnocení **nejmenšího opsaného rozměru** může být výhodné v případě vyhodnocování součástí typu „hřídel“, kdy je pro správnou funkci součásti potřeba zajistit, aby žádný místní rozměr součásti nepřesáhl maximální dovolený rozměr, a tudíž vyhovoval podmínkám zaručujícím smontovatelnost. Způsob přiřazení ideálního prvku je naznačen níže na obrázku. [10]



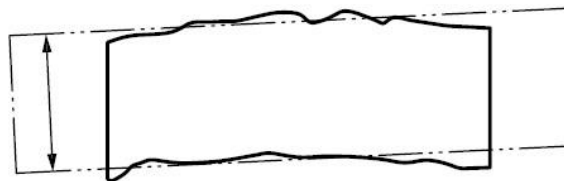
Obrázek 4: Metoda přiřazení minimálního opsaného rozměru [10]

Vyhodnocení pomocí **metody nejmenších čtverců** je znázorněno na obrázku níže. Princip metody spočívá v tom, že se skutečnému povrchu součásti přiřadí takový ideální prvek, jehož globální rozměr je aproximován z povrchu skutečné součásti Gaussovou metodou nejmenších čtverců. Výpočet rozměru je naznačen na obrázku níže [10]



Obrázek 5: Přiřazení pomocí metody nejmenších čtverců [10]

Poslední využívanou metodou přiřazení je Čebyševova **minimax metoda**. Globální rozměr prvku přiřazeného skutečnému vyhodnocovanému povrchu součásti je stanoven pomocí Čebyševovy metody minimalizující maximální odchylky. Tato metoda se také nazývá jako metoda minimální zóny. Způsob přiřazení pomocí této metody je vyobrazen níže. [10]



Obrázek 6: Metoda přiřazení Čebyševovou metodou [10]

Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly, globální délkový rozměr lze získat také pomocí výpočtu. Aby se dal výpočet provést, je potřeba znát nějaký jiný charakteristický rozměr, s jehož pomocí se hledaný délkový rozměr dopočítá. Takovým charakteristickým rozměrem může být obvod průřezu v konkrétním místě součásti, plocha nebo objem měřené součásti, které lze získat přímým měřením, nebo pomocí údajů z modelu v CAD softwaru. Na druhou stranu by bylo složité zaznamenat charakteristiky jako objem, obvod nebo plocha ve výkresové dokumentaci. Právě z toho důvodu je vhodné popsat součást dopočítaným lineárním rozměrem. [10]

Za pomoci známé délky obvodu v konkrétním průřezu kolmém k ose součásti lze dle níže uvedeného vztahu určit hledaný rozměr, a sice průměr součásti

$$d = \frac{o}{\pi},$$

Rovnice 1: Vztah pro výpočet rozměru z obvodu [10]

kde d je hledaný rozměr a o je délka obvodu součásti v konkrétním průřezu. [10]

Obdobně by bylo možné dopočítat průměr skutečné součásti z plochy průřezu, a to dle vztahu

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}},$$

Rovnice 2: Vztah pro výpočet rozměru z plochy průřezu [10]

kde d je hledaný rozměr a A je plocha průřezu v konkrétním místě součásti. [10]

Takto získaný rozměr může sloužit například k popisu součástí, jimiž protéká nějaké médium. V praxi nemusí mít součást dokonale válcový tvar, její průřez může mít například tvar elipsy nebo jiného tvaru. Je však důležité, aby bylo na výkresu součásti, u níž je zásadní právě velikost plochy průřezu, uvedeno, že se charakteristický rozměr, v tomto případě průměr, vyhodnocuje z plochy průřezu pomocí výpočtu.

Lineární rozměr lze také získat pomocí výpočtu z objemu součásti. Pokud by byla uvažovaná součást válcového tvaru, hledaný průměr válce by bylo možné vypočítat z celkového objemu součásti. Za pomoci známého objemu skutečné součásti a známé vzdálenosti čelních ploch válce je možné dopočítat průměr válce dle vztahu

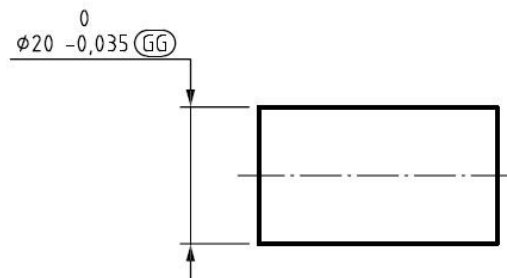
$$d = \sqrt{\frac{4V}{\pi \cdot L}},$$

Rovnice 3: Vztah pro výpočet rozměru z objemu [10]

kde V je objem skutečné válcové součásti a L je vzdálenost čelních ploch součásti kolmých k ose součásti. [10]

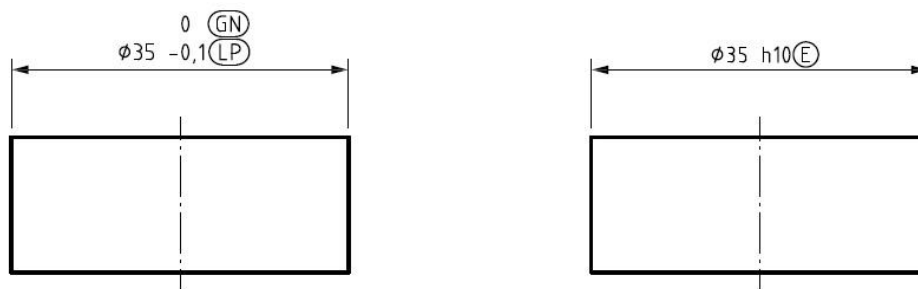
Výše zmíněné metody přiřazení prvků ideálních tvarů prvkům skutečných součástí mohou výrazně ovlivnit hodnotu stanoveného globálního rozměru. Cílem užití jednotlivých metod přiřazení je přiřadit skutečným prvkům součástí takový ideální prvek, který by vyhodnocovaný prvek nejlépe nahradil vzhledem k funkci součásti. Ve výchozím nastavení systému ISO GPS jsou délkové rozměry vyhodnocovány pomocí rozměru mezi dvěma body. Rozměr mezi dvěma body je možné chápat jako vzdálenost dvou protějších bodů z povrchu součásti, které byly získány měřením v jeden okamžik. Je-li nutné použít jiné kritérium k vyhodnocení konkrétních délkových rozměrů, musí být toto kritérium indikováno na výkrese uvedením značky modifikátoru specifikace za patřičný vyhodnocovaný rozměr. Pokud je nutné, aby byly všechny délkové rozměry vyhodnocovány jinou metodou než metodou rozměru mezi dvěma body, je nutné uvést indikátor příslušné metody v blízkosti razítka výkresu.

Obrázek 7 ukazuje, jak může vypadat indikování konkrétní metody vyhodnocení délkového rozměru. V tomto případě se jedná o přiřazení pomocí Gaussovy metody nejmenších čtverců. [10]



Obrázek 7: Indikace operátoru specifikace Gaussovy metody vyhodnocení [10]

Ve strojírenské praxi lze velmi často narazit na sestavy součástí typu díra a hřídel. Skrze volbu vhodného způsobu definování patřičných metod přiřazení je možné zajistit smontovatelnost takové soustavy. Je-li tolerovaná součást typu hřídel, omezí se horní mezní rozměr předepsáním metody vyhodnocení pomocí minimálního opsaného prvku. V případě součásti typu díra, se dolní mezní rozměr omezí předepsáním metody vyhodnocení pomocí metody maximálního vepsaného prvku. Druhý z mezních rozměrů je pro oba typy součástí stanoven přiřazením rozměru mezi dvěma body. Tyto dvojice operátorů specifikace lze nahradit jedním, a sice operátorem specifikace **požadavku obálky**. Příklad rozdílných indikací ekvivalentních požadavků je uveden níže na obrázku. [10]



Obrázek 8: Indikace požadavku obálky [10]

Systém ISO GPS dále definuje indikátory, s jejichž pomocí je možné specifikovat délkové rozměry pouze pro části prvků součástí. Specifikovány mohou být stejně tak pouze určité průřezy. Zahrnutý jsou také indikátory uvažující změny délkových rozměrů před a po tepelném zpracování. [10]

Chyba! Nenalezen zdroj odkazů. uvádí jednotlivé značky modifikátorů specifikace élkových rozměrů.

Tabulka 1: Značky modifikátorů specifikace délkových rozměrů [10]

Modifikátor	Popis
Ⓐ	Rozměr mezi dvěma body
Ⓑ	Místní rozměr definovaný koulí
Ⓒ	Vyhodnocení metodou nejmenších čtverců
Ⓓ	Vyhodnocení metodou největšího vepsaného prvku
Ⓔ	Vyhodnocení metodou nejmenšího opsaného prvku
Ⓕ	Vyhodnocení Čebyševovou metodou
Ⓖ	Rozměr z obvodu (vypočítaný rozměr)
Ⓗ	Rozměr z plochy (vypočítaný rozměr)
Ⓙ	Rozměr z objemu (vypočítaný rozměr)
Ⓚ	Maximální rozměr
Ⓛ	Minimální rozměr
Ⓜ	Průměrný rozměr
Ⓝ	Střední rozměr
Ⓟ	Střední rozsah rozměru
Ⓡ	Rozsah rozměrů
Ⓢ	Standardní odchylka rozměrů

3.2.2 Úhlové rozměry

Další ze základních rozměrových charakteristik, které slouží k definování velikosti a tvaru součásti, je úhlový rozměr. Úhlový rozměr je chápán jako úhel, který svírá kužel, nebo jako úhel svíraný dvěma mimoběžnými přímkami v rovině, případně dvěma nerovnoběžnými rovinami v prostoru. Úhlové rozměry mohou být, stejně jako lineární rozměry, rozděleny na místní (lokální) a celkové (globální). [12]

Podobně jako u rozměrů délkových, i u úhlových rozměrů se pro stanovení globálních rozměrů prvků využívají různé aproximační metody (metody vyhodnocení) jejichž účelem je nahrazení nedokonalých prvků skutečných součástí prvky ideálními. Prostorové úhly lze vyhodnocovat buď z hlediska celkového, kdy se vyhodnocuje například úhel, který svírají dvě roviny, nebo na základě dvou vybraných přímek, jimiž se nahradí prostorové elementy, které specifikovaný úhlový rozměr svírají. Ať už se jedná o první či druhé hledisko, využívají se metody přiřazení dle Čebyševa nebo dle Gausse. Ve výchozím nastavení slouží jako metoda přiřazení minimax Čebyševova metoda, která vyhodnocuje prvek nahrazený dvěma přímkami. **Tabulka 2** obsahuje všechny definované značky modifikátorů specifikace úhlových rozměrů. [12]

Tabulka 2: Značky modifikátorů specifikace úhlových rozměrů [12]

Modifikátor	Popis
Ⓒ	Úhel svíraný dvěma přímkami vyhodnocen Čebyševovou metodou
Ⓓ	Úhel svíraný dvěma přímkami vyhodnocen Gaussovou metodou
Ⓔ	Celkový úhlový rozměr vyhodnocen Gaussovou metodou
Ⓕ	Celkový úhlový rozměr vyhodnocen Čebyševovou metodou
Ⓗ	Maximální úhlový rozměr
Ⓖ	Minimální úhlový rozměr
Ⓙ	Průměrný úhlový rozměr
Ⓜ	Střední úhlový rozměr
Ⓝ	Střední rozsah úhlového rozměru
Ⓡ	Rozsah úhlových rozměrů
Ⓢ	Standardní odchylka úhlových rozměrů

3.2.3 Úchyly netolerovaných délkových a úhlových rozměrů

Ne všechny délkové ani úhlové rozměry mají na výkrese explicitně předepsány toleranční meze. Neznámá to, že by se jednalo o dokonale přesné rozměry, ba ani to, že jsou toleranční pole těchto rozměrů nekonečně široká. Takovéto rozměry zkrátka neovlivňují funkci součásti v takové míře, aby bylo nutné konkrétně specifikovat jejich mezní rozměry. Pro tento případ zavádí systém ISO GPS normu ČSN ISO 2768-1, která stanovuje obecné třídy přesnosti, dle nichž lze jednotlivým rozměrům na základě jejich velikosti přiřadit doporučené úchyly. Řídí-li se výkresová dokumentace touto normou, je nutné ji uvést v okolí razítka daného výkresu. Tabulky stanovených úchylek pro jednotlivá rozmezí velikostí délkových a úhlových rozměrů jsou k vidění níže.

Tabulka 3: Úchyly netolerovaných délkových rozměrů [13]

Třída přesnosti		Mezní úchyly pro základní rozsah rozměrů							
Označení	Název	0,5 ¹⁾ do 3	přes 3 do 6	přes 6 do 30	přes 30 do 120	přes 120 do 400	přes 400 do 1000	přes 1000 do 2000	přes 2000 do 4000
f	jemná	±0,05	±0,05	±0,1	±0,15	±0,2	±0,3	±0,5	–
m	střední	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2
c	hrubá	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2	±3	±4
v	velmi hrubá	–	±0,5	±1	±1,5	±2,5	±4	±6	±8

¹⁾ U jmenovitého rozměru pod 0,5 mm se mezní úchyly předepíše za odpovídající jmenovitý rozměr.

Tabulka 4: Úchyly netolerovaných úhlových rozměrů [13]

Třída přesnosti		Mezní úchyly úhlu pro rozsah délek jeho kratšího ramene v mm				
Označení	Název	do 10	přes 10 do 50	přes 50 do 120	přes 120 do 400	přes 400
f	jemná	±1°	±0°30'	±0°20'	±0°10'	±0°5'
m	střední					
c	hrubá	±1°30'	±1°	±0°30'	±0°15'	±0°10'
v	velmi hrubá	±3°	±2°	±1°	±0°30'	±0°20'

3.3 Geometrické tolerance

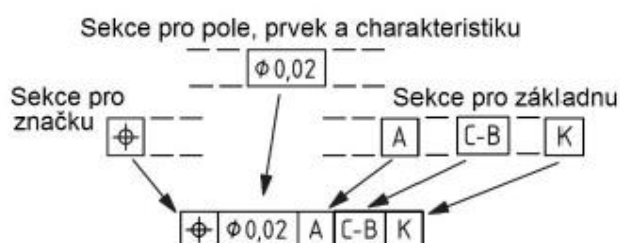
V předešlé kapitole byla nastíněna problematika rozměrových tolerancí. Jak již napovídá název, popisovaná problematika se zabývá pouze rozměry délkovými a úhlovými. Ve skutečnosti to však nejsou jediné vlastnosti součástí, na které jsou kladeny určité požadavky. Dalším důležitým parametrem je samotný tvar součásti, který se často velmi obtížně zachycuje pouze pomocí rozměrových tolerancí, v některých případech je to dokonce zcela nemožné. Právě za účelem zachycení požadavků na výkrese týkajících se nejen tvaru součásti, ale i vzájemné orientace a umístění jednotlivých prvků součásti, se zavádí tolerance geometrické. Synonymem pro pojem geometrické tolerance (GT) je pojem geometrické specifikace.

Podobně jako u rozměrových tolerancí se při předepisování geometrických tolerancí vychází především z funkčních požadavků, které jsou kladeny na součást. Vhodným výběrem geometrických tolerancí lze jít zároveň vstřícně dostupným technologickým možnostem výroby a optimálnímu procesu kontroly tvaru součástí, který by poskytovaly směřodatné výsledky, a byl zároveň produktivní. Nicméně musí být respektován princip duality, který říká, že geometrické specifikace slouží výhradně k popisu vlastností součásti a měly by být přímo ovlivněny způsobem jejich výroby ani následné kontroly. [14]

Předepsáním GT na výkrese je skutečnému tolerovanému prvku přiřazen prvek referenční, v jehož tolerančním poli musí skutečný tolerovaný prvek ležet, aby mohl být označen za vyhovující. Pod pojmem prvek, nebo také element, je chápána specifická část součásti, například bod, čára nebo povrch. Tolerovaným prvkem může být stejně tak i prvek odvozený, například osa válce nebo osa, či rovina symetrie. Toleranční pole lze chápat jako oblast v rovině nebo prostoru, kde se musí skutečný povrch tolerovaného prvku nacházet v celé své délce, aby mohl být označen jako vyhovující. Standardně je toleranční pole rozmístěno symetricky kolem přiřazeného ideálního prvku. V závislosti na specifikovaném prvku a konkrétní zvolené geometrické toleranci mohou mít toleranční pole různé tvary. Šířka tolerančního pole odpovídá předepsané hodnotě tolerance. Značení a význam jednotlivých GT, včetně problematiky filtrování a metod vyhodnocení, bude blíže popsáno v této kapitole. [14]

3.3.1 Značky geometrických charakteristik

Na výkrese jsou požadované geometrické charakteristiky součásti, zachyceny prostřednictvím indikátorů geometrických tolerancí, které jsou přiřazeny konkrétnímu tolerovanému prvku pomocí odkazové čáry. Indikátor tolerance, někdy také označován jako „rámeček tolerance“, se skládá ze tří základních částí, a sice z části pro značku tolerance, z části pro pole, prvek a charakteristiku a z části pro základnu (vizte obrázek níže). [14]



Obrázek 9: Tři sekce indikátoru geometrické tolerance [14]

Jak název napovídá, do části pro značku se předepisuje značka konkrétní geometrické tolerance. **Tabulka 5** obsahuje značky geometrických charakteristik, rozdělené do skupin podle toho, jaký druh geometrické specifikace vyjadřují. Tabulka rovněž uvádí, které geometrické specifikace vyžadují definování základny. [14]

Tabulka 5: Značky geometrických charakteristik [14]

Specifikace	Charakteristika	Značka	Nutná základna
Tvar	Přímost		ne
	Rovinnost		ne
	Kruhovitost		ne
	Válcovitost		ne
	Profil čáry		ne
	Profil povrchu		ne
Orientace	Rovnoběžnost		ano
	Kolmost		ano
	Sklon		ano
	Profil čáry		ano
	Profil povrchu		ano
Umístění	Poloha		ne ano
	Soustřednost (středů)		ano
	Souosost (medián čar)		ano
	Souměrnost		ano
	Profil čáry		ano
	Profil povrchu		ano
Házení	Obvodové házení		ano
	Celkové házení		ano

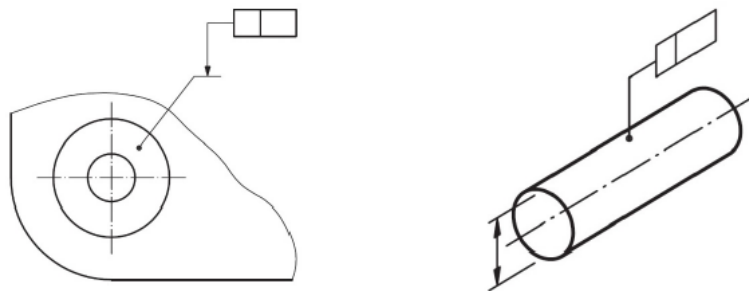
Do druhé části indikátoru geometrické tolerance, konkrétně do sekce pro pole, prvek a charakteristiku se předepisuje tvar tolerančního pole a jeho rozsah. Do tohoto pole se také předepisují elementy značící aplikaci kombinovaného pole, elementy charakterizující posun a omezení tolerančního pole, nebo aplikace příslušných filtrů. Třetí, poslední sekce indikátoru, je určena pro uvedení základny příslušné geometrické tolerance, je-li pro její správnou interpretaci vyžadována. [14]

Odkazová čára, jež spojuje indikátor tolerance s tolerovaným prvkem součásti, je nejčastěji zakončena šipkou, jak ukazuje **Obrázek 10**. [14]



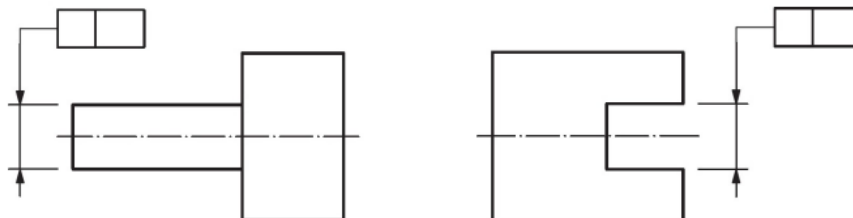
Obrázek 10: Odkazová čára zakončená šipkou [14]

Na následujícím obrázku lze vidět případ, kdy je specifikovaným prvkem plocha v rovině či prostoru, a odkazová čára musí být zakončena tečkou. [14]



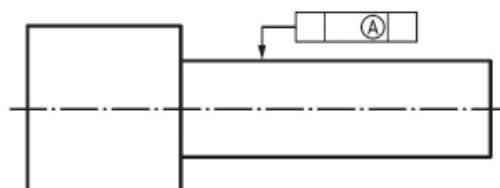
Obrázek 11: Odkazová čára zakončená tečkou [14]

Pro specifikaci odvozených prvků, kterými jsou například osy rotačních součástí nebo osy symetrie, je nutné, aby byla odkazová čára kolmá k prodloužení kótovací čáry rozměrového prvku. V praxi se tomuto druhu značení říká „značení proti kótě“. Konkrétní příklady tolerování odvozených prvků součástí jsou uvedeny na obrázku níže. [14]



Obrázek 12: Indikace specifikace odvozených prvků [14]

Geometrickou toleranci lze rovněž vztáhnout na odvozený prvek rotační součásti umístěním modifikátoru medián prvku do sekce pro pole, prvek a charakteristiku, jak je možné vidět na následujícím obrázku. [14]



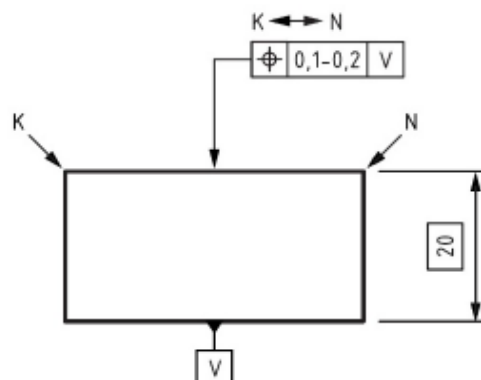
Obrázek 13: Indikace specifikace medián prvku [14]

V mnoha případech je v rámci geometrického tolerování nutné stanovit naprosto přesně rozměr prvku, jeho umístění nebo jeho orientaci. K zachycení této vlastnosti prvku slouží **teoreticky exaktní rozměry**, které se zkráceně označují jako TED rozměry. Již z podstaty těchto rozměrů vyplývá, že není možné tyto rozměry tolerovat, neboť jsou považovány za teoreticky přesné. Rozlišují se TED rozměry implicitní a explicitní. Implicitní rozměry na výkrese nejsou přímo uváděny. Mohou to být například rozměry definující pravouhlost, nebo rovnoběžnost jednotlivých prvků součástí. Explicitní rozměr lze na výkrese poznat tak, že je přímo kótován a zároveň vepsán do obdélníkového rámečku. Škála využití TED rozměrů je velmi široká, a příklady jejich konkrétního použití budou k vidění na řadě příkladů napříč dalšími kapitolami této práce. [14]

Jak bylo již zmíněno v úvodu této kapitoly, **toleranční pole** mohou mít různé tvary. Je proto nutné dokázat v rámci výkresu správně vyjádřit, jak má být toleranční pole příslušné geometrické tolerance chápáno. Tvar tolerančního pole je zachycen přímo v indikátoru tolerance, konkrétně v sekci pro pole. [14]

Je-li tolerovaným prvkem povrch, tvarem tolerančního pole je prostor mezi dvěma ekvidistantními povrchy, jejichž vzdálenost odpovídá uvedené hodnotě tolerance. Takové toleranční pole platí například pro geometrickou toleranci profilu povrchu. V případě, kdy je tolerovaným prvkem čára, odpovídá toleranční pole prostoru mezi dvěma ekvidistantními čarami v průsečné rovině tolerované čáry, jejichž vzájemná vzdálenost odpovídá předepsané hodnotě tolerance. S takovým tolerančním polem se lze setkat u geometrické tolerance přímosti. Stojí-li před hodnotou tolerance navíc značka průměru, bude mít toleranční pole tvar kruhu, mezikruží, válce, nebo prostoru mezi dvěma sousými válci. Existuje i toleranční pole kulového charakteru a vyjádří se přidáním písmene S a značky průměru před předepsanou hodnotou tolerance. [14]

Mohou nastat i takové případy, kdy není šířka tolerančního pole konstantní po celé délce tolerovaného prvku. Požadavky na tvarovou přesnost nefunkčních částí tolerovaných ploch se mohou snižovat a ulevovat tak náročnosti výrobního procesu. V takovém případě je toleranční pole nazýváno **proměnným tolerančním polem** a má pevně daná omezení. Toleranční pole se po délce tolerovaného prvku musí měnit lineárně v pevně daném rozmezí, určeném krajními hodnotami, kterých šířka tolerančního pole nabývá. Příklad takového případu je k vidění níže na obrázku. [14]



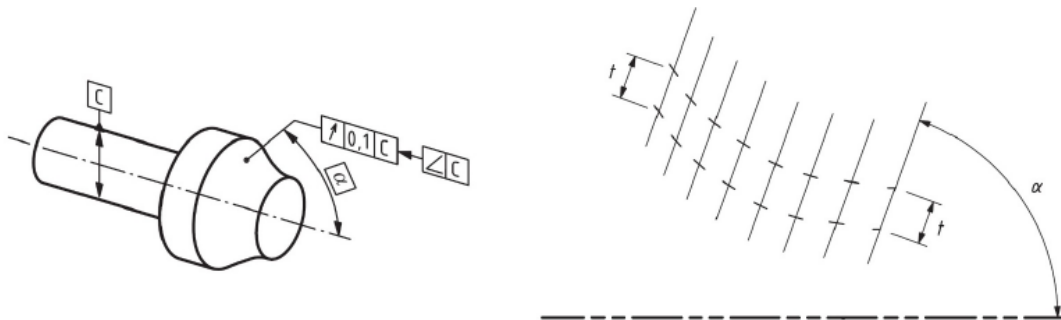
Obrázek 14: Indikace proměnného tolerančního pole [14]

Někdy potřebuje konstruktér tolerovat pouze určitou část vybraného prvku. I takový požadavek lze zachytit na výkresu, a sice oddělením hodnoty tolerance a tolerovaného místa na součásti šikmým lomítkem. Názorný příklad zápisu tolerance pro přímkové, rovinné a válcové prvky zobrazuje **Obrázek 15**. [14]



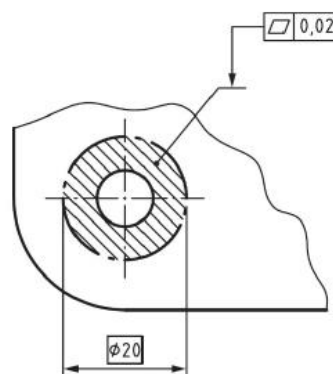
Obrázek 15: Indikátory specifikace omezeného tolerančního pole [14]

Orientace tolerančních polí je ve výchozím nastavení uvažována jako kolmá ke specifikované geometrii tolerované součásti. U součástí složitějších – například obecných rotačních – tvarů může být žádoucí, aby bylo toleranční pole orientováno ve směru daného úhlu. Přenesení takového požadavku do výkresové dokumentace umožňují **indikátory směřových prvků**. Orientace tolerančního pole je stanoven od definované základny. Je-li směr tolerančního pole kolmý na povrch tolerovaného prvku, použije se v indikátoru směřového prvku značka házení. Pro toleranční pole svírající se specifikovaným povrchem tolerované součásti úhel 0° nebo 90° se v indikátoru uvádí značka kolmosti nebo rovnoběžnosti (v závislosti na orientaci zvolené základny). Značka sklonu se do indikátoru uvádí, svírá-li toleranční pole se specifikovaným povrchem tolerované součásti jiný než pravý úhel. Takto definovaný úhel musí být uveden jako TED rozměr. Na následujícím obrázku je vyobrazen příklad, jak lze interpretovat sklon tolerančního pole o úhel α vzhledem k základně (ose) tolerované součásti. [14]



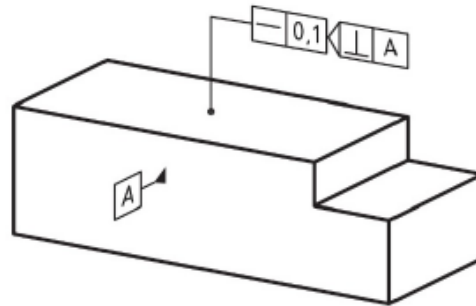
Obrázek 16: Použití indikátoru směřového prvku [14]

K vyjádření požadavku na konkrétní část plochy povrchu součásti slouží **indikátor omezené plochy**. Způsobů, jak vymežit specifikovanou plochu je mnoho, například vymezením hraničních úseček, definováním krajních bodů plochy, nebo stanovením průměrů omezujících šířku mezikruží. Pro všechny způsoby vymezení omezené plochy je třeba užít TED rozměry. Příklad indikace omezené plochy je k vidění níže. [14]



Obrázek 17: Použití indikátoru omezené plochy [14]

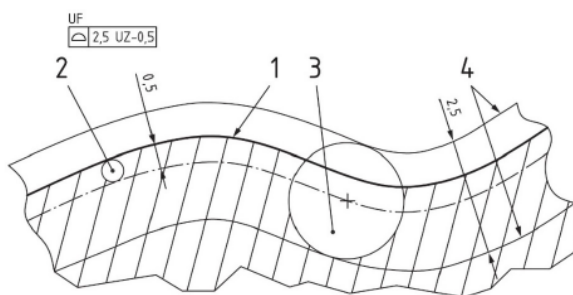
Dále existují indikátory, které umožňují specifikovat vlastnosti konkrétní čáry, která vznikne řezem integrálního (jednotného) povrchu součásti s takzvanou průsečnou rovinou. Tyto nástroje se nazývají **indikátory průsečné roviny**. Průsečná rovina je zpravidla kolmá, rovnoběžná, úhlově natočená, nebo souměrná vůči jiné rovině, která bývá definována jako základna. Užívá se například pro jednoznačné definování směru extrakce bodů při měření součásti. Způsob tolerování čar vznikajících řezem průsečnou rovinou, která je kolmá na předepsanou základní rovinu, znázorňuje obrázek níže uvedený. [14]



Obrázek 18: Použití indikátoru průsečné roviny [14]

Na podobném principu fungují **indikátory orientační roviny**. S jejich pomocí je možné definovat orientaci rovin omezujících vlastnosti tolerančních polí medián prvků (například os válců nebo středů kružnic). [14]

Jak již bylo zmíněno výše, toleranční pole předepsaných geometrických tolerancí jsou kolem ideálního tolerovaného prvku umístěna souměrně. Nicméně, mohou nastat případy, kdy je nutné, aby bylo toleranční pole vůči ideálnímu prvku posunuto jedním, nebo druhým směrem. Takový případ může nastat například tehdy, kdy je potřeba definovat toleranční pole pro povrch, který bude následně obráběn nebo na něm bude vytvořen návar. Je-li potřeba posunout toleranční pole geometrické tolerance směrem z povrchu ven, zapíše se za hodnotu tolerance značka UZ a za ní následně kladná hodnota posunu tolerančního pole. Pokud je nutné definovat posun tolerančního pole směrem dovnitř od povrchu součásti, hodnota posunu tolerančního pole bude mít záporné znaménko. Pro lepší představu je níže na obrázku znázorněn příklad indikace posunutého tolerančního pole směrem dovnitř tolerovaného povrchu součásti. [14]

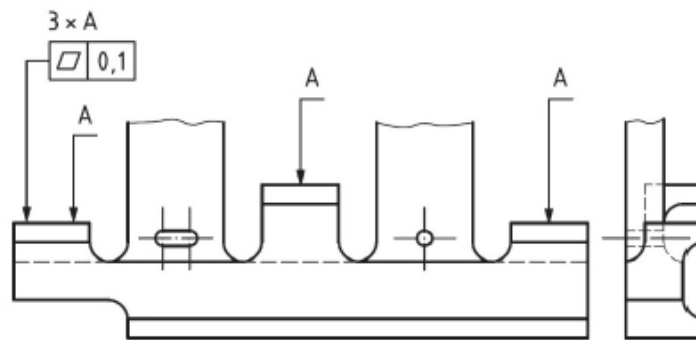


Legenda

- 1 jednotlivý komplexní teoretický exaktní prvek (TEF) v tomto příkladu je materiál pod tímto prvkem
- 2 jedna z nekonečného počtu koulí stanovujících posunutý teoretický prvek, tj. referenční prvek
- 3 jedna z nekonečného počtu koulí stanovujících toleranční pole podél referenčního prvku
- 4 meze tolerančního pole

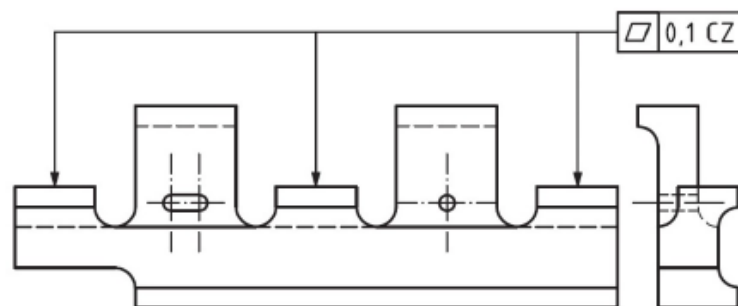
Obrázek 19: Indikace posunutého tolerančního pole [14]

Vyskytuje-li se na součásti několik podobných prvků, které je potřeba tolerovat, je možné předepsat toleranci pouze pro jeden prvek a dále znázornit její opakování na příslušných prvcích součásti. Příklad indikace zobrazuje **Obrázek 20**. [14]



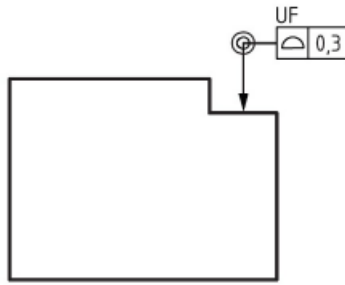
Obrázek 20: Indikace specifikace uplatněné na několik prvků součásti [14]

Je však potřeba pamatovat na to, že se bude každý prvek vyhodnocovat nezávisle na ostatních prvcích, jinak řečeno bude jeho skutečný tvar vyhodnocován v rámci samostatného tolerančního pole. Existují však případy, kdy se naopak vyžaduje, aby byly všechny vybrané prvky hodnoceny v rámci jednoho společného tolerančního pole, neboť je to nutné pro správnou funkci celé součásti. Konkrétně mohou prvky tvořit jednu opěrnou plochu, jako je znázorněno na obrázku níže. Pro požadavek vyhodnocení tolerance v rámci společného tolerančního pole je nutné uvést za hodnotu tolerance symbol CZ. [14]



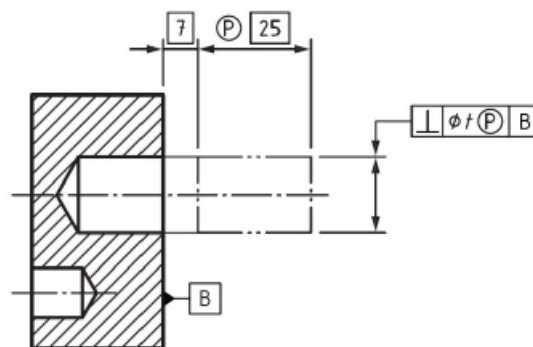
Obrázek 21: Indikace společného tolerančního pole [14]

Dalšími z palety indikátorů, které může konstruktér využít ke specifikaci požadavku vztahujícímu se k několika prvkům tolerované součásti najednou, jsou indikátory nazývající se „**všude kolem**“ a „**všude**“. Použije-li konstruktér na výkrese indikátor „všude kolem“, chce tím vyjádřit, že má být daná geometrická specifikace platná pro všechny obrysy příčných průřezů nebo pro všechny prvky znázorněné uzavřeným obrysem tolerovaného prvku. V případě, že má geometrická specifikace platit pro všechny uzavřené povrchy součásti, přidá k ní konstruktér indikátor „všude“. Oba zmíněné indikátory se umísťují na průsečík odkazové čáry a praporek indikátoru míněné geometrické specifikace. Konkrétní příklad, jak může vypadat užití indikátoru „všude“ na výkrese, naznačuje **Obrázek 22**. [14]



Obrázek 22: Použití indikátoru „všude“ [14]

Systém ISO GPS nabízí možnost tolerovat i takzvané **promítnuté prvky**. Promítnuté prvky lze chápat jako virtuální prvky, které nejsou skutečnou součástí prvku, k němuž se indikace vztahuje. Nicméně jsou tyto promítnuté prvky ze skutečných prvků součásti odvozeny a lze na ně klást nějaké požadavky. Konkrétním příkladem může být situace, kdy chce konstruktér zajistit bezproblémovou montáž šroubového spoje. Ze skutečného prvku součásti zobrazené na výkrese, v tomto případě díry, je odvozen promítnutý prvek, v tomto případě šroub, a je na něj dále kladena taková specifikace, aby byla montáž šroubu do díry vždy zajištěna. Hranice promítnutého prvku je na výkrese indikována tenkou čerchovanou čarou s dvěma tečkami a je délkou vymezena pomocí TED rozměru. Pro znázornění, že se jedná o promítnutý prvek, se za velikost tolerančního pole dané geometrické charakteristiky, stejně tak za délkové vymezení specifikovaného prvku, přidává příslušný modifikátor. Níže na obrázku lze vidět, jak může indikace promítnutého prvku vypadat na výkrese. V tomto konkrétním případě je samotný promítnutý prvek posunutý vůči skutečnému prvku, ze kterého byl odvozen. Tento posun může reprezentovat například tloušťku těsnění, podložky, nebo jiného vymežujícího elementu, který by promítnutý prvek (šroub) od skutečného prvku (díry) odděloval. [14]

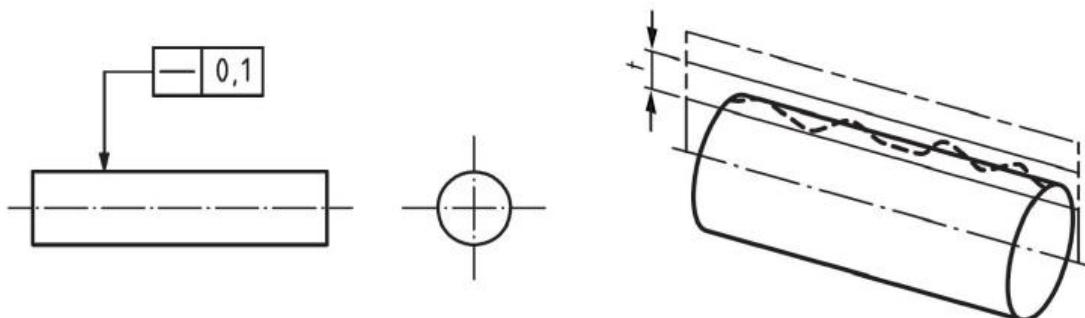


Obrázek 23: Indikace promítnutého prvku [14]

3.3.2 Geometrické tolerance tvaru

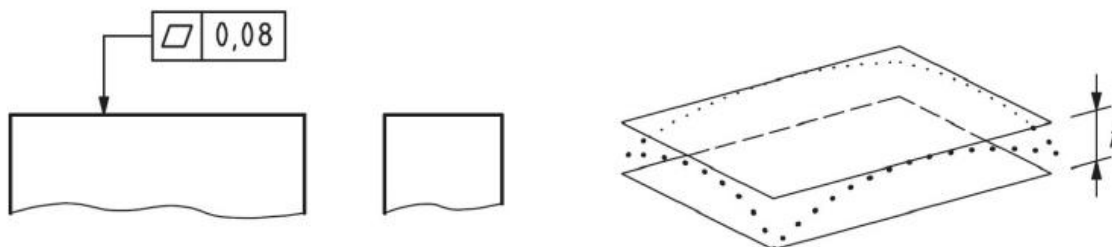
Pro vyjádření požadavku na tvar součásti, který by s jistotou zajistil její správnou funkci, slouží geometrické specifikace tvaru. Geometrické specifikace tvaru se vyhodnocují nezávisle na umístění, nebo orientaci tolerovaných prvků vůči ostatním prvkům součásti, a proto nepotřebují definovat základny, které by nějakým způsobem omezovaly jejich toleranční pole. Do skupiny geometrických specifikací tvaru patří tolerance přímosti, rovinnosti, kruhovitosti, válcovitosti a specifikace profilu čáry a profilu povrchu. [14]

Tolerance přímosti se využívá ke specifikaci přímosti čar, které mohou být součástí celých integrálních povrchů, například rovin nebo plášťů válců. Při specifikování přímosti rovin se v některých případech značka geometrické tolerance přímosti doplňuje o indikátor průsečné roviny, který explicitně určuje směr, ve kterém má být přímost vyhodnocována. Toleranční pole specifikace přímosti je vymezeno dvěma rovnoběžnými čarami v rovině, které jsou od sebe vzdáleny o předepsanou hodnotu tolerance. Stejně tak může být před hodnotu tolerance přidána značka průměru a toleranční pole tím dostává tvar válce o průměru, který odpovídá velikosti předepsané hodnoty tolerance. Dále na obrázku je možné vidět, jak je geometrická tolerance přímosti indikovaná na výkrese a jak je graficky interpretováno její toleranční pole. [14]



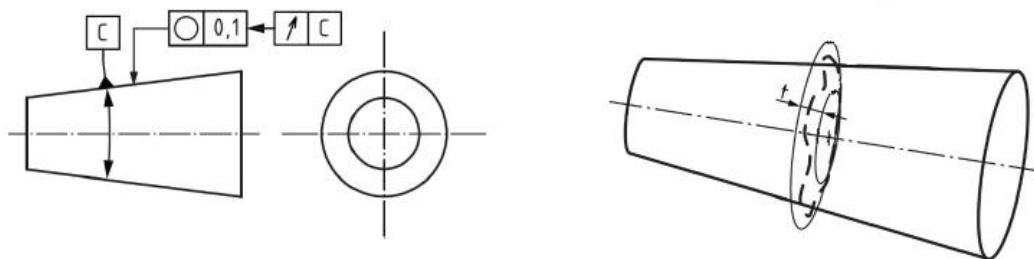
Obrázek 24: Indikace tolerance přímosti [14]

Specifikace rovinnosti se vztahuje výhradně k tolerování tvaru plošných rovinných prvků součástí. Toleranční pole je vymezeno dvěma rovnoběžnými rovinami, jejichž vzájemná vzdálenost odpovídá předepsané velikosti tolerance. Příklad indikace tolerance rovnoběžnosti na výkrese a grafické znázornění jejího tolerančního pole je možno vidět na následujícím obrázku. [14]



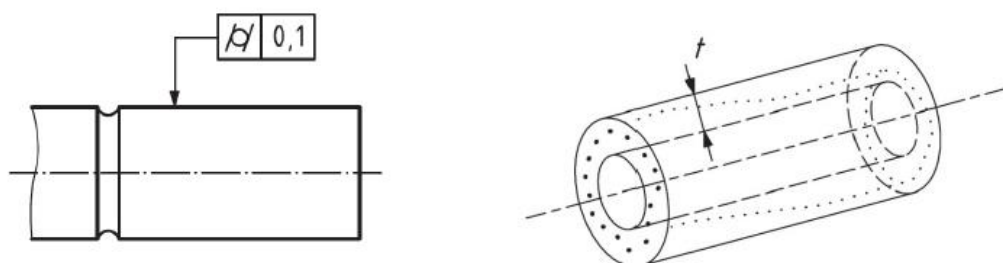
Obrázek 25: Indikace tolerance rovinnosti [14]

Tolerance kruhovitosti slouží ke specifikaci kruhových křivek, které vzniknou řezem povrchu rotační součásti. Je-li tolerovaným prvkem válec, příčný průřez, ve kterém kruhová křivka leží, je kolmý na jeho osu. Pokud je kruhovitosť vyhodnocována na kulovitých prvcích součásti, prochází rovina řezu skrz střed kulového prvku. U jiných než válcových a kulových rotačních součástí je nutné definovat orientaci tolerančního pole pomocí indikátoru směrového prvku. Toleranční pole specifikace kruhovitosti je vymezeno dvěma koplanárními soustřednými kružnicemi. Tvarem odpovídá toleranční pole mezikružím, jehož šířka je rovna rozdílu poloměrů vymežujících kružnic, a předepisuje se do pole pro hodnotu tolerance. Příklad tolerování kruhovitosti na kuželu je ukazuje **Obrázek 26**. Jak již bylo zmíněno, pro jednoznačné stanovení orientace tolerančního pole je použit indikátor směrového prvku. [14]



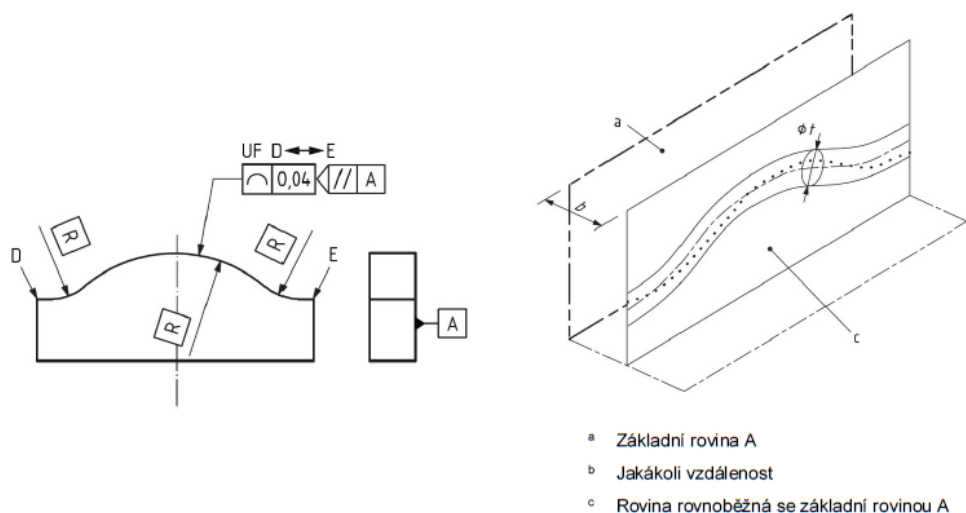
Obrázek 26: Indikace tolerance kruhovitosti [14]

Toleranci válcovitosti si lze představit jako toleranci kruhovitosti vztaženou na celou délku specifikovaného povrchu tolerované součásti. Tolerovanými prvky mohou být pouze prvky válcového charakteru. Toleranční pole této specifikace je vymezeno dvěma souosými válci, jejichž rozdíl poloměrů odpovídá předepsané hodnotě tolerance. Níže uvedený obrázek slouží jako příklad indikace tolerance válcovitosti na výkrese a jako grafické znázornění tolerančního pole. [14]



Obrázek 27: Indikace tolerance válcovitosti [14]

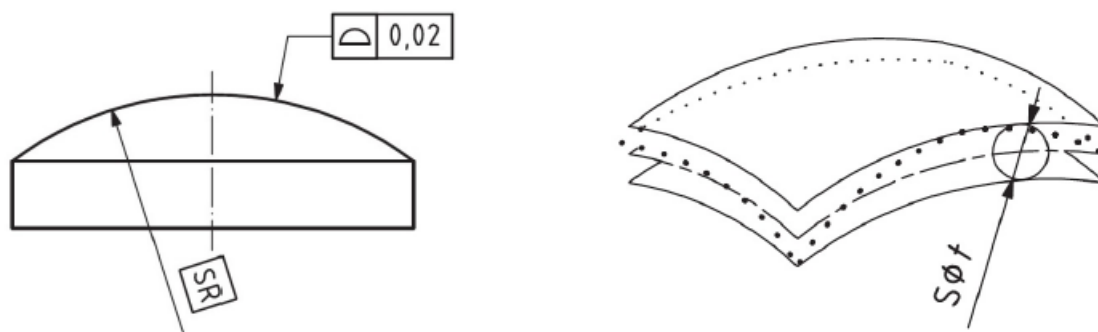
Specifikaci profilu čáry, jež se nevztahuje k žádné základně, je možné použít k tolerování všech prvků lineárního charakteru. Toleranční pole této specifikace si lze představit jako prostor mezi dvěma ekvidistantními čarami, které jsou od sebe vzájemně vzdáleny o hodnotu předepsané tolerance. Podobně jako u specifikování přímosti, i v tomto případě lze využít indikátoru průsečné roviny pro jednoznačné definování orientace tolerančního pole jednotlivých specifikovaných křivek. **Obrázek 28** uvádí příklad indikace této GT na výkrese spolu se znázorněním tolerančního pole dané specifikace. Na obrázku je možné vidět, že je toleranční pole umístěno symetricky kolem teoreticky exaktního prvku definovaného TED rozměry. [14]



Obrázek 28: Indikace tolerance profilu čáry [14]

Specifikace profilu čáry nemusí sloužit pouze ke specifikaci tvaru, ale také ke specifikaci orientace a umístění tolerovaného prvku. Je-li specifikace vztažena k základně nebo soustavě základen, interpretace tolerančního pole specifikace je téměř stejná, ale navíc uvažuje jeho orientaci a umístění vůči zvoleným základnám. [14]

Posledním zástupcem skupiny geometrických tolerancí tvaru je tolerance **profilu povrchu**. Tolerovaným prvkem může být jakákoli tvarová plocha. Toleranční pole je v případě této specifikace vymezeno dvěma ekvidistantními povrchy, které jsou od sebe vzdáleny o předepsanou hodnotu tolerance. Dále je uveden příklad indikace této tolerance na výkrese včetně znázornění jejího tolerančního pole. [14]



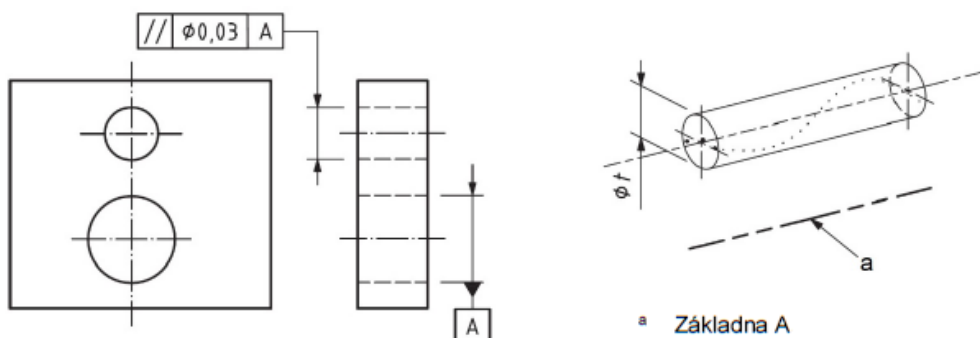
Obrázek 29: Indikace tolerance profilu povrchu [14]

Podobně jako tolerance profilu čáry, i tolerance profilu povrchu může být vztažena k základně nebo soustavě základen. Význam specifikace je zachován a navíc je obohacen o definici orientace a umístění tolerovaného prvku vzhledem ke zvoleným základnám. Lze tvrdit, že tolerance profilu povrchu, stejně tak jako tolerance profilu čáry náleží zároveň do skupin tolerancí tvaru, orientace i umístění. Záleží pouze na tom, zda je či není vybraná specifikace vztažena k základně, resp. soustavě základen. [14]

3.3.3 Geometrické tolerance orientace, umístění a házení

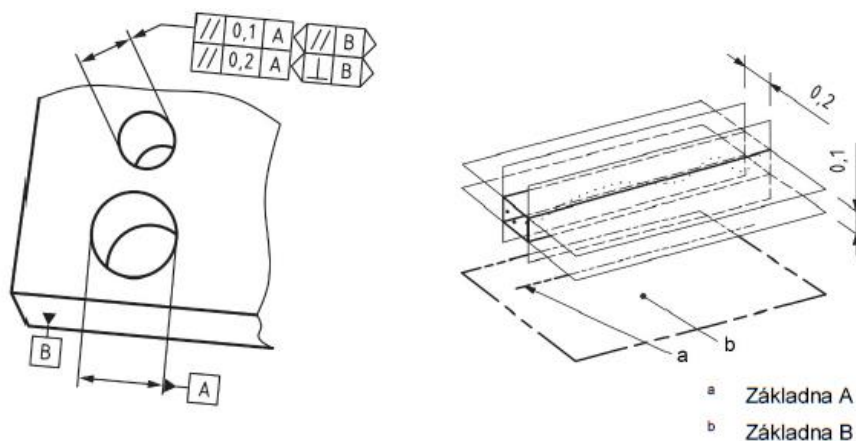
Je-li pro zajištění správné funkce součásti nezbytné, aby byly jednotlivé prvky součásti nějakým způsobem vzájemně orientovány a umístěny, má konstruktér možnost tyto požadavky přenést do výkresové dokumentace skrze geometrické tolerance orientace a umístění. U pohyblivých součástí, zejména těch, které během svého provozu vykonávají rotační pohyb, je nutné omezit míru házivosti. Tuto charakteristiku součásti je možné regulovat předepsáním geometrických tolerancí házení. Všechny výše zmíněné charakteristiky se vyhodnocují vůči jednomu, nebo celé skupině referenčních prvků, které jsou označeny jako základny. První představovanou skupinou geometrických tolerancí, je skupina tolerancí orientace. Patří do ní tolerance rovnoběžnosti, kolmosti, sklonu, profilu čáry a profilu povrchu. [14]

Tolerance rovnoběžnosti slouží ke specifikování rovnoběžné orientace lineárního nebo plošného prvku tolerované součásti vzhledem k definované základně. Základnou může být opět jakýkoli lineární nebo plošný prvek. Toleranční pole této GT je vymezeno dvěma rovnoběžnými rovinami, které jsou zároveň rovnoběžné se základní rovinou, a jsou od sebe vzdáleny o hodnotu předepsané tolerance. Předepíše-li se před hodnotu tolerance značka průměru, toleranční pole nabývá tvar válce, jehož průměr odpovídá dané hodnotě tolerance, a jehož osa leží v definované základní rovině. Příklad indikace válcového tolerančního pole lze vidět na obrázku níže. [14]



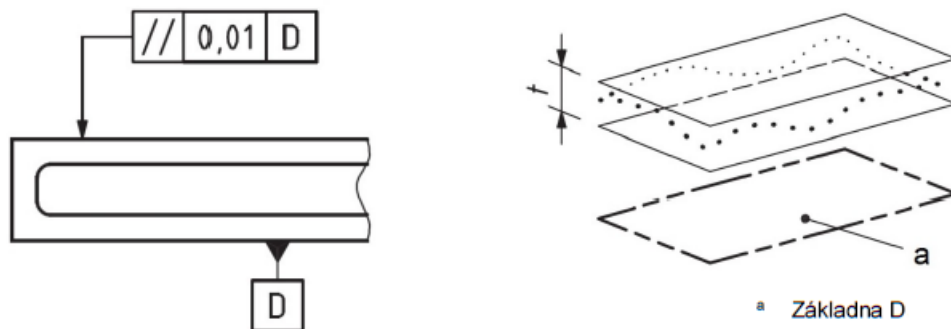
Obrázek 30: Indikace tolerance rovnoběžnosti lineárních prvků [14]

Vnímání orientace tolerovaných prvků lineárního charakteru může být často nejednoznačné, a proto je často nezbytné volit další doplňkové indikátory, jako jsou například indikátory orientační roviny nebo indikátory průsečné roviny. Ve dřívější praxi bylo zvykem používat k zajištění jednoznačnosti sekundární základny. Jako příklad situace, kdy je toleranční pole vymezeno pomocí dvou indikátorů orientační roviny, slouží **Obrázek 31**. [14]



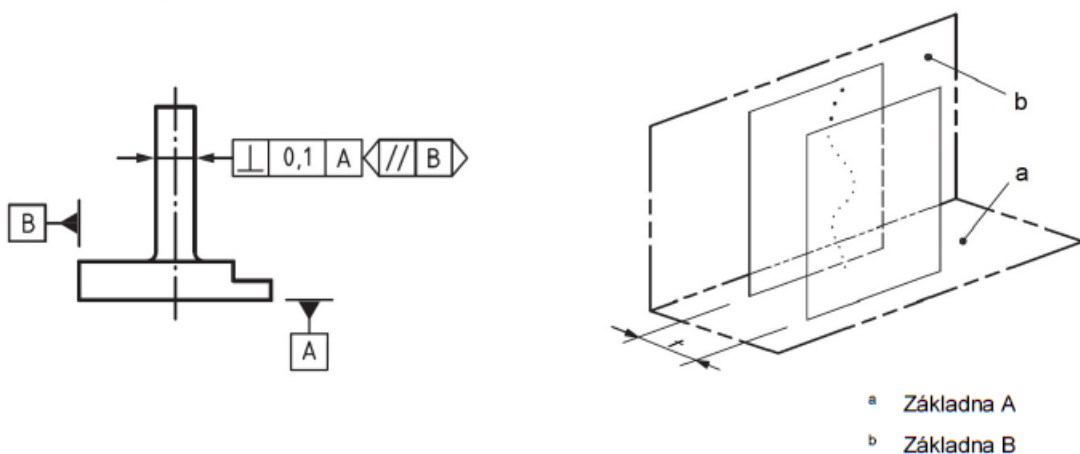
Obrázek 31: Omezení tolerančního pole pomocí indikátorů orientačních rovin [14]

Specifikace rovnoběžnosti rovinných prvků je snadněji interpretovatelná a nevyžaduje užívání doplňkových indikátorů. Příkladem může být situace na obrázku níže, kdy je orientace tolerančního pole definována základnou.

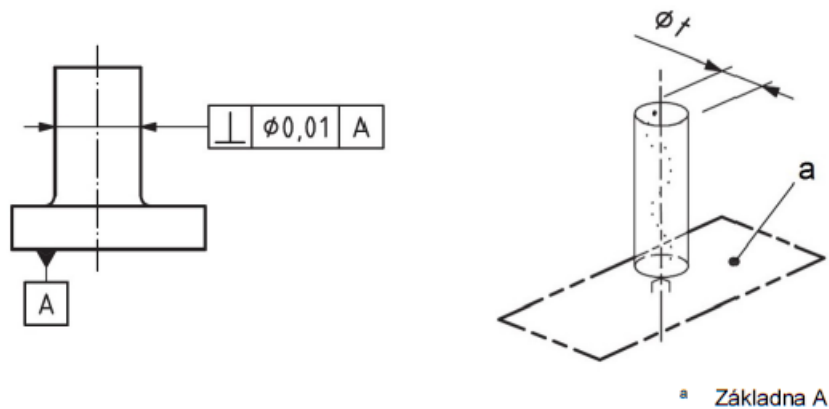


Obrázek 32: Indikace tolerance rovnoběžnosti rovinných prvků

Následující specifikací je **specifikace kolmosti**. Tato specifikace umožňuje tolerovat orientaci lineárních nebo plošných prvků vůči definované základně. Toleranční pole si lze představit jako prostor mezi dvěma rovnoběžnými rovinami, které jsou vzdálené od sebe o předepsanou hodnotu tolerance, a jsou zároveň na předepsanou základnu kolmé. Ke specifikování dalších rovin, které uzavírají neobsazené stupně volnosti tolerančních polí, se ve dřívější praxi užívaly sekundární, případně terciární základny. Stejně jako u tolerance rovnoběžnosti doporučuje norma namísto sekundárních a terciárních základen užívat pro definování orientace tolerančního pole indikátory orientační nebo průsečné roviny. Další podobnost s tolerancí rovnoběžnosti je možné nalézt při tolerování lineárních prvků pomocí válcového tolerančního pole, které je definováno předepsáním značky průměru před hodnotu tolerance. **Obrázek 33** a **Obrázek 34** ukazuje, jak se liší interpretace tolerančních polí pro různé způsoby indikace. V prvním případě je tolerovaný lineární prvek, v tomto případě medián čára (osa) válce, omezen dvěma rovnoběžnými rovinami, které jsou kolmé na základní rovinu a zároveň rovnoběžné s orientační rovinou. V druhém případě je tolerančním polem medián čáry válcového prvku válec, jehož osa je kolmá k předepsané základně. [14]

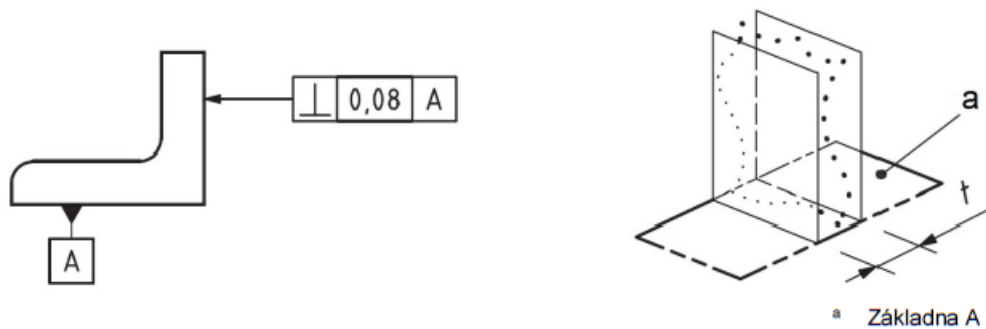


Obrázek 33: Vymezení tolerančního pole tolerance kolmosti pomocí indikátoru průsečné roviny [14]



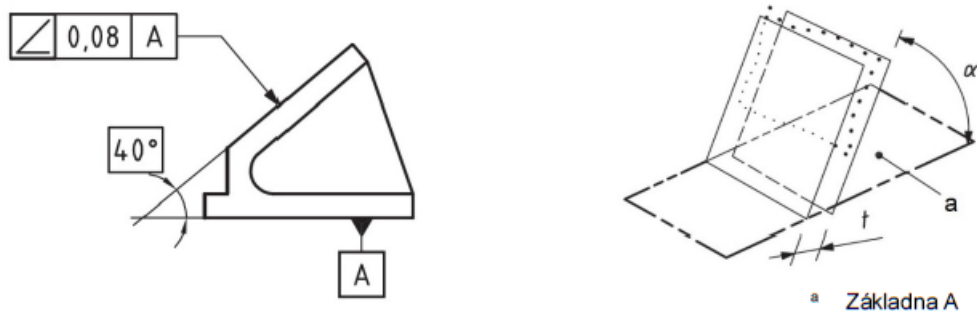
Obrázek 34: Vymezení tolerančního pole tolerance kolmosti pomocí základny [14]

V případě, kdy je tolerovaným prvkem plošný prvek, stačí k omezení stupňů volnosti jediná základna a interpretace tolerančního pole je více intuitivní. Příkladem je níže uvedený obrázek. [14]



Obrázek 35: Indikace tolerance kolmosti plošného prvku [14]

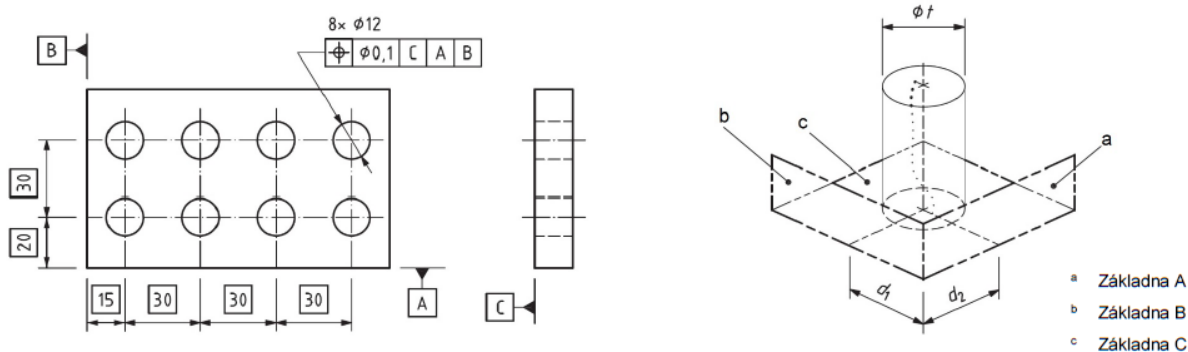
Pomocí **tolerance sklonu** mohou být specifikovány lineární a plošné prvky. Tato specifikace definuje sklon tolerovaného prvku vzhledem k jinému prvku označenému jako základna. Tolerance je svým významem i způsobem indikování na výkrese velmi podobná tolerancím rovnoběžnosti a kolmosti, s tím rozdílem, že může tolerovaný prvek svírat se základním prvkem libovolný úhel. Jelikož není tolerovaný sklon roven 0° nebo 90° , musí být stanoven explicitním TED rozměrem, kolem něhož je symetricky rozmístěno toleranční pole. Toleranční pole může být vymezeno dvěma rovnoběžnými rovinami, které jsou od sebe vzdáleny o předepsanou hodnotu tolerance, a které zároveň svírají se základnou předepsaný úhel. Stejně tak může mít toleranční pole válcový tvar, je-li tolerovaným prvkem čára. Průměr tohoto válcového pole odpovídá předepsané velikosti tolerance, a jeho osa svírá se základnou úhel stanovený TED rozměrem. Na obrázku níže je znázorněn případ, kdy je tolerovaným prvkem rovina. [14]



Obrázek 36: Indikace tolerance sklonu [14]

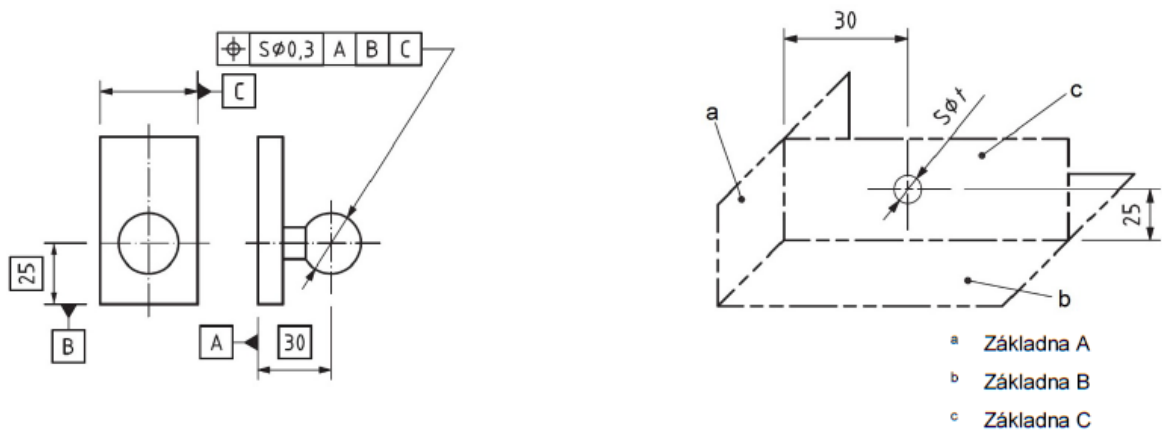
Druhou skupinou geometrických specifikací, která bude v této kapitole popsána, je skupina tolerancí umístění. Řadí se do ní tolerance polohy, soustřednosti a souososti a souměrnosti. [14]

Specifikace polohy se využívá k tolerování polohy prvku vzhledem ke zvolené základně, častěji přímo k soustavě základen, v závislosti na tom, jaký druh prvku je tolerován a kolik stupňů volnosti je nutno odebrat. Tolerovanými prvky mohou být body, lineární prvky, rovinné prvky i obecné tvarové prvky. Široká škála možných tolerovaných prvků determinuje různé tvary tolerančních polí. Pro všechny druhy tolerančních polí je společný způsob definování jejich středu pomocí TED rozměrů. Je-li specifikován bod v rovině, předepisuje se nejčastěji kruhové toleranční pole, jehož průměr odpovídá předepsané hodnotě tolerance, která musí být označena značkou průměru. V případě, že je tolerovaným prvkem přímka, toleranční pole má nejčastěji tvar válce o průměru odpovídajícím předepsané hodnotě tolerance, před níž se také předepisuje značka průměru. Takový případ je možné vidět na obrázku níže. [14]



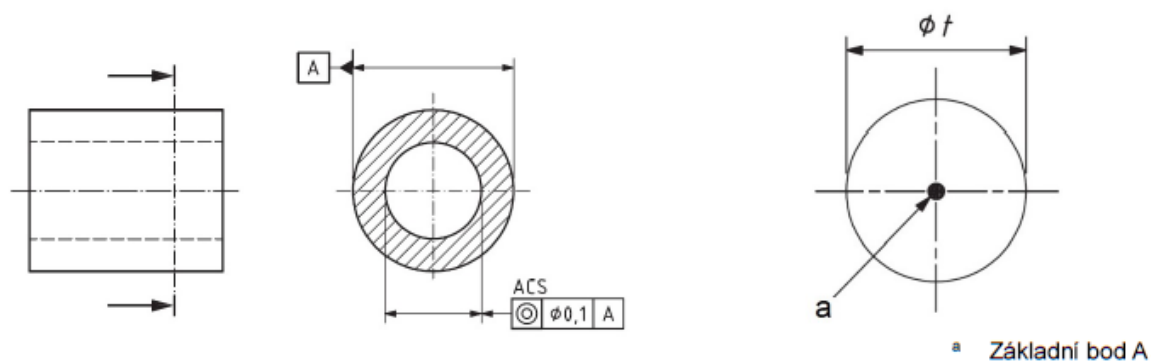
Obrázek 37: Specifikace tolerance polohy lineárního prvku [14]

Pokud je nutné tolerovat polohu bodu v prostoru, toleranční pole má tvar koule o průměru odpovídajícím předepsané hodnotě tolerance, před kterou se přidává značka $S\phi$. Takovou situaci znázorňuje **Obrázek 38**. [14]



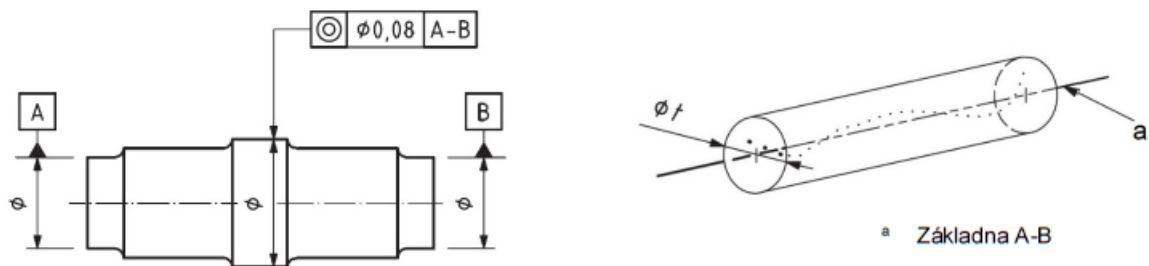
Obrázek 38: Specifikace tolerance polohy bodového prvku [14]

Specifikace soustřednosti a sousosti se od dosud zmiňovaných geometrických specifikací liší tím, jaký druh prvků může být specifikován. Specifikace soustřednosti totiž může specifikovat pouze prvky odvozené, aneb prvky, které nejsou skutečnou součástí povrchu tolerovaného dílu. Jedná se o medián prvky, jakými jsou nejčastěji osy rotačních dílů, nebo středy jejich průřezů. Je-li tolerovaným prvkem bod, toleranční pole má tvar kruhu o průměru odpovídajícím předepsané hodnotě tolerance, před nímž musí být uvedena značka průměru. Na následujícím obrázku je možné vidět, jak je tolerována skupina všech bodů, které tvoří osu díry tolerované součásti. Geometrická tolerance je v tomto případě doplněna o element specifikace ACS, který říká, že specifikace platí pro libovolný příčný průřez kolmý na definovanou základnu. [14]



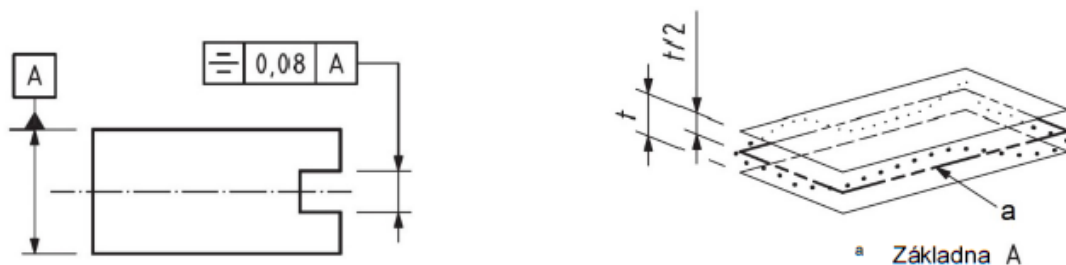
Obrázek 39: Indikace tolerance soustřednosti v libovolném příčném průřezu [14]

V případě specifikace umístění osy má toleranční pole tvar válce o průměru, který je roven předepsané hodnotě tolerance. Před hodnotu tolerance musí být opět připsána značka průměru. Příkladem je **Obrázek 40**, kde je vidět způsob specifikace sousosti válce, kde je umístění jeho osy vyhodnocováno vůči společné základně, kterou tvoří osy krajních válcových prvků součásti. [14]



Obrázek 40: Indikace tolerance soustřednosti [14]

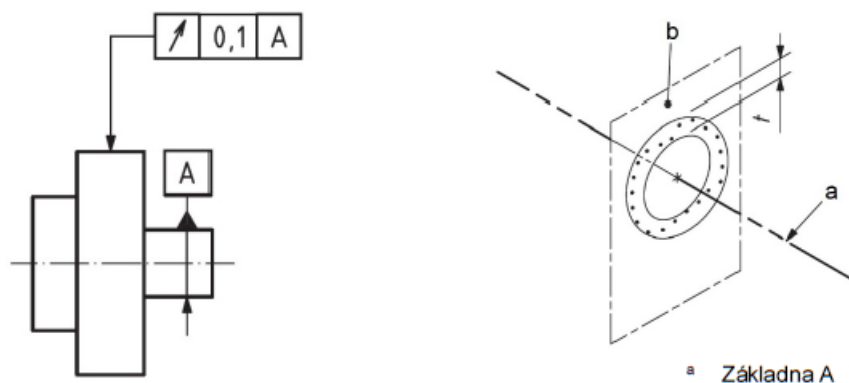
Tolerance souměrnosti, někdy nazývána také jako tolerance symetrie, slouží ke specifikaci umístění tolerovaného prvku vzhledem k základnímu prvku, od něhož je dále definován střed či osa symetrie. Toleranční pole je vymezeno dvěma rovnoběžnými rovinami od sebe vzdálenými o hodnotu tolerance, které jsou zároveň souměrně (symetricky) rozmístěny kolem prvku definujícího symetrii. Na dále uvedeném obrázku lze vidět příklad indikace této tolerance na výkresu, a stejně tak i znázornění tvaru jejího tolerančního pole. [14]



Obrázek 41: Indikace tolerance souměrnosti [14]

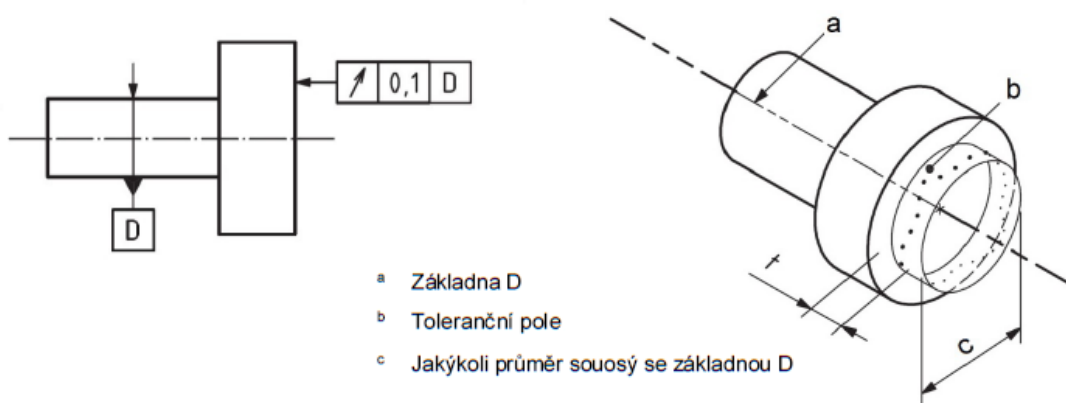
Do poslední skupiny geometrických specifikací této kapitoly, která zahrnuje tolerance házení, se řadí házení obvodové a házení celkové. [14]

Toleranci obvodového házení si lze představit jako specifikaci umístění kruhové čáry nebo souboru kruhových čar povrchu tolerované součásti vzhledem k prvku stanovenému jako základna. Na základě směru, ve kterém je specifikace obvodového házení vyhodnocována, je možné rozlišit obvodové házení radiální a axiální. Je-li tolerovaným prvkem součásti jiný rotační prvek než válcový, hovoří se o specifikaci obvodového házení v libovolném či definovaném směru. Toleranční pole radiálního obvodového házení si lze představit jako mezikruží ležící v rovině kolmé na základní prvek, jehož střed leží na stanoveném základním prvku a jehož šířka odpovídá předepsané velikosti tolerance. **Obrázek 42** znázorňuje způsob indikace na výkresu, spolu s grafickou interpretací tolerančního pole radiálního obvodového házení. [14]



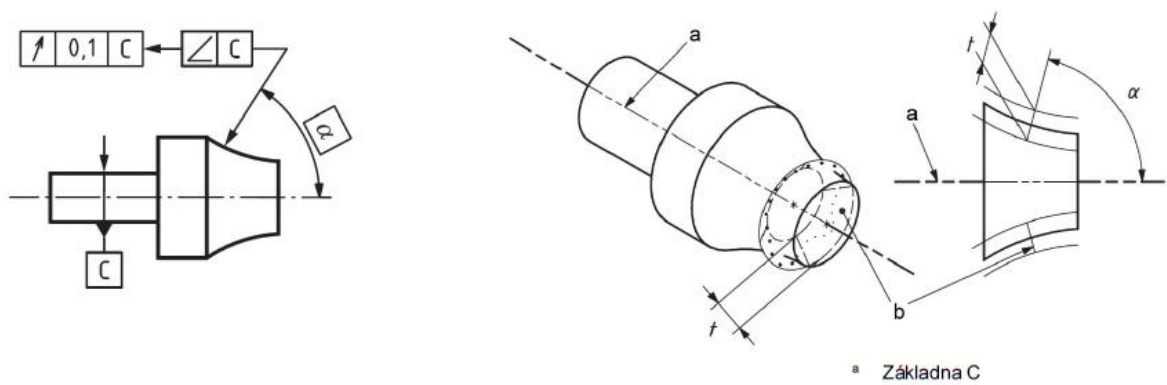
Obrázek 42: Indikace tolerance obvodového házení [14]

Pro případ axiálního obvodového házení je toleranční pole vymezeno v jakémkoli průměru specifikovaného válcového prvku dvěma kružnicemi axiálně (ve směru osy základního prvku) vzdálenými o předepsanou hodnotu tolerance, jejich středy leží na ose základního prvku. Příklad indikace axiálního obvodového házení včetně znázornění tolerančního pole v konkrétním průměru tolerovaného prvku je možné vidět na obrázku níže. [14]



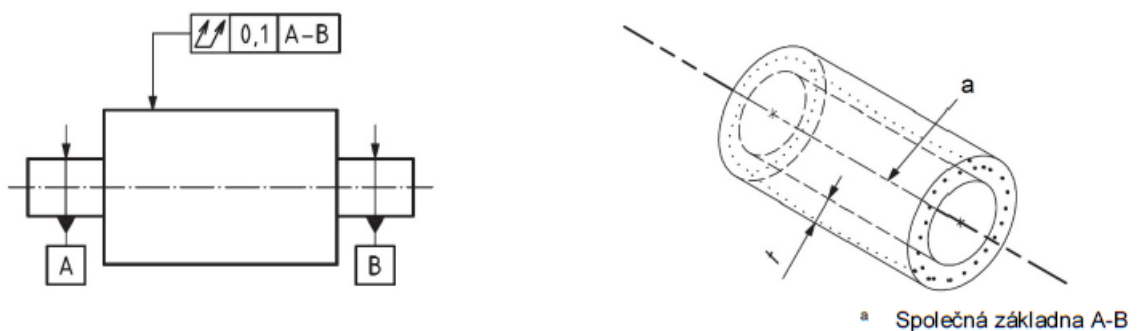
Obrázek 43: Indikace tolerance axiálního házení [14]

Nemá-li specifikovaný prvek tolerované součásti válcový tvar, ale jiný obecně rotační tvar, je možné nazývat specifikaci házením ve směru. Směrem je myšlena orientace tolerančního pole. V případě specifikace obvodového házení v libovolném směru bývá respektován směr kolmý k povrchu tolerovaného prvku. V případě tolerance obvodového házení ve směru, je orientace tolerančního pole stanovena pomocí indikátoru směrového prvku a TED rozměru, kterému úhel naklonění tolerančního pole odpovídá. V obou případech je toleranční pole vymezeno dvěma soustřednými kružnicemi, jejichž vzájemná vzdálenost odpovídá předepsané toleranci. Konkrétní příklad indikace obvodového házení ve směru zahrnující znázornění tolerančního pole pomocí indikátoru směrového prvku ukazuje **Obrázek 44**. [14]



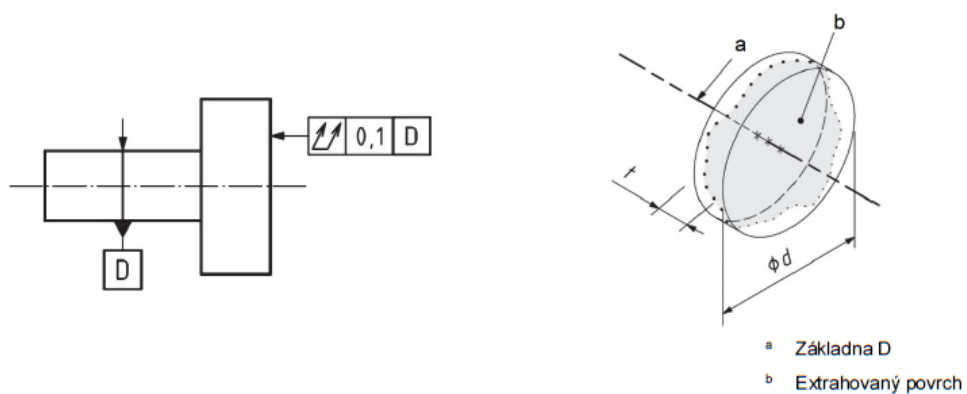
Obrázek 44: Indikace tolerance házení ve směru [14]

Druhou geometrickou specifikací házení je **specifikace celkového házení**. Tolerovaným prvkem může být válcový nebo rovinný povrch. Je-li tolerovaným prvkem válcový povrch, je toleranční pole vymezeno dvěma souosými válci s rozdílem poloměrů odpovídajícím předepsané hodnotě tolerance, jejichž osy jsou totožné s předepsanou základnou. Na níže přiloženém obrázku je možné vidět, jak je indikováno celkové házení na výkrese, spolu s grafickým znázorněním tolerančního pole. [14]



Obrázek 45: Indikace tolerance celkového házení válcového prvku [14]

V případě specifikace rovinného prvku pomocí tolerance celkového házení odpovídá toleranční pole prostoru mezi dvěma rovinami, které jsou navzájem vzdáleny o předepsanou hodnotu tolerance a jsou obě situovány kolmo na definovanou základnu, která je v konkrétním případě zobrazeném níže na obrázku osou válcového prvku součásti. Na obrázku je dále zobrazen i tvar popsáného tolerančního pole. [14]



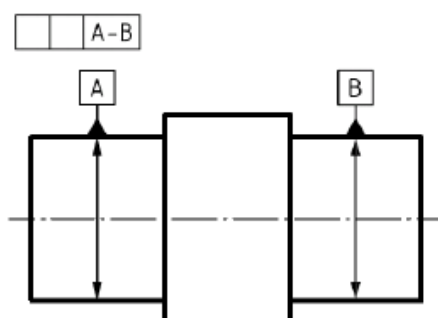
Obrázek 46: Indikace tolerance celkového házení rovinného prvku [14]

3.3.4 Základny geometrických tolerancí

Obecně lze základny definovat jako prvky, které slouží ke stanovení rozměrových, tvarových a funkčních vztahů mezi ostatními elementy součásti. Účelem základen je uzavírání stupňů volnosti tolerančních polí. Jinými slovy slouží základny jako referenční, teoreticky exaktní geometrické prvky součásti, od nichž se odvíjí ostatní charakteristiky, kterými je součást popsána. Z toho vyplývá, že mělo používání základen smysl, musí být základny odvozeny od skutečných povrchů součásti. V praxi mohou být takovými prvky například plochy, osy, nebo body vyskytující se na tolerované součásti. [15]

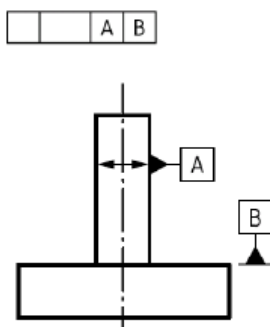
Základny lze rozdělit z hlediska jejich funkce na konstrukční, technologické, kontrolní a montážní. Úkolem konstrukčních základen je stanovení vzájemných vztahů, nejčastěji polohy a orientace jednotlivých prvků součásti tak, aby byla zajištěna její správná funkce. Technologické základny se do výkresové dokumentace zpravidla přenášejí přímo v závislosti na výrobním procesu součásti. Tyto základny nejčastěji charakterizují způsob upínání součásti při výrobě. Pomocí kontrolních základen je možné stanovit, jak má být součást vyrovnána při procesu kontroly, aby bylo možné dosáhnout optimálních měřicích podmínek. Za účelem zajištění přesné polohy součásti vzhledem k ostatním dílům je možné určit také montážní základny. [15], [16]

Základna nemusí být nutně tvořena pouze jedním prvkem součásti. V některých případech je žádoucí, aby byla základna odvozena z více než jednoho prvku součásti. V takových případech je žádoucí definovat takzvanou **společnou základnu**. Pro lepší porozumění je níže uveden příklad použití společné základny. Konstrukčním záměrem předepsání této společné základny je v případě znázorněném níže na obrázku zajištění koaxiality krajních válcových povrchů součásti. [15]



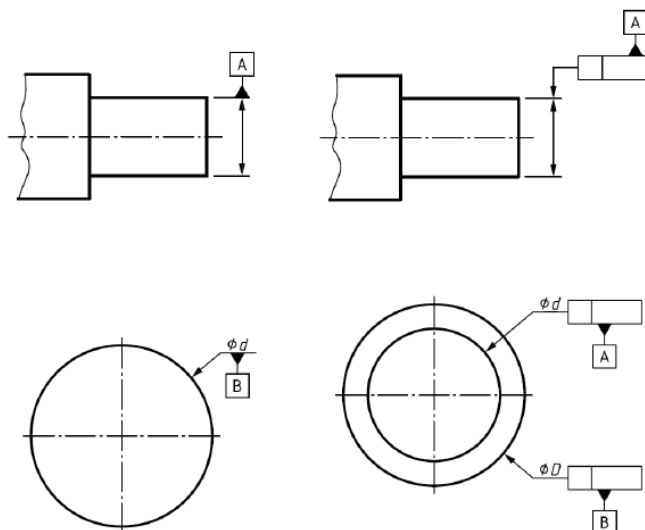
Obrázek 47: Indikace společné základny [15]

Soustava základen je tvořena kombinací dvou, nebo tří jednotlivých nebo společných základen. Tyto soustavy se definují v případě, je-li nutné odebrat více stupňů volnosti tolerančního pole, než by umožnilo předepsání pouze jedné základny. Základna odebírající nejvíce stupňů volnosti tolerančního pole je označována jako primární a píše se do prvního rámečku indikátoru příslušné geometrické charakteristiky určeného pro zápis základny. Do dalších rámečků indikátoru se uvádí sekundární a dále terciární základna. Vzájemná pozice základen vůči sobě je teoreticky exaktní, a tedy na výkrese popsána pomocí implicitních nebo explicitních TED rozměrů. Pořadí jednotlivých základen je zásadní pro správnou interpretaci charakteristik uvedených na výkrese. Prvky součásti přiřazené jednotlivým základnám jsou odvozeny v pořadí důležitosti jednotlivých základen v rámci soustavy. Prakticky to znamená, že je odvozen nejprve primární základní prvek, poté sekundární a nakonec terciární. Indikaci primární a sekundární základny zobrazuje **Obrázek 48**. [15]



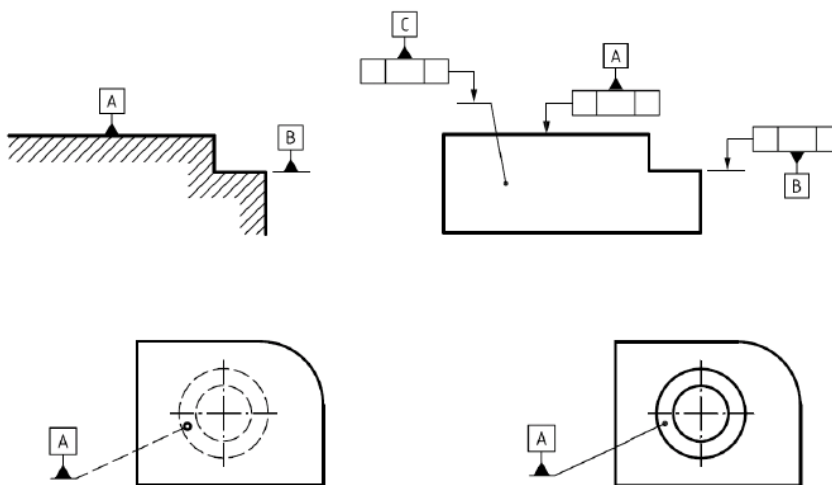
Obrázek 48: Indikace soustavy základen [15]

Značení základen se liší dle toho, je-li prvkem pro ustavení základny rozměrový prvek, nebo jiný povrch součásti. Základní rozměrový prvek lze na výkrese značit jako na obrázku níže. [15]



Obrázek 49: Indikace základen – rozměrové prvky [15]

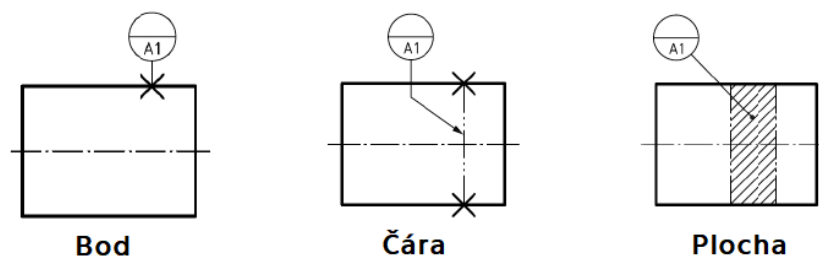
Pokud není základnou prvek rozměrový, může být základna na výkrese značena způsoby, které lze vidět níže na obrázku. [15]



Obrázek 50: Indikace základen – jiné než rozměrové prvky [15]

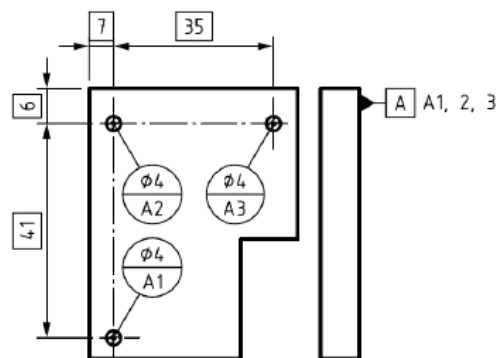
Cílené základny umožňují označit jako základny vybrané části celého prvku součásti, například části ploch a čar, nebo přímo body. Často jsou to právě dotykové plochy součástí, které jsou voleny jako cílené základny. Toho se využívá například pro jednoznačné definování bodů, ve kterých má být součást podepřena v prizmatu, je-li to z hlediska kontroly vyžadováno. [15]

Indikátor cílené základny se skládá z orámování základny a odkazové čáry. Orámování značky cílené základny je nezávislé na elementu, který je zvolen jako základna. To neplatí pro odkazovou čáru indikátoru, která se mění dle specifikovaného elementu součásti. Na obrázku níže lze vidět, jak vypadá indikátor cílené základny aplikovaný na bod, čáru a plochu součásti. [15]



Obrázek 51: Varianty indikací cílené základny – bod, čára, plocha [15]

Pro stanovení rozměru a umístění cílené základny, se používají TED rozměry. Jejich použití je zobrazeno na obrázku níže. Konstrukčním záměrem takovéto indikace může být například definování tří konkrétních bodů na povrchu součásti, pomocí kterých bude definována rovina pro vyrovnání v metrologickém softwaru souřadnicového měřicího stroje. [15]



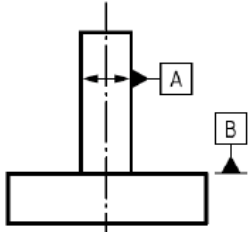
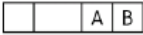
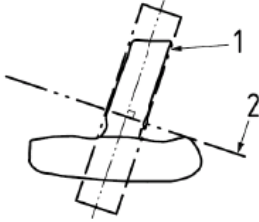
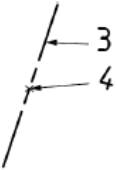

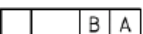
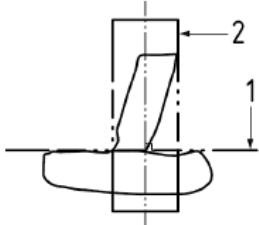

Obrázek 52: Indikace rozměru a umístění cílených základen [15]

Výchozí **metody filtrace a přiřazení** základních prvků nejsou normou pevně stanoveny. Standardně se však používají takové metody filtrace a vyhodnocení, které zachovávají nejvyšší body povrchu, který má jako základna fungovat. To zejména z toho důvodu, aby odvozený prvek co nejlépe simuloval skutečný dotek povrchu s jiným povrchem. [15]

Co se týká přiřazení základních prvků v rámci soustavy více základen, postup přiřazení určuje pořadí volených základen. Nejprve je přiřazen prvek označený jako primární základna. Poté je přiřazen prvek označený jako sekundární základna, který musí zároveň respektovat orientaci vůči primární základně. Je-li výkresovou dokumentací stanoven i terciární základní prvek, přiřazuje se jako poslední a respektuje orientaci nejprve vůči primární a dále vůči sekundární základně. Vliv volby pořadí základen na interpretaci výkresové dokumentace naznačuje

Tabulka 6. [15]

Tabulka 6: Postup přiřazení prvků v soustavě základen [15]

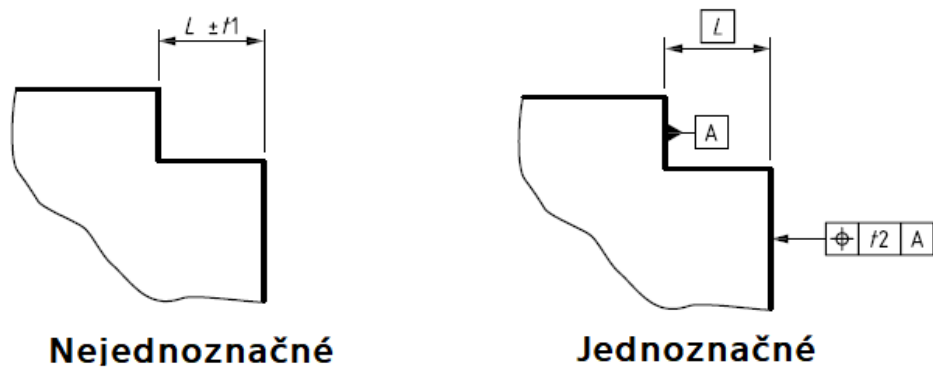
Indikace základního prvku	Indikace základny v orámované toleranci	Význam na obrobku	Odpovídající společná základna nebo soustava základny
			
			
Legenda			
1 první přiřazený prvek bez omezení orientace			
2 druhý přiřazený prvek s omezením orientace od prvního přiřazeného prvku			
3 příčka, která je situačním prvkem přiřazeného válce (jeho osy)			
4 bod průsečíku mezi příčkou a plochou			

V případě společných základen je postup přiřazení společného základního prvku jiný, než tomu bylo u výše zmíněné soustavy základen. Společný základní prvek je odvozen z několika prvků součásti a jeho přiřazení probíhá současně. [15]

3.3.5 Nejednoznačná interpretace v rámci rozměrového tolerování

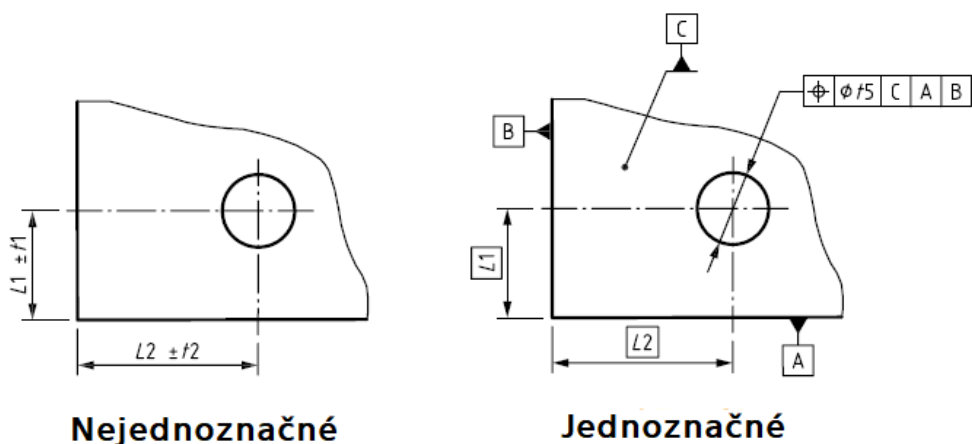
V některých případech může při specifikaci požadavků na délkové a úhlové rozměry jednotlivých prvků součástí docházet k situacím, kdy není možné specifikaci jednoznačně interpretovat. Řešením takto vznikajících nejednoznačností může být vhodné užití geometrických tolerancí.

Jedním z typických případů nejednoznačné specifikace je indikace vzdálenosti dvou rovin pomocí délkového rozměru. Jako příklad nejednoznačné specifikace a její možné řešení užitím geometrické specifikace polohy je uveden **Obrázek 53**. Vzdálenost dvou rovin by mohla být jednoznačně stanovena pouze tehdy, kdyby byly roviny vzájemně dokonale rovnoběžné, což je v praxi téměř nemožné. Řešení tedy spočívá ve stanovení jedné z rovin základnou, která bude sloužit jako referenční prvek pro geometrickou toleranci polohy. [17]



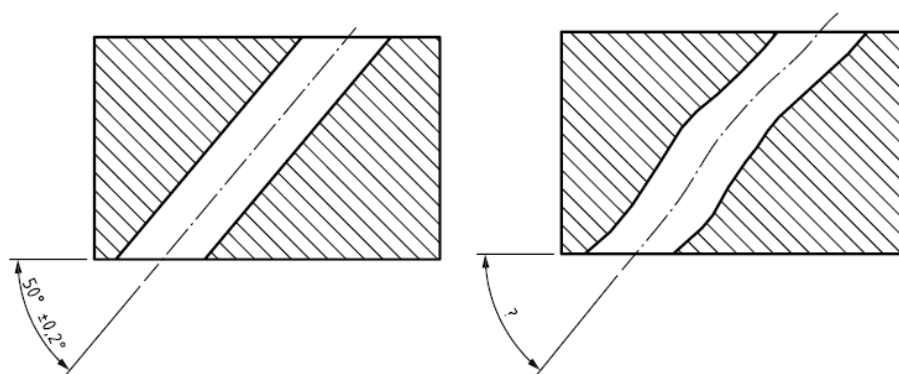
Obrázek 53: Řešení nejednoznačnosti specifikace vzdálenosti dvou rovin použitím GT polohy [17]

Užití geometrické specifikace polohy představuje řešení i v případě, kdy je nutné definovat pozici medián prvku (například osy díry či válce) vzhledem k ostatním prvkům součásti. Na obrázku níže lze vidět, jak je ideální umístění středu díry (válce) vůči zvoleným základnám definováno pomocí TED rozměrů. [17]



Obrázek 54: Řešení nejednoznačnosti specifikace umístění medián prvku použitím GT polohy [17]

Konkrétní příklad nejednoznačnosti vznikající v oblasti úhlových rozměrů lze vidět na následujícím obrázku. Řešením by ve zázorněném případě bylo použití GT sklonu spolu s definováním vhodné základny. [17]



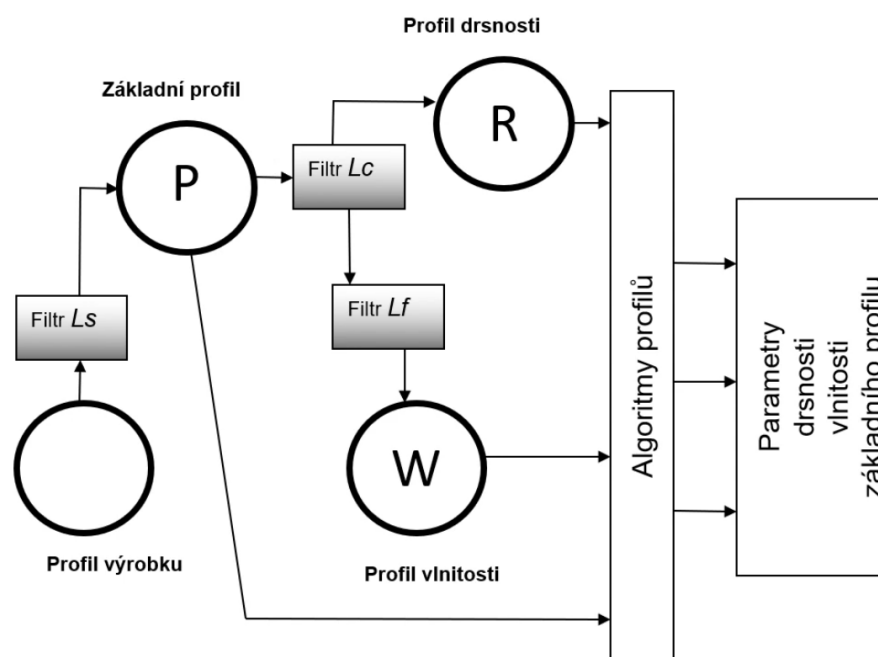
Obrázek 55: Nejednoznačná specifikace úhlového rozměru [17]

3.3.6 Filtrování v GPS

Konstruktér má rovněž ve svých rukou nástroje, pomocí kterých může definovat konkrétní metodu filtrace měřených bodů tolerovaného povrchu součásti. Takové nástroje se nazývají elementy filtrace. Jedná se o volitelný element specifikace, což znamená, že není povinné metodu filtrace naměřených bodů povrchu součásti přímo uvádět. Žádná výchozí metoda filtrace není v současnosti normami stanovena. [14]

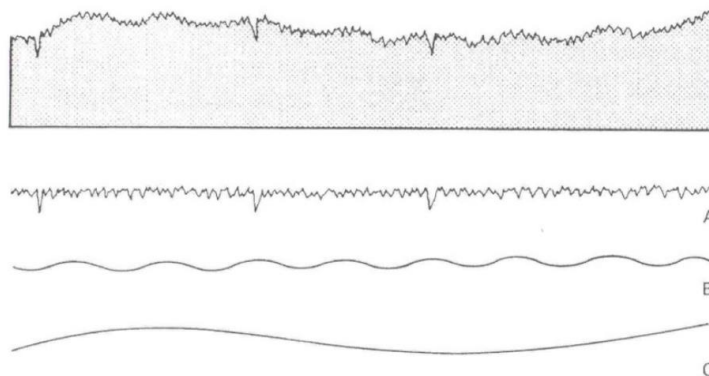
Aplikace konkrétní metody filtrace má významný vliv na vyhodnocení úchylek tvaru měřeného povrchu součásti. Filtrace měřených bodů povrchu součásti stejně tak významně ovlivňuje interpretaci vlastností textury zkoumaného povrchu. Hodnocení úchylek tvaru a textury povrchu hraje významnou roli ve spojitosti se správnou funkcí součásti a rovněž také v otázce nastavení optimálních podmínek výrobního procesu. Některé funkce součásti mohou být ovlivněny sebemenší podrobností povrchu, zatímco jiné reagují teprve na větší tvarové odchylky součásti. Různé druhy filtrů slouží k odstranění nějak velkého stupně podrobnosti. Existují filtry, které vyhladí extrahovaný povrch dle jeho průměrné úrovně, stejně tak existují filtry, které vnímají extrémní výstupky a prohlubně. [14], [18]

Profil povrchu součásti bývá filtrován v konkrétních průřezech. Orientace řezných rovin by měla být taková, aby byly zachyceny největší výstupky a prohlubně profilu povrchu a měření tak postihovalo nekritičtější charakteristiky měřeného povrchu. Nejčastěji bývají voleny řezy kolmé na směr obrábění. Orientaci řezné roviny povrchem součásti lze předepsat například pomocí indikátoru průsečné roviny. Proces filtrování extrahovaného povrchu měřené součásti má daný postup. Na zkoumaný profil povrchu součásti je nejprve aplikován krátkovlnný filtr λ_s , který potlačí nežádoucí vlivy okolního prostředí, které měřicí zařízení vlivem vysoké citlivosti zaznamenává, a mohly by negativně ovlivnit výsledek měření. Aplikováním filtru λ_s je tedy získán obraz skutečného profilu povrchu součásti, který je nazýván základním profilem. Základní profil lze rozložit do tří základních složek, a sice na **drsnost**, **vlnitost** a **úchylku tvaru**. Pro oddělení složek profilu drsnosti a profilu vlnitosti s úchylnou tvaru je na základní profil potřeba aplikovat filtr λ_c . Pokud je nutné dále oddělit složku profilu vlnitosti a celkovou úchylku tvaru základního profilu, aplikuje se na zkoumaný profil po filtru λ_c ještě filtr λ_f . Níže na obrázku je znázorněno schéma, které popisuje proces filtrování profilu povrchu součásti. [14], [18]



Obrázek 56: Schéma filtrace povrchu součásti po aplikaci filtrů o různých vlnových délkách [18]

Charakter jednotlivých složek profilu povrchu je z velké části ovlivněn konkrétními dominantními jevy vyskytujícími se přímo ve výrobním procesu nebo jeho okolí. V případě složky drsnosti povrchu jsou dominantními jevy použitý nástroj a nastavení řezných podmínek v procesu výroby součásti. Co se týká složky vlnitosti, ta je ovlivněna především vznikajícím chvěním, konkrétně vlivem nedostatečné tuhosti v soustavě stroje, nástroje a obrobku. Úchylky tvaru jsou potom závislé především na kinematické přesnosti stroje. Právě díky filtrování je možné tyto jevy identifikovat a provést vhodný zásah do výrobního procesu s cíleným účinkem na výslednou podobu povrchu a tvaru součásti. Na obrázku níže lze vidět řez povrchem reálné součásti, též označovaný jako základní profil. Ten je dále rozložen na profil drsnosti, vlnitosti a následně profil celkového tvaru. [18]



Rozložení základního profilu:

A – drsnost

B – vlnitost

C – úchylka tvaru

Obrázek 57: Rozložení základního profilu povrchu [18]

Profily povrchu součástí se dělí dle způsobu, jakými vznikaly, na **periodické a aperiodické**. Periodické profily povrchu lze označit jako profily, které jsou vytvářeny technologiemi s pevně definovaným procesním parametrem, jako například posuv na otáčku, posuv na zub, nebo krok do strany. Nejčastěji se jedná o technologie soustružení a frézování. Aperiodické profily povrchu nemají pravidelnou strukturu a vznikají například po odlévání či elektroerozivním obrábění. V závislosti na tom, zda je profil periodický nebo aperiodický, se volí hodnota pro volbu klíčového parametru základní délky λ_c . Hodnota základní délky se u periodického profilu určuje na základě parametru R_{Sm} , který se odhaduje graficky ze zkoumaného povrchu. V praxi je často obtížné přímo odhadnout hodnotu parametru R_{Sm} , a proto se nejprve zvolí výchozí hodnota základní délky $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$, která následně slouží k vyhodnocení skutečné hodnoty parametru R_{Sm} zkoumaného povrchu. Spadá-li parametr R_{Sm} do předepsaného rozsahu pro uvažovanou základní délku $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$, výsledek měření lze považovat za směrodatný. Pokud parametr R_{Sm} do předepsaného rozsahu nespadá, volí se jiná, tomuto rozsahu příslušná základní délka a měření se opakuje. [18]

Pro samotné měření je dále důležité znát velikost celkové vyhodnocované délky povrchu součásti. Vyhodnocovaná délka λ_n je taková délka povrchu součásti, na které probíhá měření. Standardně by měla vyhodnocovaná délka odpovídat alespoň pětinašobku základní délky λ_c . Celková délka snímání bývá zpravidla volena ještě o něco větší, a sice tak, aby odpovídala sedmi základním délkám λ_c , kde je první a poslední základní délka využita pro náběh a přeběh snímače. [18]

Tabulka níže uvádí kritéria, dle kterých se volí základní délky pro měření periodických profilů v závislosti na parametru povrchu R_{sm} . [18]

Tabulka 7: Velikost parametru základní délky pro periodické profily povrchu [18]

R_{sm} [mm]	Základní délka λ_c [mm]	Vyhodnocovaná délka λ_n [mm]
$0,013 < R_{sm} < 0,04$	0,08	0,4
$0,04 < R_{sm} < 0,13$	0,25	1,25
$0,13 < R_{sm} < 0,4$	0,8	4,0
$0,4 < R_{sm} < 1,3$	2,5	12,5
$1,3 < R_{sm} < 4$	8,0	40,0

Volba základních délek pro aperiodické povrchy probíhá stejně, jako tomu je u povrchů periodických. Rozdíl je však v tom, že se velikost základních délek neodvíjí od parametru R_{sm} , který je typický pro periodické povrchy, ale od parametrů povrchu Ra a Rz , které je možné vyhodnotit i na aperiodických površích. [18]

Tabulka 8: Velikost parametru základní délky pro aperiodické profily povrchu – dle Ra [18]

Ra [μm]	Základní délka λ_c [mm]	Vyhodnocovaná délka λ_n [mm]
$0,006 < Ra < 0,02$	0,08	0,4
$0,02 < Ra < 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < Ra < 2$	0,8	4,0
$2 < Ra < 10$	2,5	12,5
$10 < Ra < 80$	8,0	40,0

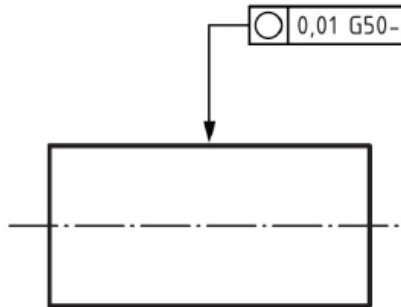
Tabulka 9: Velikost parametru základní délky pro aperiodické profily povrchu – dle Rz , Rz_{1max} [18]

Rz, Rz_{1max} [μm]	Základní délka λ_c [mm]	Vyhodnocovaná délka λ_n [mm]
$0,025 < Rz, Rz_{1max} < 0,1$	0,08	0,4
$0,1 < Rz, Rz_{1max} < 0,5$	0,25	1,25
$0,5 < Rz, Rz_{1max} < 10$	0,8	4,0
$10 < Rz, Rz_{1max} < 50$	2,5	12,5
$50 < Rz, Rz_{1max} < 200$	8,0	40,0

Způsob filtrace je závislý na charakteru filtrovaného profilu povrchu. Je-li filtrovaným profilem povrch otevřený, stanovuje se jako parametr filtrace základní délka λ_c . Mezi otevřenými povrchy je možné řadit například roviny, nebo jiné plochy, které jsou vymezené ukončené. Pro uzavřené profily (kruhové, válcové a kuželové povrchy) se jako parametr filtrace volí parametr UPR (z anglického Undulations Per Revolution), který se v českém názvosloví označuje jako počet vln na otáčku. Jemnost filtru lze označit jako schopnost filtru rozlišovat určitý stupeň členitosti extrahovaného povrchu. V závislosti na zvolených hodnotách parametrů filtrace se jemnost filtru mění následovně. Čím menší je hodnota parametru λ_c , tím je filtr jemnější, a tím drobnější úchyly snímaného povrchu dokáže rozlišit. Naopak filtr užívající parametr UPR je tím jemnější, čím vyšší je hodnota parametru. [14], [18]

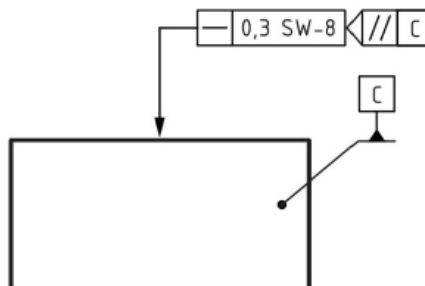
Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly, konkrétní filtry jsou voleny v závislosti na uvažované funkci, kterou bude součást plnit. Gaussův filtr nebere v úvahu extrémní výstupky a prohlubně, a slouží tedy k určitému stupni vyhlazení extrahovaného povrchu. Kulový filtr simuluje odvalování koule malého průměru po povrchu součásti a slouží k filtraci povrchu součástí, jejichž povrchy se během chodu dostávají do přímého kontaktu s povrchy jiných součástí. Aplikaci obávkového filtru si lze představit jako natahování gumového povlaku přes extrahovaný povrch, a rozlišuje tak jeho největší výstupky. Dále existují například spline filtry, nebo filtry diskové. [14]

Indikace filtrování se na výkrese uvádí do indikátoru příslušné geometrické tolerance za předepsanou hodnotu tolerance. Nejprve se uvádí použitý druh filtru a následně jeho parametry. Na obrázku níže je uveden případ, kdy je indikováno použití Gaussova filtru o parametru 50 UPR. Je použit parametr UPR, neboť se jedná o specifikaci uzavřeného profilu (povrchu válce). Pomlčka za hodnotou parametru značí, že se jedná o filtr dlouhovlnný, který odstraňuje krátké vlnové délky (hodnoty vyšší než 50 UPR). [18]



Obrázek 58: Indikace dlouhovlnného filtru [14]

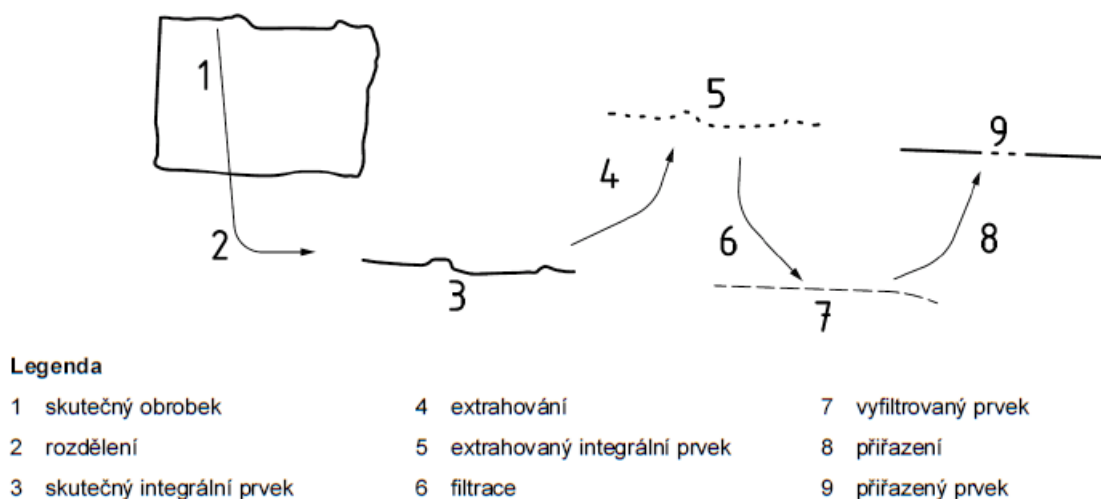
Na dalším obrázku je znázorněna indikace filtru typu spline vlnitosti. Filtr využívá parametr λ_c , neboť je specifikovaný povrch otevřený. Jelikož je pomlčka uvedena před hodnotou parametru cutoff délky $\lambda_c = 8 \text{ mm}$, jedná se o filtr krátkovlnný, který odstraňuje větší vlnové délky, než je předepsaná hodnota. Dále je na obrázku indikován také doplňkový indikátor průsečné roviny, který jasně definuje směr, ve kterém má být snímán a následně vyhodnocován specifikovaný profil tolerovaného prvku součásti.



Obrázek 59: Indikace krátkovlnného filtru [14]

3.3.7 Metody vyhodnocení přiřazených prvků v GPS

Po definování metody filtrace extrahovaného povrchu součásti přichází přirozeně na řadu definování metody přiřazení. Přiřazení lze popsat jako proces odvození ideálního prvku z extrahovaného – nejčastěji i filtrovaného – povrchu součásti dle určitých kritérií. Pro jednodušší představu procesu, jehož jednotlivými fázemi jsou výše zmiňovaná extrakce bodů z měřeného povrchu součásti, jejich filtrace a následné stanovení přiřazeného prvku, je níže uveden **Obrázek 60**, který jej znázorňuje. [11], [14]

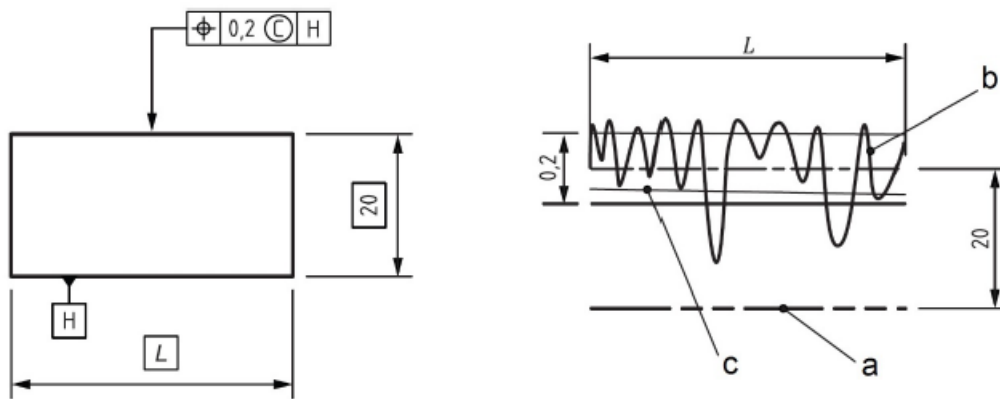


Obrázek 60: Postup ustavení přiřazeného prvku [15]

Zvolená kritéria, dle kterých má být extrahovaný povrch součásti vyhodnocen, odpovídají konkrétním metodám vyhodnocení. Konstruktor má díky elementům specifikace přiřazeného tolerovaného prvku možnost ve výkresové dokumentaci definovat, jakou metodou má být daný tolerovaný prvek součásti vyhodnocen. Tento element specifikace není povinný, avšak je normou doporučeno jej stanovit pro specifikaci prvků, které slouží jako základny pro geometrické tolerance orientace a umístění. [14]

Rozlišuje se hned několik metod sloužících k vyhodnocení přiřazených prvků, a sice metoda minimax, také známá jako Čebyševova metoda, dále metoda nejmenších čtverců, nazývána také Gaussovou metodou, poté metoda přiřazení minimálního opsaného prvku, nebo metoda přiřazení největšího vepsaného prvku, a nakonec metoda přiřazení tečného prvku. Pomocí Čebyševovy a Gaussovy metody je možné vyhodnocovat prvky všech typů, konkrétně tedy prvky typu přímka, rovina, kružnice, válec, kužel a anuloid. Metody nejmenšího opsaného a největšího vepsaného prvku se využívají výhradně k vyhodnocování prvků typu kružnice a válec. Pro vyhodnocování prvků přímkového či rovinného typu je definována metoda přiřazení tečného prvku. Rozměrový prvek charakterizující vzdálenost mezi dvěma rovinami lze vyhodnotit libovolnou metodou přiřazení. [14]

Metoda minimax přiřazuje skutečnému povrchu specifikované součásti takový povrch, který je aproximován pomocí Čebyševovy metody. **Obrázek 61** uvádí příklad, jak může být element přiřazení pomocí metody minimax indikován na výkrese. [14]

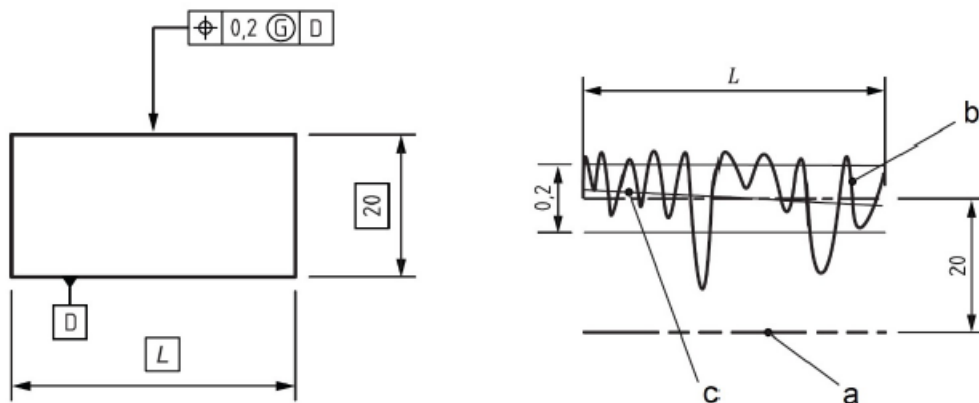


Legenda

- a základna H
- b skutečný prvek, nebo filtrovaný prvek
- c minimax (Čebyševův) prvek (tolerovaný prvek)

Obrázek 61: Vyhodnocení Čebyševovou (minimax) metodou [14]

Gaussova metoda využívá pro aproximaci povrchu tolerované součásti metodu nejmenších čtverců. Na následujícím obrázku je naznačeno, jak může indikace přiřazení prvku Gaussovou metodou vypadat. [14]

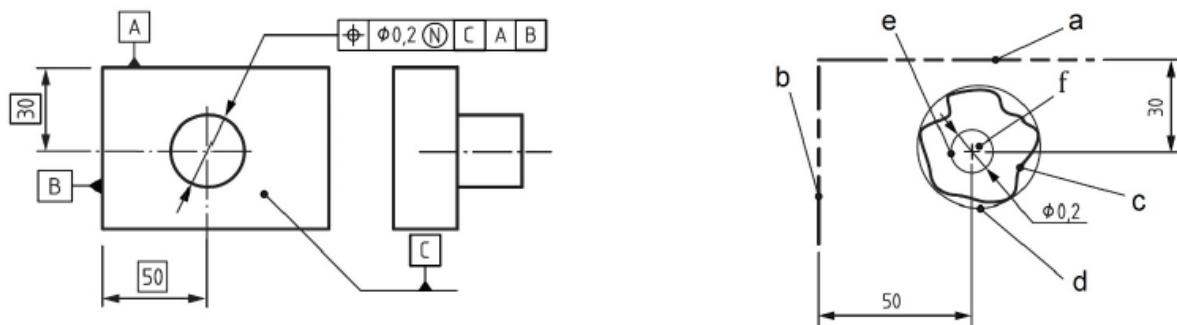


Legenda

- a základna D
- b skutečný prvek, nebo filtrovaný prvek
- c přiřazený prvek (tolerovaný prvek) nejmenších čtverců (Gaussův)

Obrázek 62: Vyhodnocení Gaussovou metodou [14]

Další metodou přiřazení je **metoda minimálního opsaného prvku**, která přiřadí skutečnému povrchu prvku, jak již název metody napovídá, nejmenší opsaný prvek. Tato metoda se nejčastěji používá pro specifikaci součástí typu hřídel. Je totiž jasně definován maximální vnější rozměr součásti, což může hrát významnou roli v otázce zajištění smontovatelnosti. **Obrázek 63** zobrazuje, jak může být na výkrese indikováno přiřazení nejmenšího opsaného prvku. [14]

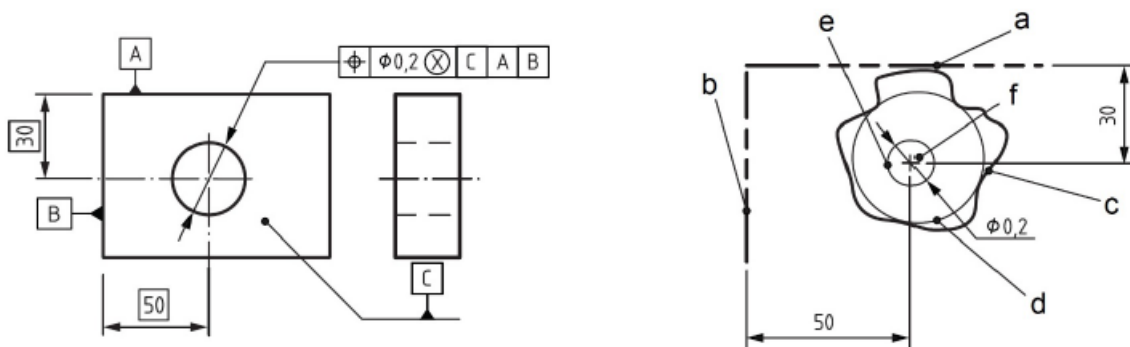


Legenda

- | | |
|---|--------------------------------|
| a základna A | d minimální opsaný prvek |
| b základna B | e toleranční pole |
| c skutečný prvek, nebo filtrovaný prvek | f tolerovaný prvek (osa pro d) |

Obrázek 63: Vyhodnocení metodou minimálního opsaného prvku [14]

Metoda, která se často využívá ke specifikaci způsobu přiřazení součástí typu „díra“, je **metoda maximálního vepsaného prvku**. Pomocí této metody je možné tolerovanému prvku přiřadit takový prvek, který bude garantovat největší možný rozměr, který by mohl být do díry vložen. Pro představu takového způsobu vyhodnocení specifikovaného prvku slouží obrázek přiložený níže. [14]

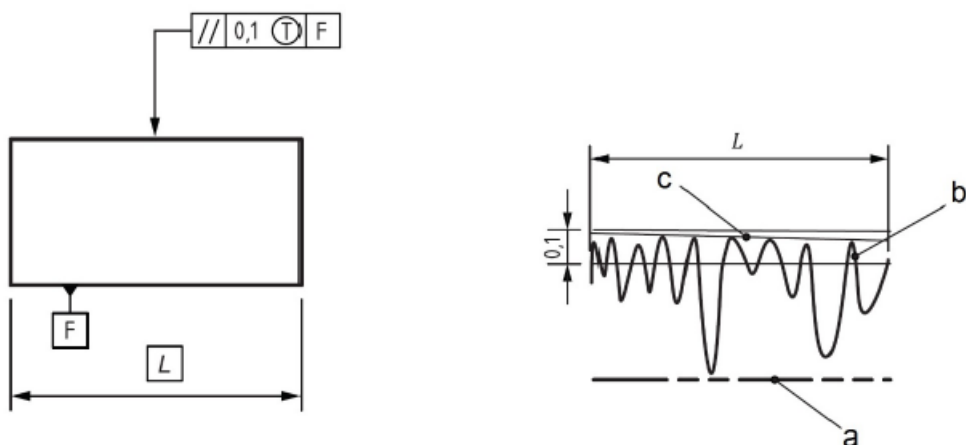


Legenda

- | | |
|---|--------------------------------|
| a základna A | d maximální vepsaný prvek |
| b základna B | e toleranční pole |
| c skutečný prvek, nebo filtrovaný prvek | f tolerovaný prvek (osa pro d) |

Obrázek 64: Vyhodnocení metodou maximálního vepsaného prvku [14]

Posledním způsobem, jakým může být prvek vyhodnocen, je přiřazením pomocí **metody tečného prvku**. Tečný prvek je skutečnému prvku přiřazen tak, aby se vyskytoval vně skutečného prvku a tečně se jej dotýkal. **Obrázek 65** ukazuje, jak probíhá přiřazení tečného prvku skutečnému povrchu (rovinnému prvku) tolerované součásti. [14]



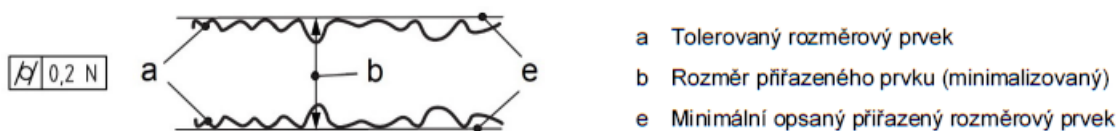
Legenda

- a základna F
- b skutečný prvek, nebo filtrovaný prvek
- c tečný prvek (tolerovaný prvek)

Obrázek 65: Vyhodnocení metodou tečného prvku [14]

Pokud je dle uvážení konstruktéra žádoucí, aby byl specifikován způsob přiřazení referenčního prvku pro geometrické charakteristiky tvaru, je možné využít takzvané elementy specifikace přiřazení referenčního prvku. Ve výchozím nastavení je referenční prvek přiřazen pomocí Čebyševovy metody. Stejně tak může být přiřazen referenční prvek definován Gaussovou metodou nejmenších čtverců, metodou nejmenšího opsaného a největšího vepsaného prvku a v poslední řadě také metodou tečného přiřazení. Metody přiřazení referenčních prvků dle Čebyševa a Gausse mohou být dále omezeny vzhledem k materiálovému požadavku. [14]

Indikátory specifikace přiřazení referenčního prvku se na výkrese od indikátorů specifikace přiřazení tolerovaného prvku liší pouze tím, že jejich značka není v kroužku. Jako příklad je níže uveden obrázek popisující způsob přiřazení referenčního prvku pomocí metody nejmenšího opsaného prvku pro válec, na nějž je kladen požadavek válcovitosti. [14]



- a Tolerovaný rozměrový prvek
- b Rozměr přiřazeného prvku (minimalizovaný)
- e Minimální opsaný přiřazený rozměrový prvek

Obrázek 66: Indikace přiřazení referenčního prvku [14]

4 Souřadnicová měřicí technika

Skutečnost, zda se charakteristiky jednotlivých prvků vyrobených součástí shodují s charakteristikami, které jsou díky systému ISO GPS zaznamenány na výkrese, je za účelem zajištění správného fungování součásti nutné ověřovat. Existuje mnoho různých měřidel nebo měřicích zařízení, které umožňují kvalitu předepsaných vlastností kontrolovat. Ta se od sebe odlišují tím, jaké charakteristiky jsou schopny ověřit, s jakou přesností dokáží pracovat, jak obtížná je jejich obsluha a celou řadou dalších ukazatelů. Je-li nutné se značnou přesností ověřovat velký počet charakteristik různých druhů, jeví se jako nejvhodnější použití souřadnicové měřicí techniky.

První zmínky o použití souřadnicové měřicí techniky přichází v 50. letech minulého století. Jako většina průmyslových zařízení byla souřadnicová měřicí technika vyvíjena v souvislosti s poválečným rozvojem automobilového a letadlového průmyslu. První souřadnicové měřicí stroje, byly zkonstruovány zejména pro potřeby měření obecných tvarových ploch lopatkových součástí nebo součástí s širokou škálou tvarových prvků. Souřadnicový měřicí stroj, dnes často označován zkráceně jako CMM (z anglického Computer Measuring Machine) lze označit jako průlomové zařízení, které umožňuje kombinovat přesné měření prvků složitých tvarů spolu s měřením jejich vzájemné polohy a orientace. To vše pod zárukou dosažení vysoké stability a reprodukovatelnosti měření díky počítačovému řízení stroje. [19], [20]

V následujících kapitolách budou blíže rozebrány hlavní výhody a možné nevýhody, které měření na CMM přináší. Stejně tak budou představeny základní principy měření na CMM, jednotlivé druhy konstrukcí strojů, způsoby snímání bodů z povrchu měřené součásti a v neposlední řadě i obecný doporučený postup měření součástí.

4.1 Princip měření na CMM

Souřadnicové měřicí zařízení funguje na principu odměřování jednotlivých bodů z povrchu součásti, kterým následně přiřadí konkrétní souřadnici v rámci definovaného nepohyblivého souřadnicového systému. Ze snímaných bodů se dále dopočítávají příslušné elementy součásti, jejichž rozměrové a tvarové charakteristiky jsou následně vyhodnocovány a porovnávány s výkresovou dokumentací nebo přímo CAD modelem součásti. Pro měření na CMM je typické vytváření plánů měření, neboli měřicích programů, v rámci metrologických softwarů, které umožňují dosažení stabilních výsledků měření s minimálním ovlivněním chybami lidského faktoru. [20]

4.2 Výhody a nevýhody měření na CMM

Existuje řada měřidel, s jejichž pomocí lze měřit konkrétní rozměrové a tvarové charakteristiky se srovnatelnou přesností, jaké dosahují souřadnicová měřicí zařízení. Jedním z hlavních důvodů, proč jsou dnes CMM tak hojně využívána a často upřednostňována, je komplexnost těchto zařízení. Jeden CMM stroj dokáže zastoupit veškerá měřicí zařízení. Jinými slovy ho lze označit jako univerzální měřicí zařízení, na kterém lze zkontrolovat všechny charakteristiky měřené součásti, nemluvě o tom, že umožňuje naměřit charakteristiky vzájemné orientace a polohy prvků, které by jinými měřidly změřit nešly. Jak bylo již zmíněno v předchozí kapitole, pro CMM zařízení je charakteristické vytváření měřicích plánů v metrologických softwarech. Tyto systémy disponují širokou škálou nástrojů, s jejichž pomocí lze měnit celá řada parametrů měření, stejně tak i způsob zpracování a vyhodnocení naměřených dat. Právě díky jasně definovaným měřicím plánům a počítačovému řízení stroje přispívá obsluha stroje do celkové chyby měření zcela minimálně. Dalším z benefitů, které přináší počítačové řízení stroje, je dosahovaná úroveň reprodukovatelnosti jednotlivých měření. V případě, že je měření téže

charakteristiky provedeno člověkem a CMM zařízením, celková variabilita výsledků měření, kterou bude poskytovat souřadnicové měřicí zařízení, bude významně nižší. [20]

Na druhou stranu bývají tato zařízení podstatně dražší, než jiná, méně komplexní měřicí zařízení. Jako nevýhodu CMM lze vnímat zpravidla velký rozměr stroje a z toho vyplývající komplikace ve spojitosti s jeho transportem. Za další negativum by se daly považovat vysoké nároky na udržování měřicího prostředí, ve kterém dokáže stroj pracovat tak, aby poskytoval výsledky dostatečné kvality. Při pořizování souřadnicového měřicího zařízení je taktéž nezbytné dopředu uvažovat nad samotným charakterem dílů, které budou předmětem měření. Do koupě stroje se nevyplatí investovat v případě, že není potřeba měřit složité, nebo jinak neměřitelné charakteristiky součásti. Podobná úvaha by měla proběhnout v případě, že by se stroj využíval ke kontrole pouze malého počtu dílů. Mimo samotné pořizovací náklady stroje je třeba pamatovat na náklady na zajištění vhodného měřicího prostředí stroje, jeho údržbu nebo také na školení jeho obsluhy. [20]

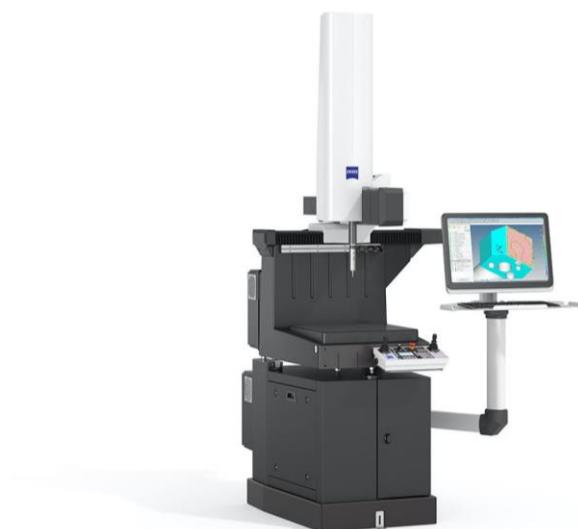
4.3 Konstrukční varianty CMM

Jedním z hlavních kritérií, dle kterého je možné souřadnicovou měřicí techniku rozdělit do dvou skupin, je konstrukce strojů. Příslušné konstrukci stroje totiž nejčastěji odpovídá základní souřadnicový systém, ve kterém je stroj schopný měřit. Typickým a dnes nejčastěji využívaným měřicí systémem je systém kartézský. Existují však případy, kdy je vhodnější realizovat měření v jiných než kartézských souřadnicových systémech, které lze souhrnně nazvat nekartézskými systémy. V dnešní době nejsou měřicí systémy pevně vázány na konstrukci stroje. Počítačové měřicí systémy strojů jsou schopny plynule přecházet mezi různými souřadnicovými systémy, ba dokonce umožňují různé systémy souřadnic kombinovat v rámci jednoho měření. [20]

4.3.1 Kartézsky uspořádané souřadnicové měřicí stroje

Uspořádáním, ve kterém fungovaly první souřadnicové měřicí stroje, je uspořádání kartézské. Kartézský systém souřadnic je definován třemi navzájem kolmými osami, jejichž průsečík je označován jako počátek. Z hlediska konstrukce je pro kartézsky uspořádané stroje typické, že jsou jednotlivé osy souřadnicového systému orientovány tak, aby odpovídaly lineárním pohybům, které stroj vykonává. Významným pozitivem, které přináší konstrukce stroje v kartézském souřadnicovém systému, je jednoznačná definice pohybů, kterými lze dosáhnout naměření jednotlivých bodů pracovního prostoru. Na základě této skutečnosti vznikají takzvané korekční mapy, které mají významný vliv na dosahovanou přesnost měření měřicího zařízení. Korekční mapa je nástroj, který slouží k popisu měřicího prostoru konkrétního stroje, za účelem kompenzace chyb, které dělají výsledky nepřesnými. Konkrétními chybami, které je možné pomocí korekční mapy kompenzovat, jsou nejčastěji tvarové nepřesnosti jednotlivých komponentů stroje nebo nedokonalé seřízení stroje při montáži, ale i celá řada chyb dalších. Právě vytváření korekčních map přispívá nemalým dílem ke skutečnosti, že jsou kartézsky uspořádané CMM považovány za nejpřesnější měřicí zařízení vůbec. [20]

Co se týká dělení kartézsky uspořádaných CMM, rozlišují se zařízení konzolová, portálová, mostová nebo sloupcová s vodorovným ramenem. Nejlevnější variantu stroje, a sice **konzolový CMM** uvádí **Obrázek 67**. Řadí se mezi méně rozměrné souřadnicové měřicí stroje a nevyžaduje tedy velký zástavbový prostor. Na druhou stranu však pracuje s omezeným měřicím rozsahem. Hlavním pohyblivým prvkem stroje je konzola, která se pohybuje ve směru vedení stroje. Na konzolu je připevněna měřicí pinola, která zajišťuje pohyb snímače ve dvou zbylých osách. Standardně dokáže takový stroj měřit s chybou v rozmezí dvou až tří mikrometrů. Největší výhodou tohoto zařízení je právě jeho cenová dostupnost a především nenáročnost na dodržování přísných pracovních podmínek. Proto se toto zařízení často umísťuje přímo do výrobních hal a využívá se pro kontrolu součástí přímo v rámci výrobního procesu. [20], [21]



Obrázek 67: Konzolové souřadnicové měřicí zařízení [22]

Dalším typem CMM, který využívá kartézské uspořádání je **portálový měřicí stroj**. Na rozdíl od konzolového CMM je konstrukce tohoto stroje mnohem tužší, bytelnější a standardně dosahuje větších rozměrů. Portálové vedení je při pohybu stabilní a umožňuje stroji dobře kompenzovat dynamické vlivy, které by mohly negativně ovlivnit kvalitu měření. Vlivy chvění minimalizuje masivní lože spolu s vzduchovými polštáři nebo pneumatickými měchy určenými ke stabilizaci portálu. Nejsilnější stránky tohoto druhu zařízení jsou velká přesnost měření a dostatečně velký měřicí rozsah. Tento stroj dokáže měřit standardně s chybou menší než jeden mikrometr. Na druhou stranu je náročné, ale pro dosažení velmi přesných výsledků měření zásadní, aby byly při měření dodrženy optimální podmínky měřicího prostředí. Při pořizování stroje je tedy nutné počítat s nemalou investicí do zařízení měřicí laboratoře. Portálové CMM zařízení lze vidět níže na obrázku. [20], [23]



Obrázek 68: Portálové souřadnicové měřicí zařízení [24]

Pro měření dílů nebo sestav velkých rozměrů jsou vhodná **mostová CMM**. Jejich konstrukce, která připomíná dva pilíře spojené mostem, vytváří velký měřicí prostor. Rozměry pracovního prostoru stroje se pohybují kolem tří metrů šířky, od pěti do dvanácti metrů délky a až pěti metrů výšky. Na rozdíl od ostatních skupin kartézsky uspořádaných CMM nemají tato zařízení pevná lože. Převážně se tedy rozdělena na několik částí a sestavují se až přímo na hale. Jak už vyplývá z konstrukce stroje a velikosti měřicího rozsahu, nebude tento druh strojů patřit k těm nejpřesnějším. Chyba měření se u nich pohybuje kolem čtyř mikrometrů. Dosahovaná přesnost měření je zásadně ovlivněna kvalitou seřízení stroje při jeho sestavení. Korekční mapa se vytváří až přímo na místě sestavení stroje. Na obrázku níže je zobrazen mostový CMM. [20], [25]



Obrázek 69: Mostové souřadnicové měřicí zařízení [26]

Posledním typem CMM spadajícím do skupiny kartézsky uspořádaných zařízení je **sloupový souřadnicový měřicí stroj s vodorovným ramenem**, nazývaný také stojanovým typem CMM zařízení. Hlavním konstrukčním prvkem, který přináší jak řadu výhod, tak řadu nevýhod, je právě vysunutelné měřicí rameno. Otevřená konstrukce stroje ho dělá vhodným pro integraci do výrobních linek. Nicméně, pozice měřicí pinoly na vodorovném rameni může mít na přesnost měření neblahý vliv. Je-li měřicí pinola umístěna v krajní pozici vodorovného ramene, mohlo by dojít k jeho nepatrnému prohnutí vlivem hmotnosti měřicí pinoly. Standardně dokáže tento typ CMM měřit s chybou v řádech desítek mikrometrů. Na obrázku níže lze vidět, jak takové zařízení vypadá. [20], [27]



Obrázek 70: Sloupové souřadnicové měřicí zařízení [28]

4.3.2 Nekartézsky uspořádané CMM

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, existuje celá řada součástí, jejichž rozměrové a tvarové charakteristiky je vhodné měřit v jiném než kartézském souřadnicovém systému. Příkladem mohou být součásti válcovitého tvaru, které je vhodné měřit v cylindrickém souřadném systému. Z toho důvodu jsou vyvíjena měřicí zařízení, která jsou konstrukčně uzpůsobena pro měření v nekartézských souřadnicových systémech. Takto konstruovaná zařízení mívají zpravidla několik různě pohyblivých os, které umožňují velkou flexibilitu měření a snadnou manuální obsluhu. Právě tato takzvaná svoboda při měření však přináší obtíže v souvislosti s korekcí měřicího zařízení. To z důvodu, že do každého bodu měřicího rozsahu přístroje se lze dostat nekonečně mnoha způsoby. Obecně lze tato zařízení označit za vyloženě nevhodná pro sériové měření velkého počtu součástí. Měřicí stroje bývají zpravidla obsluhováni lidmi, kteří zapříčiní mnohonásobné zvýšení variability výsledků měření. Na druhou stranu je to právě flexibilita, mobilita, relativně snadné ovládání a absence nutnosti vytváření měřicích programů pro jednotlivá měření, které v určitých případech činí tato zařízení vhodnější než kartézsky uspořádaná souřadnicová měřicí zařízení. [20]

Typickým nekartézsky uspořádaným souřadnicovým měřicím zařízením, pracujícím konkrétně ve sférickém souřadnicovém systému, je **měřicí rameno**. Toto zařízení je složeno z posuvného ramene a kloubů umožňujících náklon a natočení ramene. Právě tato široká škála pohybů zajišťuje obrovskou flexibilitu měření. Na následujícím obrázku je popisované zařízení zachyceno. Mimo již zmiňovanou flexibilitu měření a tím i pohodlnou manuální obsluhu, je velkou výhodou tohoto zařízení jeho malý rozměr a tím pádem i velká mobilita. V případě nutnosti měření objektů na těžko přístupných místech se hojně využívají právě měřicí ramena. [20]



Obrázek 71: Měřicí rameno [29]

Dalším zástupcem nekartézsky uspořádaných souřadnicových měřicích zařízení je **ruční CMM**. Je to zařízení fungující v cylindrickém souřadném systému, kde je poloha bodu definována parametry délky, výšky a úhlu natočení měřicího ramene. Princip měření na tomto zařízení je podobný, jako u standardního portálového nebo konzolového CMM, s tím rozdílem, že pohyby snímací hlavy neřídí počítačový software, ale obsluha stroje manuálně. Přední výhodou tohoto zařízení je jeho jednoduché ovládání. Na druhou stranu zaostává toto zařízení za ostatními v oblasti přesnosti a opakovatelnosti měření. Jak takový stroj může vypadat, předvádí **Obrázek 72**. [20]



Obrázek 72: Ruční souřadnicové měřicí zařízení [30]

Mezi CMM zařízení fungující v jiném než kartézském souřadnicovém systému patří dále například **laser tracer**, nebo **laser radar**. Obě zařízení využívají pro snímání bodů laserový paprsek. První zmíněné zařízení slouží především k odměřování vzdálenosti, kterou určuje na základě doby trvání odrazu laserového paprsku od koutového odražeče zpět na čidlo umístěné u zdroje paprsku. [20]

Laser radar funguje stejně jako laser tracer, s tím rozdílem, že nepotřebuje pro určení vzdálenosti snímaného bodu žádný koutový odražeč. Je tedy na obsluhu značně méně náročný, což jde však znát na jeho ceně, která je přibližně dvakrát vyšší než cena laser traceru. Níže na obrázku vlevo je možné vidět laser tracer spolu s koutovým odražečem a vpravo lze vidět laser radar. [20]



Obrázek 73: Laser tracer a laser radar [31], [32]

4.3.3 Materiály používané pro konstrukci CMM

Jednotlivé komponenty souřadnicových měřicích strojů bývají vyráběny z různých materiálů v závislosti na tom, jaké vlastnosti musí mít s ohledem na jejich příslušnou funkci. Stejně tak se liší materiály dílů v závislosti na prostředí, ve kterém budou muset pracovat.

Dnes je nejrozšířenějším a cenově nejvíce dostupným materiálem využívaným pro konstrukci součástí CMM **ocel**. Hlavní výhodou tohoto materiálu je jeho relativně nízká cena v porovnání s ostatními materiály. Na druhou stranu je to materiál s vysokou hustotou a díly z něj vyráběné mají tedy vysokou hmotnost. To může být v některých případech problém, zejména při uvážení dynamických účinků, které působí na pohyblivé části stroje a zvyšují tak celkovou variabilitu měření. Další zásadní nevýhodou oceli je její vysoká tepelná roztažnost, jejímž vlivem dochází na stroji ke vzniku teplotních gradientů, které způsobují deformaci částí zařízení, a mohou tak představovat další zdroj variability. Právě z tohoto důvodu se používá ocel výhradně pro velké základové konstrukce portálových strojů, kde není požadavek na přesnost měření tak vysoký. Možné řešení představuje používání invaru. Invar je materiál podobný oceli, konkrétně slitina niklu a železa, který si zachovává kladné stránky oceli, a navíc je výrazně tepelně stabilnější. [20]

Dalším často používaným materiálem pro konstrukci CMM je **granit** neboli přírodní žula. V porovnání s ocelí je výrazně tepelně stálejší a má více než dvakrát nižší hustotu, a při stejném objemu tedy nižší hmotnost. Dokáže také dobře pohlcovat vibrace, a proto se dnes využívá především na konstrukci základových desek strojů. Jiné části strojů se z granitu nevyrábějí proto, že je obtížné jej jakkoli tvarovat, a ve výsledku by byly součásti vyráběné z tohoto materiálu příliš hmotné. [20]

Materiál, který je, podobně jako granit, vysoce tepelně stabilní, ale zároveň se dá libovolně tvarovat, je **keramika**. V porovnání s granitem je však cena tohoto materiálu výrazně vyšší. [20]

Jeden z materiálů, který se využívá především díky své nízké hustotě, a tedy nízké i hmotnosti, je **hliník**, konkrétně jeho slitiny. Z dosud zmíněných materiálů má tento materiál největší teplotní roztažnost, což by se mohlo jevit jako zásadní negativum. Nicméně, spolu s vysokou teplotní roztažností má hliník také velkou teplotní vodivost. To ve finále znamená, že se materiál prohřeje v celém svém objemu, v materiálu nedochází ke vzniku výrazných teplotních gradientů a jeho deformaci je tak možné snadno kompenzovat. [20]

Současným trendem v oblasti konstrukce souřadnicové měřicí techniky je využívání **uhlíkových kompozitních materiálů**. Tento materiál dosahuje velké tepelné stability a je ještě lehčí než hliník. Kombinace těchto na pohled ideálních vlastností se však projevuje na jeho ceně, která je v přepočtu na jednotku objemu ze všech zmiňovaných materiálů nejvyšší. [20]

Materiál	Hustota [kg/m^3]	Teplotní vodivost [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	Teplotní roztažnost [K^{-1}]
Ocel	7850	46	12
Žula (granit)	3000	2,1	8
Keramika	3200	60	6
Hliník	2700	237	23
Uhlíkový kompozit	1900	620	-1,4

Tabulka 10: Fyzikální vlastnosti materiálů používaných pro konstrukci CMM [20]

Tabulka 10 popisuje vlastnosti materiálů, které se využívají především pro konstrukci nosných a pohyblivých částí.

Co se týká materiálů používaných pro konstrukci snímačů, díky snímačů bývají vyrobeny nejčastěji z **hliníku**, nebo **kompozitu**, zejména díky své nízké hmotnosti a tepelné stálosti. Snímače mívají nejčastěji na svém konci dotyk tvaru kuličky, někdy také válečku, nebo disku. Tyto dotyky musí být z materiálu odolného proti otěru. Nejčastěji jsou využívány keramické materiály, konkrétně **rubíny**, nebo **hvězdné safíry**. Při volbě snímače, konkrétně materiálu jeho dotyku, je nutné zvážit, z jakého materiálu je měřená součást. Pro měření hliníkových součástí se nedoporučuje používat rubínové dotyky, neboť rubín disponuje vysokou afinitou k hliníku, a má tendenci ulpívat na povrchu součásti. Jinými slovy není dotyk snímače vystaven abrazivnímu, ale chemickému druhu opotřebení. Pro měření hliníkových součástí je vhodné používat dotyky z hvězdného safíru. [20]

Speciální materiál, ze kterého jsou vyrobeny součásti, na něž jsou kladeny největší požadavky zejména z hlediska tepelné stálosti, se nazývá **Zerodur**. Jedná se o druh sklokeramiky a vyrábí se z něj například měřítka os strojů nebo jiných velmi přesných etalonů a kalibračních pomůcek. [20]

4.4 Snímací systémy CMM

Předchozí kapitola byla věnována především konstrukci souřadnicových měřicích zařízení a popisu způsobů, jakými se zařízení pohybují a definují měřené body v rámci příslušných souřadnicových systémů. V této kapitole bude blíže popsána problematika samotného způsobu snímání bodů, která byla zatím zmíněna jen okrajově. Rozlišují se dva hlavní způsoby, jakými lze bod z povrchu součásti sejmout, a sice způsob kontaktní a bezkontaktní.

4.4.1 Kontaktní snímací systémy

Snímání jednotlivých bodů z povrchu součásti kontaktním způsobem je realizováno skrze kontakt měřicího dotyku s povrchem součásti. Snímání jednotlivých bodů kontaktními snímači funguje na principu zaznamenávání okamžiku, ve kterém je měřicí dotyk vychýlen vlivem kontaktu s měřenou součástí o výchylku odpovídající překonání stanovené snímací síly. Jednou z výhod měření kontaktními snímacími systémy je právě simulace doteku povrchu měřené součásti s jiným povrchem. Snímání součásti dotykem skutečného tvaru zároveň představuje určitý druh mechanické filtrace měřeného povrchu. Stejně tak jsou kontaktní snímací systémy méně náchylné na ovlivnění výsledků měření přítomností nečistot na povrchu měřené součásti. Na druhou stranu je při jakémkoli kontaktu snímacího dotyku a součásti měřený povrch elasticky deformován a naměřený rozměr tak zcela neodpovídá skutečnosti. Snímače používané v dnešní době jsou schopny tento vliv minimalizovat díky možnosti měnit velikost snímací síly. Nejmodernější kontaktní snímací zařízení dokážou velikost snímací síly regulovat v průběhu měření. [20]

Rozlišují se dva systémy kontaktního snímání bodů z povrchu měřené součásti, a to spínací a skenovací. Spínací systémy fungují na principu snímání samostatných bodů. Snímač musí nad měřeným bodem určitou chvíli vyčkat, aby se stroj stihl ustálit a bod z povrchu součásti mohl být sejmout co nejpřesněji. Standardně probíhá snímání rychlostí přibližně jeden bod za sekundu. Ve srovnání se skenovacími systémy, které budou blíže popsány dále, je rychlost snímání výrazně nižší. Je vhodné mít tuto skutečnost na paměti obzvláště při tvorbě jednotlivých měřicích strategií. Vhodné rozmístění co možná nejmenšího počtu bodů dokáže výrazně zkrátit celkovou dobu měření. [20]

Skenovací systémy se od spínacích systémů odlišují zejména rychlostí snímání bodů. Snímač vykonává při měření součásti plynulý pohyb a je standardně schopen zaznamenat kolem pěti set bodů za jednu sekundu. Hlavní výhodou měření součástí pomocí skenovacích snímačů, je právě vysoká produktivita a také poskytování výsledků, které jsou často objektivnější, neboť

nejsou ovlivněny nedostatečným počtem snímaných bodů. Velký počet snímaných bodů pozitivně ovlivňuje výsledky vyhodnocení tvarových charakteristik, stejně tak minimalizuje chybu opakovatelnosti měření. [20]

4.4.2 Bezkontaktní snímací systémy

Jednotlivé body měřeného povrchu lze snímat také bezkontaktním způsobem. Při samotném snímání bodů není součást nijak deformována. Na druhou stranu však takový systém při měření nesimuluje dotek povrchu součásti s jiným tělesem a nedosahuje tak výhod mechanické filtrace jako tomu je u kontaktních snímacích systémů. Výsledky měření jsou silně závislé na světelných podmínkách prostředí, ve kterém probíhá měření. Dalším faktorem, který ovlivňuje výsledky měření, je barva povrchu součásti. Všechny tyto vlivy zvyšují chybu měření na hodnoty až desítek mikrometrů. Proto jsou zařízení využívající bezkontaktní způsob měření využívána především v případech, kdy jsou na měřicí proces kladeny vysoké požadavky z hlediska produktivity, anebo nelze z nějakého důvodu provést měření kontaktními snímacími systémy. Konkrétně využívají tento způsob snímání zařízení jako například laser scannery, kamerové systémy nebo výpočetní tomografie. [20]

4.5 Kontrola součásti na CMM

Postup měření na souřadnicovém měřicím zařízení lze obecně shrnout do několika kroků. Náročnost některých kroků se může více či méně lišit v závislosti na charakteru měřené součásti. Nicméně je možné tvrdit, že všechny kroky, jejichž bližší popis následuje, se v procesu kontroly součásti na CMM objevují. [20]

4.5.1 Analýza výkresové dokumentace

V první řadě je vhodné, aby si metrolog, udělal obrázek o tom, jaký díl vlastně bude měřit, k čemuž mu poslouží výkresová dokumentace měřeného dílu. Tento krok je pro samotný výsledek celého měření stěžejní, neboť přímo ovlivňuje všechny další kroky. Bývá to tedy právě analýza výkresové dokumentace, která je z časového hlediska v porovnání s ostatními kroky nejnáročnější. Lze tvrdit, že čím složitější je měřený díl, tím více času tento krok zabere. Nicméně pokud je tato „nulová fáze“ měření dobře zvládnutá, šance, že dosáhne metrolog směrodatných výsledků v rozumném časovém horizontu, je o to větší. [20]

4.5.2 Definice upnutí

Po získání představy o tom, jak je součást velká, jaký má tvar a jaké charakteristiky je nutné naměřit, musí metrolog definovat vhodné upnutí součásti na stroji. Měření součásti na CMM probíhá výhradně na jedno upnutí, neboť jakýkoliv další zásah do systému upnutí během měření by mohl mít katastrofální vliv na výsledky měření. Při výběru upnutí je tvar součásti jedním z rozhodujících faktorů. Rotační součásti je možné měřit na výšku upnutím do otočného stolu, nebo na ležato upnutím do prizmat. Nerotační součásti se upínají pomocí upínacích přípravků na desku pracovního stolu stroje. Měřená součást by měla být upnuta dostatečně pevně, aby se při měření nijak nevychýlila. Na druhou stranu by příliš pevné upnutí mohlo součást deformovat a výsledky měření by tak byly znehodnoceny. Při upínání dlouhých součástí je také vhodné brát v úvahu jejich vlastní hmotnost, jejímž vlivem by se součást mohla prohýbat. Polohování měřené součásti před upnutím by rovněž mělo respektovat základny zvolené ve výkresové dokumentaci. [20]

4.5.3 Konfigurace a klasifikace snímacího systému

Po tom, co je součást vhodně upnutá, přichází na řadu konfigurace a klasifikace snímacího systému. Nejprve musí metrolog vybrat a sestavit snímače, které bude pro měření používat. Délka dřívků snímačů a velikost snímacích dotyků by měla být volena s ohledem na velikost a vzájemnou polohu jednotlivých elementů měřené součásti. Poté následuje klasifikace snímacího systému, jíž cílem je přizpůsobení snímacího systému aktuálním mechanickým vlastnostem stroje a podmínkám okolí. Samotný proces klasifikace probíhá v několika krocích. Nejprve se na desku stolu připevní kalibrační koule známých rozměrů a tvaru, a její orientace se přizpůsobí zvolené konfiguraci snímačů. Do pinoly stroje se poté upne referenční snímač, kterým následně provede operátor manuální klasifikaci sejmutím několika bodů z povrchu kalibrační koule za účelem zaměření polohy jejího středu. Poté se do měřicí pinoly upne zvolená měřicí konfigurace snímačů, s jejíž pomocí se znovu zaměří kalibrační koule, nejprve manuálně, poté již automaticky bez přičinění operátora. Tím se jednoznačně definuje poloha středu měřicích dotyků, vůči středu kalibrační koule. [20]

4.5.4 Vyrovnání součásti

Dalším krokem je vyrovnání součásti. Vyrovnání součásti lze popsat jako proces definování lokálního souřadnicového systému součásti v rámci globálního souřadnicového systému stroje. Souřadnicový systém součásti je definován právě tehdy, jsou-li omezeny jeho všechny stupně volnosti. Pro kompletní ustavení souřadnicového systému je potřeba odebrat minimálně šest stupňů volnosti, kterými se omezí tři translační a tři rotační pohyby. Operátor provádí vyrovnání nejprve ručně, poté provede stroj vyrovnání ještě jednou v CNC režimu. [20]

Rozlišuje se několik metod vyrovnání měřených součástí. Nejčastěji používanou metodou je **standardní metoda**, kdy se jednotlivé stupně volnosti odebírají pomocí roviny, přímky a bodu. Definováním roviny se zafixují dva rotační a jeden translační pohyb měřené součásti. Následně se zafixuje jeden rotační a jeden translační pohyb pomocí definování přímky. Poslední translační pohyb je fixován definováním bodu. Definování roviny a přímky stanoví orientaci dvou souřadnicových os, orientace třetí osy vyplývá z definice pravotočivého kartézského systému. Poslední zvolený bod fixuje počátek takto vzniklého souřadnicového systému. [20]

Další známou metodou, která se využívá k vyrovnání součástí obecných tvarů, je takzvaná **metoda 3D připasování**. Cílem této metody je definovat souřadnicový systém měřené součásti pomocí několika bodů tak, aby byl její pohyb fixován ve všech směrech. Pro dosažení optimálních výsledků měření je nutné rozmístit body sloužící k definici vyrovnání měřené součásti rovnoměrně. Koncentrování zvolených bodů výhradně kolem jednoho prvku součásti by mohlo vést ke zvyšování chyby tvaru odlehlých prvků součásti. [20]

Existuje také způsob vyrovnání **metodou RPS** (z německého Referenz Punkte System), která definuje souřadnicový systém měřené součásti s vazbou na souřadnicový systém celé sestavy, do níž součást patří. Tato metoda se využívá typicky v automobilovém nebo leteckém průmyslu, kde jsou referenční body sestavy pevně stanoveny. [20]

K vyrovnání dílů trubkového charakteru se používá **metoda 6P**. Definují se tři středové body kruhových řezů na trubce, z nichž každý odebere 2 stupně volnosti. První řez definuje počátek souřadnicového systému, druhý řez zafixuje prostorovou rotaci systému a třetí řez spolu s jeho spojnicí s druhým řezem odebere zbylé dva stupně volnosti. [20]

4.5.5 Extrakce bodů a definice geometrických elementů

Po absolvování všech předešlých kroků přichází na řadu samotné měření. Snímací dotyk snímá jednotlivé body povrchu součásti dle naprogramovaných strategií, kterým jsou následně v počítačovém softwaru přiděleny konkrétní souřadnice. Každý měřený element součásti je definován minimálním počtem bodů, z nichž může být sestaven. Doporučuje se snímat více než minimální počet bodů nutný k definici prvku, aby nebyl následující proces vyhodnocení extrahovaných bodů neblaze ovlivněn sejmutím bodů z ojedinele se vyskytujících rýh nebo náhodně ulpělých nečistot na povrchu měřené součásti. Za účelem dosažení co možná nejvíce objektivních výsledků měření je vhodné při tvorbě strategií měření rozmístit jednotlivé dráhy nebo snímané body podél povrchu měřeného elementu rovnoměrně. Kvalitu výsledků měření ovlivňuje také zvolená rychlost snímání bodů, konkrétně dynamické účinky pohybujícího se snímače a schopnost snímače zaznamenávat jednotlivé extrahované body. Snahou je dosažení optimálního nastavení měřícího procesu s ohledem na rychlost a počet snímaných bodů. Rychlost snímání by měla být nastavena tak, aby bylo měření co možná nejproduktivnější, ale zároveň stabilně přinášelo směrodatné výsledky. [20]

4.5.6 Výpočet geometrických charakteristik a vyhodnocení výsledků

Nasnímané elementy měřené součásti jsou dále zpracovávány v metrologickém softwaru. Nejprve bývají extrahované body jednotlivých elementů vyfiltrovány pomocí zvolených filtrů a následně jsou těmto elementům na základě zvolených metod vyhodnocení přiřazovány konkrétní charakteristiky, například rozměr, tvar, nebo umístění a orientace vůči ostatním prvkům. V poslední fázi měření následuje zhodnocení získaných charakteristik a interpretace výsledků měření. Dnešní metrologické softwary dokážou naměřené charakteristiky porovnat s charakteristikami předepsanými na výkrese a rozhodnout, zda vyhovují, či nevyhovují specifikaci. Naměřená data je možné interpretovat jak číselně, tak graficky skrze protokoly z měření. V dnešní době, zejména ve velkosériových výrobních procesech, se měřená data využívají jako okamžitá zpětná vazba pro výrobní proces. Na základě získaných výsledků měření je možné pohotově reagovat na změny vznikající ve výrobním procesu, takřka ihned provést vhodný zásah, a tím zvyšovat kvalitu každé další vyrobené součásti. [20]

5 Způsobilost procesu

Všechny skutečné procesy se v čase nějakým způsobem mění. To znamená, že dochází k jejich přirozenému kolísání, a podléhají tedy určité míře variability. Variabilita procesu může být různě vysoká a může mít celou řadu příčin. Každý výrobní podnik, zejména ten, který vyrábí velké série produktů, by se měl snažit variabilitu vznikající ve svých procesech (výroby, měření) regulovat do takové míry, aby vyhověl požadavkům zákazníka, a mohl tak své procesy považovat za způsobilé. Úkolem statistické regulace procesu je příčiny vznikající variability identifikovat, odstranit a pomoci nalézt opatření, která by zajistila, že se již nebudou opakovat. Zároveň by měl být proces regulován takovým způsobem, aby byly signály charakterizující příčiny zdrojů variability vysílány právě tehdy, jsou-li tyto příčiny v procesu opravdu přítomny. Konkrétním cílem statistické regulace procesu je dostat proces do stavu, kdy není ovlivňován žádnými vymezenými zdroji variability a v čase nedochází ke změnám polohy jeho těžiště ani celkové variability. [33]

Způsobilost procesu lze obecně chápat jako charakteristiku procesu popisující vztah mezi přirozeným kolísáním procesu vznikajícím vlivem působení náhodných příčin a mezi technickým zadáním. Pro kvantifikaci této charakteristiky se v praxi užívají koeficienty nazývané ukazateli způsobilosti. Ukazatele způsobilosti procesu lze v závislosti na požadovaných informacích z hlediska časového rozdělit na krátkodobé, předběžné a dlouhodobé. [33]

Zkoumání způsobilosti procesu pomocí krátkodobých ukazatelů způsobilosti se provádí s cílem ověřit, zda je fungování procesu statisticky zvládnuté. Výsledky měření jsou v takovém případě získány zpravidla z jediného provozního cyklu. Pomocí předběžných ukazatelů způsobilosti se provádí analýza procesu před náběhem sériové výroby nejčastěji za účelem odstranění zvláštních příčin variability. Pro dosažení optimálních výsledků by se měl potřebný rozsah pohybovat okolo pětadvaceti měřených podskupin. Variabilita procesu v delším časovém období je sledována dlouhodobými ukazateli způsobilosti procesu. Měřená data, která slouží k výpočtu těchto koeficientů, jsou získávána po náběhu sériové výroby, za již zaběhlých provozních podmínek, v rámci delšího časového období. Všechny vypočítané hodnoty ukazatelů způsobilosti rovněž podléhají normálnímu rozdělení, a proto je pro ně možno stanovit konfidenční intervaly. [33]

Při následné interpretaci vypočítaných koeficientů je nutné pamatovat na to, že ukazatele platí za předpokladu, že je proces statisticky zvládnutý a že se sledovaný znak kvality chová dle normálního rozdělení. Proto je pro platnost ukazatelů způsobilosti nutné nejprve ověřit výše zmíněné předpoklady. Výpočet ukazatelů způsobilosti procesů, jejichž znaky se neřídí normálním rozdělením, je totiž zcela odlišný. [33]

5.1 Ukazatele způsobilosti procesu

Rozlišují se tři hlavní ukazatele způsobilosti procesu, a sice ukazatele C_p , C_{pk} a C_{pM} . Každý z ukazatelů popisuje způsobilost procesu s přihlédnutím k jiným omezujícím podmínkám. [33]

5.1.1 Ukazatel způsobilosti C_p

Ukazatel způsobilosti C_p popisuje, čeho je proces schopený dosáhnout za předpokladu, že je jeho těžiště umístěno ve středu tolerančního pole sledovaného znaku jakosti. Nezohledňuje tedy nastavení procesu, jinými slovy nebere v úvahu, kde se nachází střední hodnota procesu μ v rámci tolerančního pole sledovaného znaku kvality. Jak již bylo zmíněno výše, ukazatel vychází z předpokladů, že se sledovaný znak jakosti N řídí normálním rozdělením $N(\mu, \sigma)$ a měřený rozsah je tvořen počtem k skupin o n jednotkách. Ukazatel způsobilosti se vypočítá dle vztahu, který uvádí **Rovnice 4**

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma},$$

Rovnice 4: Vztah pro výpočet ukazatele způsobilosti procesu C_p [33]

kde USL značí horní mez specifikace, LSL značí dolní mez specifikace a parametr σ je určen dle vztahu níže

$$\sigma \approx \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s_i^2},$$

Rovnice 5: Vztah pro odhad výběrové směrodatné odchylky [33]

kde parametr \bar{s} značí průměrnou směrodatnou odchylku k podskupin a s_i^2 reprezentuje rozptyl i -té podskupiny. [33]

5.1.2 Ukazatel způsobilosti C_{pk}

Na rozdíl od ukazatele způsobilosti C_p přihlíží ukazatel C_{pk} ke skutečnému nastavení procesu, a tedy bere v úvahu polohu střední hodnoty procesu v rámci tolerančního pole sledovaného znaku kvality. Jinými slovy říká, čeho proces za sledované období skutečně dosáhl. Číselná hodnota koeficientu C_{pk} bude tedy vždy menší nebo rovna číselné hodnotě ukazatele C_p . Stejně jako u ukazatele C_p , i pro ukazatel C_{pk} musí platit předpoklad, že se sledovaný znak jakosti N řídí normálním rozdělením $N(\mu, \sigma)$ a měřený rozsah je tvořen počtem k skupin o n jednotkách. Ukazatel C_{pk} se potom určí dle vztahu

$$C_{pk} = \min \left\{ \frac{USL - \mu}{3\sigma}; \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \right\},$$

Rovnice 6: Vztah pro výpočet ukazatele způsobilosti procesu C_{pk} [33]

kde USL značí horní mez specifikace, LSL značí dolní mez specifikace, parametr μ vyjadřuje již zmiňovanou střední hodnotu procesu a parametr σ je určen dle vztahu, který popisuje **Rovnice 4**. Parametr μ se odhaduje dle vztahu

$$\mu \approx \bar{\bar{x}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \bar{x}_i,$$

Rovnice 7: Vztah pro výpočet střední hodnoty procesu [33]

kde \bar{x}_i je výběrový průměr i -té podskupiny, a $\bar{\bar{x}}$ tedy znázorňuje průměr výběrových průměrů podskupin.

Výpočet je možné vztáhnout konkrétně k jedné ze specifikačních mezí. V takovém případě by se ukazatel určil dle vztahu

$$C_{pU} = \frac{USL - \mu}{3\sigma},$$

Rovnice 8: Vztah pro výpočet ukazatele způsobilosti procesu C_{pU} [33]

nebo dle vztahu

$$C_{pL} = \frac{\mu - LSL}{3\sigma}.$$

Rovnice 9: Vztah pro výpočet ukazatele způsobilosti procesu C_{pL} [33]

V případech, kdy je uvažována pouze horní mezní hodnota USL , bude platit $C_{pk} = C_{pU}$, analogicky potom v případě uvažování pouze dolní mezní hodnoty LSL , a sice $C_{pk} = C_{pL}$. [33]

5.1.3 Ukazatel způsobilosti C_{pM}

Posledním ze tří hlavních ukazatelů způsobilosti procesu je ukazatel C_{pM} . Tento ukazatel je užíván tehdy, kdy předepsaná cílová hodnota neleží ve středu tolerančního pole. Od ukazatelů C_p a C_{pK} se liší tím, že bere v úvahu odchylku nastavení střední hodnoty procesu μ od cílové hodnoty procesu T . Podobně jako u výše popsaných ukazatelů platí pro tento ukazatel stejné předpoklady. Sledovaný znak jakosti N odpovídá svým chováním normálnímu rozdělení $N(\mu, \sigma)$ a rozsah měření tvoří k podskupin rozsahu n jednotek. Pro výpočet ukazatele platí vztah

$$C_{pM} = \frac{USL - LSL}{6\sigma_T}.$$

Rovnice 10: Vztah pro výpočet ukazatele způsobilosti procesu C_{pM} [33]

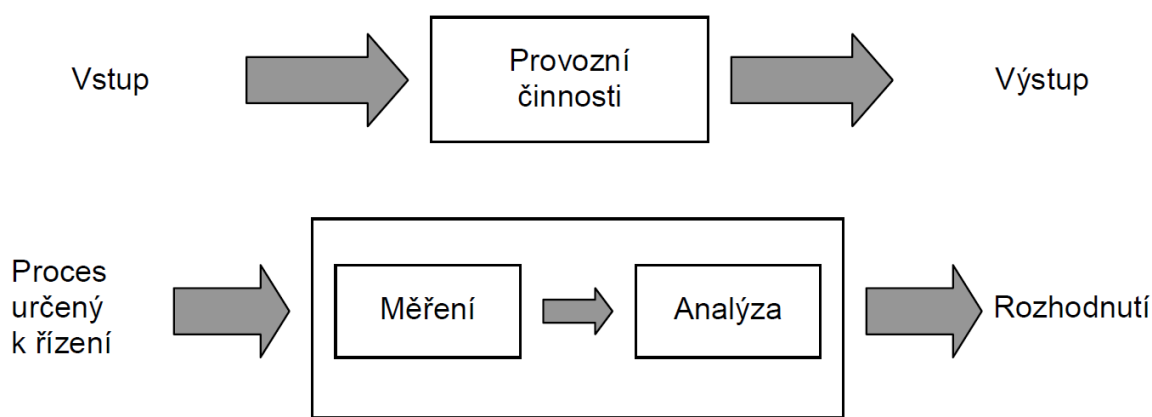
Parametr σ_T je odhadován pomocí vztahu

$$\sigma_T \approx s_T = \sqrt{s^2 + (\bar{\bar{x}} - T)^2}.$$

Rovnice 11: Vztah pro odhad parametru σ_T [33]

6 Způsobilst procesu měření

Jak již bylo zmíněno v předešlé kapitole, snahou každého výrobního i nevýrobního podniku je zajistit možnost nastavení svých procesů tak, aby se co nejvíce blížily procesům ideálním, jejichž výstupy by vyhovovaly všem specifikacím a technickým požadavkům, které jsou na ně kladeny. Aby bylo možné procesy efektivně řídit, je nutné znát faktory, které chování procesu ovlivňují. Stejně tak je nezbytně nutné dokázat chování procesu monitorovat a zaznamenávat. Analýza chování procesů a hodnocení jejich výstupů se v technické praxi nazývá pojmem kontrola. Kontrola procesu je prováděna skrze sledování parametrů procesu, rozpracovaných dílů nebo hotových výrobků pomocí měřicích zařízení či vhodných etalonů. Díky těmto nástrojům je možné rozhodnout, zda proces pracuje s variabilitou, která odpovídá stabilizovanému procesu a zároveň vyhovuje technickým požadavkům. Samotnou kontrolní činnost lze vnímat jako proces. Pro znázornění procesu kontroly slouží níže uvedené schéma. [33]



Obrázek 74: Schéma procesu kontroly [33]

Kontrolní proces zahrnující měření a analýzu je souhrnně označován jako proces měření. Výsledky procesu měření ovlivňuje nejen použité měřicí zařízení, ale také schopnost operátora s měřicím zařízením správně zacházet a výsledky následně analyzovat a interpretovat. [33]

Ani sebelépe nastavený a realizovaný proces měření nebude poskytovat vždy stejné výstupy ve formě totožných naměřených hodnot. Je však možné sledovat, jak moc se měřené hodnoty liší od sebe navzájem, a zejména to, jak moc se liší od hodnoty, kterou by měly reprezentovat. V závislosti na velikosti a příčině vzniku odchylky od této ideální hodnoty můžeme dělit chyby, které měřicí proces doprovází. Rozlišují se chyby hrubé, vymezitelné a náhodné. Hrubé chyby bývají nejčastěji způsobeny zaváháním obsluhy (chybný odečet naměřené hodnoty, chybný přepis), závadou měřicího zařízení, nebo výrazným zásahem okolních vlivů (otřesy, teplotní šoky). Pokud se mezi naměřenými hodnotami objeví hodnota výrazně odlehlá, je pravděpodobné, že je důsledkem právě hrubé chyby. Takovéto hodnoty je možné ze souboru měřených hodnot vyloučit za předpokladu, že byl aplikován některý z testů odlehlých hodnot, příčina odlehlosti byla jasně definována a byla přijata opatření vedoucí k neopakování zjištěné příčiny. [33]

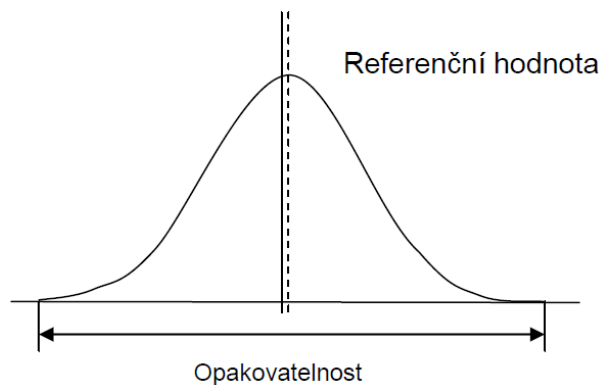
Chyba, kterou do výsledků měření vnáší samotné měřidlo, se stanovuje na základě opakovaného měření etalonu, který v tomto případě slouží jako ztělesněná míra pravé referenční hodnoty. [33]

Skutečný měřicí proces bude vždy podléhat alespoň nepatrné míře variability, neboť některé její příčiny nelze zcela eliminovat. Proto je nutné, stejně jako tomu je u popisu každého

procesu, zavádět popisné výběrové charakteristiky získané pomocí statistické analýzy většího souboru opakovaných měření. Poloha souboru na číselné ose bývá nejčastěji udávána aritmetickým průměrem, nebo mediánem souboru měřených hodnot. Ke stanovení rozptýlení hodnot kolem těžiště (polohy) souboru slouží výběrová směrodatná odchylka nebo výběrové rozpětí. [33]

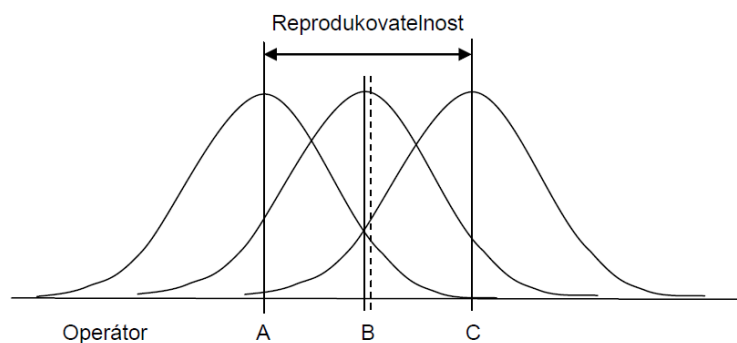
Existuje celá řada charakteristik, kterými lze popsat jednotlivé druhy chyb vznikajících v procesu měření. Patří mezi ně například strannost, opakovatelnost, reprodukovatelnost, stabilita, linearita a reverzibilita. [33]

Opakovatelnost měření je označována variabilita výsledků měření, které provedl stejný operátor v krátkém časovém úseku stejným měřidlem na stejném dílu za definovaných a neměnných podmínek. Opakovatelnost nelze zcela eliminovat, neboť je vyvolána náhodnými jevy. Je možné ji pouze zlepšit skrze zajištění stabilních podmínek měření (minimalizace okolních vibrací, tepelná stabilita prostředí, stálá měřicí síla...). [33]



Obrázek 75: Variabilita procesu ovlivněná opakovatelností [33]

Reprodukovatelnost je charakteristika měřicího procesu, která se velmi podobá opakovatelnosti, s tím rozdílem, že nepostihuje variabilitu jediného operátora, ale variabilitu mezi operátory. Reprodukovatelnost je definována jako variabilita průměrů měření stejného znaku jednoho dílu, která byla provedena různými operátory při užití stejného měřidla za stejných podmínek. Variabilitu reprodukovatelnosti nelze, stejně jako tomu je u opakovatelnosti, zcela eliminovat, neboť vliv jednotlivých operátorů je náhodný. Zejména u ručních měřicích přístrojů je vliv variability mezi operátory významný. Z toho vyplývá, že vznikající variabilitu mezi operátory lze výrazně snížit například užíváním souřadnicové měřicí techniky, která využívá při měření automatizované systémy řízené počítačem. [33]



Obrázek 76: Variabilita procesu ovlivněná reprodukovatelností [33]

6.1 Analýza chyb opakovatelnosti a reprodukovatelnosti

Na celkové variabilitě procesu měření se podílí celá řada různých zdrojů. Mezi ty nejvýznamnější patří především přesnost měřicího přístroje a poté opakovatelnost a reprodukovatelnost procesu měření. Přesnost měřidla je normou definována jako schopnost měřicího přístroje poskytovat výstupní signály blízké pravé hodnotě. To, s jakou přesností měřidlo funguje, je ovlivněno celou řadou faktorů, které nejbližší souvisejí s principem, na kterém měřidlo funguje, a s jeho konstrukčním a materiálovým provedením. Neexistuje měřicí zařízení, které by dokázalo pracovat s absolutní přesností. Z toho plyne, že přesnost měřidla je nutné považovat za zdroj variability procesu měření, který nelze zcela eliminovat. Stejně tak je nemožné eliminovat zdroje variability opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měřicího procesu. Ke kvantifikaci vlivů chyb vznikajících v důsledku opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření slouží analýza R&R (z anglického repeatability and reproducibility). [33]

Analýza R&R může vycházet buď z celkové přirozené variability procesu, která zahrnuje mimo vlivy opakovatelnosti a reprodukovatelnosti také vlivy variability různých součástí, nebo z variability jedné součásti, anebo z povolené variability, která je závislá na mezních hodnotách definovaných pro sledovaný znak jakosti. Přijatelnost procesu měření lze vyhodnocovat různými způsoby, a sice pomocí procentní míry variability procesu, procentní míry „spotřebované“ tolerance nebo na základě počtu rozdílných kategorií dat. [33]

Je-li proces hodnocen na základě **procentní míry variability procesu**, je možné proces považovat za vyhovující v případě, kdy jsou výsledky měření provedené jedním operátorem opakovatelné a výsledky provedené různými operátory reprodukovatelné. Při splnění tohoto předpokladu lze tvrdit, že variabilita měření, kterou operátor pomocí měřidla detekuje, skutečně mapuje variabilitu mezi díly a ne variabilitu operátora nebo operátorů. To znamená, že variabilita operátorů by měla být v poměru k celkové variabilitě procesu měření co možná nejmenší, aby byl proces měření schopen poskytovat vypovídající výsledky. Jinými slovy lze tvrdit, že lepších výsledků měření proces dosahuje v případech, kdy přirozená variabilita vyplňuje větší část tolerančního pole. Pro kvantifikaci procentní míry variability procesu, které takzvané „připadá na vrub faktorům R&R“ se uvažují vztahy uvedené níže, a sice

$$\sigma_m = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_o^2},$$

Rovnice 12: Vztah pro výpočet směrodatné odchylky systému měření [33]

kde σ_m reprezentuje směrodatnou odchylku systému měření, σ_e značí směrodatnou odchylku měřidla a σ_o představuje směrodatnou odchylku operátora. Celková variabilita měřidla je potom dána vztahem

$$\sigma_T^2 = \sigma_p^2 + \sigma_m^2,$$

Rovnice 13: Vztah pro výpočet směrodatné odchylky měřidla [33]

kde σ_T udává směrodatnou odchylku měřidla a σ_p odpovídá směrodatné odchylce rozměrů měřených součástí. [33]

Samotná procentní míra variability procesu měření, neboli vyjádření, jak velkou část zastává v celkové variabilitě měřidla variabilita systému měření, je udávána vztahem, který definuje **Rovnice 14**

$$\% R\&R = \frac{\sigma_m}{\sigma_T} \cdot 100.$$

Rovnice 14: Vztah pro výpočet procentní míry variability procesu měření [33]

Je-li měřicí proces hodnocen dle kritéria **procentní míry tolerance**, uvažuje se, jak velkou část z celého tolerančního pole zaujímá variabilita procesu měření (jejímž zdrojem je právě R&R). Tento poměr popisuje vztah

$$\% tolerance = \frac{5,15 \cdot \sigma_m}{tolerance} \cdot 100,$$

Rovnice 15: Vztah pro výpočet procentní míry spotřebované tolerance [33]

kde *tolerance* reprezentuje šíři tolerančního pole, která se rovná rozdílu hodnoty horní a dolní specifikační meze. [33]

V pořadí třetí kritérium, dle kterého lze hodnotit vliv opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření na celkovou variabilitu procesu, představuje **počet oddělených kategorií dat**. Počet oddělených kategorií vypovídá o rozlišovací schopnosti systému, která závisí na parametrech opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření, a lze si jej představit jako počet vzájemně se nepřekrývajících intervalů spolehlivosti, které pokrývají celé rozpětí vyráběných dílů. Ukazatel počtu oddělených kategorií tedy udává, mezi jakým počtem skupin ze souboru naměřených dat dokáže měřicí systém rozlišovat. Toto kritérium lze kvantifikovat pomocí vztahu uvedeného níže

$$počet\ oddělených\ kategorií = \frac{\sigma_p}{\sigma_m} \cdot 1,41.$$

Rovnice 16: Vztah pro výpočet počtu oddělených kategorií [33]

Účinek konkrétního systému měření na celkové ovládnání procesu se dle počtu oddělených kategorií liší. Jako příklad nedostatečného počtu oddělených kategorií lze uvést případ, kdy je měření podrobena deset rozdílných dílů. Pokud dle výpočtu vyjde počet oddělených kategorií menší než deset, například pět, znamená to, že měřicí systém nepracuje s dostatečnou přesností. Měřicí systém tím pádem pracuje s tak velkou variabilitou, že rozdělil soubor měření do pěti (místo deseti) množin, z nichž některé zahrnují více než právě jedno měření. Pokud je počet oddělených kategorií menší než dvě, měřicí proces dokáže odhalit pouze to, zda systém produkuje shodné či neshodné díly. Stejně tak není možné spolehlivě odhadnout parametry ani ukazatele procesu. Pro účinnou analýzu procesu se doporučuje, aby byl měřicí proces schopen rozlišovat alespoň pět oddělených kategorií. Pro takový měřicí systém má smysl odhadovat parametry a ukazatele procesu. [33], [34]

6.2 Ukazatele způsobilosti měřidla

V předchozí kapitole již bylo naznačeno, jak podstatně přispívá k celkové variabilitě měřicího procesu samotné měřidlo. Pro kvantifikaci způsobilosti měřidla se užívají, podobně jako tomu je u způsobilosti procesů, ukazatele (koeficienty) způsobilosti měřidla.

Existují dva pohledy na výpočet koeficientů způsobilosti měřidel, a sice dle metodiky Ford a Bosch. Způsoby výpočtu koeficientů způsobilosti měřidla navržené firmami Ford a Bosch jsou si velmi podobné, liší se pouze zvolenými výpočtovými konstantami (charakterizující šířku pásma), čemuž jsou však úměrně přizpůsobeny intervaly způsobilosti, tedy mezní hodnoty, kdy je možné měřidlo považovat za způsobilé. Metody jsou si tedy prakticky rovnocenné. Obě metody výpočtu vycházejí z předpokladu, že variabilita měřidla představuje pouze určitou část celkové variability procesu, která je dále označována jako šířka pásma. V obou metodách je možné vztahovat variabilitu měřidla k celkové variabilitě procesu, nebo k požadované šíři tolerančního pole. Pomocí ukazatelů způsobilosti měřidla lze rozhodnout, zda je zvolené měřidlo způsobilé. To znamená, že je možné s jistotou říci, že je zvolené měřidlo vhodné pro dané měření, a zda jsou operátoři užívající měřidlo schopni vyhovět požadavkům kladeným na měřicí proces. [33]

6.2.1 Ukazatele způsobilosti měřidla C_g a C_{gk} dle metodiky Ford

Metodika společnosti Ford stanovuje pro výpočet šířku pásma o velikosti 15 % (0,15). Koeficient způsobilosti měřidla, který uvažuje pouze vliv variability opakovatelnosti měření, se značí C_g a vypočítá se dle vztahu

$$C_g = 0,15 \cdot \frac{\sigma_p}{\sigma_a},$$

Rovnice 17: Vztah pro výpočet ukazatele způsobilosti měřidla C_g dle Forda [33]

kde σ_p vyjadřuje velikost směrodatné odchylky procesu a σ_a reprezentuje směrodatnou odchylku hodnot získaných opakovaným měřením etalonu. [33]

Pokud je žádoucí zahrnout při hodnocení způsobilosti měřidla i strannost měření, zavádí se ukazatel C_{gk} . Právě proto, že ukazatel C_{gk} zohledňuje také strannost měření, je při jeho výpočtu nutné pracovat i s polohou statistických charakteristik souboru měření vůči referenční hodnotě. Vztahy pro výpočet tohoto koeficientu jsou uvedeny níže:

$$C_{gk} = \frac{(X_r + 0,075 \cdot \sigma_p) - \bar{x}}{3 \cdot \sigma_a},$$

Rovnice 18: Vztah pro výpočet ukazatele způsobilosti měřidla C_{gk} dle Forda zprava [33]

$$C_{gk} = \frac{\bar{x} - (X_r - 0,075 \cdot \sigma_p)}{3 \cdot \sigma_a},$$

Rovnice 19: Vztah pro výpočet ukazatele způsobilosti měřidla C_{gk} dle Forda zleva [33]

kde parametr X_r značí referenční hodnotu a parametr \bar{x} zastává aritmetický průměr provedených měření. [33]

Při posuzování ukazatele C_{gk} se vždy počítá s (kritičtější) nižší ze dvou vypočítaných hodnot. Měřidlo je možné prohlásit za způsobilé, splňuje-li nerovnosti

$C_g > 1$ nebo $C_{gk} > 1$. V případě, že je způsobilost procesu hodnocena vzhledem k šíři tolerančního pole, vypadá vzorec pro výpočet koeficientu způsobilosti následovně

$$C_g = 0,15 \cdot \frac{T}{6 \cdot \sigma_a},$$

Rovnice 20: Vztah pro výpočet ukazatele způsobilosti měřidla C_g dle Forda vzhledem k tol. poli [33]

kde parametr T vyjadřuje šířku tolerančního pole a vypočítá se jako $T = USL - LSL$. Pro ukazatele způsobilosti měřidla vztažené k šíři tolerančního pole navíc uvažující strannost měření platí následující vztahy

$$C_{gk} = \frac{(X_r + 0,075 \cdot T) - \bar{x}}{3 \cdot \sigma_a},$$

Rovnice 21: Vztah pro výpočet ukazatele způsobilosti měřidla C_{gk} dle Forda vzhledem k tol. poli zprava [33]

$$C_{gk} = \frac{\bar{x} - (X_r - 0,075 \cdot T)}{3 \cdot \sigma_a}.$$

Rovnice 22: Vztah pro výpočet ukazatele způsobilosti měřidla C_{gk} dle Forda vzhledem k tol. poli zleva [33]

6.2.2 Ukazatele způsobilosti měřidla C_g a C_{gk} dle metodiky Bosch

Výpočet ukazatelů způsobilosti dle metodiky společnosti Bosch je téměř totožný s výpočtem navrženým metodikou Ford, s tím rozdílem, že metodika Bosch uvažuje šířku pásma rovnou 20 % (0,2). Tato změna se projeví ve vztazích pro výpočet jednotlivých ukazatelů následovně, je-li porovnávána variabilita měřidla k celkové variabilitě procesu. [33]

$$C_g = 0,20 \cdot \frac{\sigma_p}{6 \cdot \sigma_a},$$

Rovnice 23: Vztah pro výpočet ukazatele způsobilosti měřidla C_g dle Bosche [33]

$$C_{gk} = \frac{(X_r + 0,1 \cdot \sigma_p) - \bar{x}}{3 \cdot \sigma_a},$$

Rovnice 24: Vztah pro výpočet ukazatele způsobilosti měřidla C_{gk} dle Bosche zprava [33]

$$C_{gk} = \frac{\bar{x} - (X_r - 0,1 \cdot \sigma_p)}{3 \cdot \sigma_a}.$$

Rovnice 25: Vztah pro výpočet ukazatele způsobilosti měřidla C_{gk} dle Bosche zleva [33]

V případě, kdy se hodnotí způsobilost měřidla vzhledem k šíři tolerančního pole, vypadají vztahy pro výpočet koeficientů způsobilosti takto:

$$C_g = 0,20 \cdot \frac{T}{6 \cdot \sigma_a},$$

Rovnice 26: Vztah pro výpočet ukazatele způsobilosti měřidla C_g dle Bosche vzhledem k tol. poli [33]

$$C_{gk} = \frac{(X_r + 0,1 \cdot T) - \bar{x}}{3 \cdot \sigma_a},$$

Rovnice 27: Vztah pro výpočet ukazatele způsobilosti měřidla C_{gk} dle Bosche vzhledem k tol. poli zprava [33]

$$C_{gk} = \frac{\bar{x} - (X_r - 0,1 \cdot T)}{3 \cdot \sigma_a}.$$

Rovnice 28: Vztah pro výpočet ukazatele způsobilosti měřidla C_{gk} dle Bosche vzhledem k tol. poli zleva [33]

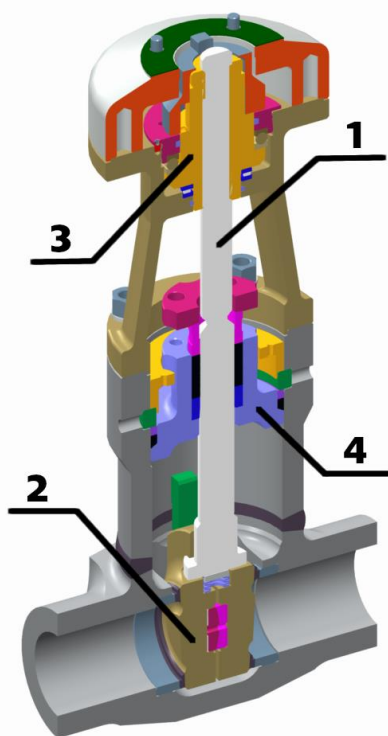
Měřidlo lze prohlásit za způsobilé, pokud vypočítaný koeficient splňuje nerovnost $C_g > 1,33$ nebo $C_{gk} > 1,33$. [33]

7 Realizace měření vybraného dílu

V této kapitole bude nejprve představen díl, který byl pro tuto práci zvolen jako předmět měření. Konkrétně bude popsána jeho funkce v rámci celé sestavy, ve které pracuje, a dále bude nastíněn postup jeho výroby. Na základě provedené analýzy výkresové dokumentace dílu bude navržen způsob kontroly vybraných elementů součásti pomocí dvou různých konfigurací snímačů. Nakonec budou popsány jednotlivé cíle měření a jejich realizace.

7.1 Popis funkce měřené součásti

Díl, který bude v této práci předmětem měření, má charakter vřetena. Konkrétně se jedná o vřeteno v šoupátku, jehož hlavní funkcí je manipulace s uzavíracím elementem, konkrétně klínem. Vřeteno má také funkci těsnící, neboť zajišťuje, aby nedocházelo k úniku média skrze ucpávku. **Obrázek 77** představuje sestavu šoupátka, včetně označení jednotlivých součástí, které spolu s vřetenem zajišťují fungování celé sestavy. Pozice 1 značí vřeteno, pozice 2 značí klín, pozici 3 je označena vřetenová matice a pozici 4 označuje tlakotěsné víko. [35]



Obrázek 77: Řez sestavou šoupátka [35]

Médium, většinou pára, proudí potrubím, které je pevně a těsně spojeno – přivařeno, nebo přišroubováno v případě přírubového typu připojení – s šoupátkem. Šoupátko samo o sobě může fungovat jako regulační nebo uzavírací orgán. Slouží-li šoupátko jako uzavírací orgán, klín je buď zcela vytažen a médium může potrubím volně procházet, nebo zcela spuštěn, a průtok média je zastaven. V případě, že slouží šoupátko jako regulační orgán, může být klín v libovolné pozici mezi krajními polohami, čímž je možné průtok média regulovat. Pohyb klínu je umožněn díky vřetenu, které se buď vysouvá směrem vzhůru a táhne klín s sebou, nebo se zasouvá směrem dolů a tlačí klín do sedla. Rotační pohyb vřetenové matice je převeden na lineární pohyb vřetena přes rovnoramenný lichoběžníkový závit. Potřebný točivý moment pro otáčení vřetenové matice je přiveden skrze otáčení ručního kola, nebo elektrický pohon. Elektrický pohon se používá v případech, kdy je potřeba ovládat mohutnější šoupátka, nebo pokud je vyžadováno automatické řízení. [35]

Jak je již zmíněno v úvodním popisu funkcí vřetena v šoupátku, vřeteno má také těsnící funkci. Při vertikálním pohybu prochází vřeteno skrz tlakotěsné víko, kde spolu s řadou těsnění zaručuje, že nedojde k úniku média o vysokém tlaku a teplotě ven ze šoupátka. Konstrukce vřetena je navržena tak, aby bylo možné utěsnit šoupátko i v případě, že by došlo k poškození těsnění v ucpávce. [35]

7.2 Popis procesu výroby měřené součásti

Nutnou podmínkou, jejíž splnění nemůže konstruktér při návrhu konstrukce součásti opomenout, je samotná vyrobiteľnost součásti. Součást by měla být navržena tak, aby plnila svou funkci a byla zároveň co nejjednodušeji a nejlevněji vyrobiteľná. Technologie výroby představuje jeden ze zásadních faktorů, který ovlivňuje výsledné rozměry a tvar součásti. Pro správné pochopení výkresové dokumentace je proto nutné znát nejen princip fungování součásti, ale také způsob, jakým byla součást vyrobena.

Součást, která bude měřena v této práci, se vyrábí z tyčového polotovaru. V první výrobní operaci se polotovaz upne do soustružnického centra, zarovnájí se jeho čela, a na obou jeho koncích se navrtají středící dŕlky. Součást se následně upne mezi hroty a následuje obrábění kontury na hrubo. Vřeteno se poté vloží do pece a žihá se za účelem snížení vnitřního pnutí, jehož vlivem by se mohlo vřeteno prohnut. Po vyjmutí součásti z pece je nutné zkontrolovat tvrdost vřetena. Dále se vřeteno znovu upne mezi hroty a soustruží se na čisto levá strana kontury. Poté se řeže rovnoramenný lichoběžníkový závit. Následuje mezioperační kontrola délkových rozměrů pomocí posuvného měřítka a třmenového mikrometru, závit je kontrolován závitovým kalibrem. V další operaci se soustruží zbytek kontury na čisto a vřeteno se přesune na frézku, na níž se odfrézují rovinné plochy. Poté se opět kontrolují jednotlivé délkové rozměry posuvným měřítkem, geometrické specifikace přímosti a házení se kontrolují pomocí číselníkového úchylkoměru. Celá součást se poté odjehlí, provede se finální rozměrová kontrola a vyrazí se její evidenční číslo. Takto připravená součást se odesílá do kooperace na chromování, po němž následuje leštění chromované válcové části. Pochromovaná součást se následně přijímá zpět na mezisklad, kde se provádí kontrola chromované části ještě jednou. [35]

7.3 Analýza výkresové dokumentace

Ať už je na výkresovou dokumentaci součásti pohlíženo s úmyslem součást přímo vyrábět, nebo za účelem její kontroly po vyrobění, je vždy potřeba vytvořit si představu o tom, jak přísné požadavky na rozměrovou a tvarovou přesnost jsou na jednotlivé prvky součásti kladeny. Podobně jako technolog, který by na základě výše zmíněných požadavků vymýšlel optimální výrobní postup, i metrolog se snaží součást změřit vycházející z požadavků výkresové dokumentace. Fáze analyzování výkresové dokumentace je pro kontrolu součásti a následnou volbu vhodné strategie měření jednotlivých elementů zcela zásadní. Silně se totiž odráží v mnoha oblastech měření, konkrétně ovlivňuje například způsob upnutí součásti, následné vyrovnání součásti, volbu referenčních prvků a v neposlední řadě také volbu metody vyhodnocení a parametrů filtrace naměřených elementů. To vše s jedním společným cílem, a sice poskytnout co možná nejstabilnější a nejvíce vypovídající výsledky měření. Výkres součásti, který bude dále blíže rozebrán, je k nahlédnutí v **Příloze 1**.

Jednotlivé lineární a úhlové rozměry jsou voleny především s ohledem na pevnostní požadavky, které jsou na vřeteno při provozu kladeny, a na velikost okolních součástí v sestavě šoupátka. Úchylky většiny lineárních i úhlových rozměrů nejsou konkrétně specifikovány a podléhají tedy všeobecným tolerancím. Funkčním plochám součásti jsou předepsány přísnější tolerance. Jedná se o rozměr, jímž je specifikována vzdálenost frézovaných rovin na pravé části vřetene, která se označuje také jako hlava vřetene. Nejužší toleranční pole je předepsáno pro

chromovanou a následně leštěnou válcovou část procházející ucpávkou šoupátka (rozměr h9). [35]

Ve výkresové dokumentaci se rovněž objevují požadavky na tvarovou přesnost součásti, které jsou vyjádřeny pomocí předepsaných GT. Ty jsou voleny tak, aby byl zajištěn požadovaný tvar nebo vzájemná poloha funkčních elementů součásti. GT kruhového házení je předepsána na plochu závitu proto, aby se vřeteno při pohybu co možná nejméně vychylovalo z osy. Prvkem, vůči kterému je házení vyhodnocováno, je chromovaná válcová část vřetene označena jako základna A. [35]

Chromovaná válcová část vřetene je specifikována GT přímosti. Tvarová přesnost tohoto elementu je požadována proto, aby vřeteno co nejlépe pasovalo do válcového otvoru ucpávky, a tedy dobře těsnilo, a mohlo se zároveň plynule pohybovat. Pro zajištění správného fungování součásti není nutné, aby se součást pohybovala dokonale v ose šoupátka, a proto může klín, který je zvedán a spouštěn právě pomocí vřetene, dosednout lehce vyosený, a přesto bude těsnit. Lehké vyosení nevádí ani ucpávce, která se skládá z několika řad pružných těsnění. Znamená to tedy, že čím přesnější válcový tvar bude chromovaný průměr vřetene mít, a čím menší bude zároveň házení závitu, tím přesněji se bude vřeteno pohybovat v ose šoupátka. V tomto případě je volba GT ovlivněna také používanou měřicí metodou, která bude ke kontrole této charakteristiky v praxi použita. Bude-li se totiž GT obvodového házení měřit pomocí číselníkového úchytkoměru, je z hlediska produktivity měření vhodné použít stejné měřicí zařízení i pro kontrolu GT přímosti. [35]

GT kruhového házení předepsaná na kuželovou část hlavy vřetene zaručuje, aby tvar kuželové plochy (pracovně nazývané jako uzávěr), odpovídal tvaru kuželového otvoru v tlakotěsném víku šoupátka. Právě stykem těchto ploch je zajištěno pojistné těsnění v případě, že se poruší těsnění hlavního těsnícího uzlu, a sice ucpávky šoupátka. Jako základna je opět zvolena chromovaná válcová část vřetene. [35]

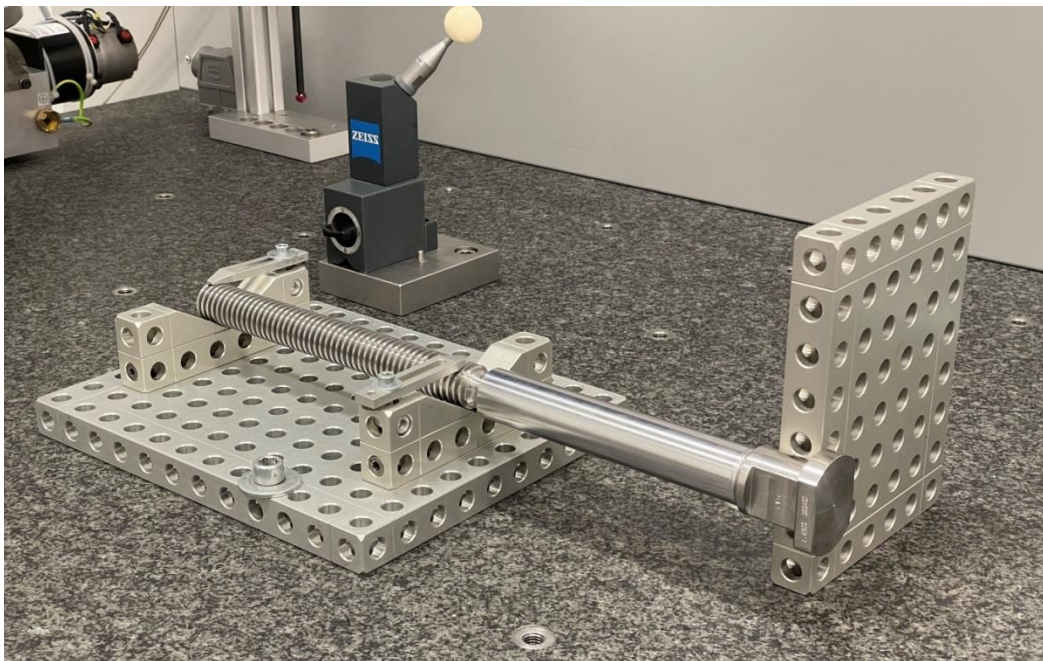
Boční plochy drážek na takzvané hlavě vřetene jsou specifikovány GT souměrnosti. Jako základna je zvolena rovina symetrie bočních ploch hlavy vřetene, které se, stejně jako tolerované plochy, dotýkají desek klínu. Symetrie ploch drážek hlavy vřetene zajistí, že budou tolerované plochy navzájem symetrické podle předepsané základny. Díky tomu nebudou desky klínu, které právě na tyto plochy dosedají, vůči sobě nijak pootočené, a bude tím zajištěno úplné dosednutí klínu do sedla šoupátka. [35]

7.4 Návrh kontroly vybraného dílu pomocí CMM

Po provedené analýze výkresové dokumentace přichází na řadu návrh kontroly zkoumaného dílu. První otázkou tedy bylo, jaké nejvhodnější měřicí zařízení zvolit. Jako nejvhodnější zařízení pro kontrolu vybraného dílu, se jevílo souřadnicové měřicí zařízení. Tento stroj totiž umožňoval zkontrolovat téměř všechny rozměrové charakteristiky specifikované ve výkresové dokumentaci. Pro kontrolu tvarových požadavků kladených na součást by mohla být využita i jiná měřicí zařízení, jejichž obsluha by byla snadnější, a měření by se tak obešlo bez náročnějších příprav. Žádné zařízení by však neumožňovalo naměřit a vyhodnotit všechny elementy součásti najednou, a proto bylo pro účely měření v této práci zvoleno právě souřadnicové měřicí zařízení. Měření na CMM s sebou mimo jiné přináší celou řadu benefitů. Souřadnicové měřicí zařízení umožňuje měření a vyhodnocení geometrických charakteristik orientace, které jsou ve výkresové dokumentaci specifikovány. Další a zcela zásadní výhodou kontroly součástí na CMM, je minimalizace vlivu chyb lidského faktoru na výsledky měření. Dalším pozitivem je možnost libovolně měnit metody vyhodnocení naměřených elementů, stejně tak parametry filtrace extrahovaných bodů v rámci metrologického softwaru.

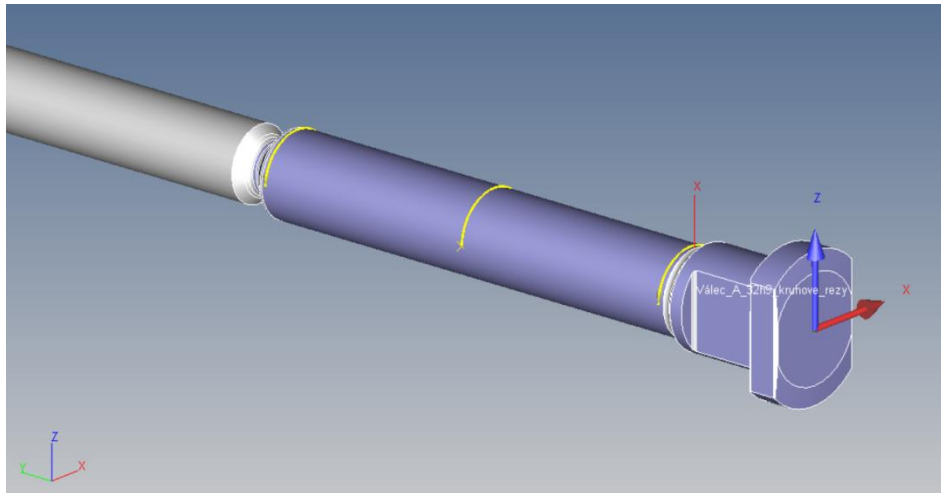
Měření pro účely této práce bylo realizováno v metrologické laboratoři Fakulty strojní ČVUT, konkrétně na souřadnicovém měřicím zařízení PRISMO firmy ZEISS, které zobrazuje **Obrázek 68**.

Po výběru vhodného měřicího zařízení přišel na řadu návrh způsobu upnutí a orientace součásti na stroji. Aby bylo možné součást zkoumanou v této práci pohodlně naměřit, bylo nejlepší ji upnout do prizmat a měřit ji orientovanou vleže – tak, aby byla osa součásti rovnoběžná s osou Y pracovního stolu stroje. Součást by nebylo možné pohodlně měřit vstoje (orientovanou visle), neboť výška pracovního prostoru stroje vzhledem k délce vřetena nebyla dostačující. Vřeteno bylo v prizmatech upevněno za závitovou část pomocí upínek. Na obrázku níže je možné vidět celý způsob upnutí, včetně nastavení vhodné orientace vřetene vůči desce měřicího stolu.



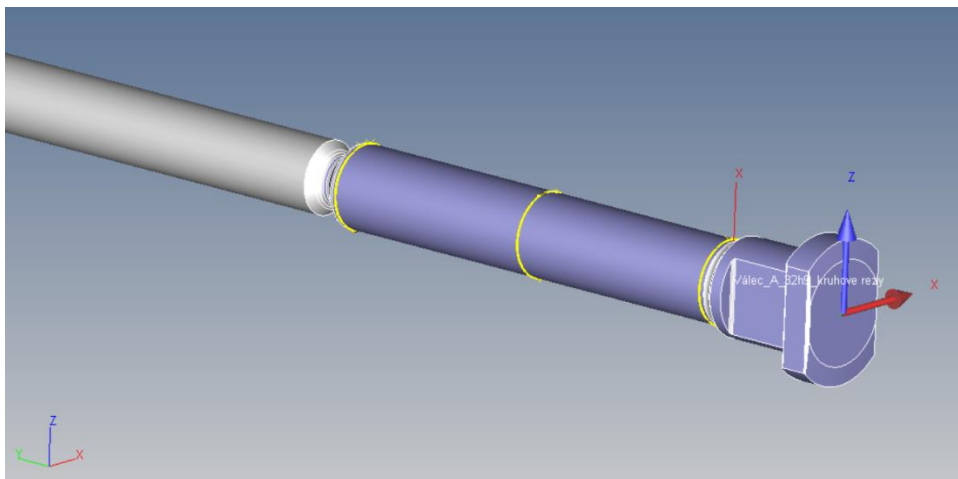
Obrázek 78: Systém upnutí součásti

V další fázi přípravy měření bylo nutné zvolit konfigurace snímačů vhodné k realizaci vybraných strategií měření vzhledem k upnutí součásti. Ve zvolené poloze bylo možné součást měřit dvěma konfiguracemi snímačů. První konfigurace využívá pouze jeden snímač v ose $-Z$. Aby se snímač při měření nepoškodil, je možné snímat pouze horní polovinu měřeného dílu. To znamená, že nebude možné snímat válcové prvky součásti po celém obvodu. Kruhové řezy těchto částí budou tedy při vyhodnocení odvozeny ze snímaných bodů horní poloviny součásti. Tento způsob snímání bodů naznačuje **Obrázek 79**, kde jsou jednotlivé dráhy snímání reprezentovány žlutými křivkami.



Obrázek 79: Strategie snímání v konfiguraci snímače -Z

Druhá konfigurace snímačů využívá dva snímače, jeden v ose $-X$ a druhý v ose $+X$. Na rozdíl od první konfigurace je možné měřit válcové prvky po celém obvodu. Jednotlivé kruhové řezy lze získat spojením dvou půlkruhových drah, které budou snímány nejprve z jedné a potom z druhé strany měřeného prvku, jak uvádí níže.



Obrázek 80: Strategie snímání v konfiguraci snímačů +-X

Během přípravy plánu měření, konkrétně při definování snímacích drah, bylo nutné pamatovat na samotnou délku dříku snímačů, stejně tak na velikost snímacích dotyků. Výše uvedeným parametrům snímačů, stejně tak velikosti a rozmístění měřených elementů součásti, musely být přizpůsobeny délky a rozmístění jednotlivých snímacích drah, rovněž i nájezdové a odjezdové vzdálenosti snímacích dotyků. Příprava plánů měření v metrologickém softwaru Calypso byla kvůli složité epidemiologické situaci provedena na dálku z domácího prostředí.

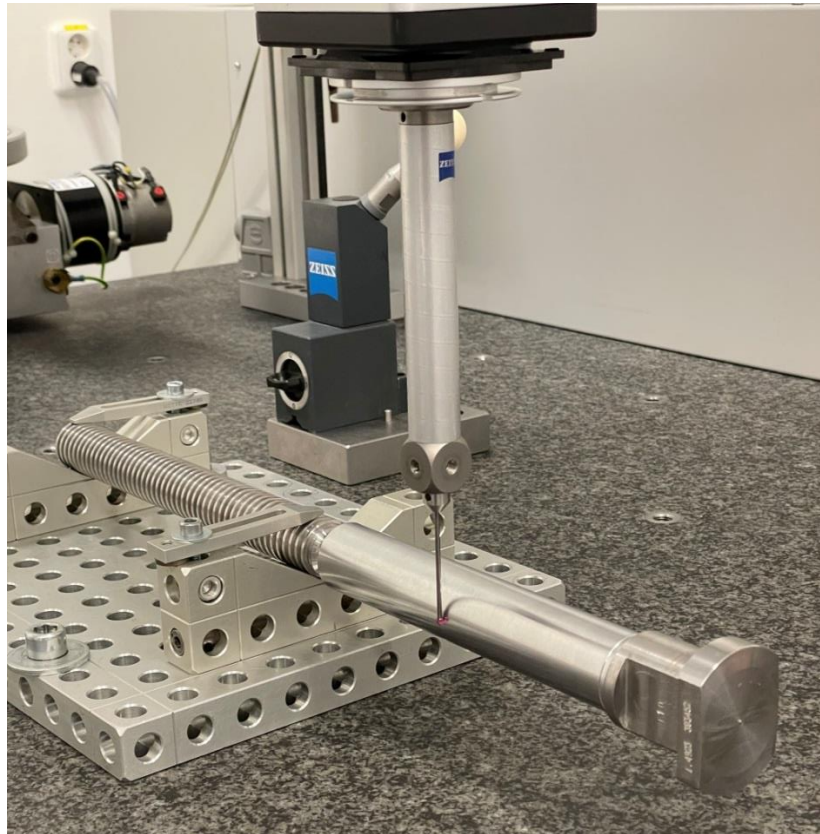
Následně byla provedena klasifikace jednotlivých konfigurací snímačů. Klasifikace snímačů byla provedena nejprve manuálně, poté v CNC režimu, proměřením kalibrační koule pomocí referenčního snímače, a následně i pomocí jednotlivých konfigurací snímačů. Proces klasifikace snímačů, konkrétně zaměřování polohy kalibrační koule referenčním snímačem, zaznamenává **Obrázek 81**.



Obrázek 81: Zaměření kalibrační koule referenčním snímačem

Zaměření kalibrační koule konfigurací snímače -Z probíhalo podobně, jako zaměření koule referenčním snímačem. Malý rozdíl nastal při klasifikaci snímací konfigurace $-X$ a $+X$, kdy musely být jednotlivé snímací dotyky kalibrovány samostatně, a kalibrační koule musela být vhodně přeorientována.

Po upnutí součásti a provedení klasifikace snímačů přišlo na řadu definování lokálního souřadnicového systému měřeného dílu neboli vyrovnání. Při volbě referenčních prvků, na základě kterých byl díl vyrovnán, se vycházelo z výkresové dokumentace dílu. Jako primární prvek vyrovnání, který odebíral nejvíce stupňů volnosti, byla určena válcová část vřetene o průměru 32 h9, která je na výkrese označena základnou A. Jako sekundární prvek vyrovnání sloužila rovina symetrie boků drážek hlavy, která má dle výkresu také funkci základny, konkrétně se jedná o základnu B. Terciárním prvkem, který bylo potřeba zvolit pro úplné definování souřadnicového systému, byla určena čelní plocha hlavy vřetene. Ta sice není na výkrese označena jako základna, ale váže se na ni celá řada kót, proto je vhodné, aby sloužila jako počátek jedné ze souřadnicových os. Základní souřadnicový systém součásti ukazuje **Obrázek 80**. Osa Y, která na obrázku není vidět, je definována osou leštěného chromovaného válce. Osa X je kolmá na rovinu symetrie drážek hlavy vřetene a osa Z je s rovinou symetrie drážek hlavy vřetene rovnoběžná. Počátek souřadnicového systému leží v bodě průniku osy primárního prvku vyrovnání s terciárním prvkem vyrovnání, a sice na čelní ploše hlavy vřetene. Jednotlivé body, z nichž byly definovány elementy sloužící k vyrovnání, byly nejprve snímány v manuálním režimu. Následně bylo provedeno ještě jedno vyrovnání v CNC režimu. Po provedení všech výše zmíněných kroků bylo možné přejít k samotnému měření. Jako první bylo provedeno deset měření součásti konfigurací snímače $-Z$. Následně byla konfigurace snímače $-Z$ vyměněna za konfiguraci snímačů $+X$. Bylo nutné znovu provést klasifikaci snímačů a poté se přešlo k měření součásti, které rovněž proběhlo desetkrát. Měření konfigurací snímače $-Z$ ukazuje **Obrázek 82** a měření konfigurací snímačů $+X$ zobrazuje **Obrázek 83**.



Obrázek 82: Měření vybraného dílu konfigurací snímače -Z



Obrázek 83: Měření vybraného dílu konfigurací snímačů +-X

7.5 Cíle měření

Výstup z experimentální části této práce lze rozdělit do několika částí, které jsou označeny jako jednotlivé cíle měření. Aby mohly být jednotlivé cíle uskutečněny, proběhlo nejprve měření celého dílu dvěma konfiguracemi snímačů, které byly již výše představeny. Jednotlivé cíle měření budou blíže popsány v následujících kapitolách.

7.5.1 Vliv konfigurace snímačů na způsobilost procesu měření

Tato část měření si klade za cíl porovnat, jaký vliv mají vybrané konfigurace snímačů na variabilitu procesu měření. Měřicí procesy budou porovnány na základě koeficientů způsobilosti měřidla, který bude stanoven pro všechny měřené charakteristiky.

7.5.2 Vliv volby parametrů filtrace na výsledek měření GT tvaru

V rámci této části měření bude cílem ukázat, jak ovlivňuje výsledek měření změna parametrů filtrace, v případě, že je měřeným elementem otevřený a uzavřený element. Předmětem zkoumání budou charakteristiky tvaru, konkrétně příměst chromované části vřetene a kruhovitost kuželové části vřetene (uzávěru). V této části měření budou využita data naměřená konfigurací snímače –Z.

Aby bylo možné vyhodnotit příměst válcového elementu, je potřeba naměřit jeho povrchy, konkrétně bude hodnocena povrchka ležící v rovině YZ souřadnicového systému měřeného dílu. Protože je vyhodnocovaným elementem přímka (povrchka válce), bude parametrem filtrace základní délka λ_C . Konkrétní hodnoty parametru základní délky, které budou při měření použity, jsou $\lambda_C = \{0,25; 0,8; 2,5\} \text{ mm}$.

Tvarová charakteristika kruhovitosti bude vyhodnocena z jednoho kruhového řezu snímaného z kuželové části vřetene. Protože se jedná o uzavřený prvek, parametrem filtrace bude počet vln na otáčku UPR. Účinek filtrace bude porovnán pro hodnoty parametru $UPR = \{150; 50; 15\}$.

7.5.3 Vliv metody vyhodnocení na výsledky měření vybraného prvku

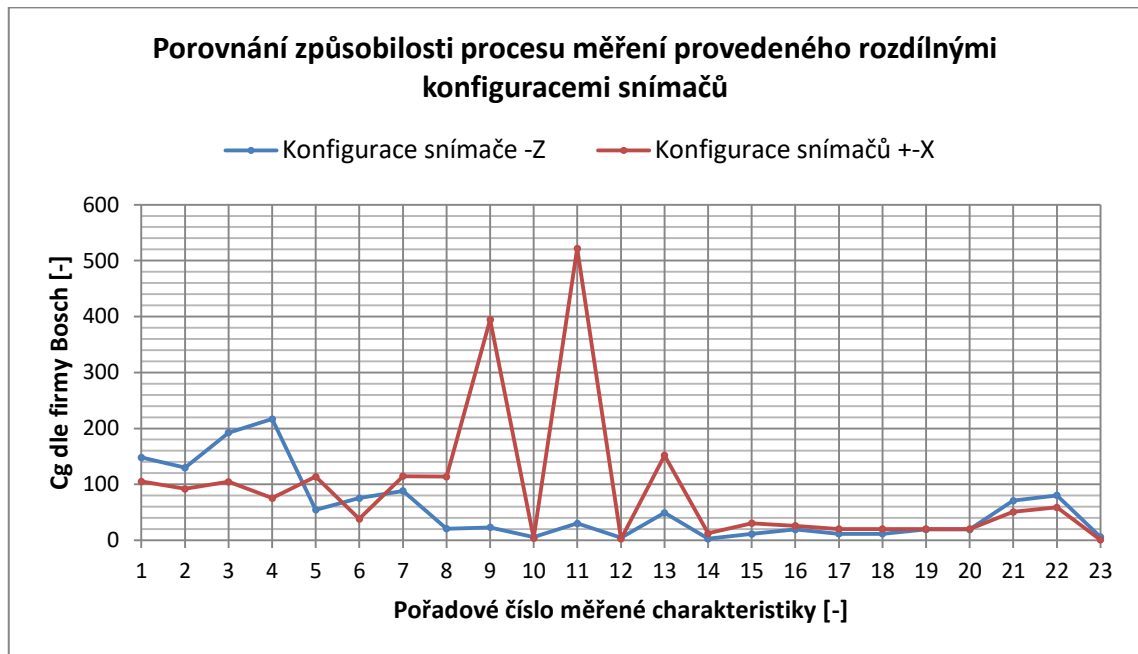
V této části měření bude cílem znázornit, jak ovlivňují zvolené metody vyhodnocení výsledky měření rozměrové charakteristiky. Předmětem měření bude v tomto případě leštěná válcová část vřetene (rozměr 32 h9) měřená konfigurací snímačů +-X. Vybraný element bude vyhodnocen třemi různými metodami, a sice metodou minimálního opsaného prvku (MCC), metodou maximálního vepsaného prvku (MIC) a metodou nejmenších čtverců (LSC). Vypočtené prvky budou navíc vyfiltrovány nízkopásmovým spline filtrem o parametrech 150 UPR, 50 UPR a 15 UPR.

7.5.4 Vliv nedostatečného počtu snímaných bodů na fungování filtru

Významnost snímání dostatečného počtu bodů, pro zajištění funkce příslušného filtru, bude předvedena v poslední části vyhodnocení praktického měření. Situace, kdy filtr nefunguje, bude předvedena na charakteristice přímosti leštěné chromované válcové části vřetene. Pro demonstraci případu, kdy filtr o parametru filtrace $\lambda_C = 0,8 \text{ mm}$ neplní svou funkci, je v rámci strategie měření nastaven rozestup snímaných bodů na $0,2 \text{ mm}$.

7.6 Vyhodnocení měření

Za účelem porovnání způsobilosti dvou rozdílných konfigurací snímačů byly vypočítány koeficienty způsobilosti měřidla C_g dle firmy Bosch pro každou měřenou charakteristiku. Charakteristik bylo celkem dvacet tři a každá byla měřena desetkrát. Ukazatel způsobilosti byl stanoven na základě vztahu, který definuje **Rovnice 26**. Výsledné hodnoty koeficientů způsobilosti byly vyneseny do níže uvedeného grafu.



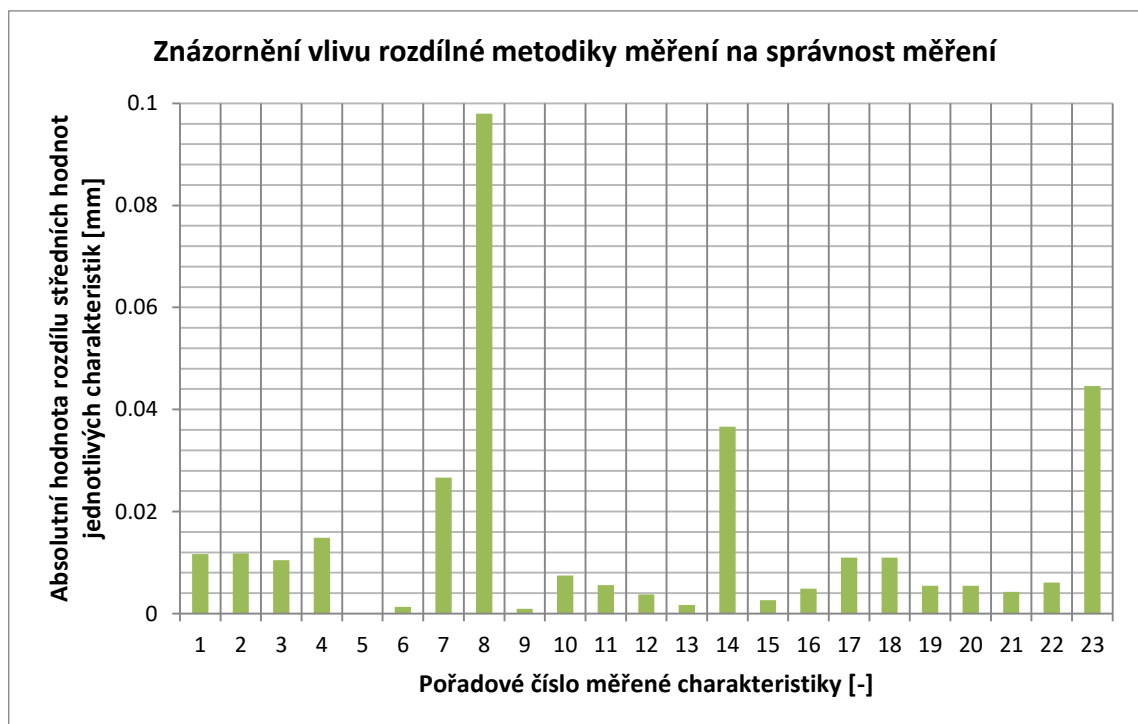
Graf 1: Porovnání způsobilosti procesu měření provedeného rozdílnými konfiguracemi snímačů

Z grafu je vidět, že až na extrémní hodnoty koeficientů způsobilosti charakteristik č.9 a č.11 měřených konfigurací snímačů +-X dosahují koeficienty způsobilosti C_g obou snímacích konfigurací podobných hodnot. Způsobilost měřicího procesu mohla být ovlivněna celou řadou vymezených i nevymezených vlivů, například stavem použitých snímacích dotyků, kvalitou provedení klasifikace snímačů, nebo kvalitou provedení vyrovnání součástí. Nicméně pokud se uváží, že bylo měření provedeno na stejném stroji, za stejných podmínek okolí, za použití stejných typů snímačů pro obě konfigurace a při zachování stejného upnutí součásti pro obě provedená měření, jeví se s největší pravděpodobností jako klíčový faktor ovlivňující výslednou způsobilost procesu měření zvolená strategie měření. Třebaže bylo snahou zachovat rozmístění snímaných bodů i drah pro obě konfigurace snímačů stejné, u některých měřených elementů musely být snímané dráhy konkrétní konfiguraci snímačů přizpůsobeny. Dalším z klíčových faktorů, které mohly silně ovlivnit způsobilost měřicího procesu, byla zvolená rychlost snímání. Ačkoliv byly pro obě snímací konfigurace nastaveny stejné počty snímaných bodů připadající na konkrétní snímací dráhu, rychlost snímání nebyla ve všech případech nastavena na stejnou hodnotu – rychlost snímání byla automaticky dopočítána měřicím softwarem, což se ukázalo jako nejednoznačné. Je tedy vhodné pro každý prvek vždy definovat konkrétní rychlost snímání. Automatické nastavení rychlosti vedlo například k tomu, že byla pro tři stejné kruhové měřicí dráhy na válcovém elementu (rozměr 32 h9) volena zcela odlišná snímací rychlost.

Co se týká hodnocení způsobilosti procesu jako celku, koeficienty způsobilosti měřidla vypočítané pro jednotlivé charakteristiky přesahují požadovanou hodnotu 1,33 ve všech případech, až na jeden. Konkrétně se jedná o charakteristiku č. 23 měřenou konfigurací snímače +-X, a sice GT souměrnosti drážek hlavy vřetene. Proces měření konfigurací snímače -Z lze tedy

prohlásit za zcela způsobilý. V procesu měření konfigurací snímačů +-X by se musel provést zásah, který by vedl ke zvýšení koeficientu způsobilosti výše zmíněné charakteristiky. S největší pravděpodobností by pomohlo rozmístit snímané body sloužící pro výpočet elementů specifikovaných GT souměrnosti tak, aby neležely v místech, kde bylo vyraženo evidenční číslo součásti. K tomuto pochybení došlo z toho důvodu, že byla příprava plánů měření realizována offline s využitím CAD modelu měřeného dílu, kde nebylo vidět evidenční číslo vyražené na skutečném dílu, a jeden z měřených bodů tak byl umístěn přímo do vyraženého popisu.

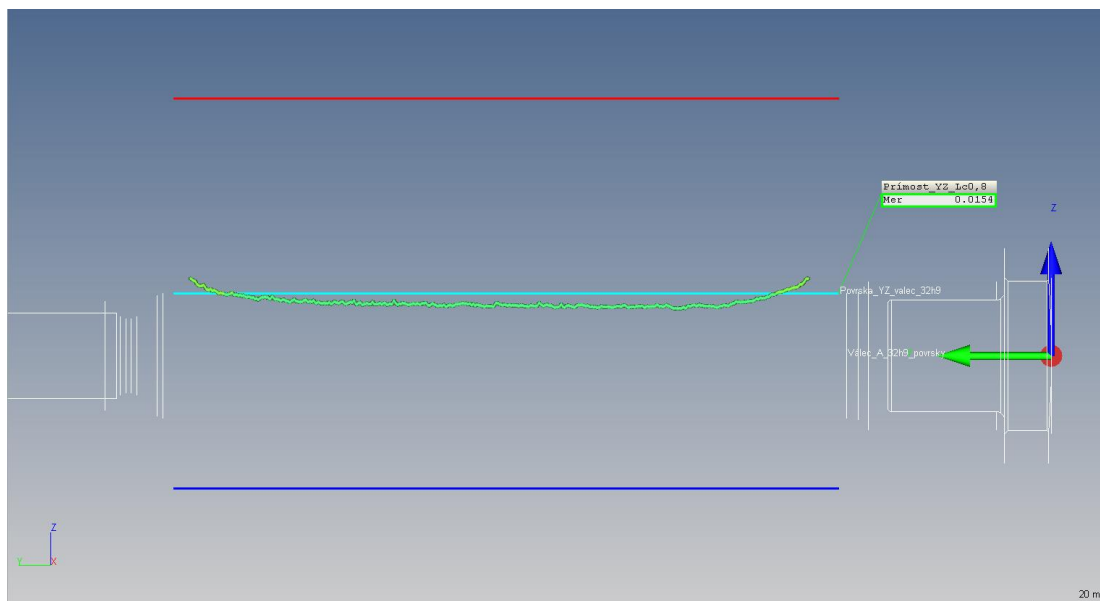
Souřadnicová měřicí technika se vyznačuje výbornou opakovatelností (precizností měření), což potvrzují vypočítané koeficienty C_g , které vlastně charakterizují variabilitu měření vzhledem k požadavku zákazníka. Směrodatné odchylky opakovaných měření se pohybovaly typicky v řádu desetin mikrometrů s průměrnou směrodatnou odchylkou přes 23 charakteristik a 10 opakovaných měření každé charakteristiky na úrovni $0,8 \mu m$ pro konfiguraci snímače -Z a $0,66 \mu m$ pro konfiguraci snímačů +-X. Dalším charakteristickým znakem, který měření na CMM přináší, je výrazná závislost správnosti měření na použité metodice měření. Správnost měření je vyjádřena jako těsnost shody průměru opakovaných měření od referenční hodnoty. Třebaže nebyla ani jedna ze sérií hodnot označena jako referenční měření, což bývá v případě výsledků získaných měřeními na CMM v praxi běžné, samotný rozdíl mezi průměry opakovaných měření jednotlivých charakteristik poskytuje dobrou představu o silném vlivu zvolené metodiky měření na správnost měření. Níže uvedený graf znázorňuje velikosti rozdílů středních hodnot jednotlivých charakteristik, které byly měřeny popsány konfiguracemi snímačů. Je tedy možné vidět, že zmiňované rozdíly dosahují velikosti jednotek, v některých případech až desítek mikrometrů. Výrazně větší hodnoty dosahuje rozdíl průměrů v případě charakteristiky č.8 (válcová část hlavy vřetene $\varnothing 38$) z toho důvodu, že došlo během přípravy měřicího plánu pro snímací konfiguraci +-X k pochybení, a sice nebyl použit žádný filtr, ani nástroj k potlačení odlehlých hodnot. Jak filtrace, tak eliminace odlehlých hodnot jsou přitom nutnou podmínkou při využívání skenování. Průměrná hodnota těchto rozdílů je rovna $0,014 mm$. Obecně je tedy možné konstatovat, že volba správné metodiky měření je zásadní pro zajištění správnosti a přeneseně i přesnosti výsledků měření.



Graf 2: Znázornění vlivu rozdílné metodiky měření na správnost měření

Měřená data a jejich vyhodnocení jsou zaznamenány v **Příloze 2** (konfigurace snímače -Z) a v **Příloze 3** (konfigurace +-X).

V další části měření bylo zkoumáno, jak působí volba parametrů filtrace na výslednou úchylku tvaru otevřeného elementu. Konkrétně byla zkoumána úchylka přímosti povrchy broušené válcové části vřetene. Na obrázku níže je vidět zobrazení snímané povrchy v metrologickém softwaru, z níž byla specifikovaná GT přímosti vyhodnocena.



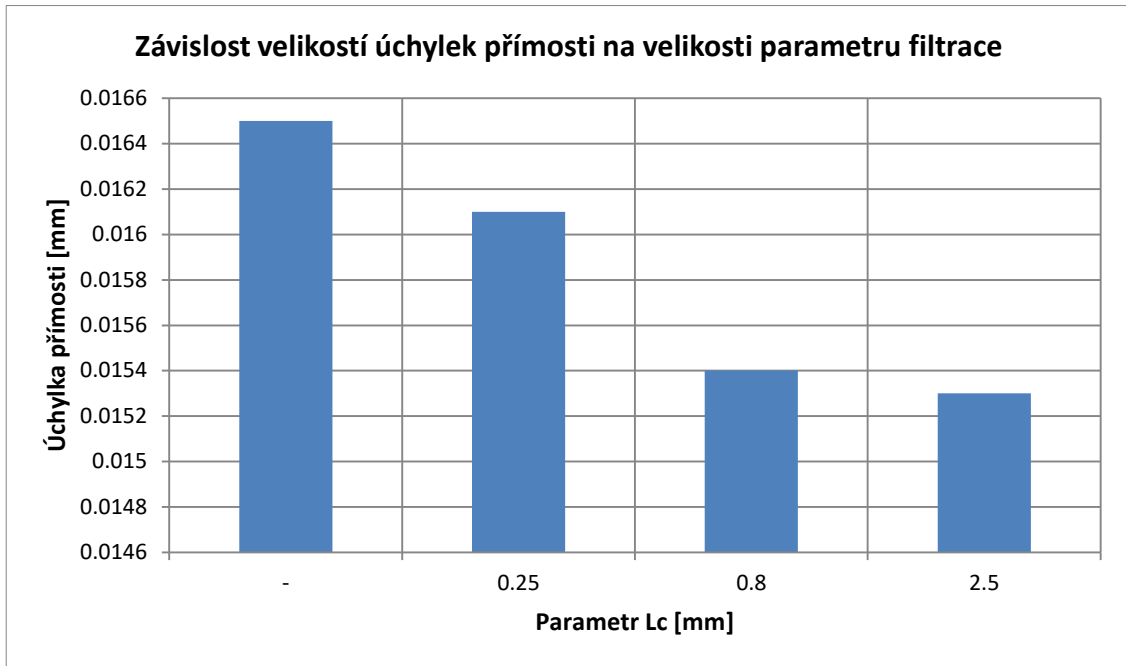
Obrázek 84: Povrch válcě měřená za účelem vyhodnocení GT přímosti

Jak uvádí **Tabulka 11**, největší úchylka přímosti připadá extrahovaným bodům, které nebyly podrobeny žádnému filtru. Celková úchylka tvaru je největší z toho důvodu, že v sobě zahrnuje celé spektrum vlnových délek, včetně těch, které vznikaly v důsledku vlivu okolního prostředí (vibrace, šum...), a které by jinak byly použitím filtru potlačeny. Z ostatních hodnot úchylek přímosti lze dále vyčíst trend, který je charakteristický pro použití filtrů o různé jemnosti. Filtr je tím jemnější, čím menší je hodnota parametru základní délky λ_c , a měřený profil povrchu je tedy o to podrobnější. Pro nejmenší hodnotu parametru filtrace $\lambda_c = 0,25 \text{ mm}$ je tím pádem úchylka tvaru největší, pro hodnotu $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$ je úchylka tvaru menší, a nejmenší úchylka tvaru odpovídá použití hrubého filtru o parametru $\lambda_c = 2,5 \text{ mm}$. Pro potlačení chyby tvaru válce, kde je střední část elementu výrazně užší než krajní části (vizte **Obrázek 84**), a která pravděpodobně vznikla vlivem špatného postupu broušení této části dílu, by bylo nutné použít filtr o podstatně větší vlnové délce.

Tabulka 11: Úchylky přímosti odpovídající filtru o daných velikostech základní délky

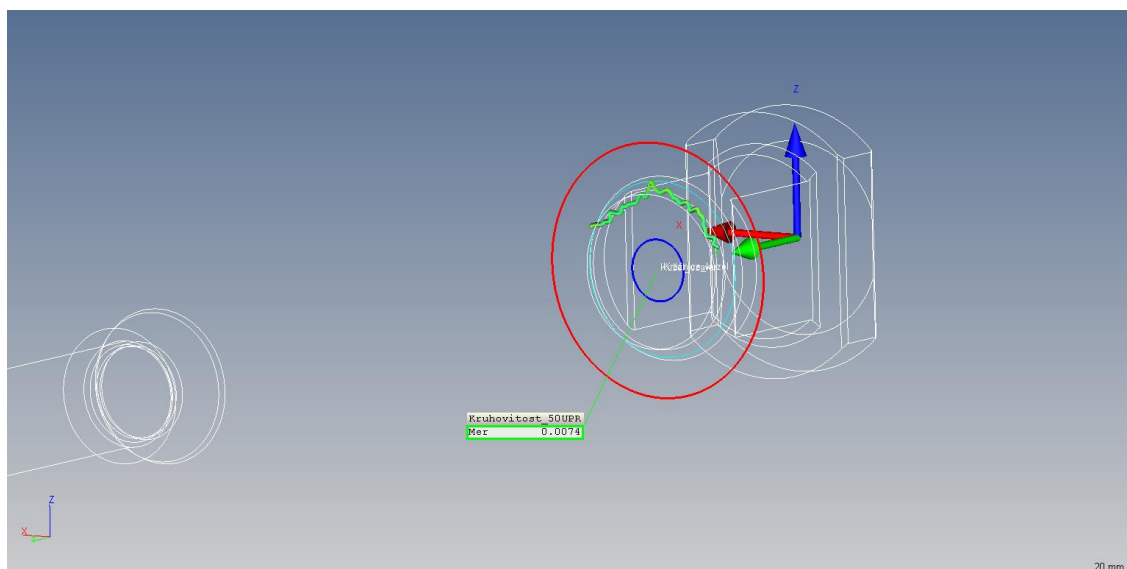
λ_c [mm]	-	0,25	0,8	2,5
úchylka přímosti [mm]	0,0165	0,0161	0,0154	0,0153

Trend charakterizující snižování úchytky tvaru vlivem použití filtru o delších vlnových délkách je patrný z níže uvedeného sloupcového grafu.



Graf 3: Závislost velikostí úchylek přímosti na velikosti parametru filtrace

Účinek použitých filtrů o různých parametrech je možné sledovat také na uzavřených elementech, konkrétně na kuželové části vřetene. Specifikovaná úchylnka házivosti, předepsaná zmíněnému elementu na výkrese, byla pro účel tohoto měření nahrazena zkoumáním kruhovitosti v jednom samostatném řezu, který je k vidění v náhledu z metrologického softwaru níže na obrázku.

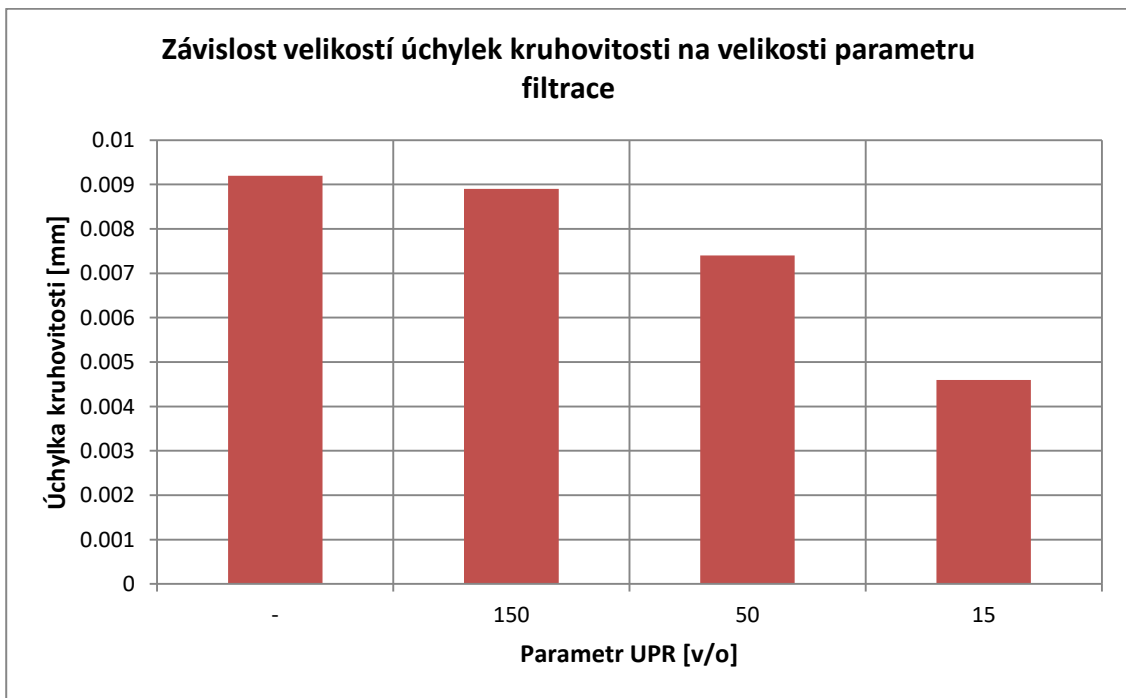


Obrázek 85: Kruhový řez měřený za účelem vyhodnocení GT kruhovitosti

Pokud by nebyl povrch měřeného elementu filtrován, projevil by se působení okolních vlivů na vyhodnocované úchylce kruhovitosti podobně, jako tomu bylo u měření GT přímosti. Jak ukazuje **Tabulka 12**, úchylka kruhovitosti dosahuje při absenci filtru nejvyšší hodnoty. Jemnost použitého filtru charakterizovaná zvolenými parametry filtrace v podobě hodnot vln na otáčku ovlivňuje výslednou úchylku kruhovitosti stejně, jako ve výše popsaném případě GT přímosti. Nejmenší úchylka kruhovitosti odpovídá nejhrubšímu filtru o parametru 15 UPR, vyšší úchylka kruhovitosti připadá jemnějšímu filtru o parametru 50 UPR, a ještě větší hodnoty dosahuje úchylka kruhovitosti v případě použití nejjemnějšího filtru o parametru rovnému sto padesáti vln na otáčku. Klesající trend, který vykazují úchylky kruhovitosti při použití filtru o delších vlnových délkách, naznačuje **Graf 4**.

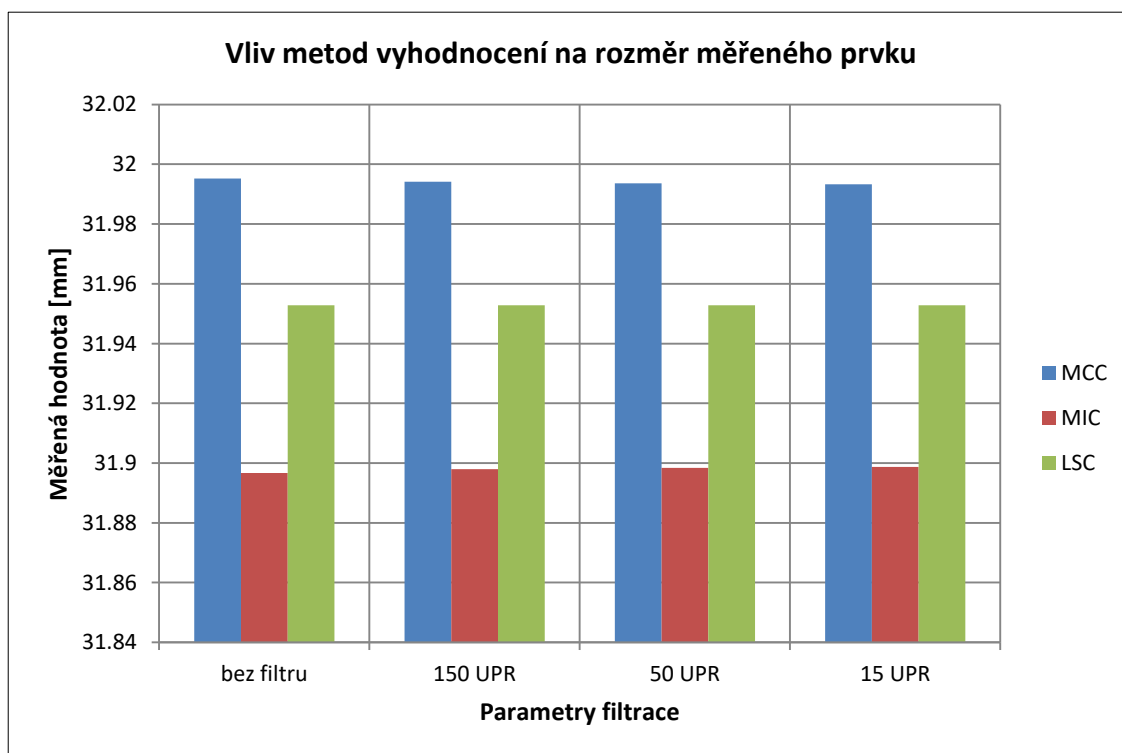
Tabulka 12: Úchylky kruhovitosti odpovídající filtru o daném počtu vln na otáčku

UPR [v/o]	-	150	50	15
úchylka kruhovitosti [mm]	0,0092	0,0089	0,0074	0,0046



Graf 4: Závislost velikostí úchylek kruhovitosti na velikosti parametru filtrace

Dále byl hodnocen vliv použitých metod vyhodnocení na výpočet rozměru broušené válcové části vřetena. Z níže uvedeného grafu je patrné, že se rozměr vypočítaný různými metodami vyhodnocení liší, třebaže jsou použita stejná vstupní (měřená) data.

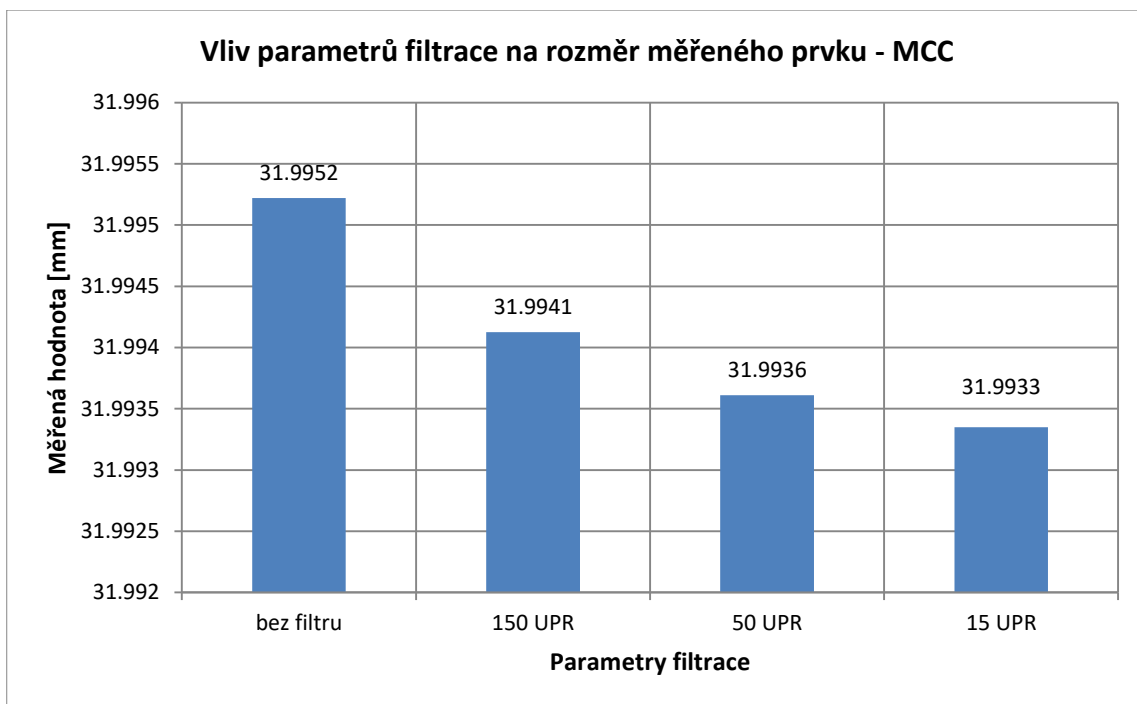


Graf 5: Vliv metod vyhodnocení na rozměr měřeného prvku

Velikost vypočítaného rozměru vyplývá ze způsobu, jakým metoda výpočtu funguje. Metoda nejmenšího opsaného prvku (MCC) zahrnuje nejvyšší výstupky povrchu součásti, a proto jí odpovídají největší rozměry označené modrou barvou (vizte Graf 5). Podobně, akorát s opačným výsledkem, funguje výpočet rozměru pomocí metody největšího vepsaného prvku. Ta naopak zachycuje největší prohlubně měřeného povrchu, a proto jí odpovídá nejmenší rozměr, v grafu označený červeně. Zelenou barvou je v grafu označen rozměr vypočítaný metodou nejmenších čtverců. Princip metody spočívá v minimalizování součtu čtverců odchylek v každém měřeném bodě povrchu, a přiřazuje tedy měřenému prvku rozměr, který nebere v potaz nejvyšší výstupky ani nejhlubší prohlubně.

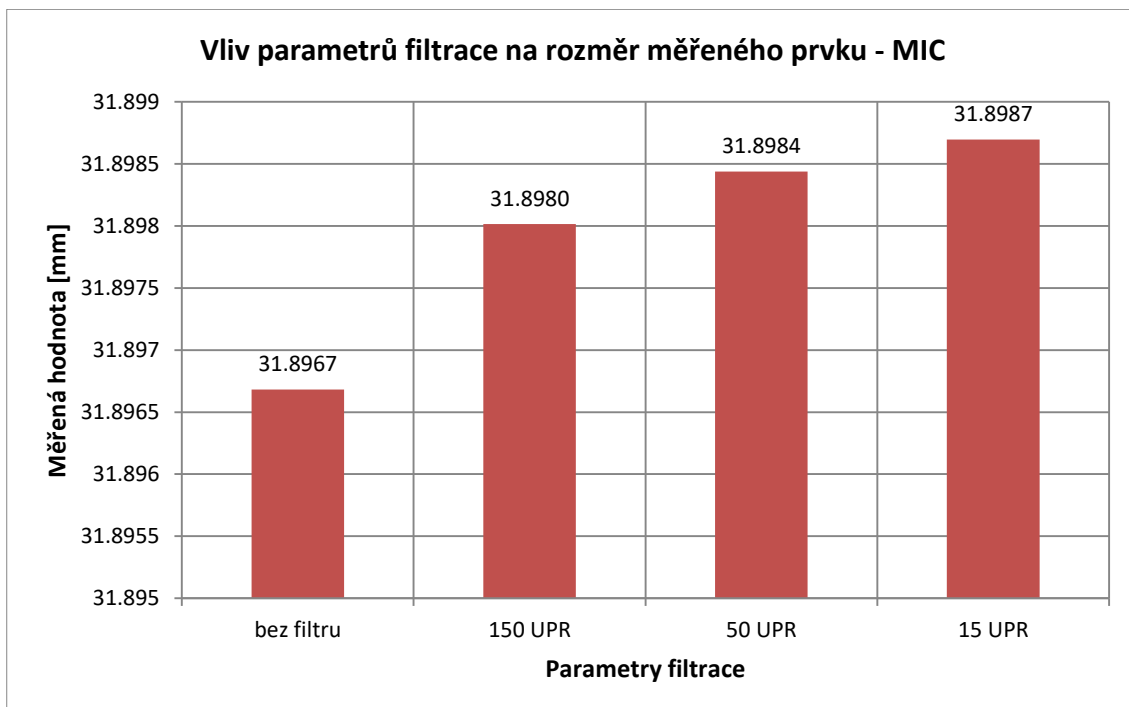
Celkovou chybu tvaru měřeného elementu lze rovněž odhadnout z grafu. Dvojnásobek chyby tvaru odpovídá rozdílu rozměru vypočítaného metodou MCC a rozměru vypočítaného metodou MIC.

Výsledný rozměr prvku je stejně tak ovlivněn zvolenými parametry filtrace. Je-li prvek vyhodnocen metodou MCC, vypočítaný rozměr se s použitím filtru o větších vlnových délkách zmenšuje, jak ukazuje **Graf 6**. Děje se tak z toho důvodu, neboť největší výstupky, které tato metoda bere v potaz především, jsou působením filtru potlačovány.



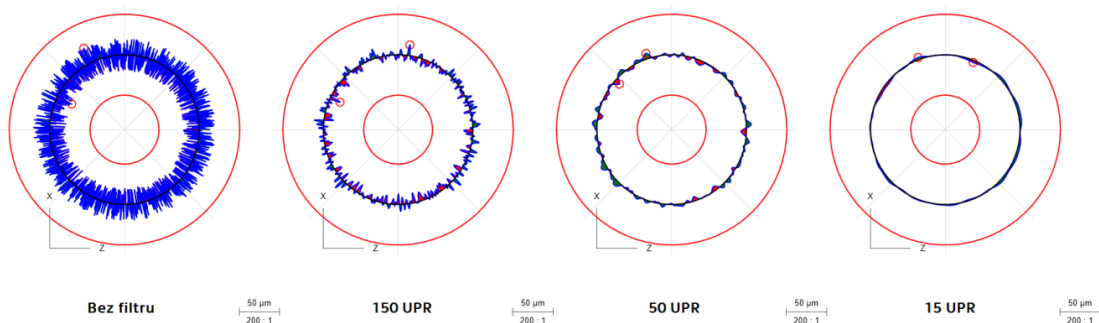
Graf 6: Vliv parametrů filtrace na rozměr měřeného prvku - MCC

Opačný jev lze sledovat v případě filtrování prvku vyhodnoceného metodou MIC. Působením silnějších filtrů se nejhlubší prohlubně zmenšují a rozměr prvku, který se přiřazuje jako maximální vepsaný, se tak zvětšuje, jak naznačuje **Graf 7**.



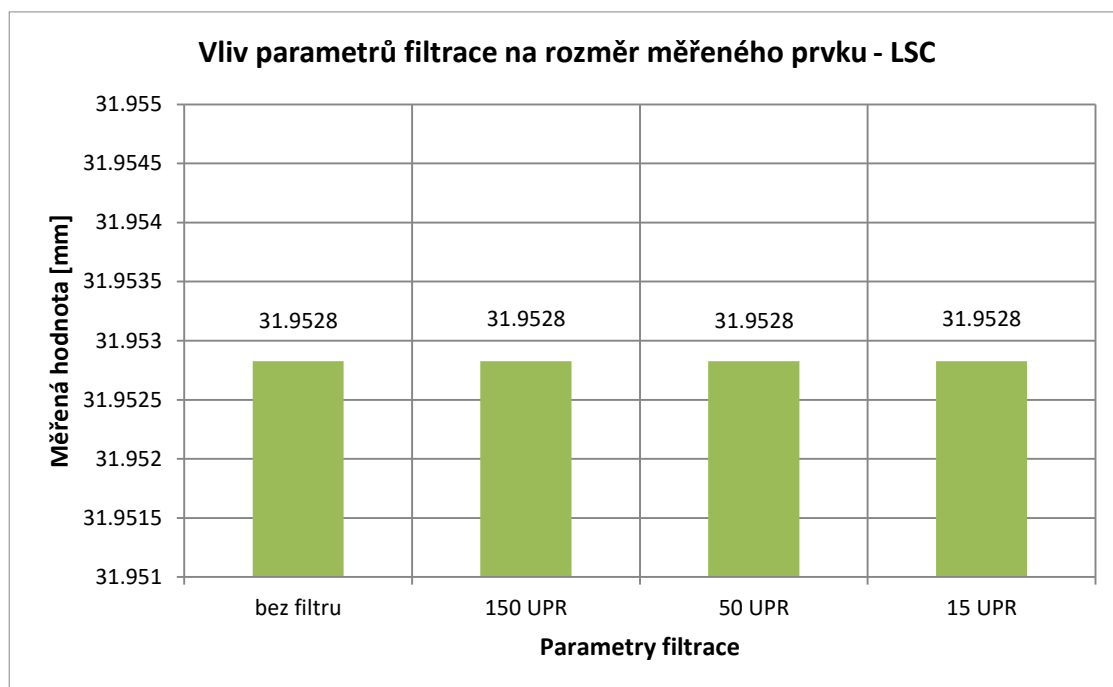
Graf 7: Vliv parametrů filtrace na rozměr měřeného prvku - MIC

Na rozměr elementu vyhodnoceného metodou LSC nebude mít filtrace velký vliv. To z toho důvodu, že jakkoli silný filtr potlačuje úchytky povrchu měřeného elementu symetricky, nehledě na to, zda se jedná o výstupky či prohlubně – vizte **Obrázek 86**.



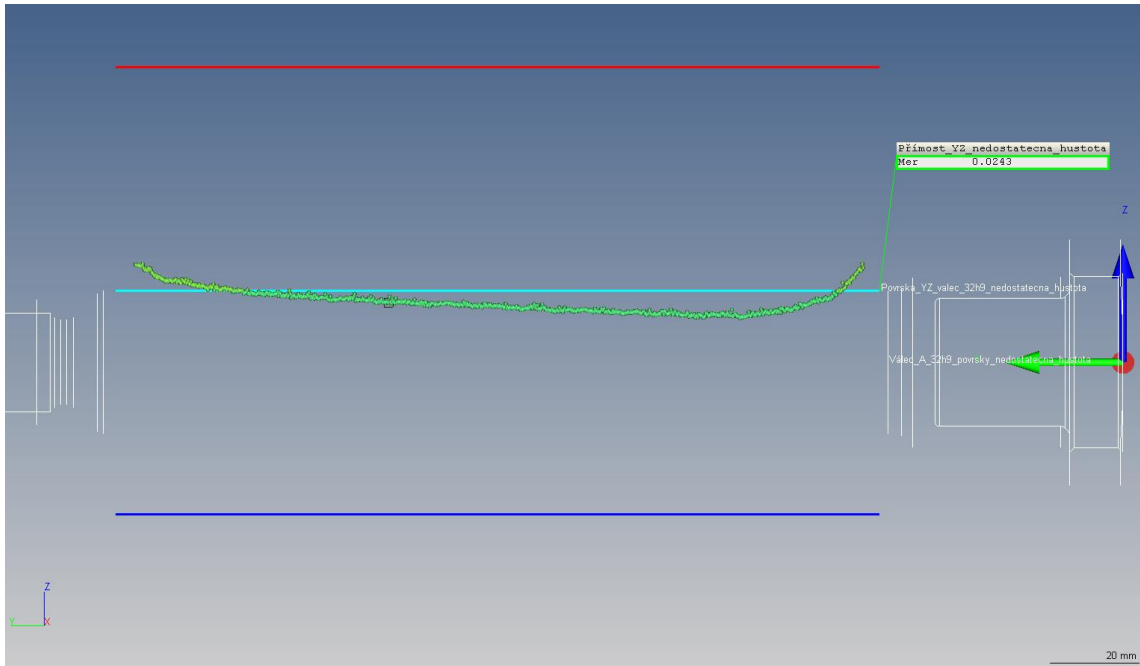
Obrázek 86: Potlačení úchylek měřeného povrchu pomocí filtru o různých parametrech [20]

Nejsou-li na povrchu součásti prohlubně, či výstupky extrémních velikostí, výsledné vypočítané rozměry by se tedy měly lišit pouze minimálně, což potvrzují i naměřené hodnoty, jak ukazuje **Graf 8**.

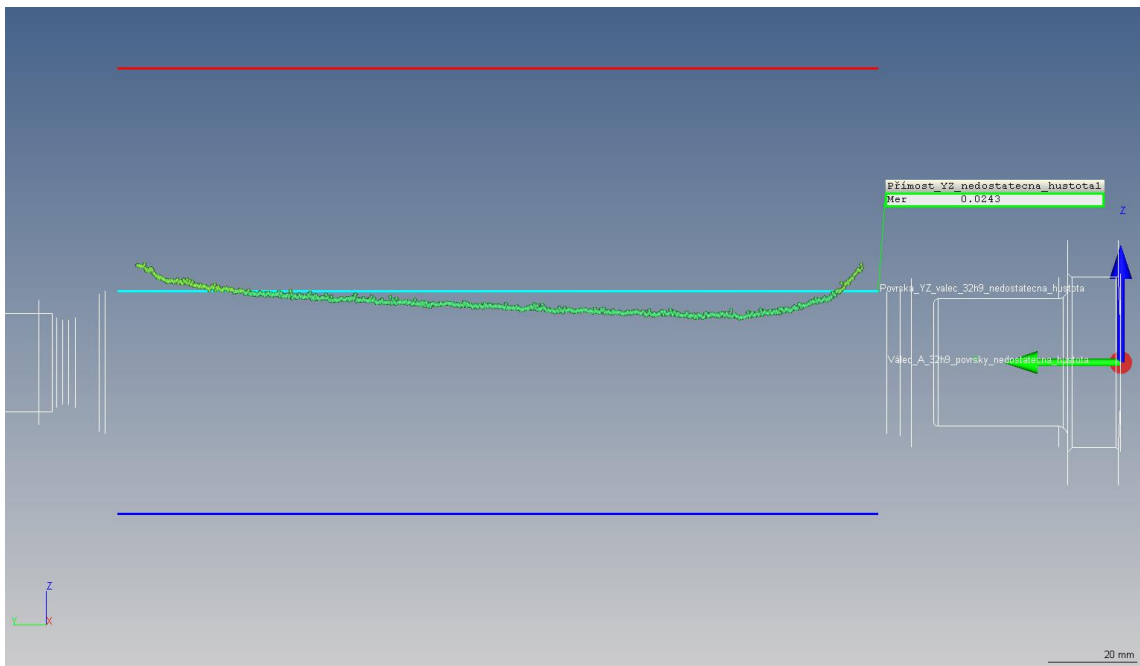


Graf 8: Vliv parametrů filtrace na rozměr měřeného prvku - LSC

Aby mohlo filtrování fungovat, musí být jednotlivé snímané body rozprostřeny na snímaném povrchu otevřeného elementu s dostatečnou hustotou. Příklad, kdy byl záměrně zvolen příliš velký rozstup mezi snímanými body, a filtr tak nefunguje, je možné vidět na obrázcích na další straně. Ačkoli byl na měřený element aplikován filtr o parametru základní délky $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$, výsledná hodnota úchylky přímosti zůstala stejná (0,0243 mm), jako v případě, kdy filtr aplikován nebyl. Aby filtr o dané velikosti parametru základní délky λ_c správně fungoval, je nutné, aby byly rozestupy mezi jednotlivými snímanými body v rámci jedné základní délky menší, než je jedna sedmina základní délky. To znamená, že pro zvolenou základní délku by musel být rozstup mezi snímanými body menší než $0,8/7 \text{ mm}$, neboli přibližně $0,114 \text{ mm}$. V případě, že by byl filtrovaným prvkem uzavřený element, minimální hodnota snímaných bodů, při které by filtr plnil správně svou funkci, by se rovnala sedminásobku zvolené hodnoty parametru filtrace (filtr o 150 UPR ... alespoň $7 \cdot 150$ bodů).



Obrázek 87: Úchylka přímosti bez použití filtru



Obrázek 88: Úchylka přímosti s použitím filtru o parametru $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$.

8 Závěr

V teoretické části práce bylo představeno, jak důležitou roli hraje technická normalizace v rámci světového průmyslu a obchodu. Rovněž byly představeny authority, které fungování technické normalizace ve světě zajišťují. Další kapitoly byly zaměřeny na popis nástrojů, které umožňují zajistit výslednou kvalitu výrobku na požadované úrovni. V první fázi byly popsány jednotlivé nástroje systému ISO GPS, který zajišťuje úplnou a jednoznačnou specifikaci požadavků kladených na vyráběné součásti. Následně byl charakterizován způsob ověřování předepsaných specifikací pomocí souřadnicových měřicích zařízení. V poslední fázi byla nastíněna problematika způsobilosti procesu a procesu měření, která významně ovlivňuje správné nastavení a chod procesů výroby a kontroly.

Experimentální část práce byla zaměřena na hodnocení procesu kontroly z několika hledisek. Cílem experimentální části bylo ukázat, jak může filtrace a použité metody vyhodnocení ovlivnit výsledky měření vybraného dílu. Stejně tak bylo cílem porovnat dvě konkrétní snímací konfigurace, a rozhodnout, která z nich je pro měření vybraného dílu vhodnější. Nejprve bylo nutné součást naměřit. Samotnému měření předcházela podrobná analýza výkresové dokumentace měřeného dílu, na základě které byl připraven proces kontroly součásti skládající se z výběru vhodného měřicího zařízení, volby vhodných snímačů a jejich konfigurací, a navržení způsobu upnutí součásti. Podstatnou část přípravy měření obsáhla fáze přípravy měřicích strategií a definice ideálního způsobu vyrovnání v metrologickém softwaru.

Po provedeném měření byly na základě naměřených dat porovnány dvě konfigurace snímačů, a sice konfigurace se snímači v osách +X a -X, a konfigurace s jedním snímačem v ose -Z. Tyto konfigurace byly porovnány na základě vypočítaných koeficientů způsobilosti měřidla. Způsobilost obou použitých snímacích konfigurací byla vzhledem k technické specifikaci měřeného dílu na dostatečné úrovni. Hypotéza, která uvažuje, že měření na CMM přináší výsledky podléhající velmi nízké míře variability, byla potvrzena. Stejně tak se podařilo na měřených datech ukázat, že je správnost měření výrazně ovlivňována konkrétní měřicí metodikou. Je tedy možné tvrdit, že pro zajištění shody na straně kontroly u výrobce a odběratele, je klíčové měřicí metodiku sjednotit v co možná největší míře. Na otázku, která ze dvou snímacích konfigurací je pro měření vybraného dílu vhodnější, není jednoduché nalézt jednoznačnou odpověď. Co se způsobilosti týká, byly na tom obě konfigurace podobně. Velkou výhodou, kterou konfigurace snímačů +X disponuje v porovnání s konfigurací snímače -Z, a která by činila danou konfiguraci vhodnější pro měření dílů obecných tvarů, je schopnost snímat rotační prvky po celém obvodu. To by mohlo hrát významnou roli v případě, kdy by byla měřená součást v dolní polovině nějak poškozená. S vědomím toho, že byly všechny rotační elementy vybraného měřeného dílu vyrobeny technologií soustružení, a broušená část dílu byla broušena na kulato, a že nebyla spodní polovina součásti nijak viditelně poškozená, bylo možné považovat výsledky provedeného měření získané konfigurací snímače -Z za spolehlivé. Pokud by se do hodnocení zahrnula produktivita měření, pak by se jako vhodnější jevila konfigurace s jedním snímačem umístěným v ose -Z. To zejména proto, že jak proces klasifikace snímače, tak samotné měření, zabraly výrazně méně času (v řádu jednotek minut) než v případě měření druhou konfigurací snímačů.

Výsledky, které byly měřením získány, korespondovaly s teorií stojící za problematikou filtrování a vyhodnocování měřených prvků. Úspěšně se podařilo demonstrovat, jak ovlivňuje filtrace úchylnky tvaru otevřených i uzavřených elementů. Stejně tak se povedlo popsat a graficky znázornit na jakém principu jednotlivé metody vyhodnocení fungují, jak jejich aplikace ovlivňuje výsledný rozměr měřeného prvku, a jak výrazně dané metody reagují na změnu parametrů použitých filtrů. V poslední řadě byla zdárně potvrzena hypotéza popisující podmínky, kdy filtr o

daném parametru nebude správně fungovat. Vzhledem k dosaženým výsledkům v experimentální části práce je možné říci, že byly všechny cíle práce úspěšně naplněny.

Na základě poznatků získaných v této práci, by bylo možné navrhnout vylepšení výkresové dokumentace měřeného dílu, a stejně tak i optimalizovat měřicí procesy obou konfigurací snímačů. V průběhu analýzy výkresové dokumentace měřeného dílu, která byla provedena vskutku důkladně, bylo objeveno několik nejednoznačností ve specifikaci, které by mohly být odstraněny. Skutečnost, že vyšly ukazatele způsobilosti procesu měření pro některé měřené charakteristiky relativně vysoké, je rozhodně pozitivní. Na druhou stranu to znamená, že existuje dostatečná rezerva vzhledem k technickému předpisu, na úkor které by mohl být proveden do měřicího procesu zásah zvyšující produktivitu měření.

9 Použité zdroje a literatura

1. **ISO.** ISO strategy 2030. *ISO*. [Online] 2021. [Citace: 20. 1 2021.] <https://www.iso.org/files/live/sites/isoorg/files/store/en/PUB100364.pdf>.
2. **ISO .** Developing standards. *ISO*. [Online] [Citace: 7. 12 2020.] <https://www.iso.org/developing-standards.html>.
3. **Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.** Často kladené otázky – Technická normalizace. *ÚNMZ*. [Online] [Citace: 5. 12 2020.] <https://www.unmz.cz/caste-dotazy/casto-kladene-otazky-technicka-normalizace/>.
4. **Česká agentura pro standardizaci.** Evropská a mezinárodní standardizace. *ČAS*. [Online] [Citace: 9. 12 2020.] <https://www.agentura-cas.cz/standardizace/evropska-a-mezinarodni-standardizace/>.
5. **Česká společnost pro jakost.** Centrum technické normalizace. *Česká společnost pro jakost*. [Online] [Citace: 8. 12 2020.] <https://www.csq.cz/infocentrum/centrum-technicke-normalizace>.
6. **Česká agentura pro standardizaci.** Technické normalizační komise. *ČAS*. [Online] [Citace: 8. 12 2020.] <https://www.agentura-cas.cz/prostor-pro-experty/technicke-normalizacni-komise/>.
7. **Česká agentura pro standardizaci .** Centra technické normalizace/zpracovatelé. *ČAS*. [Online] [Citace: 9. 12 2020.] <https://www.agentura-cas.cz/prostor-pro-experty/centra-technicke-normalizace-zpracovatele/>.
8. **ISO.** Welcome to ISO/TC 213. *ISO/TC 213*. [Online] [Citace: 5. 12 2020.] <https://committee.iso.org/home/tc213>.
9. **ČSN EN ISO 8015.** *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Základy - Pojmy, principy a pravidla*. Česká agentura pro standardizaci, 2012.
10. **ČSN EN ISO 14405-1.** *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Tolerování rozměrů - Část 1: Lineární rozměry*. Česká agentura pro standardizaci, 2017.
11. **ČSN EN ISO 17450-1.** *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Obecné pojmy - Část 1: Model geometrické specifikace a jeho ověřování*. Česká agentura pro standardizaci, 2012.
12. **ČSN EN ISO 14405-3.** *Geometrická specifikace produktu (GPS) - Tolerování rozměrů - Část 3: Úhlové rozměry*. Česká agentura pro standardizaci, 2017.
13. **ČSN ISO 2768-1.** *Všeobecné tolerance. Nepředepsané mezní úchyly délkových a úhlových rozměrů*. Česká agentura pro standardizaci, 1992.
14. **ČSN EN ISO 1101.** *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Geometrické tolerování - Tolerance tvaru, orientace, umístění a házení*. Česká agentura pro standardizaci, 2020.
15. **ČSN EN ISO 5459.** *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Geometrické tolerování - Základny a soustavy základen*. Česká agentura pro standardizaci, 2012.
16. **prof. Ing. Jan Mádl, CSc.** *Technologie obrábění. 3. díl*. Praha : ČVUT, 2007. 978-80-01-03752-2.
17. **ČSN EN ISO 14405-2.** *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Tolerování rozměrů - Část 2: Rozměry jiné než lineární nebo úhlové rozměry*. Česká agentura pro standardizaci, 2019.
18. **Beránek, Libor.** *Textura povrchu, profil povrchu. Průmyslová metrologie*. Praha : ČVUT v Praze, 2021.
19. **STATUS.** A BRIEF HISTORY OF CMM TECHNOLOGY. *STATUS - CMM*. [Online] [Citace: 16. 4 2021.] <https://status-cmm.co.uk/blog/a-brief-history-of-cmm-technology/>.
20. **Beránek, Libor.** *Měření s využitím CMM - CMS. Průmyslová metrologie*. Praha : ČVUT v Praze, 2021.
21. **ZEISS Česká Republika.** ZEISS DuraMax - Technické údaje. *ZEISS*. [Online] [Citace: 20. 4 2021.] <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/souradnicove-merici-stroje/souradnicove-merici-stroje-do-vyrobnihoprostredii/zeiss-duramax.html>.
22. **ZEISS Global.** ZEISS DuraMax. *ZEISS*. [Online] [Citace: 20. 4 2021.] <https://images.zeiss.com/metrology/products/systems/cmms/shop-floor-cmm/duramax/zeiss-duramax-product-image.ts->

- 1570537827575.jpg?auto=compress%2Cformat&fm=png&ixlib=java-1.1.11&rect=334%2C64%2C1257%2C944&w=1280&s=8a1ba0e31df556d3b4d8a85a1f14daa3.
23. **ZEISS Česká Republika.** ZEISS PRISMO - Technické údaje. *ZEISS*. [Online] [Citace: 21. 4 2021.] <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/souradnicove-merici-stroje/portalove-souradnicove-merici-stroje/zeiss-prismo.html>.
24. **ZEISS Global.** ZEISS PRISMO. *ZEISS*. [Online] [Citace: 21. 4 2021.] <https://images.zeiss.com/metrology/products/systems/cmms/bridge-type-cmm/prismo/zeiss-prismo-cmm.ts-1555055826994.jpg?auto=compress%2Cformat&fm=png&ixlib=java-1.1.11&rect=472%2C0%2C1080%2C1080&w=1280&s=c94dc41bf5ed99863728c3fd04c00b2e>.
25. **Hexagon AB.** DELTA SLANT. *HEXAGON*. [Online] [Citace: 21. 4 2021.] <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/coordinate-measuring-machines/gantry-cmms/dea-delta-slant>.
26. **GlobalSpec.** Coordinate Measuring Machines. *Engineering360*. [Online] [Citace: 21. 4 2021.] https://www.globalspec.com/ImageRepository/LearnMore/20146/HFER_23117d3b71278d29488e839df0bf294f784d.png.
27. **ZEISS Česká Republika.** ZEISS PRO T - Technické údaje. *ZEISS*. [Online] [Citace: 20. 4 2021.] <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/souradnicove-merici-stroje/stojanove-merici-stroje-s-horizontalnim-ramenem/zeiss-pro-t.html#technicaldata>.
28. **ZEISS Global.** ZEISS PRO T. *ZEISS*. [Online] [Citace: 22. 4 2021.] <https://images.zeiss.com/metrology/products/systems/cmms/horizontal-arm-cmm/prot/zeiss-pro-t-product-image.ts-1522249992342.jpg?auto=compress%2Cformat&fm=png&ixlib=java-1.1.11&rect=123%2C100%2C1657%2C933&w=1280&s=7c0874957e656bcb873c5744ebe9406d>.
29. **Hexagon AB.** Absolute Arm 7osé. *HEXAGON*. [Online] [Citace: 22. 4 2021.] https://www.hexagonmi.com/-/media/Images/Hexagon/Hexagon%20MI/Products/Portable%20Measuring%20Arms/New-Absolute-Arm_Hero-Image_7-Axes.ashx?h=428&la=cs-CZ&w=800&hash=5538D910F8CE2AF78A4517B1B866F969.
30. **ZEISS Global.** ZEISS ScanMax. *ZEISS*. [Online] [Citace: 22. 4 2021.] https://images.zeiss.com/corporate-new/about-zeiss/history/images/technische_meilenstein/imt/1997.ts-1525351051842.jpg?auto=compress%2Cformat&fm=png&ixlib=java-1.1.11&rect=0%2C220%2C1278%2C959&w=832&s=4e40e56aeb11597f8a7f57da0a22f1dd.
31. **G2METRIC ISRAEL.** FARO – Laser Tracker Vantage E & S 6Dof. *G2METRIC*. [Online] [Citace: 22. 4 2021.] https://www.g2metric.co.il/wp-content/uploads/2020/09/VantageS6_SMR_Hand1.png.
32. **Nikon Corporation.** Non-Contact Large-Volume Inspection System. *Nikon*. [Online] [Citace: 22. 4 2021.] https://www.nikon.com/about/technology/product/laser_radar/img/pic_laser_radar_01.jpg.
33. **Fabian F., a další, a další.** *STATISTICKÉ METODY ŘÍZENÍ JAKOSTI*. [Dokument] Praha : Česká společnost pro jakost, 2007.
34. **Minitab, LLC.** Using the number of distinct categories. *Minitab 18 Support*. [Online] 2019. [Citace: 25. 4 2021.] <https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/measurement-system-analysis/supporting-topics/gage-r-r-analyses/using-the-number-of-distinct-categories/>.
35. **MPOWER Engineering, a.s.** Know-how podniku.
36. ČSN EN ISO 17450-2. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Obecné pojmy - Část 2: Základní zásady, specifikace, operátory a nejistoty*. Česká agentura pro standardizaci, 2015.
37. ČSN EN ISO 17450-3. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Obecné pojmy - Část 3: Tolerování prvků*. Česká agentura pro standardizaci, 2016.

10 Seznamy

10.1 Seznam obrázků

Obrázek 1: Charakteristiky délkových rozměrů [10]	6
Obrázek 2: Ideální a skutečný rozměrový prvek [10]	7
Obrázek 3: Metoda přiřazení maximálního vepsaného rozměru [10]	7
Obrázek 4: Metoda přiřazení minimálního opsaného rozměru [10]	8
Obrázek 5: Přiřazení pomocí metody nejmenších čtverců [10]	8
Obrázek 6: Metoda přiřazení Čebyševovou metodou [10]	8
Obrázek 7: Indikace operátoru specifikace Gaussovy metody vyhodnocení [10]	10
Obrázek 8: Indikace požadavku obálky [10]	10
Obrázek 9: Tři sekce indikátoru geometrické tolerance [14]	13
Obrázek 10: Odkazová čára zakončená šipkou [14]	15
Obrázek 11: Odkazová čára zakončená tečkou [14]	15
Obrázek 12: Indikace specifikace odvozených prvků [14]	15
Obrázek 13: Indikace specifikace medián prvku [14]	15
Obrázek 14: Indikace proměnného tolerančního pole [14]	16
Obrázek 15: Indikátory specifikace omezeného tolerančního pole [14]	17
Obrázek 16: Použití indikátoru směrového prvku [14]	17
Obrázek 17: Použití indikátoru omezené plochy [14]	17
Obrázek 18: Použití indikátoru průsečné roviny [14]	18
Obrázek 19: Indikace posunutého tolerančního pole [14]	18
Obrázek 20: Indikace specifikace uplatněné na několik prvků součásti [14]	19
Obrázek 21: Indikace společného tolerančního pole [14]	19
Obrázek 22: Použití indikátoru „všude“ [14]	20
Obrázek 23: Indikace promítnutého prvku [14]	20
Obrázek 24: Indikace tolerance přímosti [14]	21
Obrázek 25: Indikace tolerance rovinnosti [14]	21
Obrázek 26: Indikace tolerance kruhovitosti [14]	22
Obrázek 27: Indikace tolerance válcovitosti [14]	22
Obrázek 28: Indikace tolerance profilu čáry [14]	23
Obrázek 29: Indikace tolerance profilu povrchu [14]	23
Obrázek 30: Indikace tolerance rovnoběžnosti lineárních prvků [14]	24
Obrázek 31: Omezení tolerančního pole pomocí indikátorů orientačních rovin [14]	24
Obrázek 32: Indikace tolerance rovnoběžnosti rovinných prvků	25
Obrázek 33: Vymezení tolerančního pole tolerance kolmosti pomocí indikátoru průsečné roviny [14]	25
Obrázek 34: Vymezení tolerančního pole tolerance kolmosti pomocí základny [14]	26
Obrázek 35: Indikace tolerance kolmosti plošného prvku [14]	26
Obrázek 36: Indikace tolerance sklonu [14]	27
Obrázek 37: Specifikace tolerance polohy lineárního prvku [14]	27
Obrázek 38: Specifikace tolerance polohy bodového prvku [14]	28
Obrázek 39: Indikace tolerance soustřednosti v libovolném příčném průřezu [14]	28
Obrázek 40: Indikace tolerance soustřednosti [14]	29
Obrázek 41: Indikace tolerance souměrnosti [14]	29
Obrázek 42: Indikace tolerance obvodového házení [14]	30
Obrázek 43: Indikace tolerance axiálního házení [14]	30
Obrázek 44: Indikace tolerance házení ve směru [14]	31
Obrázek 45: Indikace tolerance celkového házení válcového prvku [14]	31
Obrázek 46: Indikace tolerance celkového házení rovinného prvku [14]	31
Obrázek 47: Indikace společné základny [15]	32

Obrázek 48: Indikace soustavy základen [15]	33
Obrázek 49: Indikace základen – rozměrové prvky [15]	33
Obrázek 50: Indikace základen – jiné než rozměrové prvky [15]	33
Obrázek 51: Varianty indikací cílené základny – bod, čára, plocha [15]	34
Obrázek 52: Indikace rozměru a umístění cílených základen [15]	34
Obrázek 53: Řešení nejednoznačnosti specifikace vzdálenosti dvou rovin použitím GT polohy [17]	36
Obrázek 54: Řešení nejednoznačnosti specifikace umístění medián prvku použitím GT polohy [17]	36
Obrázek 55: Nejednoznačná specifikace úhlového rozměru [17]	36
Obrázek 56: Schéma filtrace povrchu součásti po aplikaci filtrů o různých vlnových délkách [18]	37
Obrázek 57: Rozložení základního profilu povrchu [18]	38
Obrázek 58: Indikace dlouhovlnného filtru [14]	40
Obrázek 59: Indikace krátkovlnného filtru [14]	40
Obrázek 60: Postup ustavení přiřazeného prvku [15]	41
Obrázek 61: Vyhodnocení Čebyševovou (minimax) metodou [14]	42
Obrázek 62: Vyhodnocení Gaussovou metodou [14]	42
Obrázek 63: Vyhodnocení metodou minimálního opsaného prvku [14]	43
Obrázek 64: Vyhodnocení metodou maximálního vepsaného prvku [14]	43
Obrázek 65: Vyhodnocení metodou tečného prvku [14]	44
Obrázek 66: Indikace přiřazení referenčního prvku [14]	44
Obrázek 67: Konzolové souřadnicové měřicí zařízení [22]	47
Obrázek 68: Portálové souřadnicové měřicí zařízení [24]	47
Obrázek 69: Mostové souřadnicové měřicí zařízení [26]	48
Obrázek 70: Sloupové souřadnicové měřicí zařízení [28]	48
Obrázek 71: Měřicí rameno [29]	49
Obrázek 72: Ruční souřadnicové měřicí zařízení [30]	50
Obrázek 73: Laser tracer a laser radar [31], [32]	50
Obrázek 74: Schéma procesu kontroly [33]	59
Obrázek 75: Variabilita procesu ovlivněná opakovatelností [33]	60
Obrázek 76: Variabilita procesu ovlivněná reprodukovatelností [33]	60
Obrázek 77: Řez sestavou šoupátka [35]	65
Obrázek 78: Systém upnutí součásti	68
Obrázek 79: Strategie snímání v konfiguraci snímače –Z	69
Obrázek 80: Strategie snímání v konfiguraci snímačů +X	69
Obrázek 81: Zaměření kalibrační koule referenčním snímačem	70
Obrázek 82: Měření vybraného dílu konfigurací snímače -Z	71
Obrázek 83: Měření vybraného dílu konfigurací snímačů +X	71
Obrázek 84: Površka válce měřená za účelem vyhodnocení GT přímosti	75
Obrázek 85: Kruhový řez měřený za účelem vyhodnocení GT kruhovitosti	76
Obrázek 86: Potlačení úchylek měřeného povrchu pomocí filtru o různých parametrech [20] ..	80
Obrázek 87: Úchylka přímosti bez použití filtru	81
Obrázek 88: Úchylka přímosti s použitím filtru o parametru $\lambda c = 0,8 \text{ mm}$	81

10.2 Seznam tabulek

Tabulka 1: Značky modifikátorů specifikace délkových rozměrů [10]	11
Tabulka 2: Značky modifikátorů specifikace úhlových rozměrů [12]	12
Tabulka 3: Úchylky netolerovaných délkových rozměrů [13]	12
Tabulka 4: Úchylky netolerovaných úhlových rozměrů [13]	12
Tabulka 5: Značky geometrických charakteristik [14]	14

Tabulka 6: Postup přiřazení prvků v soustavě základů [15]	35
Tabulka 7: Velikost parametru základní délky pro periodické profily povrchu [18]	39
Tabulka 8: Velikost parametru základní délky pro aperiodické profily povrchu – dle Ra [18]	39
Tabulka 9: Velikost parametru základní délky pro aperiodické profily povrchu – dle Rz, Rz1max [18]	39
Tabulka 10: Fyzikální vlastnosti materiálů používaných pro konstrukci CMM [20].....	51
Tabulka 11: Úchylky přímosti odpovídající filtru o daných velikostech základní délky	75
Tabulka 12: Úchylky kruhovitosti odpovídající filtru o daném počtu vln na otáčku.....	77

10.3 Seznam grafů

Graf 1: Porovnání způsobilosti procesu měření provedeného rozdílnými konfiguracemi snímačů	73
Graf 2: Znázornění vlivu rozdílné metodiky měření na správnost měření	74
Graf 3: Závislost velikostí úchylek přímosti na velikosti parametru filtrace	76
Graf 4: Závislost velikostí úchylek kruhovitosti na velikosti parametru filtrace	77
Graf 5: Vliv metod vyhodnocení na rozměr měřeného prvku	78
Graf 6: Vliv parametrů filtrace na rozměr měřeného prvku - MCC.....	79
Graf 7: Vliv parametrů filtrace na rozměr měřeného prvku - MIC.....	79
Graf 8: Vliv parametrů filtrace na rozměr měřeného prvku - LSC.....	80

10.4 Seznam rovnic

Rovnice 1: Vztah pro výpočet rozměru z obvodu [10].....	9
Rovnice 2: Vztah pro výpočet rozměru z plochy průřezu [10]	9
Rovnice 3: Vztah pro výpočet rozměru z objemu [10].....	9
Rovnice 4: Vztah pro výpočet ukazatele způsobilosti procesu Cp [33]	57
Rovnice 5: Vztah pro odhad výběrové směrodatné odchyly [33]	57
Rovnice 6: Vztah pro výpočet ukazatele způsobilosti procesu Cpk [33].....	57
Rovnice 7: Vztah pro výpočet střední hodnoty procesu [33].....	57
Rovnice 8: Vztah pro výpočet ukazatele způsobilosti procesu CpU [33]	57
Rovnice 9: Vztah pro výpočet ukazatele způsobilosti procesu CpL [33].....	58
Rovnice 10: Vztah pro výpočet ukazatele způsobilosti procesu CpM [33].....	58
Rovnice 11: Vztah pro odhad parametru σT [33]	58
Rovnice 12: Vztah pro výpočet směrodatné odchyly systému měření [33]	61
Rovnice 13: Vztah pro výpočet směrodatné odchyly měřidla [33]	61
Rovnice 14: Vztah pro výpočet procentní míry variability procesu měření [33]	62
Rovnice 15: Vztah pro výpočet procentní míry spotřebované tolerance [33]	62
Rovnice 16: Vztah pro výpočet počtu oddělených kategorií [33]	62
Rovnice 17: Vztah pro výpočet ukazatele způsobilosti měřidla Cg dle Forda [33].....	63
Rovnice 18: Vztah pro výpočet ukazatele způsobilosti měřidla Cgk dle Forda zprava [33].....	63
Rovnice 19: Vztah pro výpočet ukazatele způsobilosti měřidla Cgk dle Forda zleva [33]	63
Rovnice 20: Vztah pro výpočet ukazatele způsobilosti měřidla Cg dle Forda vzhledem k tol. poli [33]	63
Rovnice 21: Vztah pro výpočet ukazatele způsobilosti měřidla Cgk dle Forda vzhledem k tol. poli zprava [33]	64
Rovnice 22: Vztah pro výpočet ukazatele způsobilosti měřidla Cgk dle Forda vzhledem k tol. poli zleva [33]	64
Rovnice 23: Vztah pro výpočet ukazatele způsobilosti měřidla Cg dle Bosche [33]	64
Rovnice 24: Vztah pro výpočet ukazatele způsobilosti měřidla Cgk dle Bosche zprava [33]	64
Rovnice 25: Vztah pro výpočet ukazatele způsobilosti měřidla Cgk dle Bosche zleva [33]	64

Rovnice 26: Vztah pro výpočet ukazatele způsobilosti měřidla <i>Cg</i> dle Bosche vzhledem k tol. poli [33]	64
Rovnice 27: Vztah pro výpočet ukazatele způsobilosti měřidla <i>Cgk</i> dle Bosche vzhledem k tol. poli zprava [33]	64
Rovnice 28: Vztah pro výpočet ukazatele způsobilosti měřidla <i>Cgk</i> dle Bosche vzhledem k tol. poli zleva [33]	64

10.5 Seznam příloh

Příloha 1: Výkres měřeného dílu vybraného pro účely práce

Příloha 2: Měřená data a jejich vyhodnocení – konfigurace snímače –Z

Příloha 3: Měřená data a jejich vyhodnocení – konfigurace snímačů +-X