



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Vliv produktivity kontroly na CMM na způsobilost procesu měření

Influence of CMM productivity on measurement process capability

Diplomová práce

Studijní program: Výrobní a materiálové inženýrství

Marek Müller

Praha 2015

Vysoká škola: ČVUT v Praze

Fakulta: strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro Bc. Marka Müllera

obor Výrobní a materiálové inženýrství

Název: Vliv produktivity kontroly na CMM na způsobilost procesu měření

Název anglicky: Influence of CMM productivity on measurement process capability

Zásady pro vypracování:

1. Postupy využívané pro analýzu systému měření, hodnocení způsobilosti.
2. Popis typických úloh kontroly kvality na CMM.
3. Parametry ovlivňující produktivitu měření na CMM.
4. Vliv vybraných parametrů na způsobilost procesu měření.

Prohlášení:

**Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně
a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.**

V Praze dne 19. 6. 2015

.....

podpis

Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Liborovi Beránkovi, Ph.D. za vedení při práci. Dále děkuji Ing. Petru Mikešovi za odborné konzultace a technickou pomoc.

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je vliv produktivity kontroly na CMM na způsobilost procesu měření. První část se zabývá souřadnicovou měřicí technikou. Následně je popisován postup měření na souřadnicových měřicích strojích, způsob ověření technického stavu CMM a analýza systému měření. Hlavní částí je volba představitelů a parametrů ovlivňující produktivitu. Následuje vyhodnocení vlivu rychlosti snímání na produktivitu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Souřadnicové měřicí stroje, přijímací a periodické zkoušky, analýza systému měření, geometrické specifikace, produktivita, rychlost snímání

ABSTRACT

The thesis aims to influence the productivity of controls on CMM for process capability measurements. The first part is concerned with coordinate measuring technology. Subsequently, the measuring process on CMMs is described, way of verifying technical condition of CMM and analysis measurement system. The main part is dedicated to choice of leaders and the parameters affecting productivity. Following the evaluation of the velocity of scanning productivity.

KEYWORDS

Coordinate Measuring Machines, acceptance and reverification tests, measurement system analysis, geometric specifications, productivity, speed scanning

Obsah

Úvod.....	8
1. Souřadnicová měřicí technika.....	9
1.1. Postup měření na CMM	9
1.1.1. Analýza výkresové dokumentace	10
1.1.2. Volba upnutí	10
1.1.3. Konfigurace snímacího systému.....	10
1.1.4. Kalibrace snímacího systému	12
1.1.5. Stanovení souřadného systému.....	14
1.1.6. Extrakce bodů	15
1.1.7. Výpočet geometrických prvků.....	17
1.1.8. Vyhodnocení charakteristik	18
1.2. Zdroje variability.....	18
2. Přejímací a periodické zkoušky	20
2.1. Norma přejímacích a periodických zkoušek ISO 10360 – 2	21
2.1.1. Opakované rozpětí chyby při měření délky.....	21
2.1.2. Chyba při měření délky s nulovou vzdáleností.....	22
2.1.3. Chyba při měření délky se vzdáleností 150 mm.....	23
2.2. CMM používané v režimu měření skenováním dle ISO 10360 – 4.....	24
2.3. Norma přejímacích a periodických zkoušek dle ISO 10360 – 5.....	26
2.3.1. Podmínky a definice	26
2.3.2. Stanovení chyby tvaru a rozměru jednotlivého doteku	31
2.3.3. Stanovení chyby tvaru a rozměru složeného doteku	31
2.3.4. Shoda se specifikacemi přejímací zkoušky	33
2.3.5. Shoda se specifikacemi periodické zkoušky.....	34
3. MSA - Analýza systémů měření.....	36
3.1. Důsledky variabilita systému měření	36
3.2. Požadavky pro měření.....	39
3.3. Numerická analýza výsledků	40
3.4. Grafická analýza výsledků	45
3.5. Koeficienty způsobilosti měřidla	53

4. Prokázání shody a neshody se specifikacemi ISO 14253-1	57
4.1. Pravidlo prokázání shody se specifikacemi	60
4.2. Pravidlo prokázání neshody se specifikacemi	60
4.3. Rozsah nejistoty	60
4.4. Aplikování vzhledem k dodavateli/zákazníkovi	61
5. Přehled představitelů	62
5.1. Rozbor geometrických specifikací	62
5.2. Volba měřené součásti	64
5.3. Parametry ovlivňující rychlost měření	65
5.4. Tvorba plánu měření	66
5.5. Vyhodnocení rychlosti snímání	73
Závěr.....	89

Úvod

Vývoj v provozní strojírenské metrologii je dán růstem kladených nároků na stále se zvyšující kvalitu produktů. To se odráží ve vyšších požadavcích technické úrovně kontroly kvality a jakosti. Tento trend vyvíjí tlak na výrobce, kteří jsou nuceni vytvářet výrobky s dokonalejšími a tvarově složitějšími elementy. Tomuto tlaku se musí přizpůsobit i výrobci měřicí techniky. Dalším vývojem je rozšiřující se automatizace výroby, která je čím dál ve větší míře i u měřicí techniky. Souřadnicová měřicí technika hraje stále důležitější roli v systému kvality. Stejně tak jako se v obrábění stále více podniky zabývají optimalizací řezných podmínek, tak by se dle mého názoru měla řešit i optimalizace měření na souřadnicové měřicí technice. Tímto se otevře prostor ke zvyšování produktivity kontroly na souřadnicové měřicí technice. Vzhledem k vysoké pořizovací ceně těchto měřicích strojů je jejich efektivní využívání velmi důležité.

V první části práce se budu zabývat postupem měření na souřadnicové měřicí technice. Následně popíši způsoby ověření technického stavu CMM a analýzu systému měření. Hlavní část bude zaměřena na volbu vhodného komponentu pro měření a volbu parametrů ovlivňující produktivitu kontroly. V závěru se zaměřím na vyhodnocení vybraného parametru pomocí koeficientů způsobilosti měřidla.

1. Souřadnicová měřicí technika

Souřadnicové měřicí stroje (Coordinate Measuring Machines – dále jen CMM) jsou zařízení pro měření rozměrů, tvaru a polohy běžných geometrických vlastností obrobků a zařízení. Jsou určené k přesnému automatizovanému měření strojních součástí. Slouží ke kontrole výrobků, zda odpovídají stanoveným požadavkům. CMM jsou elektromechanická měřicí zařízení řízená ručně (tj. obsluhou) nebo pomocí počítače. Pomocí počítačové techniky jsou CMM prostředkem pro zvýšení a udržování jakosti výroby ve strojírenství, jejichž výroba byla zapříčiněna potřebou měřit rozměrné součásti v automobilovém a letadlovém průmyslu. Dále bylo potřeba měření u NC strojů ve strojírenské výrobě. Umožňují rychlou a přesnou kontrolu výrobků, která oproti tradičním měřicím způsobům dokáže redukovat časy až o 80%. CMM pracují na podobném principu, jako NC stroje vyrábí. Patří k nejrychleji se rozvíjejícím oblastem strojírenské měřicí techniky. CMM v posledních letech patří mezi špičku v kontrole kvality výrobků. Vůdčí postavení souřadnicové měřicí techniky je dáno především vysokou produktivitou a flexibilitou kontrolního bodu výroby [1,2].

1.1. Postup měření na CMM

Samotné měření na souřadnicové měřicí technice začíná už u analýzy výkresové dokumentace. Dále je důležité stanovit, jakým způsobem bude měřená součást upnuta, což vyplývá také z analýzy výkresu. U CMM je sice možné upnout součást teoreticky v libovolné poloze, ale je bezpodmínečně nutné, aby bylo možné změřit požadované charakteristiky na měřeném dílu. V praxi se nejčastěji měřená součást upíná ve směru souřadného systému stroje. Veškeré charakteristiky, které budou vyhodnocovány, musí být dostupné ke snímání kuličkou snímače, aby měření nebylo přerušeno. Měření by mohlo být přerušeno při kontaktu dřívku snímacího systému se součástí dříve, než se jí dotkne kulička. Proto se musí volit vhodný snímací systém i na základě toho, jak je součást upnuta. Pro vyhodnocení, které je výsledkem kontroly na CMM, je zapotřebí nasnímat potřebné elementy (prvky), díky nimž se provádí vyrovnání součásti a porovnání hodnot s CAD modelem.

1.1.1. Analýza výkresové dokumentace

Pro měření na souřadnicové měřicí technice je podstatná analýza výkresové dokumentace. Na základě posouzení výkresové dokumentace se navrhuje vhodné upnutí měřené součásti tak, aby bylo možné měřit všechny kontrolované charakteristiky. V některých případech se může stát, že nelze součást upnout tak, aby bylo možné měřit všechny charakteristiky. V takových případech se musí buď vyrobit speciální přípravek pro upnutí, nebo se vyhodnotí všechny dostupné charakteristiky pro dané upnutí a zbývající se doměří při jiném upnutí. Dále analýza slouží k vhodné konfiguraci snímacího systému, vyrovnání souřadného systému, ve kterém bude plán měření tvořen. Dále na základě výkresu jsme schopni určit základny pro kontrolu měřených charakteristik, a tudíž správně vyhodnotit součást, což je cílem při měření na souřadnicové měřicí technice.

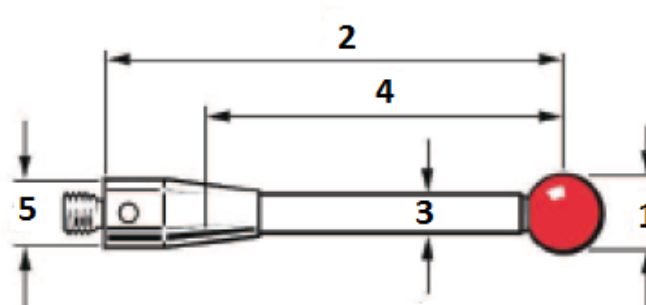
1.1.2. Volba upnutí

Upnutí se volí na základě analýzy výkresové dokumentace, jak bylo popsáno výše. Existuje velké množství způsobů, kterými lze provést upínání součástí, ale je důležité dodržet přístupnost všech měřených charakteristik. Dále je potřeba vytvořit tuhé upnutí, aby se při měření součást nemohla hnout, a tím neovlivnila naměřené výsledky. Je také potřeba dávat pozor, aby upnutí nedeformovalo měřené součásti, jelikož by naměřené hodnoty byly zkreslené danou deformací. Proto je správná volba upevnění součástí na CMM problematikou. Mezi dané volby patří například jednoúčelové přípravky, stavebnicové upínací přípravky, svěráky, různé upínky a další. Volba upnutí také ovlivňuje konfiguraci snímačů.

1.1.3. Konfigurace snímacího systému

Snímací systémy tvoří část CMM a slouží ke snímání bodů. Nasnímané body pomocí měřicího programu vyhodnocujeme, abychom získali numerickou informaci o měřené veličině. Složení snímacího systému je ze snímací hlavy, prodloužení snímací hlavy, snímací dotyk a prodloužení snímacího dotyku. Pomocí snímacích dotyků se přenáší kontakt mezi sondou a dílcem, což

způsobí sepnutí mechanismu sondy. Mechanismus generuje signál, který umožňuje zaznamenat souřadnice snímaného bodu na součásti. Měřicí dotyky se vyznačují tuhostí dotyku a dokonalým tvarem měřicí kuličky. Typ a rozměr dotyků (Obrázek 1) je pak dán měřenou součástí, její tvarovou složitostí a materiálem. Správnou volbou dotyků lze dosáhnout vyšších přesností. Při výběru dotyku měření je důležité volit co nejkratší délku, aby nedocházelo k průhybu, a také nejmenší možný počet prodlužovacích nástavců, protože každým spojem mohou vznikat nepřesnosti měření. Průměr kuličky by měl být naopak co možná největší, neboť díky volbě větší kuličky se volí větší průměr stopky dotyku, a tím i tuhost dotyku stoupá [3].



Obrázek 1: Rozměry dotyku, 1) průměr kuličky, 2) celková délka, 3) průměr dřívku, 4) efektivní činná délka, 5) průměr stopky [3]

Dále se volí materiál kuličky, kterým je nejčastěji rubín. Tento materiál je vhodný skoro u všech měřicích aplikací, ovšem jsou případy, kdy není doporučeno volit kuličku z rubínu. Prvním případem jsou skenovací aplikace na hliníkovém materiálu, kdy může docházet k adheznímu otěru. Druhým případem je skenování litinových povrchů, kde může docházet k opotřebení povrchu otěrem. Materiálem kuličky také může být nitrid křemíku, který je velmi tvrdý a odolný proti opotřebení. Dále například oxid zirkoničitý nebo diamant. Stejně tak se volí materiál u dřívku měřicího dotyku. Běžně používaná je ocel nemagnetická, je vhodná pro kuličku větší než 2 mm a do délek 30 mm. Mezi další materiály patří karbid wolframu, keramika a také uhlíková vlákna, která se využívají pro vysoce

přesné sondy, jelikož mají vynikající tlumení vibrací a zanedbatelný koeficient tepelné roztažnosti. Dalším volitelným parametrem jsou typy dotyků například přímé, hvězdicové nebo diskové. Přímé jsou nejjednodušší tvary složené ze stopky a kuličky. Hvězdicové umožňují snímání složitějších prvků, protože dotyky jsou nakonfigurovány do tvaru hvězdy, pomocí čtyř nebo pěti kuliček. Diskové dotyky se používají tam, kde nelze využít hvězdicových dotyků, např. u snímání zápichů a drážek. Při měření diskovým dotykem se využívá malá část povrchu na kontakt, což je podobné jako měření s dotykem o velkém průměru [3].

1.1.4. Kalibrace snímacího systému

Provádí se na přesné kalibrační kouli základním snímacím systémem, poté se kalibrují nové konfigurace snímacího systému. Kalibrační koule souřadnicového měřicího stroje má známý průměr a je spojena s měřicím stolem dříkem. Pro správné výsledky kalibračních měření musí program Calypso znát přesnou polohu kalibrační koule. Z výsledků kalibrace jsou zjištěné hodnoty korekce snímače. Program Calypso dokáže automaticky kontrolovat dodržení mezních hodnot. Při kalibraci snímačů je důležité, aby snímací systém a snímače byli kalibrováni a definováni v rámci plánu měření. Poté je možné takto definované snímací systémy s kalibrovanými snímači použít ve všech ostatních plánech měření [4].

Kalibrace snímačů je nutná vždy, když je instalován nový snímací systém, který nebyl ještě kalibrován, a také při opětovné kalibraci snímacího systému po kolizi nebo tepelných změnách. Při první kalibraci snímacího systému je nutné kalibrovat ručně. Jakmile snímač byl již jednou kalibrován, může být už kalibrován automaticky. Je několik metod, jak se má provádět kalibrace snímače. Metody závisí na typu snímacího systému (viz. tabulka 1) [4].

Tabulka 1: Seznam kalibračních metod[4]

Režim	Použití	Průběh
Tenzor (standard pro měřicí snímací hlavy)	Určení (statického) tenzoru. Tenzor zachycuje průhyb snímače v závislosti na použité síle.	30 snímání na 15 bodech koule. Každý bod se měří se dvěma odlišnými silami. Z rozdílů je určen staticky tenzor.
Dyn. Tenzor (pouze s opcí VAST Navigátor)	Určení statického a dynamického tenzoru. Dynamicky tenzor charakterizuje průhyb snímače v závislosti na rychlosti scannování.	Na kalibrační kouli se měří tři velké kružnice jednou s rychlosti 5 mm/s a jednou s rychlosti 50 mm/s, je stanoven vzájemný poměr výsledků. Podrobnosti viz návod k obsluze Option VAST Navigátor oddíl „Dynamická kalibrace snímačů“. <i>Upozornění:</i> Dynamicky tenzor může být určen jen, pokud je již znám staticky tenzor. Pokud ještě nebyl určen staticky tenzor, je zde automaticky určován nejprve staticky a potom dynamicky tenzor.
6 bodů (standardní pro spínací snímací hlavy)	Prvotní určení geometrie snímače. Může se použít pro všechny snímací hlavy s kulovými snímacími elementy (kromě pasivních snímačů). Nevhodná metoda pro velmi krátké snímače a speciální konfigurace snímačů (např. šikmé uspořádání).	Pro určení polohy se snímají nejprve čtyři body a potom šest bodů pro kalibraci snímače. Upozornění: Tato kalibrace se provádí v „aretovaném“ režimu. Pozor! U scannovacích hlav je tento režim potřebný pouze pro speciální měřicí úlohy. Může být spojen s určitým malým snížením přesnosti!
Manuální	Pro manuální souřadnicové měřicí stroje vždy. Jinak jen, pokud není možná automatická kalibrace (např. kvůli geometrii dířku). Také pro kalibraci teplotního senzoru nebo pro prvotní kalibraci válcového snímače nebo talířkového (diskového) snímače .	Snímané body si vyberete sami. První snímaný bod slouží pro zjištění směru snímání. Z následných snímání se vypočte geometrie snímače (výsledky jsou možné od pátého snímání).

1.1.5. Stanovení souřadného systému

Upnutí součásti se provádí pomocí upínacích zařízení nebo přípravky. Ty umožňují relativně přesné ustavení součásti. Pro měření není tak podstatná nepřesnost upnutí, jelikož nemá žádný vliv na výsledky měření. Vzhledem nízkým nárokům na přesnost upnutí je ustavení součásti snadné, a možnost definování souřadného systému měřením libovolných elementů na součásti je velkou výhodou CMM. Naopak volba správného postupu určení souřadného systému nemusí být snadná díky velkému množství variant, které jsou k dispozici. Pro názornou ukázkou dané problematiky jsem zvolil konkrétní případ na programu Calypso, který se používá u měřicích strojů firmy Zeiss [4].

Každé těleso v prostoru má z hlediska geometrie šest stupňů volnosti. Těleso může rotovat kolem tří os, které jsou na sebe kolmé a tvoří kartézský souřadný systém značený $X - Y - Z$, to jsou tři stupně volnosti. Dále je to pohyb po směru těchto os, což dává zbývající tři stupně volnosti.

Nejčastěji probíhá definice souřadného systému změřením geometrického prvku, který určuje hlavní směr prostorové osy. Tímto geometrickým prvkem může být rovina, osa válce či kužele nebo jiný geometrický prvek. Určením hlavního směru odebereme tělesu dva stupně volnosti neboli dvě rotace kolem os. Následuje odebrání třetího stupně volnosti, které docílíme změřením prvku definujícím otáčení kolem třetí prostorové osy. Pro odebrání zbývajících stupňů volnosti je potřeba určit počátek souřadného systému všech tří os $X - Y - Z$, který určíme měřením elementů dle konkrétního dílu [4].

Souřadný systém lze v programu Calypso určit dále metodou RPS, která má dvě varianty. První variantou je RPS 321, která vychází z bodů se jmenovitými souřadnicemi určenými minimálně třemi a naopak maximálně šesti elementy. Pro nastavení souřadného systému určujeme, které souřadnice elementu jsou pevné, a které volné. Zde je jedna souřadnice třikrát dána pevně, druhá souřadnice dvakrát a třetí jednou. Z toho je zřejmý název metody. Při součtu počtu pevně definovaných souřadnic získáme hodnotu 6, což je stejný počet jako počet stupňů volnosti tělesa v prostoru. Druhou variantou je RPS

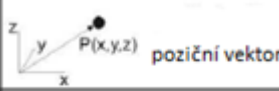



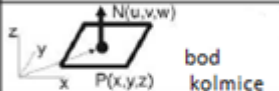

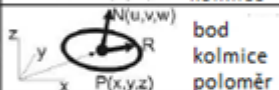
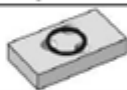


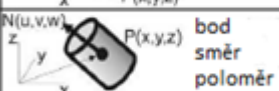

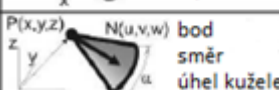
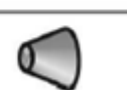
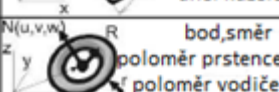

volný tvar, která se používá pro definování souřadného systému volných tvarů. V této variantě jsou naměřené body projektovány na jmenovitou rovinu a poté vyhodnoceny. Pro vyrovnání u RPS volný tvar se používá iterace, neboli opakování měření ve smyčce několikrát po sobě a postupně se výsledky zpřesňují, a tím se i zpřesňuje umístění snímaných bodů na měřeném tělese [4].

Dalším způsobem definování souřadného systému je metoda 3D připisování. Princip této metody je obdobný jako u metody RPS volný tvar, ale s rozdílem možnosti použít libovolný počet bodů a elementů, nejběžněji z CAD modelu, a neprovádí se jejich promítání. Výsledkem není stanovení jednoznačného souřadného systému, ale nejpravděpodobnější zvolený bod. Je to dáno kritériem metody, které je minimum součtu druhých mocnin odchylek. Tato metoda se využívá u tvarově složitých dílů [4].

Posledním způsobem stanovení souřadného systému je metoda P6, která je vhodná pro měření trubek. Kde prvním bodem se definuje počátek pro všechny tři souřadnice, společně s druhým bodem definují hlavní osu tělesa a třetí bod určuje otáčení kolem hlavní osy [4].

1.1.6. Extrakce bodů

Z pohledu souřadnicového měření je možné kontrolované součásti rozdělit do dvou skupin. První skupinou jsou součásti, které jsou tvořeny obecnými tvarovými plochami. Tyto plochy jsou definovány matematickým předpisem. Patří sem například lopatky turbín nebo plastové komponenty. Pro takové součásti se vyhodnocují tolerance profilu čáry nebo tolerance profilu plochy. Do druhé skupiny patří díly, které jsou složeny ze základních geometrických prvků (obrázek 2), například blok motoru nebo vstřikovací čerpadla. Na těchto komponentech se měří rozměry a vyhodnocují tolerance tvaru, orientace, umístění a házení. Pro určení základních geometrických prvků je nutno zaznamenat určitý minimální počet bodů, pro přesné definování a možné vyhodnocení.

Prvky	Příklad a popisující parametry	Minimální počet bodů	Příklad v praxi
Bod	 $P(x,y,z)$ poziční vektor	1	 roh hranolu
Přímka	 $V(u,v,w)$ $P(x,y,z)$ bod, směr	2	 hrana hranolu
Rovina	 $N(u,v,w)$ $P(x,y,z)$ bod kolmice	3	 rovina hranolu
Kružnice	 $N(u,v,w)$ $P(x,y,z)$ bod kolmice poloměr	3	 vztažná kružnice děr
Koule	 $P(x,y,z)$ bod poloměr	4	 upínání přívěsného vozíku
Válec	 $N(u,v,w)$ $P(x,y,z)$ bod směr poloměr	5	 hřídel
Kužel	 $P(x,y,z)$ bod $N(u,v,w)$ směr úhel kužele	6	 upínací kužel
Anuloid	 $N(u,v,w)$ bod, směr poloměr prstence poloměr vodiče	7	 zaoblení na válci

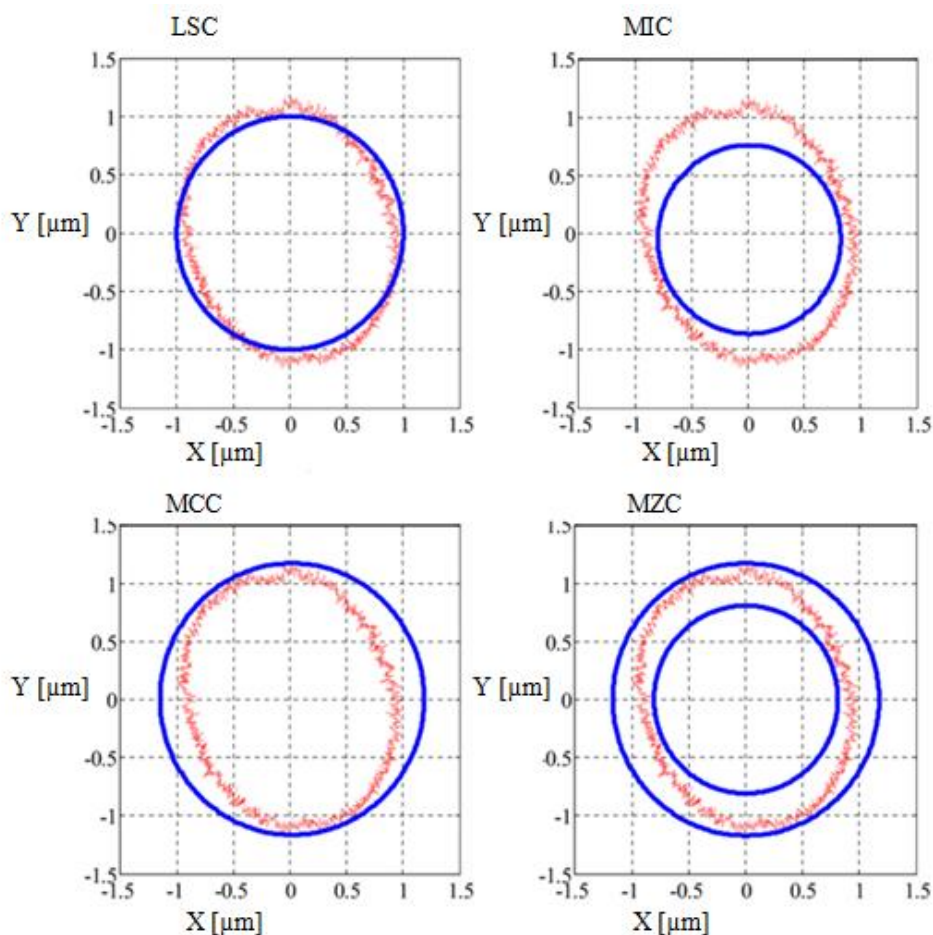
Obrázek 2: Základní geometrické prvky [3]

Tyto body jsou při dotyku snímacím systémem zaznamenány a software dokáže vyhodnotit, o jaký tvar se jedná. Například pro definování kružnice je zapotřebí nasnímání tří bodů. Způsob získání bodů je možný více způsoby, buď dotykovými snímacími systémy, nebo bezkontaktními systémy. Dotykové snímací systémy se ještě rozdělují na sondy, které fungují na spínacím typu (kontaktní sonda), nebo na snímacím typu (skenující sonda). Pro skenující metody se definují parametry pro extrakci bodů, například rozestup bodů nebo rychlost snímání, což ovlivňuje produktivitu měření na CMM. Dalším důležitým krokem je naměření vybraných geometrických elementů pro základní vyrovnání a následné aplikování metody vyrovnání, jak je důkladněji popsáno v kapitole výše. Po aplikaci vhodné metody se přenesou souřadný systém stroje automaticky na měřenou součást. Jakmile se stanoví základní

souřadný systém, nastává měření ostatních geometrických elementů. Jsou to elementy, které jsou potřebné pro výpočet požadovaných charakteristik měřené součásti [3,4].

1.1.7. Výpočet geometrických prvků

Dalším důležitým krokem je naměření vybraných geometrických elementů pro základní vyrovnání a následné aplikování. Jak je důkladněji popsáno v kapitole výše. Po aplikaci vhodné metody se přenesou souřadný systém stroje automaticky na měřenou součást. Jakmile se stanoví základní souřadný systém, nastává měření ostatních geometrických elementů. Jsou to elementy, které jsou potřebné pro výpočet požadovaných charakteristik měřené součásti. Tyto elementy se na základě vztahů zpracovávají softwarem např. rozměry, geometrické odchylky tvaru a polohy. Například pro výpočet kružnice existuje více možností získání daného rozměru. Existují možnosti, jako jsou gaussova metoda LSC, minimální opsaná kružnice MCC, maximální vepsaná MIC nebo minimální zóna MZC (obrázek 3). Gaussovou metodou se určuje průměrný rozměr z naměřených hodnot, za pomoci metody nejmenších



Obrázek 3: Metody výpočtu

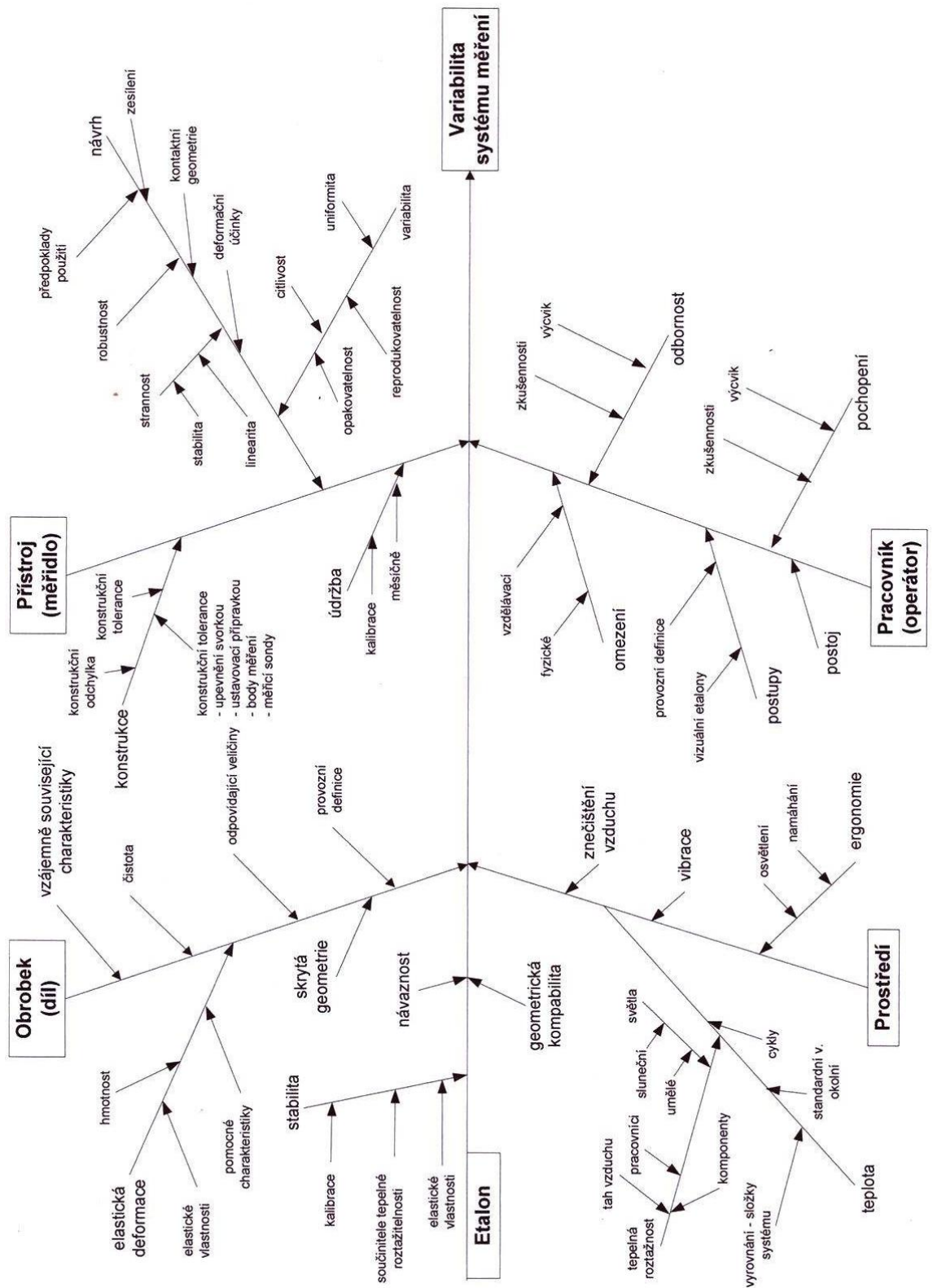
čtverců. Minimální opsaná kružnice naopak udává rozměr například válce, který je možný dostat do zmíněného rozměru náboje. Opakem je maximální vepsaná kružnice, ta udává rozměr náboje, neboli maximální průměr, který je možný vložit. Tímto se tedy pro výpočet průměru hřídele použije metody minimální opsané a pro náboj maximální vepsané kružnice. Pro zamezení možných odlehlých hodnot, které by značně ovlivnily metodu MIC, MCC a MZC, se používají filtrace. Filtry slouží k odebrání těchto odlehlých hodnot, které mohou vzniknout například nečistotou na měřeném objektu [5].

1.1.8. Vyhodnocení charakteristik

Porovnání hodnot se provádí s CAD modelem. Na základě určení základních geometrických prvků se vyhodnocují rozměry, geometrické specifikace a tím i kvalita měřeného komponentu. Hodnoty získané měřením, které popisují skutečný povrch obrobku, se vypočítávají pomocí softwaru z daných souřadnic naměřených hodnot. Tyto hodnoty se využívají pro kontrolu měřené součástky, nebo jestli daný geometrický tvar vyhovuje konstrukčním požadavkům vyrobené součásti. Zpětná kontrola charakteristik daných výkresem je vyobrazena v protokolu. Na protokolu se charakteristiky, které splňují požadavky, zobrazí v zeleném rámečku, naopak ty, které nesplňují, jsou v červeném rámečku. Možnosti protokolů jsou mnohem větší, například grafické znázornění naměřených hodnot, rozptyl v tolerančním poli a další [10].

1.2. Zdroje variability

Systém měření je ovlivňován jak náhodnými zdroji variability, tak i systematickými zdroji viz obrázek 4. Jsou způsobovány buď náhodnými, nebo zvláštními příčinami. Pro řízení variability systému měření se možné zdroje variability identifikují, eliminují se, nebo se monitorují zdroje variability. I přes to, že specifické příčiny jsou závislé na dané situaci, lze některé zdroje variability identifikovat. Mezi zdroje variability patří hlavní prvky v systému měření, kterými jsou etalon, obrobek, přístroj, pracovník a prostředí. Také samotný postup měření obsahuje zdroje chyb [6].



Obrázek 4: Diagram příčin a následků variability systému měření [6]

2. Přejímací a periodické zkoušky

Vzhledem k velké složitosti konstrukce CMM a množství dalších faktorů, které ovlivňují přesnost měření na souřadnicových měřicích strojích, je důležité provádět ověřující zkoušky. Nezaměřují se na další zdroje variability, jako jsou prostředí, obrobek nebo pracovník. Tyto zkoušky se provádí k zajištění toho, aby CMM odpovídali výrobním parametrům, a bylo možné je využívat při měření v praxi. Těmito zkouškami se provádí ověření technického stavu CMM. Zkoušky se dají normou rozdělit na přijímací zkoušky CMM a periodické zkoušky CMM. Tyto zkoušky se dělí na devět částí[7]:

ČSN EN ISO 10360-1:2000 Část 1: Slovník

ČSN EN ISO 10360-2:2010 Část 2: Souřadnicové měřicí stroje používané pro měření lineárních rozměrů

ČSN EN ISO 10360-3:2000 Část 3: Souřadnicové měřicí stroje s osou otočného stolu jako čtvrtou osou

ČSN EN ISO 10360-4:2001 Část 4: Souřadnicové měřicí stroje používané v režimu měření skenováním

ČSN EN ISO 10360-5:2011 Část 5: Souřadnicové měřicí stroje používající snímací systém s jednotlivým a složeným snímacím dotekem

ČSN EN ISO 10360-6:2001 Část 6: Odhad chyb při výpočtu prvků přiřazených metodou nejmenších čtverců

ČSN EN ISO 10360-7:2011 Část 7: Souřadnicové měřicí stroje vybavené zobrazovacími snímacími systémy

ČSN EN ISO 10360-8:2013 Část 8: Souřadnicové měřicí stroje s optickými snímači vzdálenosti

ČSN EN ISO 10360-9:2014 Část 9: Souřadnicové měřicí stroje vybavené vícenásobnými snímacími systémy

K potřebám mé diplomové práce jsou důležité části normy 2, 4 a 5, na které se zaměřím v následujících kapitolách.

2.1. Norma přijímacích a periodických zkoušek ISO 10360 – 2

Přijímací zkoušky se provádějí dle specifikací, které jsou dány výrobcem v souladu s normou ISO 10360 – 2. Artefakty reprezentující kalibrovanou zkušební délku mohou být vybrat výrobce podle předem stanovených kalibračních těles, a to tehdy, pokud uživatel stanoví kalibrovanou zkušební délku. Periodické zkoušky se provádějí stejným způsobem, s tím rozdílem, že postupy se provádějí podle výrobce, ale specifikace jsou stanovené uživatelem [8].

Princip této metody je přesně definován normou 10360 – 2: Principem metody hodnocení je využití kalibrované zkušební délky v rozsahu délkové jednotky metr vztažené na příslušný CMM, který je schopen měření v mezích stanovených maximálních hodnot $E_{0,MPE}$ a $E_{150,MPE}$ a chyb měření délky pro CMM se specifikovanou vzdáleností středu snímací hlavy k odsazení hrotu snímacího doteku (nejen 0 ale i 150) a v mezích stanovených maximálních dovolených hodnot opakovaného rozpětí $R_{0,MPL}$. Vyhodnocení se provádí porovnáním indikovaných hodnot s kalibrovanými hodnotami z pěti různých kalibrovaných zkoušených délek, při minimálním počtu měření třikrát [8].

2.1.1. Opakované rozpětí chyby při měření délky

Při měření délky se hodnota opakovaného rozpětí nesmí dostat za hodnotu maximální dovolené meze opakovaného rozpětí chyby $R_{0,MPL}$, která se stanovuje, buď výrobce v případě přijímacích zkoušek, nebo pokud jde o periodické zkoušky je stanovena uživatelem. Tato hodnota maximální dovolené meze opakovaného rozpětí chyby se pro měření délky udává v mikrometrech. U měření s nulovou vzdáleností se pro každou sadu tří opakovaných měření vypočte opakované rozpětí R_0 . Díky tomu se dá vyhodnotit rozpětí tří opakovaných měření délek. Tyto hodnoty se zaznamenávají do diagramu, ty odpovídají hodnotě $R_{0,MPE}$ [8].

2.1.2. Chyba při měření délky s nulovou vzdáleností

Tato zkouška se provádí při nulové vzdálenosti osy pinoly od odsazení snímacího doteku nebo s nejmenší možnou vzdáleností. U měření s nulovou vzdáleností se pro každou sadu tří opakovaných měření vypočte opakované rozpětí R_0 . Díky tomu se dá vyhodnotit rozpětí tří opakovaných měření délek. Tyto hodnoty se zaznamenávají do diagramu, ty odpovídají hodnotě $R_{0,MPE}$ [8].

Do měřicího objemu CMM se umístí v sedmi různých polohách (umístění a orientace) pět různých kalibrovaných zkušebních délek, a každá délka musí být měřena třikrát, pro naměření 105 hodnot. Čtyři polohy je nutné umístit do prostoru tak, aby byly diagonálami v daném prostoru, viz tabulka 1. Ostatní polohy může specifikovat uživatel, předem zvolené polohy jsou rovnoběžné ke každé z os CMM, jak uvádí tabulka 2 [8].

Tabulka 2: Orientace v měřicím objemu [8]

Poloha číslo	Orientace v měřicím objemu	Požadovaný nebo předem zvolený
1	Podél diagonály prostoru z bodu (1, 0, 0) k bodu (0, 1, 1)	Požadovaný
2	Podél diagonály prostoru z bodu (1, 1, 0) k bodu (0, 0, 1)	Požadovaný
3	Podél diagonály prostoru z bodu (0, 1, 0) k bodu (1, 0, 1)	Požadovaný
4	Podél diagonály prostoru z bodu (0, 0, 0) k bodu (1, 1, 1)	Požadovaný
5	Rovnoběžné s osou stroje z bodu (0, 1/2, 1/2) k bodu (1, 1/2, 1/2)	Předem zvolený
6	Rovnoběžné s osou stroje z bodu (1/2, 0, 1/2) k bodu (1/2, 1, 1/2)	Předem zvolený
7	Rovnoběžné s osou stroje z bodu (1/2, 1/2, 0) k bodu (1/2, 1/2, 1)	Předem zvolený

Poznámka: Pro specifikace uvedení v této tabulce se zobrazují protilehlé rohy měřicího objemu s (0, 0, 0) a (1, 1, 1) v souřadnicích (X, Y, Z).

Veškerá měření pro kvalifikaci se provádějí na referenční kouli a nesmí být použito jiných libovolných zkušebních artefaktů. Odsazení hrotu musí být od osy pinoly nulové k měření zkušební délky. Od výrobce musí být specifikován v datovém listu snímací systém, tak aby bylo možné jej použít pro zkoušku E_0 .

Vyhodnocení se provádí z naměřených 105 hodnot, ze kterých se vypočítá chyba při měření délky E_0 , s čímž se vypočítá rozdíl mezi kalibrovanou a měřenou hodnotou [8].

2.1.3. Chyba při měření délky se vzdáleností 150 mm

Pro ověření musí měřená délka splňovat, že zkoušená délka je nejméně z 66% maximálního měřicího rozsahu CMM měřicí přímky podél kalibrované zkušební délky. Pro tuto zkoušku musí být kalibrované délky výrazně rozdílné, materiál je běžný CTE, pokud není ve specifikaci od výrobce dáno jinak. Dále musí být od výrobce jasně stanovené optimální horní a dolní meze CTE kalibrované zkušební délky. Veškerá měření pro vyhodnocení se provádí na referenční kouli dodávané výrobcem, jiné zkušební artefakty se nemohou používat. Při provádění je možné vybrat ke zkoušce dvě libovolné kombinace z osmi možných kombinací polohy zkoušení a smysl pohybu snímacího doteku viz tabulka 3 [8].

Tabulka 3: Orientace v měřicím objemu [8]

Číslo pozice	Orientace v měřicím objemu
1A	v YZ- rovině diagonálně z bodu (1/2, 0, 0) k bodu (1/2, 1, 1)
1B	v YZ- rovině diagonálně z bodu (1/2, 0, 1) k bodu (1/2, 1, 0)
2A	v XZ- rovině diagonálně z bodu (0, 1/2, 0) k bodu (1/2, 1, 1)
2B	v XZ- rovině diagonálně z bodu (0, 1/2, 1) k bodu (1, 1/2, 0)
Poznámka: Pro specifikace uvedení v této tabulce se zobrazují protilehlé rohy měřicího objemu s (0, 0, 0) a (1, 1, 1) v souřadnicích (X, Y, Z).	

Pro každou měřenou kombinaci polohy zkoušené délky se musí měřit pět různých kalibrovaných délek třemi měřeními. Tímto se provede 30 měření a u všech se vypočítá chyba měření délky E_{150} . Dále se počítá rozdíl mezi hodnotou měřenou a kalibrovanou u každé měřené zkoušené délky. Měřená (indikovaná) hodnota může být korigována při zohlednění systematické chyby

nebo chyby podmíněné teplotou, ale musí být CMM vybaven pro takové účely. Korigování výsledků získaných počítačem nejsou manuálně povoleny k zohlednění vlivů teplot. Všechny tyto hodnoty chyb měření E_{150} , MPE se vynášejí do diagramu [8].

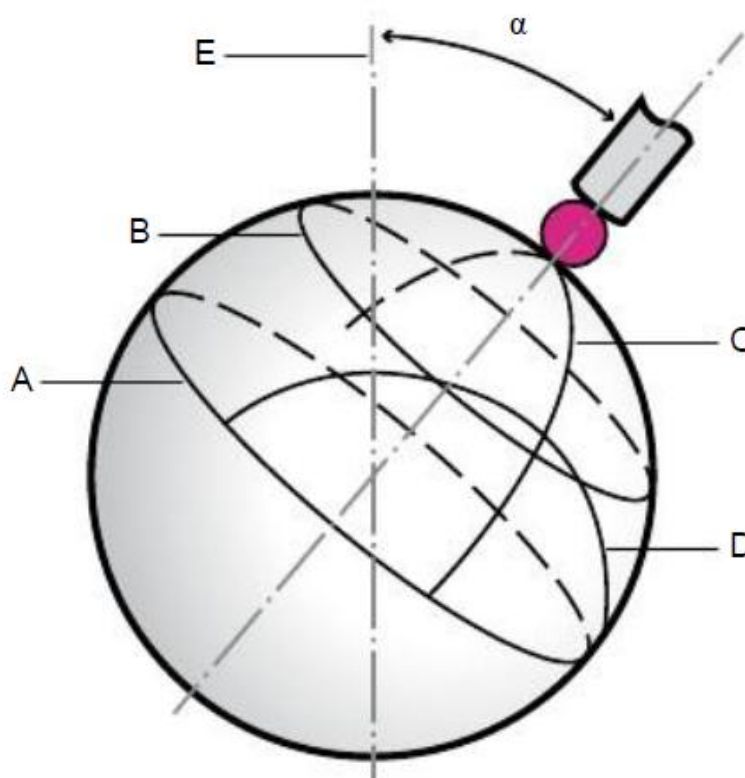
2.2. CMM používané v režimu měření skenováním dle ISO 10360 – 4

Čtvrtá část normy ISO 10360 ověřuje, zda je technický stav souřadnicového měřicího stroje používajícího způsob měření skenováním shodný s ustanovením výrobce. Dále umožňuje uživateli periodicky testovat stav souřadnicového měřicího stroje používaného v režimu skenování periodickou zkouškou. Tato část kontroluje chybu snímání při skenování T_{ij} a dobu zkoušky skenováním τ . Popisované zkoušky lze použít pro [9]:

- a) Skenování na předem stanovené dráze pro sejmutí velké hustoty bodů (HP)
- b) Skenování na předem stanovené dráze pro sejmutí malé hustoty bodů (LP)
- c) Skenování na předem nestanovené dráze pro sejmutí velké hustoty bodů (HN)
- d) Skenování na předem nestanovené dráze pro sejmutí malé hustoty bodů (LN)

Principem metody hodnocení je zjistit, jestli je souřadnicový měřicí stroj schopen měření při stanovené maximální dovolené chybě snímání při skenování $MPE_{T_{ij}}$ a maximální dovolené době MPE_{τ} . Střed a poloměr zkušební koule se určí skenováním ve čtyřech cílových skenovacích rovinách na zkušební kouli. Chyba se vyhodnocuje jako řada poloměrů mezi měřeným středem a všemi posuzovanými skenovanými body (rozdíl maximální a minimální hodnoty) [9].

Důležité je vyčištění zkušební koule a přípravku tak, aby nezůstal zbytkový film, který by mohl ovlivnit výsledky zkoušky. Dále je zapotřebí takového upnutí, aby bylo dostatečně tuhé, pro zamezení případné chyby způsobené ohybem. Zaznamenává se měření skenovaných bodů pro korigované skenovací linie na povrchu zkušební koule ve čtyřech stanovených cílových skenovacích rovinách znázorněných na obrázku 5 [9].



Obrázek 5: Vizualizace čtyř skenovacích drah [9]

Písmeny A – D jsou označeny cílové skenovací roviny a písmeno E znázorňuje osu pinoly. Cílová skenovací rovina A je na rovníku a s rovinou B jsou rovnoběžné se vzdáleností od sebe o 8 mm. Roviny B, C, a D jsou navzájem mezi sebou kolmé. Cílová skenovací rovina C prochází pólem a od ní je rovina D ve vzdálenosti 8 mm. Úhel α udává sklon stopky snímacího doteku od osy pinoly, doporučená hodnota sklonu je přibližně 45° [9].

Pro získání výsledků zkoušky se vypočítá střed Gaussovy koule metodou nejmenších čtverců. U výpočtu se použijí všechny skenované body ze všech čtyř drah. Pro každý naskenovaný bod se vypočítají radiální vzdálenosti R . Výsledná chyba snímání při skenování T_{ij} se stanoví výpočtem řad vyčíslených radiálních vzdáleností R , a polovinou hodnoty průměru zkušební koule [9].

2.3. Norma přijímacích a periodických zkoušek dle ISO 10360 – 5

Tato část normy specifikuje přijímací a periodické zkoušky CMM provedených s dotykovými snímacími systémy. Vztahuje se pouze na CMM používající libovolný typ dotykového snímacího systému, režim snímání diskretního bodu, a kulový nebo polokulový snímací dotek. Podmínky a definice přijímacích a periodických zkoušek [10]:

2.3.1. Podmínky a definice

Podmínky a definice přijímacích a periodických zkoušek mají několik bodů [10]:

1) Efektivní průměr snímacího doteku – průměr, který je použitý pro korekční vektor hrotu, k dorovnání měřeného rozměrového prvku atd. Efektivní průměr snímacího doteku může být parametrem stanoveným kvalifikací snímacího systému.

2) Předkvalifikace snímacího systému - kvalifikace snímacího systému, která je oddělena od dalšího měření sondou nebo výměnným dotekem, anebo přeorientováním kloubového snímacího systému.

3) Chyba tvaru složeného doteku – je značena jako P_{FTj} a jde o chybu indikace, ve které může být rozsah radiální vzdálenosti stanoven z vhodných bodů měřených na zkušební kouli Gausovou metodou nejmenších čtverců, přičemž měření jedné zkoušky je vyhodnoceno z pěti různých dotyků na kouli nacházejících se kdekoli v měřicím objemu CMM a v režimu snímání diskretních bodů.

4) Chyba rozměru složeného doteku - označíme P_{STj} , znamená chybu indikace, ze které může být metodou nejmenších čtverců z naměřených bodů určen průměr zkoušené koule, měření jedné zkoušky je vyhodnoceno z pěti různých doteků na kouli nacházející se kdekoli v měřicím objemu CMM.

5) Hodnota polohy složeného doteku - označíme P_{LTj} a jedná se o maximum rozsahů souřadnic X, Y a Z ve kterém je umístěna zkoušená koule, může být určena metodou nejmenších čtverců, přičemž měření jedné zkoušky je vyhodnoceno z pěti různých doteků na kouli nacházejících se kdekoli v měřicím objemu CMM v režimu snímání diskretních hodnot.

6) Chyba tvaru jednotlivého doteku – značí se jako P_{FTU} a jedná se o chybu indikace, ve které může být rozsah poloměrů určen metodou nejmenších čtverců měřených na zkušební kouli, kdy se měření provádí na CMM s jedním dotekem, s využíváním režimu snímání diskretního bodu s body vzatými na zkušební kouli umístěné kdekoli v měřicím objemu.

7) Chyba rozměru jednotlivého doteku - označujeme P_{STU} a jedná se o chybu indikace rozdílu mezi průměrem zkušební koule a jejím kalibrovaným průměrem určeným metodou nejmenších čtverců z naměřených bodů na CMM s jedním dotekem s využíváním režimu snímání diskretních hodnot bodu s body na zkušební kouli umístěné kdekoli v měřicím objemu.

8) Největší dovolená chyba tvaru složeného doteku - označujeme ji $P_{FTj, MPE}$ a jde o extrémní hodnotu chyby tvaru složeného doteku P_{FTj} , která je dovolena specifikacemi pro CMM. Největší dovolená hodnota chyby tvaru složeného doteku může být vyjádřena více způsoby, například takto:

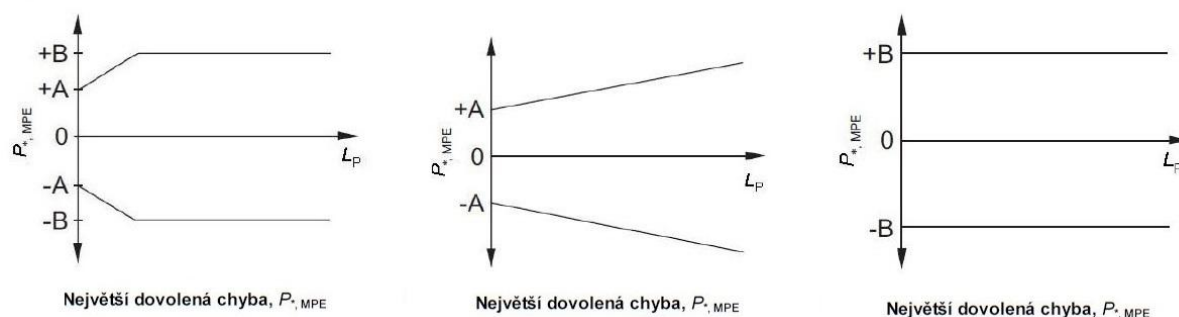
$$(4) P_{FTj, MPE} = \text{minimum}(A + L_P/K)aB$$

$$(5) P_{FTj, MPE} = (A + L_P/K)$$

$$(6) P_{FTj, MPE} = B$$

Na obrázku 6 jsou znázorněny největší dovolené chyby (mezní čísla).

Největší dovolená chyba/mezní čísla



Obrázek 6: Největší dovolené chyby (mezní čísla)[10]

9) Největší dovolená chyba rozměru složeného doteku - značíme ji $P_{STj, MPE}$ a jedná se o extrémní hodnotu chyby rozměru složeného doteku P_{STj} . Největší dovolená hodnota chyby rozměru složeného doteku může být vyjádřena více způsoby, například takto:

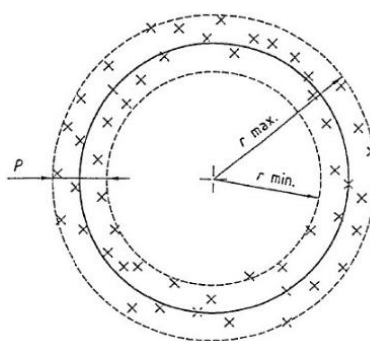
$$(1) P_{STj,MPE} = \text{minimum}(A + L_p/K) a B$$

$$(2) P_{STj,MPE} = (A + L_p/K)$$

$$(3) P_{STj,MPE} = B$$

10) Největší dovolená mez hodnoty polohy složeného doteku - značíme ji jako $P_{LTj, MPE}$ a jedná se o extrémní hodnotu polohy složeného doteku P_{LTj} , která je dovolená specifikacemi, předpisy atd. pro CMM

11) Největší dovolená chyba tvaru jednotlivého doteku - Označujeme ji jako $P_{FTU, MPE}$ a jedná se o extrémní hodnotu chyby tvaru jednotlivého doteku P_{FTU} , která je dovolená specifikacemi pro CMM. Dovolený rozsah chyby tvaru při snímání bodů znázorňuje obrázek 7.



Obrázek 7: Dovolené rozpětí chyby tvaru při snímání [10]

V tabulce 4 je přehledný seznam používaných značek používaných v definicích a podmínkách přijímacích a periodických zkoušek z normy ISO 10360-5.

Tabulka 4: Seznam použitých značek [10]

Značka	Význam
A	Kladná konstanta, vyjádřená v mikrometrech a dodaná výrobcem, použitá k vyjádření největší dovolené meze nebo chyby
K	Bezrozměrná kladná konstanta dodaná výrobcem, použitá k vyjádření největší dovolené meze nebo chyby
L_p	Vzdálenost ve 3D mezi středy referenční koule a zkušební koule, v milimetrech
B	Největší dovolená chyba (např. $P_{FTj, MPE}$) nebo meze (např. $P_{LTj, MPL}$), v mikrometrech, jak je uvedena výrobcem
R	Gaussova radiální vzdálenost
l	Délka pevného složeného doteku snímacího systému
l_u	Délka jednotlivého doteku
l_o	Délka odsazení pevné složené sondy
l_A	Délka odsazení sondy kloubového snímacího systému
X, Y, Z	Souřadnice středu
E_0	Chyba měření délky s minimální délkou odsazení sondy
$E_{0, MPE}$	Největší dovolená chyba měření délky s minimální délkou odsazení sondy
E_L	Chyba měření délky s odsazením sondy délky L
$E_{L, MPE}$	Největší dovolená chyba měření délky
$j = E$	Kloubový snímací systém používající empirickou kvalifikaci
$j = I$	Kloubový snímací systém používající odvozenou kvalifikaci
$j = M$	Pevný složený dotekový snímací systém
$j = N$	Pevný složený systém sondy
P_{FTE}	Chyba tvaru složeného doteku, P_{FTj}
P_{FTI}	
P_{FTM}	
P_{FTN}	
P_{STE}	Chyba rozměru složeného doteku, P_{STj}
P_{STI}	
P_{STM}	
P_{STN}	
P_{LTE}	Hodnota polohy složeného doteku, P_{LTj}
P_{LTI}	
P_{LTM}	
P_{LTN}	
P_{FTU}	Chyba tvaru jednotlivého doteku
P_{STU}	Chyba rozměru jednotlivého doteku
$P_{FTE, MPE}$	Největší dovolená chyba tvaru složeného doteku, $P_{FTj, MPE}$
$P_{FTI, MPE}$	
$P_{FTM, MPE}$	
$P_{FTN, MPE}$	
$P_{STE, MPE}$	Největší dovolená chyba rozměru složeného doteku, $P_{STj, MPE}$
$P_{STI, MPE}$	
$P_{STM, MPE}$	
$P_{STN, MPE}$	
$P_{LTE, MPL}$	Největší dovolená mez hodnoty polohy složeného doteku, $P_{LTj, MPL}$
$P_{LTI, MPL}$	
$P_{LTM, MPL}$	
$P_{LTN, MPL}$	
$P_{FTU, MPE}$	Největší dovolená chyba tvaru jednotlivého doteku

2.3.2. Stanovení chyby tvaru a rozměru jednotlivého doteku

K uspořádání použití snímacího jednotlivého doteku CMM používající pevné složené sondy, pevné složené doteky a kloubové snímací systémy. Jedna ze složených sond nebo jeden ze složených doteků nebo jedna z kloubových doteků mohou být použity pro tuto zkoušku [10].

Principem tohoto zkušební postupu je měření zkušební koule použitím 25 bodů snímání jednotlivým dotekem a přiřazení pozorované chyby tvaru ke snímacímu systému. Nejmenší čtverce (tzv. Gaussovy čtverce) vhodné koule v 25 bodech je zkoumáno pro tvar indikace. Tato analýza výnosů poskytne chybu tvaru jednotlivého doteku P_{TFU} [10].

Výsledky těchto zkoušek mohou být vysoce závislé na délce doteku. Pouze ty délky CMM specifikované výrobcem jako použitelné snímacím systémem musí být způsobilé pro zkoušku. Hmotná míra (což je v tomto případě zkušební koule) musí mít průměr větší nebo rovno 10 mm ale nesmí být větší než 50 mm. Zkušební koule musí mít kalibrovaný tvar. Prováděná zkouška vyžaduje, že rozměr zkušební koule musí být rovněž kalibrován. Je doporučeno, že v případě potřeby nesmí chyba tvaru koule přesáhnout 20% $P_{TFM,MPE}$ nebo $P_{TFN,MPE}$. V této zkoušce nesmí být použita referenční koule dodávaná s CMM za účelem kvalifikace snímacího systému [10].

Za použití všech 25 bodů získané měřením je vypočtena pomocí metody nejmenších čtverců tzv. Gaussova související koule. Dále je pro každé z 25 měření vypočtena Gaussova radiální vzdálenost R . Záznam rozsahu těchto vzdáleností 25 bodů s ohledem na nejmenší čtverce středu koule, tj. $R_{\max} - R_{\min}$ je zřejmý tvar koule. Absolutní hodnota této vzdálenosti je chyba tvaru jednotlivého doteku [10].

2.3.3. Stanovení chyby tvaru a rozměru složeného doteku

Principem tohoto zkušební postupu je měření tvaru a umístění zkušební koule použitím pěti různých pevných doteků. Každý z doteků snímá 25 bodů na zkušební kouli, celkem je to tedy pro celý snímací systém 125 bodů. Pokud doteky nebo sonda výměnného systému je dodána s CMM, musí

být provedeno pět výměn, jedna před použitím každého doteku. Pro každou skupinu 25 bodů jsou vzaty s jednotlivým dotekem související nejmenší čtverce vhodné koule pro celkem pět vhodných koulí. Vypočteny jsou rozsahy souřadnic středů X, Y a Z všech pěti koulí. Největší z těchto tří rozsahů složeného doteku udává hodnota polohy P_{LTM} nebo P_{LTN} . Navíc nejmenší čtverce vhodné koule používané všemi 125 body jsou zkoumány pro tvar a rozměr chyb označení. Tato analýza udává chybu rozměru složeného doteku P_{STM} nebo P_{STN} a chybu tvaru složeného doteku P_{FTM} nebo P_{FTN} [10].

➤ Postup ověřování chyby tvaru a rozměru složeného doteku

Za předpokladu použití složeného snímacího systému sondy, je ke každé z pěti sond připojen krátký 20 mm dlouhý rovný dotek, pokud ovšem není specifikováno jinak. Sestava je vhodnými součástmi prodloužena na tvar typu "hvězda", kde každý systém sondy je složený z jedné sondy paralelně k ose pinoly a čtyř sond umístěných v ploše kolmé k ose, každá orientovaná vždy s 90° stupňovým odstupem k sousední sondě. Vzdálenosti pro každý z pěti snímacích doteků k jednotlivému referenčnímu bodu na ose pinoly a délky odsazení sondy musí být přibližně stejné. Použité hodnoty délky odsazení sondy musí být specifikované výrobcem CMM a musí být vybrány z hodnot 50 mm, 100 mm, 200 mm, a 400 mm. Musí být vybrána a zkoušena uživatelem pouze jedna délka odsazení z délek specifikovaných výrobcem CMM použitelná na snímací systém. Pokud není specifikováno jinak, musí být součástí sond a doteků schváleny pro použití s CMM snímacím systémem. Připouští se ale, že přesné délka odsazení požadované pro zkušební postup nemusí být k dispozici a proto může být použita změna jmenovité hodnoty délky odsazení až 6 mm nebo 10% jmenovité délky podle toho, která je větší [10].

Pro každou ze skupin 25 bodů vzatých jednotlivými doteky je vypočtena vhodná koule metodou nejmenších čtverců. Pro celkem pět koulí je vypočten rozsah souřadnic středu X, Y a Z) a to všech pěti koulí, V případě největší z těchto tří rozsahů hodnot polohy snímacího systému je P_{LTM} nebo P_{LTN} [10].

Pro všech 125 bodů vzatých všemi pěti doteky, je vypočtena vhodná koule pomocí metody nejmenších čtverců. V případě potřeby je záznam absolutní hodnoty úchyly průměru vhodné koule od kalibrované hodnoty rozměru běžného materiálu a dává chybu rozměru složeného doteku P_{STM} nebo P_{STN} . Podobně záznam rozsahu poloměrů 125 bodů s ohledem na nejmenší čtverce středu koule, což je $R_{max} - R_{min}$ zdánlivého tvaru koule. V případě potřeby absolutní hodnota tohoto rozdílu je chyba tvaru složeného doteku P_{FTM} nebo P_{FTN} [10].

2.3.4. Shoda se specifikacemi přijímací zkoušky

Pro přijímací zkoušku je schopnost snímání jednotlivého doteku ověřena, dána pokud není P_{FTU} jednotlivého doteku větší než je dovolená hodnota chyby tvaru jednotlivého doteku $P_{FTU, MPE}$, jak je specifikováno výrobcem a s přihlédnutím k nejistotě měření podle ISO 14253-1 [7].

Snímání složeným dotykem je ověřováno zejména pokud [10]:

- Naměřená chyba tvaru složeného doteku P_{FTj} není větší než relevantní největší dovolená chyba tvaru složeného doteku $P_{FTj, MPE}$, jak je specifikováno
- Naměřená chyba tvaru složeného doteku P_{STj} není větší než relevantní největší dovolená chyba tvaru složeného doteku $P_{STj, MPE}$, jak je specifikováno
- Naměřená chyba tvaru složeného doteku P_{LTj} není větší než relevantní největší dovolená chyba tvaru složeného doteku $P_{LTj, MPE}$, jak je specifikováno

2.3.5. Shoda se specifikacemi periodické zkoušky

Pro periodické zkoušky je výkon snímání jednotlivého doteku ověřena, dána pokud není P_{FTU} jednotlivého doteku větší než je dovolená hodnota chyby tvaru jednotlivého doteku $P_{FTU, MPE}$, stejně jaké v případě pro přejímací zkoušky [10].

➤ Aplikace přejímacích zkoušek

Jde zejména o smluvní dohodu mezi dodavatelem a zákazníkem, která je popsána v nákupu, údržbě, opravě, renovaci. Přejímací zkoušky popsané v této části ISO 10360, mohou být použity k ověření výkonu snímání jednotlivého doteku a výkon systému složeného doteku CMM, podle specifikovaných největších dovolených chyb a také mezi odsouhlasených dodavatelem a zákazníkem [10].

➤ Aplikace periodických zkoušek

Část normy ISO 10360, obsahující periodické zkoušky, udává použití v organizaci pro inertní systém prokazování kvality pro ověřování provedení CMM s jednotlivými složenými doteky v souladu se stanovenými odpovídajícími největšími dovolenými chybami a jejich mezemi, jak je určeno uživatelem všemi možnými a podrobnými použitými omezeními [10].

➤ Mezikontrola

Je důležité a výhodné průběžně dokazovat, pokud se jedná o organizaci s vnitřním systémem prokazování kvality, pravděpodobnost, že CMM je v souladu s požadavky na největší dovolené chyby a meze stanovené.

Snímací systém by měl být kontrolován po jakékoliv události, která by mohla významně ovlivnit provedení snímání [10].

Všeobecně přijímací a periodické zkoušky mají za úkol ověřit konstrukci souřadnicové měřicí techniky, za pomoci jednoduchých měření, například vzdálenost mezi dvěma body, nebo skenování bodů po definované dráze. Splněním přijímacích a periodických zkoušek nezaručí způsobilost procesu kontroly na reálné součásti, neboť v těchto jednoduchých měření se nevyhodnocují geometrické tolerance a měření probíhá na přesných součástech (kalibry, etalony). Tímto nelze z výsledků zkoušek přenést variabilitu do reálného měření, jelikož při kontrole reálných úloh se vyhodnocují právě tolerance tvaru jako je rovinnost nebo profil, tolerance umístění jako je poloha a sousost, nebo tolerance házení. Reálným vyhodnocením a analýzou zjišťující zdroje nejistot v celém měření se zabývá metoda MSA.

3. MSA - Analýza systémů měření

Co je MSA (Measurement System Analysis), v překladu analýza systémů měření, používá se zkratka MSA. Je to analýza, která má identifikovat rozdílnosti měření. Zaměřuje se na vyhodnocení nastaveného systému měření a klade důraz na to, zda je měření opakovatelné a reprodukovatelné. MSA se používá pro vyhodnocení měřidla, ale také i pro celý systém měření. Touto analýzou se zjišťují zdroje nejistot měření v celém procesu, jelikož se vychází z toho, že pro přesné měření nestačí mít pouze přesné měřidlo, ale na nejistoty mohou mít vliv i další faktory a proto se hodnotí systém měření jako celek. Chyby měření neumíme úplně eliminovat, a k tomu slouží právě MSA, aby odchylka měření byla mnohem menší než odchylka měřeného objektu. Hlavním cílem této metody je zlepšení přesnosti celého systému měření. Pod pojmem systém měření se rozumí soubor operací, postupů, měřidel, osob a dalšího vybavení potřebného pro získání výsledků měřené charakteristiky [6].

3.1. Důsledky variability systému měření

Souhrn všech důsledků zdrojů variability se nazývá chyba systému měření. Vlivem variability systému měření se může stát, že výrobek dobře vyrobený je označen jako špatně vyrobený a naopak špatný výrobek jako dobrý. Při řízení procesu má variabilita systému měření podobné důsledky, označení náhodné příčiny za zvláštní nebo označení zvláštní příčiny jako náhodné. Kvalitu systému měření nejčastěji určují statické vlastnosti produkovaných údajů. Celková variabilita měření se dělí na variabilitu polohy a variabilitu šíře [6,11].

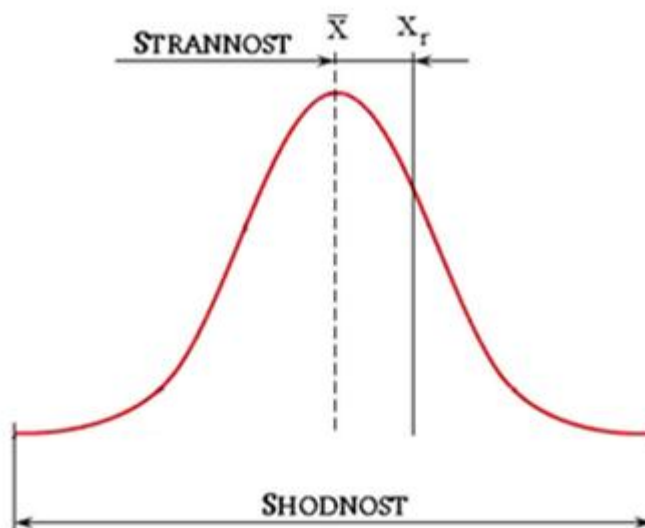
➤ Variabilita polohy

Mezi toto rozdělení řadíme přesnost, strannost, stabilitu a linearitu [6,11].

- Přesnost je rozdíl jednoho výsledku vzhledem k referenční hodnotě (pravé hodnotě).

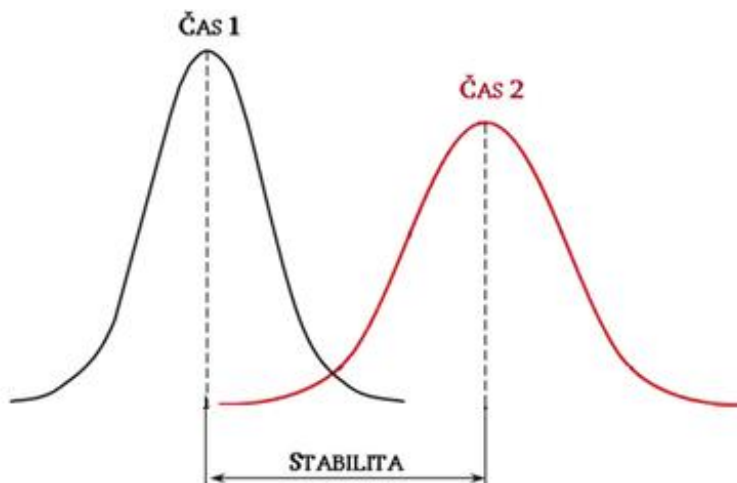
Obsahuje účinek chyb polohy a šíře.

- Strannost (obrázek 8) je vztažena k přesnosti. Odpovídá rozdílu mezi průměrnou naměřenou hodnotou a referenční hodnotou stejného objektu. Je to složka systematické chyby systému měření [6].



Obrázek 8: Strannost a shodnost [12]

- Stabilita (obrázek 9) je vztažena k schopnosti měřicího systému produkovat stejné hodnoty při měření stejného objektu. Je to změna strannosti v čase.

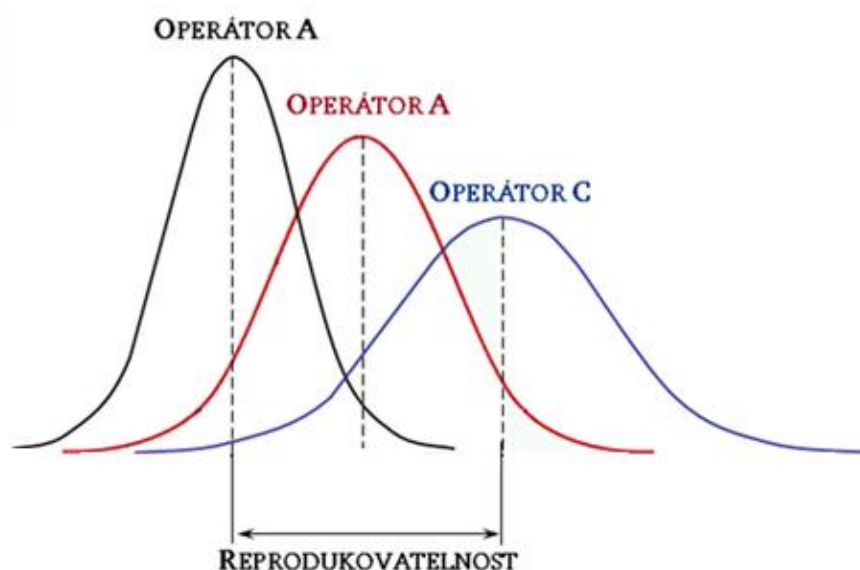


Obrázek 9: Stabilita [12]

- Linearita je změnou strannosti v běžném provozním rozsahu. Je mírou konzistence strannosti přes rozsah měřicího zařízení. Složka systematické chyby systému měření [6]

➤ Variabilita šíře

- Shodnost se dá chápat jako “těsnost“ opakovaných odčtů jednoho ke druhému. Je to náhodná chyba v systému měření. Shodnost popisuje v rozsahu systému měření celkový účinek prahu citlivosti a citlivost opakovatelnosti [6,11].
- Opakovatelnost je variabilita měření ze získaných hodnot na jednom měřicím přístroji, při měření stejné charakteristiky na tomtéž dílu jedním operátorem. Je to variabilita v krátkém časovém úseku po sobě jdoucích měření, při konstantních stanovených parametřů jako například stanovený díl, metoda měření, měřidlo, etalon, obsluha a prostředí. Opakovatelnost se obecně přiřazuje jako variabilita zařízení, variabilita vnitřního systému. Určuje se tímto způsobem měřidla (přístroje) [6,11].
- Reprodukovatelnost je naopak označována jako variabilita operátora znázornění na obrázku 10. Je to variabilita průměru měření prováděného několika operátory na stejném přístroji, při měření stejné charakteristiky na jednom dílu. Vliv na reprodukovatelnost může mít odbornost obsluhy, ale v případě ručního měření. Při použití automatizovaného systému, kde operátor není hlavním zdrojem variability, to neplatí. Vzhledem k tomuto důvodu je reprodukovatelnost brána jako průměrná variabilita měření mezi systémy nebo mezi podmínkami [6,11].



Obrázek 10: Reprodukovatelnost [12]

- Opakovatelnost a reprodukovatelnost měřidla (GRR) je odhadem kombinace variability opakovatelnosti a reprodukovatelnosti, neboli jiným způsobem, GRR je rozptyl rovný součtu rozptylů, které jsou uvnitř systému a mezi systémy [6,11].

3.2. Požadavky pro měření

Pro vyhodnocování a možnou analýzu systému měření se musí věnovat pozornost základním otázkám [6].

1. Systém měření musí mít odpovídající citlivost
 - Přístroj musí mít odpovídající práh citlivosti, který je určen návrhem a slouží jako základní výchozí bod pro volbu systému měření. Práh citlivosti by měl rozdělit toleranci nebo variabilitu procesu na nejméně 10 částí.

- Vzhledem na práh citlivosti se určí, zda systém měření má dostatečnou citlivost pro vyhodnocování změn variability produktu nebo procesu.
2. Systém měření musí být stabilní
 - Variabilita v systému měření opakovatelnosti je způsobena pouze náhodnými příčinami.
 3. Variabilita se shoduje v přijatelném rozsahu pro daný účel měření s očekávaným rozsahem.

Vzhledem k neustálému zlepšování procesu se musí znovu provádět hodnocení systému měření. Důležité je, aby osoba provádějící měření nebo analýzu pochopila důležitost měření a aplikovala odpovídající hodnocení.

➤ **Směrnice ke studiu systému měření proměnných**

Je to souhrn, který obsahuje prováděcí směrnice pro metody systémů měření. Jsou to dané analýzy, za pomoci kterých se vyhodnocují naměřená data a vyhodnocuje se variabilita. Tyto analýzy se dají provádět buď graficky, nebo numericky (matematicky). Jsou to metody založené na průměru a rozpětí. Tento způsob dopomáhá k představě jak opakovatelnosti, tak i reprodukovatelnosti systému měření. Metoda založená na průměru a rozpětí dovoluje rozložit variabilitu systému měření na dvě samostatné složky, opakovatelnost a reprodukovatelnost, ale nedokáže vyjádřit jejich interakci [6].

3.3. Numerická analýza výsledků

- Opakovatelnost – variabilita zařízení EV / σ_C
- Reprodukovatelnost – variabilita operátora AV / σ_A
- Variabilita systému měření – Opakovatelnost / Reprodukovatelnost GRR / σ_M
- Variabilita mezi díly PV / σ_P
- Celková variabilita TV / σ_T
- Stanovení počtu kategorií - citlivost měřicího systému - ndc

➤ **Výpočet pro vyhodnocení opakovatelnosti**

$$(15) EV = \frac{\bar{\bar{R}}}{d_2^*}$$

$\bar{\bar{R}}$ – násobek průměrného rozpětí konstantou K_1 závislou na počtu měření

d_2^*

– závisí na počtu opakování a na počtu dílů vynásobených počtem operátorů

➤ **Výpočet pro vyhodnocení reprodukovatelnosti**

$$(16) AV = \sqrt{\left(\frac{R_0}{d_2^*}\right)^2 - \frac{EV^2}{n \times r}}$$

R_0 – *Variační rozpětí*

$$(17) R_0 = \max_i \bar{x}_i - \min_i \bar{x}_i$$

$\max_i \bar{x}_i$

– je maximální hodnotou aritmických průměrů jednotlivých operátorů

$\min_i \bar{x}_i$

– je minimální hodnotou aritmických průměrů jednotlivých operátorů

n – počet dílů

r – počet měření

➤ **Výpočet pro vyhodnocení opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření**

$$(18) GRR = \sqrt{EV^2 + AV^2}$$

Existují čtyři různé přístupy, kterými se stanovuje variabilita procesu pro analyzování přijatelnosti variability měření.

- Použití variability procesu – v případě, že výběr představuje očekávanou variabilitu procesu
- Variabilita podobného procesu – když není dostatečné množství vzorků, které představují daný proces, ale je možné použít podobnou variabilitu procesu
- Cílová hodnota P_p – když je očekávaná variabilita než existující proces a není k dispozici dostatečný počet vzorků reprezentujících proces, ani není existující proces s podobnou variabilitou
- Tolerance specifikace – v případě kdy se má systém použít pro třídění procesu a má $P_p < 1,0$

➤ **Výpočet pro vyhodnocení variability mezi díly**

$$(19) PV = \frac{R_p}{d_2^*}$$

R_p – variační rozpětí aritmetických průměrů

$$(20) R_p = \max_j \bar{x}_j - \min_j \bar{x}_j$$

$$\max_j \bar{x}_j$$

– je maximální hodnota z aritmetických průměrů všech měření jednotlivých kusů

$$\min_j \bar{x}_j$$

– je minimální hodnota z aritmetických průměrů všech měření jednotlivých kusů

➤ **Výpočet pro vyhodnocení celkové variability**

$$(21) TV = \sqrt{GRR^2 + PV^2}$$

Při použití cílové hodnoty P_p se výpočet celkové variability dá vypočítat i takto:

$$(22) TV = \frac{USL - LSL}{6P_p}$$

Pokud je ve studii měřidla pro každý faktor daná variabilita se dá porovnat s celkovou variabilitou, za pomoci výpočtu:

$$(23) \%EV = 100 \times \frac{EV}{TV}$$

Dalšími ukazateli, které ostatními faktory spotřebovávají z celkové variability lze vypočítat:

$$(24) \%AV = 100 \times \frac{AV}{TV}$$

$$(25) \%GRR = 100 \times \frac{GRR}{TV}$$

$$(26) \%PV = 100 \times \frac{PV}{TV}$$

Součet jednotlivých procent připadajících na každý faktor se nebude rovna 100 %.

➤ **Výpočet pro vyhodnocení citlivosti měřicího systému:**

V numerické analýze se za poslední krok bere stanovení počtu různých kategorií, které dostatečně rozliší systém měření. Je to počet konfidencích intervalů 97% nepřekrývajících se, které obsáhnou rozpětí očekávané variability produktu. V analýze citlivosti ndc je maximální hodnotou jedné, či vypočtenou hodnotou zaokrouhlenou na celé číslo. Hodnota výsledku by měla být větší nebo rovna pěti [6,11].

$$(27) \quad ndc = 1,41 \times \left(\frac{PV}{GRR} \right)$$

Při použití metody Pp pro výpočet TV se citlivost měřicího systému vypočítá takto:

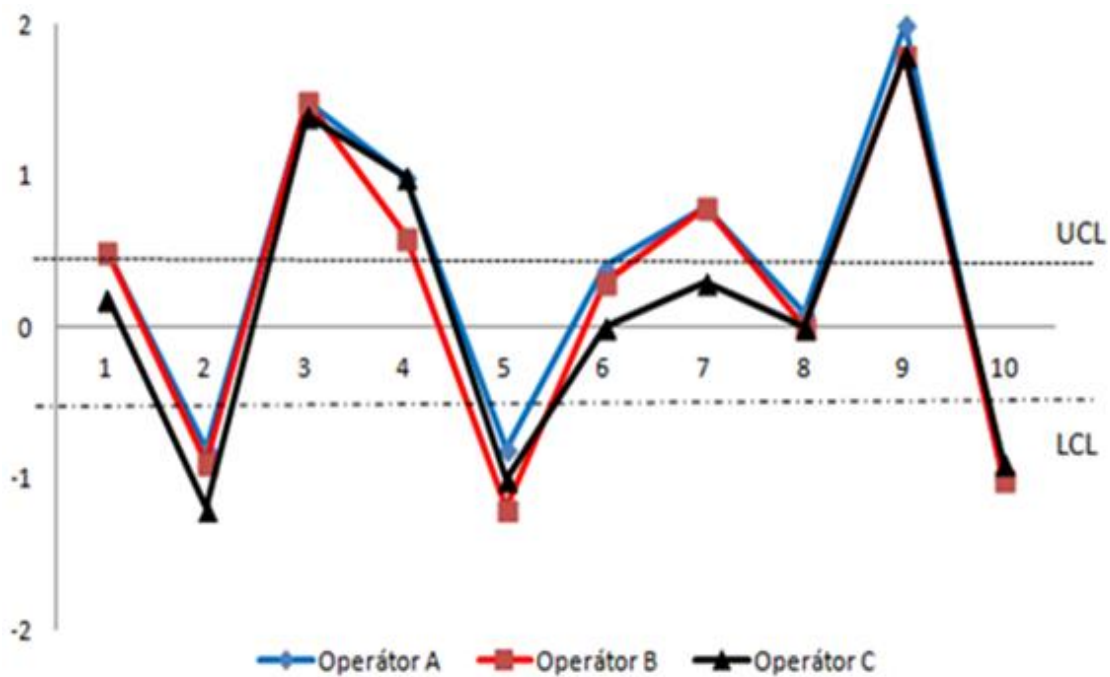
$$(28) \quad ndc = 1,41 \times \frac{PV}{GRR} - 1,41 \times \frac{\sqrt{TV^2 - GRR^2}}{GRR}$$

3.4. Grafická analýza výsledků

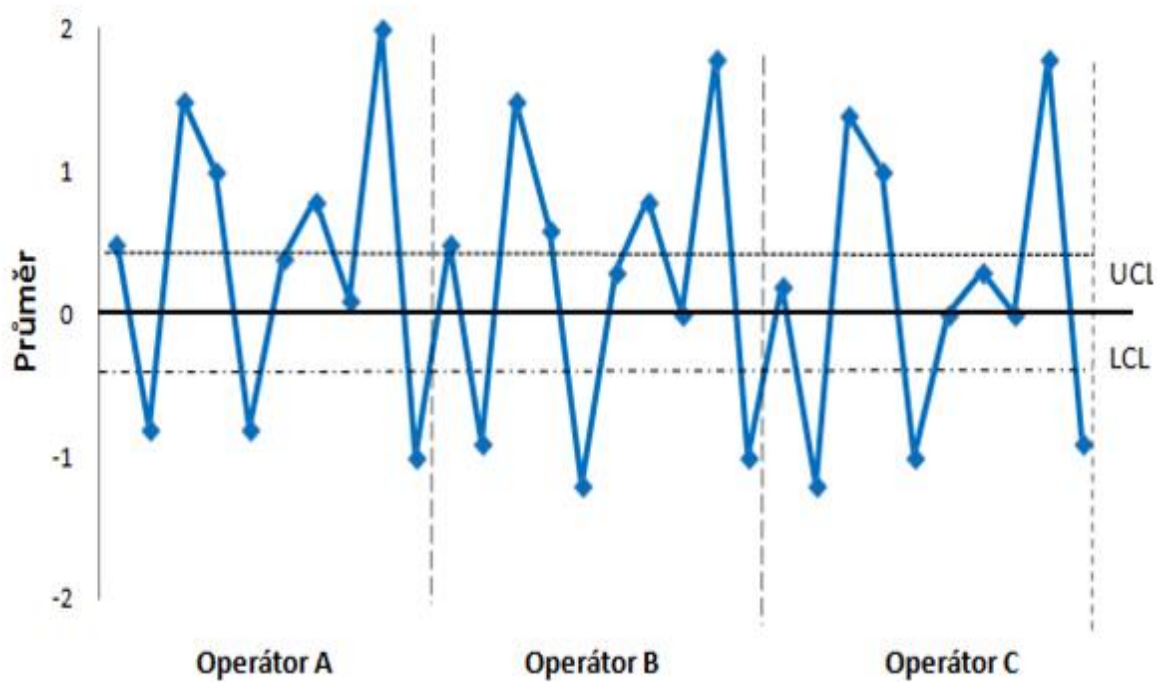
Pro vyhodnocování je grafické znázornění velmi důležité. Specifické grafické nástroje jsou závislé na návrhu experimentu, který je zvolen pro zaznamenávání dat. Za pomoci použití grafických nástrojů, by mělo předcházet systematické třídění dat pro jakékoli statistické analýzy. Graficky tedy znázorňujeme data, která získáme z analýzy systému měření [6].

➤ Diagram pro průměr

Za pomoci grafického vyhodnocení diagramem průměru viz obrázek 11 a 12, se stanovuje konzistence mezi operátory. Vynášejí se průměry několika hodnot, zjištěných různými operátory u každého dílu a označí se číslem dílu jako index. Dále se vynesou celkový průměr a regulační meze, které se určí vypočtením průměrného rozpětí. Diagram výsledně znázorňuje, zda je systém měření použitelný. Citlivost měření (šum) je představován oblastí uvnitř regulačních mezí. Jelikož se používá skupina dílu, která představuje variabilitu procesu, měla by se více jak polovina průměrů nacházet mimo stanovené regulační meze. Tímto se zaručí, že systém měření je vhodný pro určení variability mezi díly a zároveň lze získat informace pro analýzu a regulaci procesu. Pokud se nachází méně jak polovina průměrů mimo regulační mez, je systém měření buď bez odpovídající efektivní rozlišitelnosti, nebo tento výběr nepředstavuje očekávanou variabilitu procesu [6].



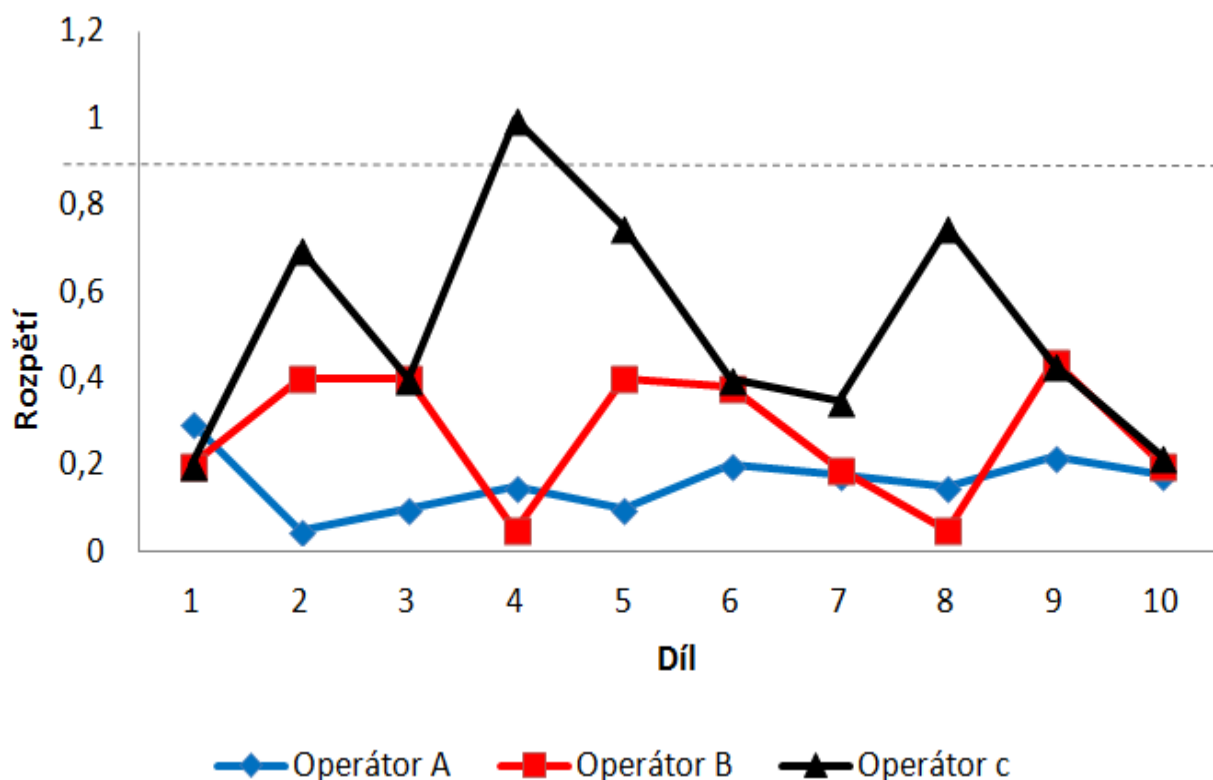
Obrázek 11: Diagram pro průměr - "Sdružený" [6]



Obrázek 12: Diagram pro průměr - "Rozložený" [6]

➤ **Diagram pro rozpětí**

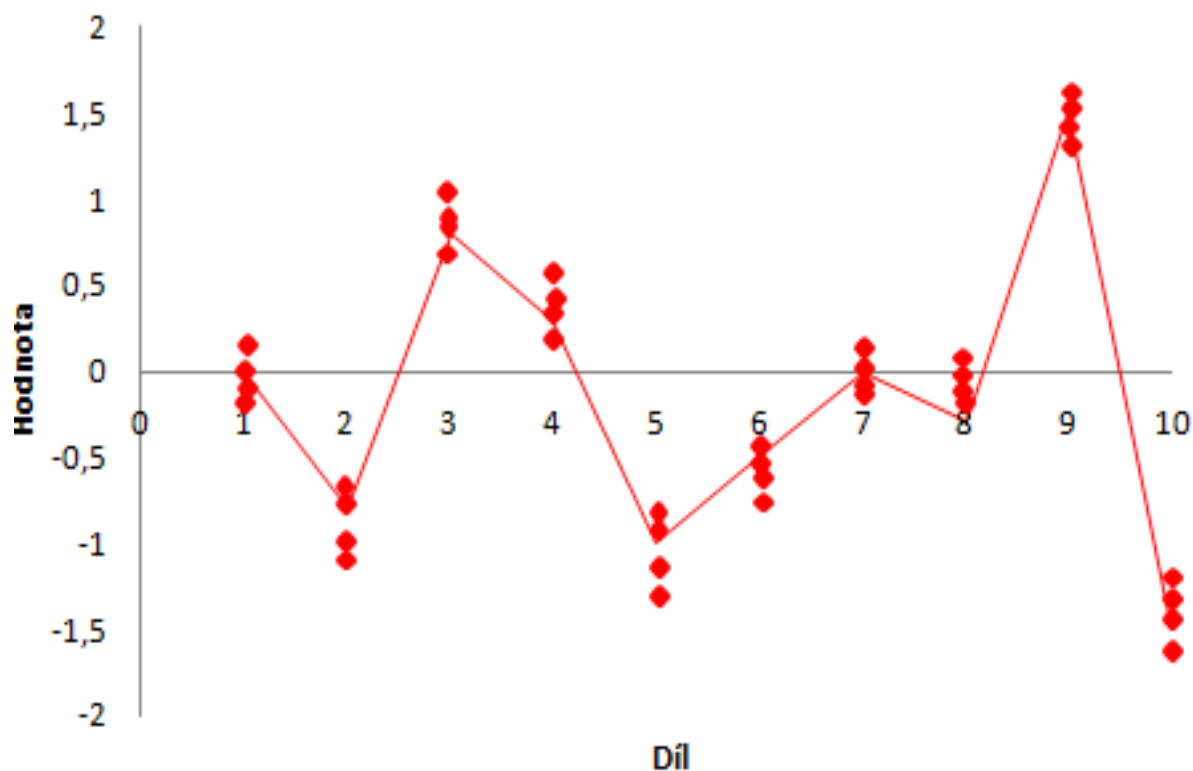
Regulační diagram pro rozpětí obrázek 13 pomáhá určovat, zda dosaženo statisticky zvládnutého stavu s ohledem na opakovatelnost, a také konzistence měřícího procesu mezi operátory v případě jednotlivého dílu. Do diagramu se zakresluje rozpětí z násobných odečtených hodnot, které jsou zjištěny operátory u jednotlivých dílů. Vynese se také průměrné rozpětí a regulační meze. Jestliže jsou ve statisticky zvládnutém stavu všechna rozpětí, tak všichni operátoři vykonávají tutéž práci. Naopak jestli vybočuje jeden operátor, liší se použitá metoda od ostatních operátorů. Při rozlišnosti všech operátorů je daný systém měření citlivý k technice operátora a je nutné zlepšení pro získání použitelných dat [6].



Obrázek 13: Diagram pro rozpětí "Sdružený" [6]

➤ **Diagram pro iterace**

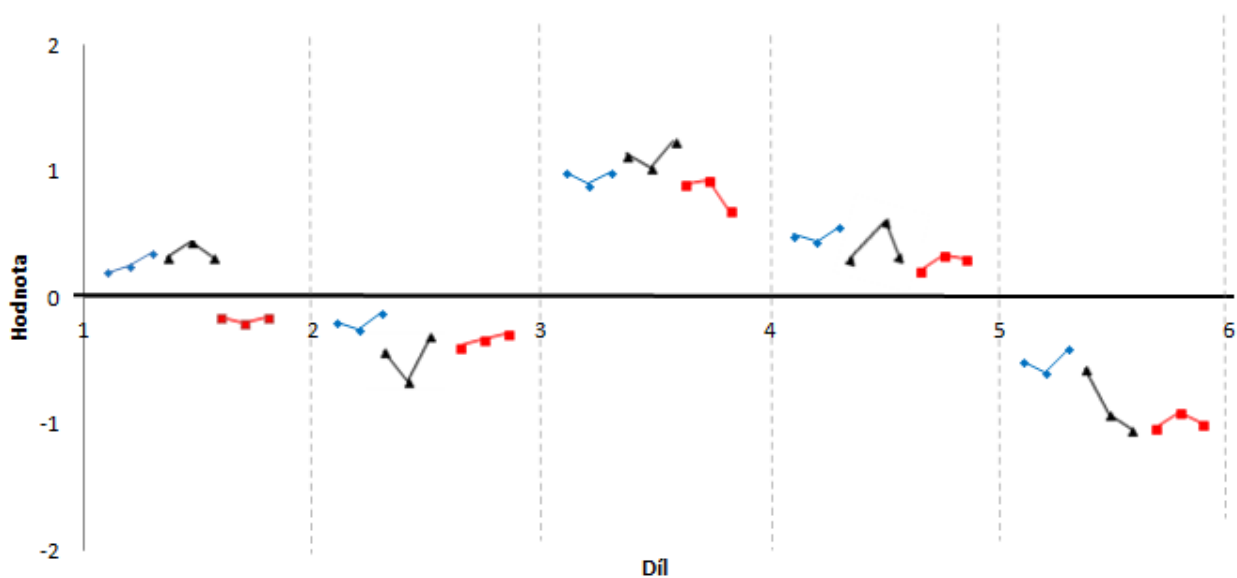
Tento diagram určuje vliv dílů na konzistenci variability jak je vidět na obrázku 14. Vyznačují se do grafu hodnoty všech operátorů podle dílů, tím se získá vliv jednotlivých dílů a vyznačení odlehlých hodnot [6].



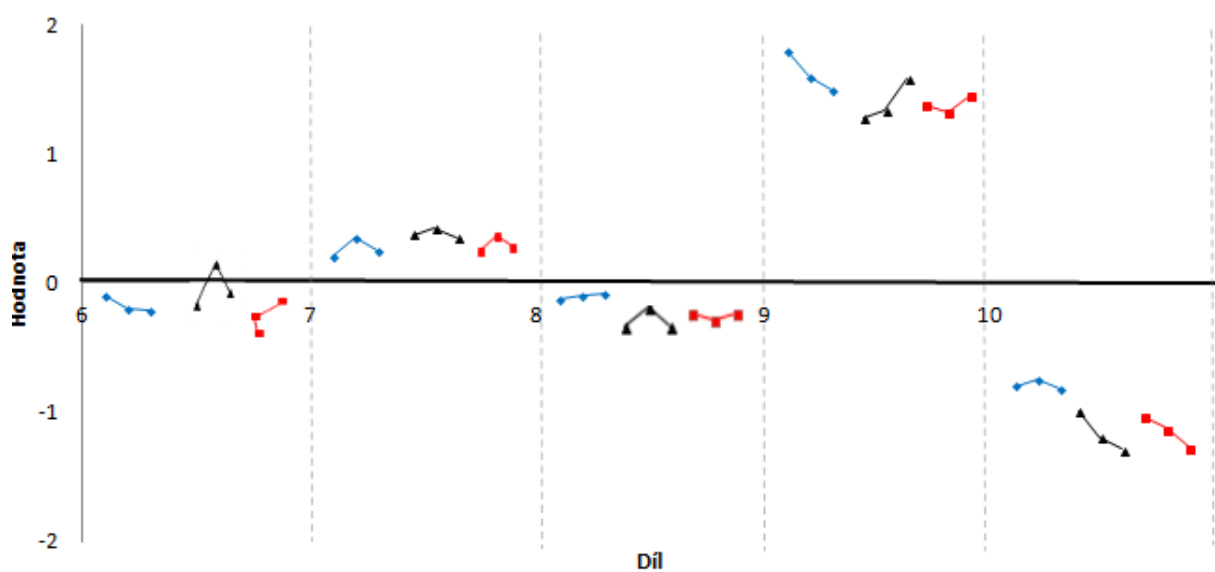
Obrázek 14: Průběh hodnot podle dílu [6]

➤ **Bodový diagram**

Zakreslení hodnot se vnáší podle dílů odečtených jednotlivými operátory jak je vidět na obrázku 15 a 16. Tím se získá hodnota konzistence mezi operátory, vyznačení hodnot, které mohou být odlehlé a také interakci mezi dílem a operátorem [6].



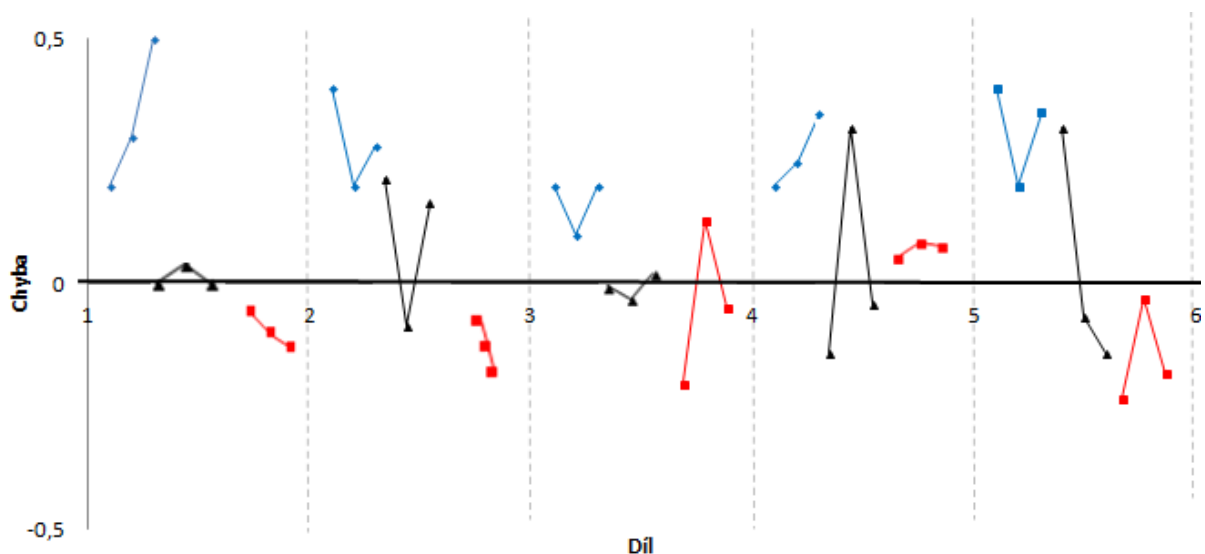
Obrázek 15: Bodový diagram díl 1 – 5 [6]



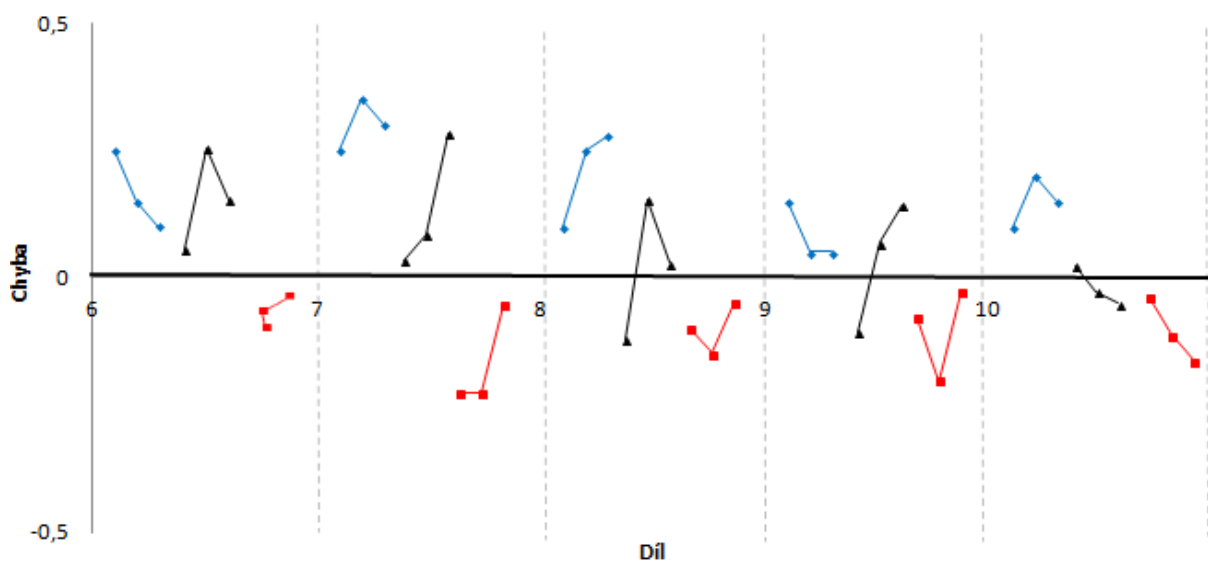
Obrázek 16: Bodový diagram díl 6 – 10 [6]

➤ **Diagram chyb**

Za pomoci tohoto diagramu je možné analyzovat odchylky naměřených hodnot od přijatých referenčních hodnot. Diagram chyb pro díly 1 – 10 je vyobrazen na obrázku 17 a 18. Každá odchylka či chyba dílů se dá spočítat, jako pozorovaná hodnota zmenšená referenční hodnotou, nebo zmenšená o průměrný výsledek měření dílu. Závisí na skutečnosti, jestli jsou k dispozici referenční hodnoty měřených dílů [6].



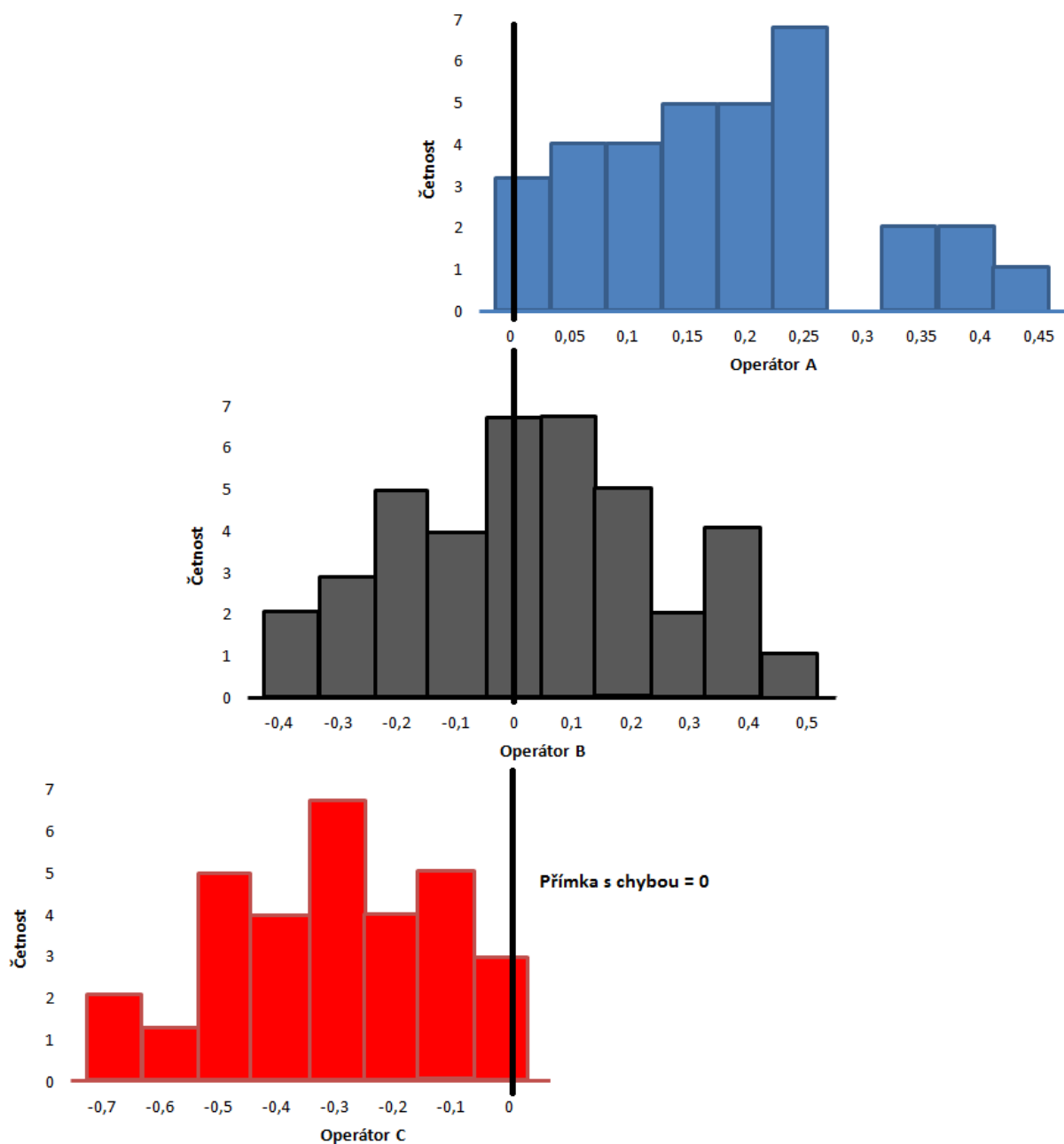
Obrázek 17: Diagram chyb díl 1 – 5 [6]



Obrázek 18: Diagram chyb díl 6 – 10 [6]

➤ **Normalizovaný histogram**

Odlišnost této grafické metody (histogramu) je v tom, že tento graf je rozdělen podle četnosti. Zobrazení histogramů pro jednotlivé operátory je názorně vidět na obrázku 19 [6].

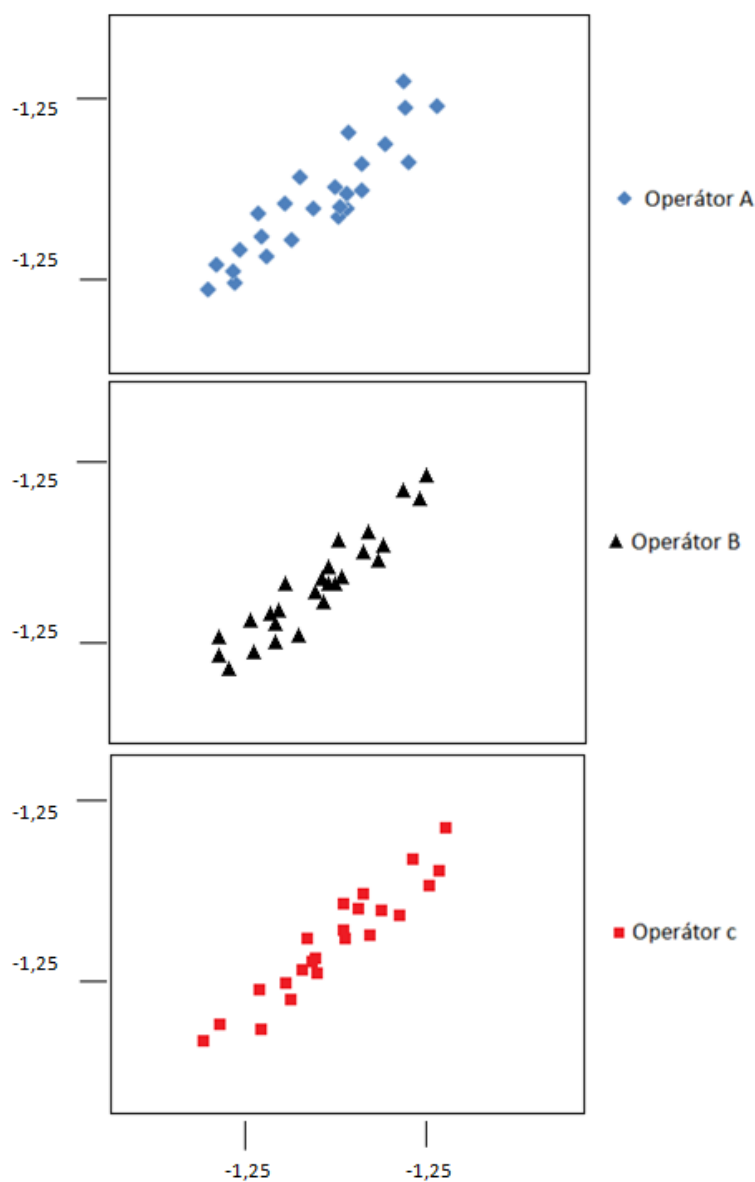


Obrázek 19: Normalizovaný histogram [6]

Normalizovaný histogram je rozdělen dle četnosti chyby měřidla u operátorů, nebo jiné kombinované rozdělení četností. Tato dotad poskytuje rychlou a přehlednou informaci jak je chyba rozdělena. Pomocí histogramu lze určit, zda existuje strannost, nebo nedostatečná konzistence u naměřených hodnot operátory [6].

➤ Porovnávání grafů X-Y

Zde se zakreslují na obrázku 20 hodnoty násobných průměrů zjištěných operátorem pro každý díl, ale při vzájemné projekci dvou operátorů [6].



Obrázek 20: Porovnávání grafů X – Y [6]

Jde o porovnávání naměřených hodnot mezi jedním a druhým operátorem. Při naprosté shodě hodnot obou operátorů by jednotlivé body tvořili přímku, která prochází počátkem a svírá úhel 45° [6].

3.5. Koeficienty způsobilosti měřidla

V praxi se nejčastěji provádí kontrola způsobilosti měřidla. Koeficient způsobilosti měřidla se značí C_g . Pro výpočet ukazatele se používají dva navržené způsoby od firem: Ford a Bosch. Pro oba způsoby je uvažováno, že rozptyl měřidla může jen částí rozptylu parametru charakterizující proces. V těchto způsobech lze vypočítat způsobilost měřidla buď k rozptylu procesu, nebo k požadované šíři tolerančního pole. Rozdíl mezi způsoby Ford a Bosch jsou v šířce pásma. Firma Ford stanovila šířku pásma na 15% a firma Bosch na 20% [12,13].

➤ Ford šířka pásma 15%

$$(29) C_g = \frac{0,15 \times S_p}{6 \times S_a}$$

S_p – velikost směrodatné odchylky procesu

S_a – směrodatná odchylka naměřených hodnot opakovaným měřením

X_r – referenční hodnota

\bar{X} – je průměrná naměřená hodnota

$$(30) C_{gk} = \frac{((X_r + 0,075 S_p) - \bar{X})}{3 S_a}$$

$$(31) C_{gk} = \frac{(\bar{X} - (X_r - 0,075 S_p))}{3 S_a}$$

Pro vyhodnocení koeficientu C_{gk} se vezme menší hodnota. Pro způsobilost měřidla je požadováno splnění nerovnosti:

$$C_g > 1 - \textit{uvažuje pouze opakovatelnost}$$

$$C_{gk} > 1 - \textit{uvažuje opakovatelnost a strannost}$$

Pokud se při vyhodnocování způsobilosti měřidla vztahujeme k šíři tolerančního pole T, postupujeme takto:

T – *šířka tolerančního pole*

$$(32) T = USL - LSL$$

USL – *horní mezní hodnota*

LSL – *dolní mezní hodnota*

$$(33) C_g = \frac{0,15 \times T}{6 \times S_a}$$

$$(34) C_{gk} = \frac{((X_r + 0,075 T) - \bar{X})}{3 S_a}$$

$$(35) C_{gk} = \frac{(\bar{X} - (X_r - 0,075 T))}{3 S_a}$$

➤ **Bosch šířka pásma 20%**

$$(36) C_g = \frac{0,20 \times S_P}{S_a}$$

$$(37) C_{gk} = \frac{((X_r + 0,1 S_P) - \bar{X})}{3 S_a}$$

$$(38) C_{gk} = \frac{(\bar{X} - (X_r - 0,1 S_P))}{3 S_a}$$

$C_g > 1,33$ – uvažuje pouze opakovatelnost

$C_{gk} > 1,33$ – uvažuje opakovatelnost a strannost

Obdobná úprava platí i pro šířku pásma 20% při použití tolerančního pole:

$$(39) C_g = \frac{0,20 \times T}{S_a}$$

$$(40) C_{gk} = \frac{((X_r + 0,1 T) - \bar{X})}{3 S_a}$$

$$(41) C_{gk} = \frac{(\bar{X} - (X_r - 0,1 T))}{3 S_a}$$

Z těchto zkoušek umožní zjistit informace o skutečné variabilitě při reálném měření. Podle správné terminologie z oblasti metrologie se koeficientem C_g rozumí pravdivost měření, jelikož pravdivost určuje těsnost shody mezi aritmetickým průměrem nekonečného počtu opakovaných naměřených hodnot veličiny a referenční hodnotu veličiny. Pak koeficient C_{gk} odpovídá v terminologii preciznosti měření, neboť preciznost je definována jako těsnost shody mezi indikacemi nebo naměřenými hodnotami veličiny získanými opakovanými měřeními na stejném objektu nebo na podobných objektech za specifikovaných podmínek[11].

Na základě toho jsem se věnoval definování typických úloh, které se měří na CMM, za pomoci předchozích způsobů zjišťování. Důvodem proč jsou všechny tyto způsoby důležité, je popsáno normou ISO 14253 prokázání shody a neshody se specifikacemi.

4. Prokázání shody a neshody se specifikacemi ISO 14253-1

Při měření charakteristik bývá různá hodnota, buď odpovídá individuální charakteristice (charakteristice obrobku) nebo charakteristice souboru, včetně různé nejistoty měření. Nejistota pro charakteristiku obrobku se liší od nejistoty charakteristiky souboru. Nejistota je normou ISO 14253 vyjádřena jako rozšířená nejistota měření značena U [14].

$$(7) U = k \times u_c$$

k – koeficient rozšíření

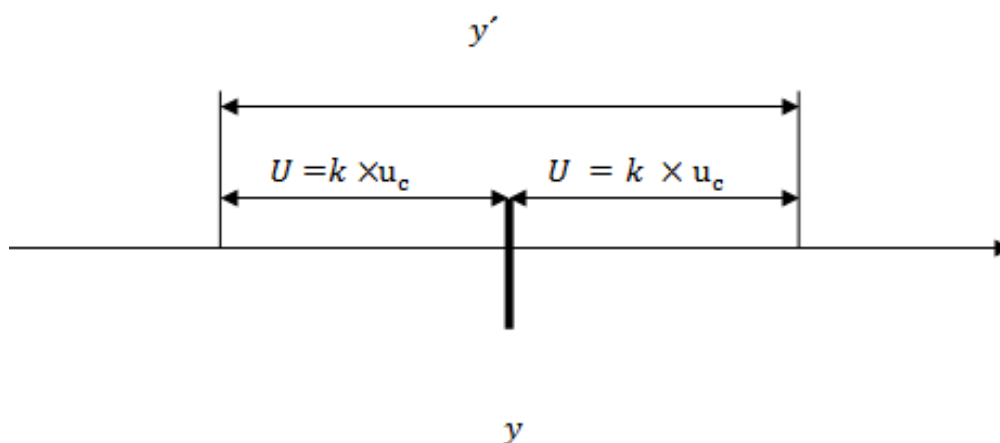
Tento koeficient může být přiřazen dle dohody mezi zákazníkem a dodavatelem.

Poté jako kompletní výsledek měření je znázorněn takto:

$$(8) y' = y \pm U'$$

y – výsledek měření

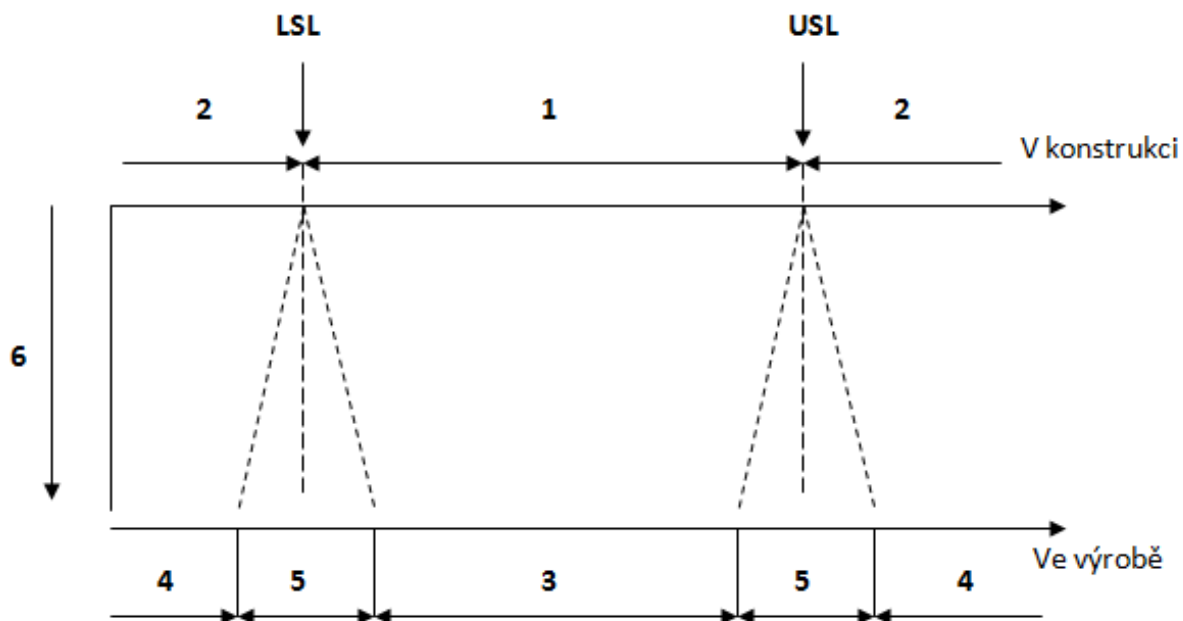
Na obrázku 21 je zobrazen kompletní výsledek měření za pomoci intervalů rozšířené nejistoty okolo výsledku měření. Zákazník a dodavatel by se měli na hodnotě odhadované nejistoty dohodnout.



Obrázek 21: Výsledek měření pomocí intervalů [14]

Pokud se zákazník s dodavatelem nedohodne na hodnotě odhadované nejistoty, pak platí pravidla prokazování shody a neshody se specifikacemi dle normy ISO 14253. Obecná pravidla v normě říkají, že pokud je modifikátor $\langle ST \rangle$ umístěn za hodnotou tolerance, jsou specifikace stanoveny a musí být brány v potaz při stanovení shody a neshody. Umístěním modifikátoru $\langle ST \rangle$ za toleranci je dána platnost pravidel pro každý obrobek souboru. Naopak pro umístění údaje za modifikátor platí pro soubor obrobků. Shoda se stanovuje až tehdy, když jsou všechny specifikace plněny. Pravidla pro prokázání shody a neshody v individuální specifikaci a specifikaci souboru jsou v rozšířeném rozsahu nejistoty stejná. Doporučeno je tyto pravidla používat pro nejdůležitější specifikace, řídicí funkce obrobku nebo měřidla [14].

Pro stanovení specifikací jsou dva pohledy, viz obrázek 22, v konstrukci nebo ve výkresové dokumentaci jsou termíny ve specifikaci a mimo specifikaci, které vyznačují ostře oddělené oblasti. Ve výrobě nebo při ověřování jsou tyto termíny komplikovány chybou měření (nejistotou) a tímto tyto oblasti jsou transformovány do rozsahů nejistoty [14].



Obrázek 22: Schéma shody a neshody zmenšený o nejistoty měření (1- pole specifikace, 2- mimo specifikace, 3- pole shody, 4- pole neshody, 5- rozsah nejistoty, 6- zvětšující se nejistota měření U) [14]

Pro dokázání shody nebo neshody s danou specifikací je nutné, aby byla odhadnutá nejistota měření brána v úvahu. Tato specifikace se nemění, je stanovena výkresem nebo pomocí přesného popisu charakteristiky měřidla, které má stanovenou hodnotu maximální dovolené chyby (MPE) [14].

4.1. Pravidlo prokázání shody se specifikacemi

Za shodu je brán takový kompletní výsledek měření, který spadá do pole tolerance charakteristiky obrobku, nebo musí patřit do maximální dovolené chyby měřidla [14].

$$(9) \quad LSL \leq y - U \quad a \quad y + U \leq USL$$

Obdobná shoda je prokázána, když je výsledek měření v poli tolerance charakteristiky obrobku nebo uvnitř MPE měřidla, zmenšené o rozšířenou nejistotu měření.

$$(10) \quad LSL + U \leq y \leq USL - U$$

4.2. Pravidlo prokázání neshody se specifikacemi

Za neshodu je brán takový kompletní výsledek měření, který nespadá do pole tolerance charakteristiky obrobku, nebo přesahuje MPE měřidla [14].

$$(11) \quad y + U \leq LSL \quad nebo \quad USL \leq y - U$$

Neshoda lze také prokázat tím, že výsledek měření nespadá do pole tolerance charakteristiky obrobku nebo přesahuje MPE měřidla rozšířené o nejistotu měření.

$$(12) \quad y \leq LSL - U \quad nebo \quad USL + U \leq y$$

4.3. Rozsah nejistoty

Jestliže v kompletní výsledku měření je zahrnuta jedna mezní hodnota obrobku nebo maximální dovolená chyba měřidla, tak nelze prokázat shodu ani neshodu se specifikacemi [14].

$$(13) \quad y - U < y + U \quad \text{nebo} \quad y - U < USL < y + U$$

Shodná situace může nastat, pokud výsledek měření spadá do jednoho z rozsahů nejistoty.

$$(14) \quad LSL - U < y < LSL + U \quad \text{nebo} \quad USL - U < y < USL + U$$

4.4. Aplikování vzhledem k dodavateli/zákazníkovi

Výše uvedená pravidla se aplikují v případě, že nedošlo k jiné dohodě mezi dodavatelem a zákazníkem. Dodavatel musí prokázat shodu v souladu s pravidlem o prokázání shody se specifikacemi s použitím odhadované nejistoty měření. Proto je ze strany dodavatele v jeho zájmu vylepšení nejistoty měření. Naopak zákazník musí prokázat neshodu s použitím odhadované nejistoty měření [14].

5. Přehled představitelů

Na souřadnicové měřicí technice jsou nejběžnějšími představiteli součástky z automobilového nebo leteckého průmyslu, jelikož jsou kladeny vysoké nároky na přesnost. CMM Umožňují rychlou a přesnou kontrolu složitých součástí. Pro měření na souřadnicové měřicí technice se dají tato představitelé rozdělit na hlavní dvě skupiny.

Jednou skupinou jsou součásti, které jsou tvořeny obecnými tvarovými plochami. Takové plochy se definují matematickým předpisem. Pro představu jsou to například tvarově složité plastové výrobky z interiéru osobních automobilů, nebo lopatky turbín. Na součástech tohoto typu se vyhodnocují tolerance profilu čáry, profilu plochy, nebo za použití metody odstup bodu od plochy, která je vyhodnocována za pomoci metody nejmenších čtverců.

V druhé skupině jsou součásti, které se skládají ze základních geometrických prvků. Tyto součásti zaujmají daleko větší procento kontrolovaných komponentů na CMM, než představitelé první skupiny. Jsou to například bloky motorů, skříňe převodovek, spojky, vstřikovací čerpadla a další. Na těchto součástech se měří rozměry a vyhodnocují se tolerance tvaru, orientace, umístění a házení.


















5.1. Rozbor geometrických specifikací

Povrch všech součástí, nebo výrobků, je složen z rozdílných geometrických prvků, které jsou tvořeny základními tvary. Odchylky od základních tvarů jsou dány tím, že ve výrobním procesu působí velká řada vlivů, proto se nedá vyrobit součást s ideálním tvarem. Tak vznikají výrobky s větší, nebo menší odchylkou od ideálního geometrického tvaru. Rozbor geometrických specifikací výrobků (GPS) je dán normou ČSN EN ISO 1101.

Tato norma obsahuje základní informace, stanovuje požadavky na geometrické tolerování součástí. Rozlišují se základní druhy tolerancí tvaru, orientace, umístění a házení. Každý druh tolerance má více druhů charakteristik a své specifické značení (Tabulka 5). Některé geometrické tolerance musí být vztažené k základně, která se značí písmenem velké abecedy. Geometrické specifikace se na výkrese udávají v tolerančním

rámečku a ty jsou rozděleny do dvou nebo tří polí. Tato pole obsahují značku geometrické charakteristiky, hodnotu požadované tolerance v délkových jednotkách a v případě potřeby označení základny písmenem, nebo písmeny [15].

Tabulka 5: Značky geometrických specifikací [15]

Tolerance	Charakteristiky	Značka	Základna je nutná
Tvar	Přímost	—	ne
	Rovinnost		ne
	Kruhovitost		ne
	Válcovitost		ne
	Profil libovolné čáry		ne
	Profil libovolné plochy		ne
Orientace	Rovnoběžnost	//	ano
	Kolmost		ano
	Sklon		ano
	Profil libovolné čáry		ano
	Profil libovolné plochy		ano
Umístění	Poloha		ano nebo ne
	Soustřednost (středů)		ano
	Soustřednost (os)		ano
	Souměmost		ano
	Profil libovolné čáry		ano
	Profil libovolné plochy		ano
Házení	Obvodové házení		ano
	Celkové házení		ano

5.2. Volba měřené součásti

Vliv produktivity kontroly měření jsem se rozhodl provést na kalibračním válci, vzhledem k přehledu představitelů a rozboru geometrických specifikací. Tuto volbu jsem udělal proto, že na kalibračním válci jsem schopen naměřit stejné charakteristiky, které se běžně měří například na hřídeli, nebo na vstřikovacím čerpadle. Kalibrační válec (obrázek 23) je velmi přesně vyroben, umožňuje simulovat měření geometrických tolerancí, a proto je vhodnou součástí. Pro vyhodnocování jsem zvolil několik charakteristik, jako jsou například hodnoty rozměrů, tolerance tvaru, orientace a umístění.



Obrázek 23: Kalibrační válec

5.3. Parametry ovlivňující rychlost měření

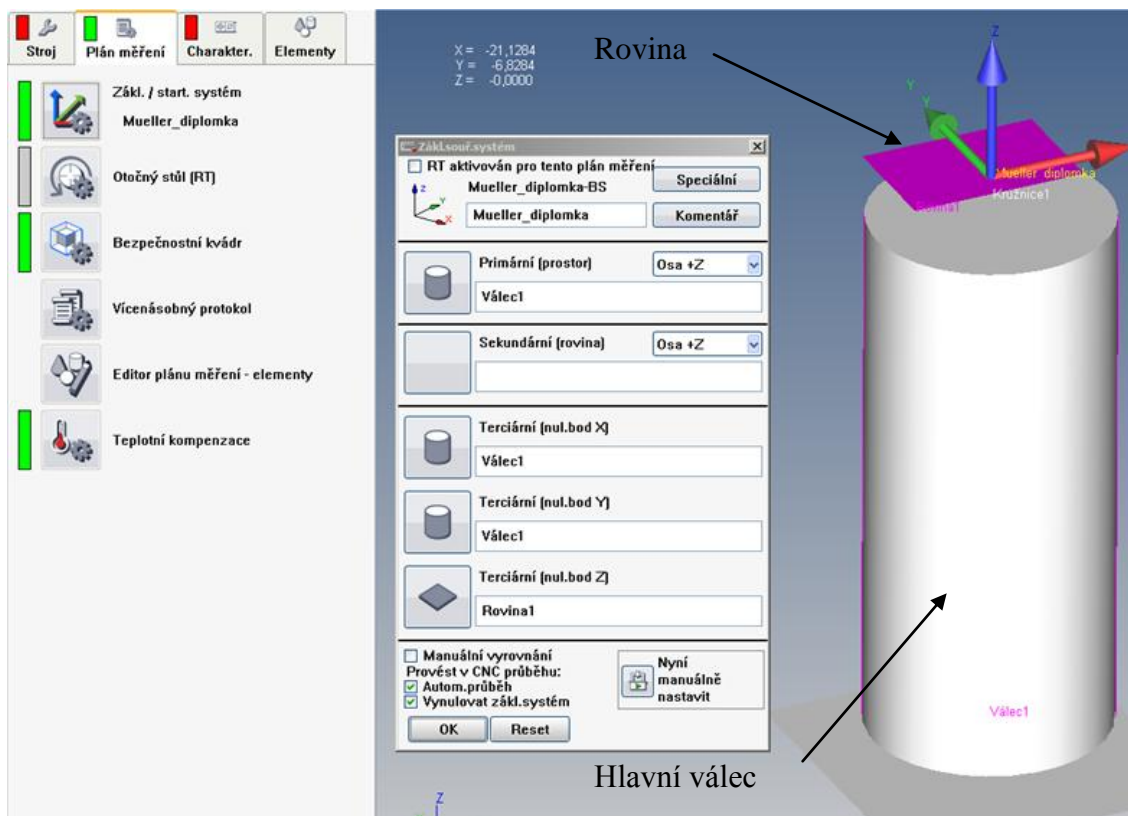
Rychlost měření ovlivňuje spousta parametrů při kontrole kvality na souřadnicové měřicí technice. Mezi operace, které přímo ovlivňují dobu měření, patří analýza výkresu, volba upnutí, konfigurace snímacího systému, kalibrace snímačů, vyrovnání součástí, tvorba plánu měření, naměření potřebných geometrických prvků a vyhodnocování. Každá z těchto operací zaujímá určitý podíl času z celkového měření na CMM. Jak velký podíl zaujmají jednotlivé operace, má podstatný vliv to, zda se jedná o sériové měření, nebo zakázkové.

Při zakázkovém měření několika součástí má každá operace velký vliv na celkový čas. Například upnutí součásti, pro zakázkovou kontrolu se nevyplatí vyrobít přípravek pro snadné upínání, naopak u sériové kontroly několika tisíc součástí může ušetřit značný čas. Tvorba plánu měření může u složitých dílů trvat i mnoho dní. U velkosériové kontroly, kde měření trvá třeba několik měsíců, bude mít však v celkovém čase zanedbatelný vliv. Obdobné to je u analýzy výkresové dokumentace. Tyto operace jsou závislé hlavně na zkušenostech a dovednostech operátora, což je možné ovlivnit školením. Jsou také parametry, které ovlivňují rychlost měření, ale nedají se urychlit. Takovým parametrem je například kalibrace snímacího systému. Kalibrace má určený postup podle typu režimu viz kapitola 1.1.5. kalibrace snímacího systému, a proto nelze čas této operace urychlit. Dalším významným faktorem ovlivňujícím rychlost měření je rychlost snímání bodů. Tento faktor zaujímá velký podíl jak u zakázkové, tak velkosériové kontroly, a je možné jej změnit. Z tohoto důvodu jsem zvolil právě tento faktor, za pomoci kterého jsem vyhodnocoval vliv produktivity kontroly na souřadnicové měřicí technice na způsobilost procesu měření.

5.4. Tvorba plánu měření

Cílem bylo naměřit charakteristiky pro posouzení vlivu rychlosti snímání bodů na produktivitu měření na CMM. Měřenými charakteristiky byly vnější průměr a vnitřní průměr, válcovitost, kruhovitost, kolmost a soustřednost. Vnější průměr byl vybrán jako geometrický prvek válec, na kterém bylo provedeno vyhodnocování válcovitosti. Vnitřní průměr byl definován kružnicí, která také sloužila pro výpočet kruhovitosti. Kolmost se vyhodnocovala mezi spodní plochou kalibračního válce a vnějším průměrem (válcem). Soustřednost je porovnávána mezi vnější a vnitřní průměr. Z toho vyplývá tvorba plánu měření.

Plán měření byl vytvořen v softwaru Calypso od firmy Zeiss. Byl tvořen na kalibračním válci bez použití CAD modelu. Základní geometrické prvky byly ručně nasnímány a přeneseny do Calypsa. Vyrovnání součásti v plánu měření a určení souřadného systému bylo na základě hlavního válce a roviny na vrchu kalibračního válce jak je vidět na obrázku 24. V tomto případě nebylo nutné určit natočení součásti (vzhledem k symetrii součásti)



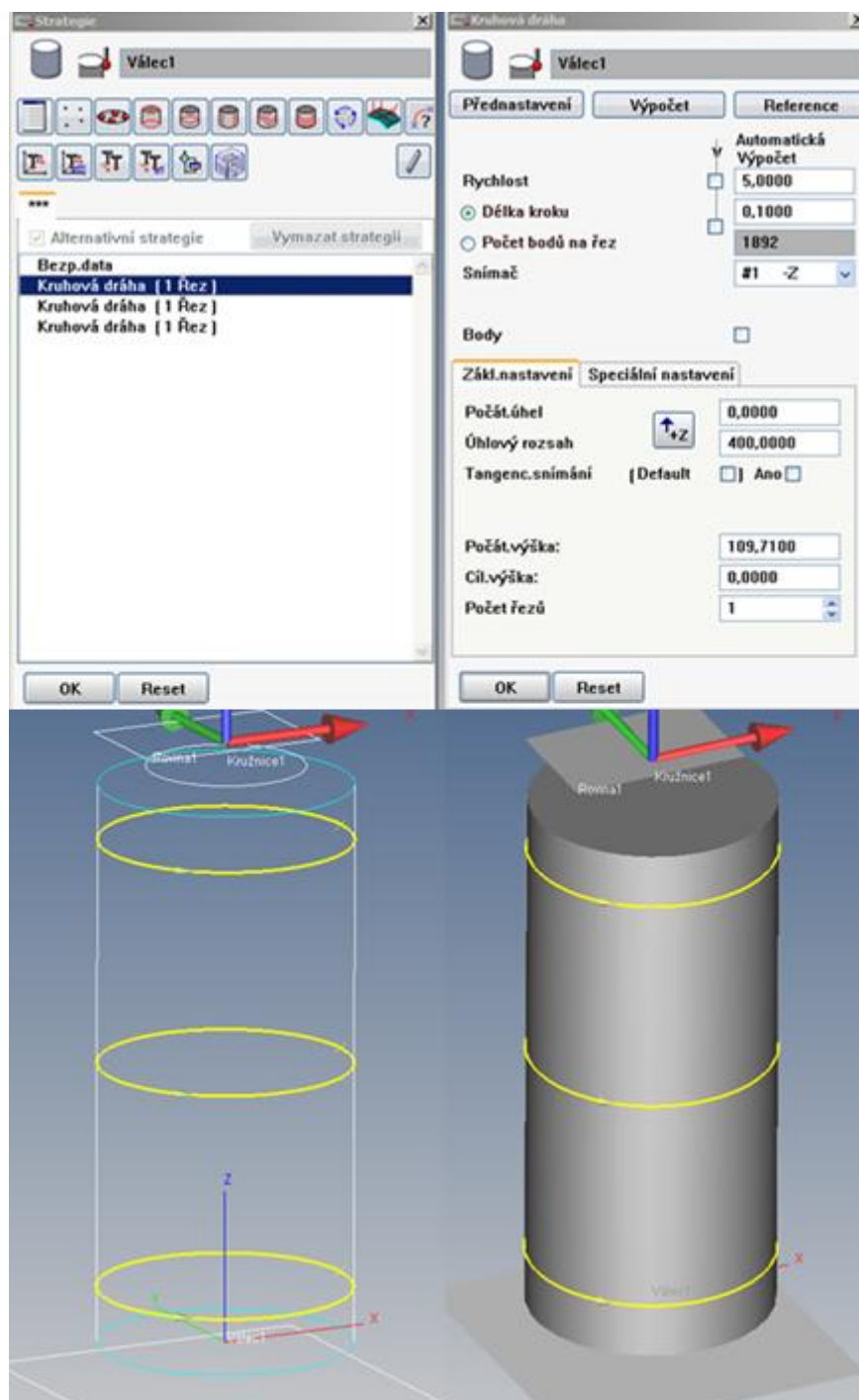
Obrázek 24: Vyrovnání součásti

V plánu měření jsem stanovil nejprve základní elementy, které byly použity právě pro vyrovnání a jsou potřebné pro vyhodnocení potřebných charakteristik, jako je rozměr, tolerance tvaru, orientace a umístění viz obrázek 25.



Obrázek 25: Vlevo základní geometrické prvky/ Vpravo měřené charakteristiky

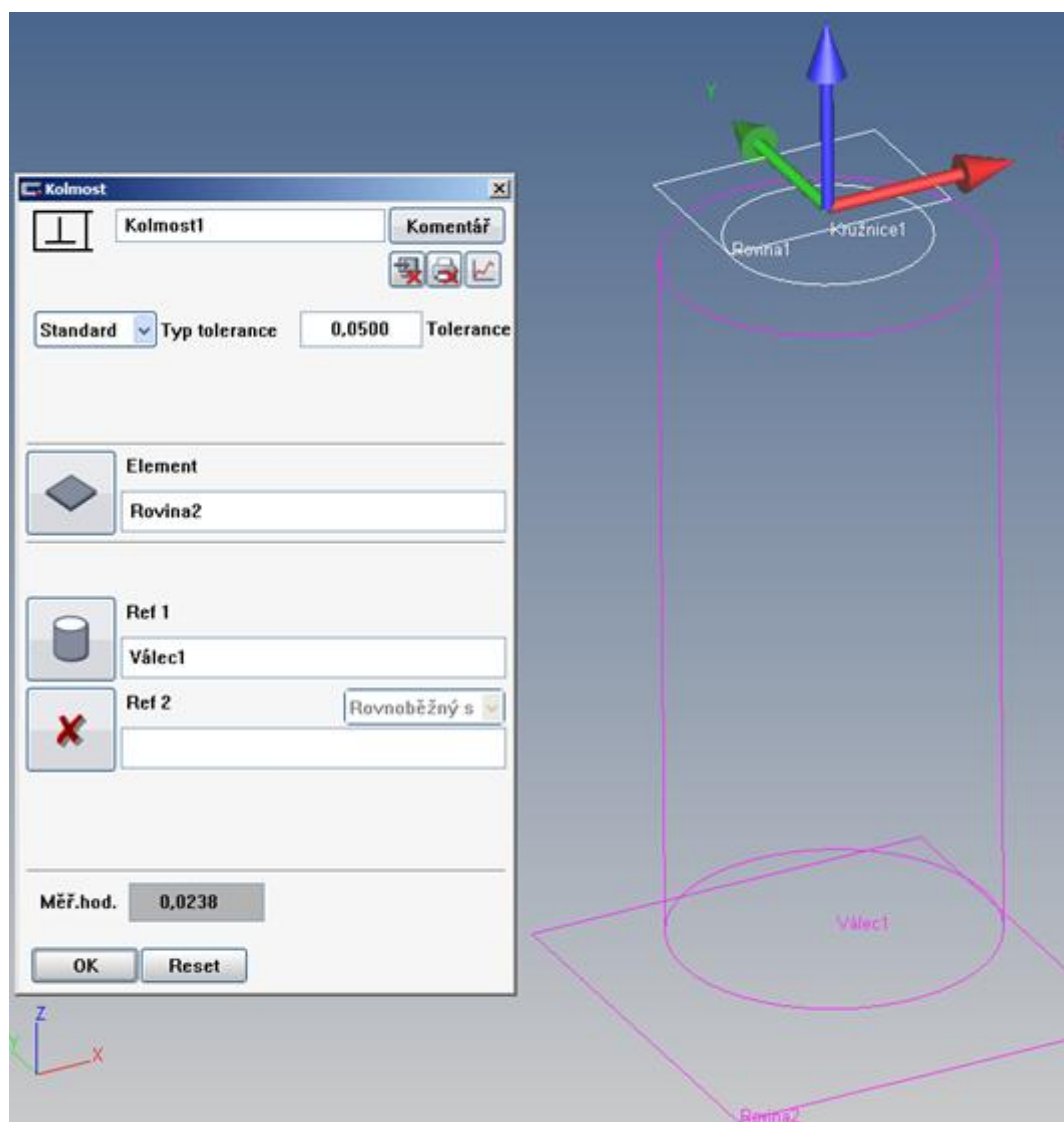
Pro naměření základních geometrických prvků, je potřeba určit jakým způsobem (metodou) budou snímány body pro definování. Prvním prvkem je Válec 1, pro který jsem zvolil strategii tří kruhových drah rozmístěných po krajích elementu a uprostřed. Jednotlivé dráhy jsem definoval délkou kroku snímání bodů na hodnotu 0,1 mm. Tyto parametry jsou vidět na obrázku 26. Pro celý válec bylo nasnímáno ve všech třech drahách 5383 bodů.



Obrázek 26: Parametry strategie elementu válec 1

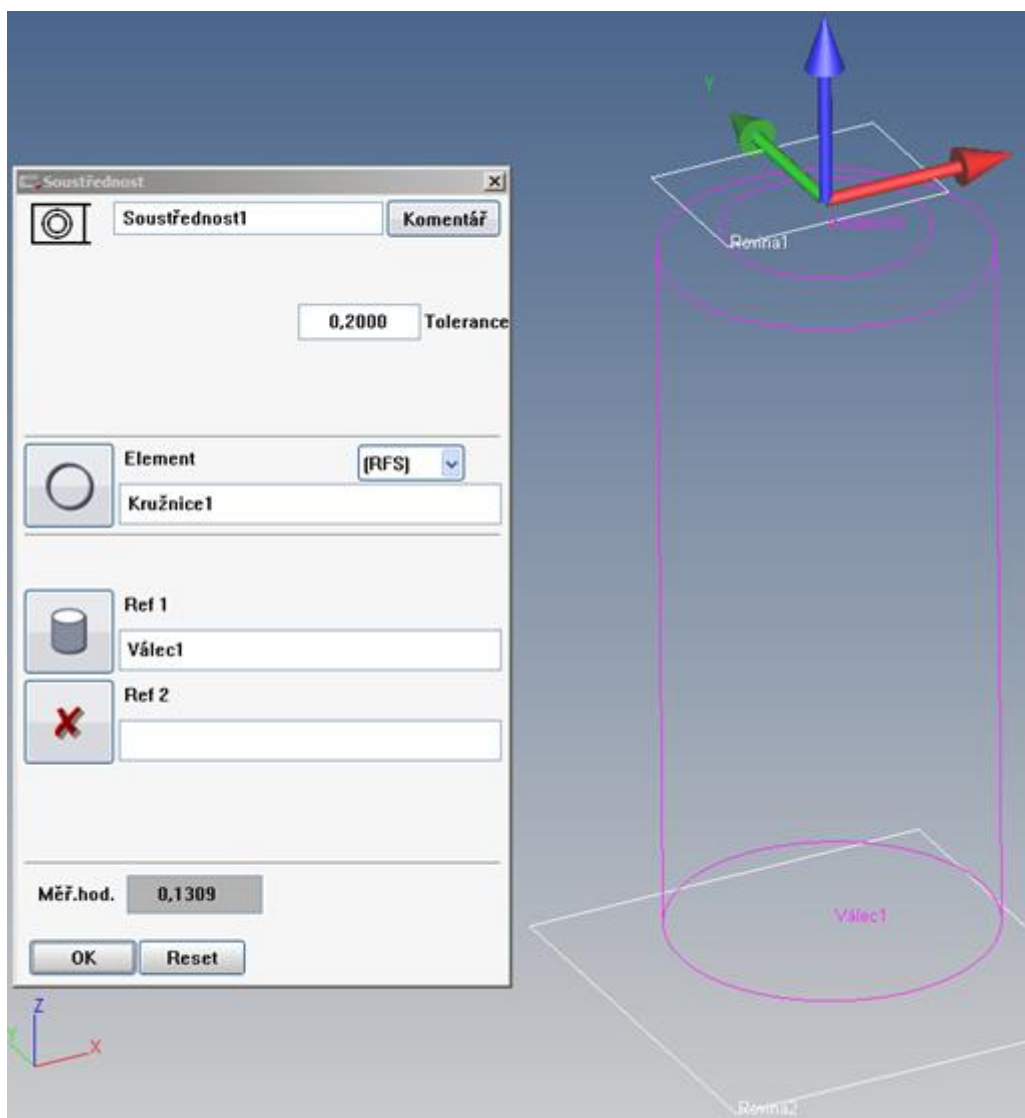
Dalšími elementy jsou Rovina 1 a Rovina 2, které jsou definovány čtyřmi body. Čtyři body pro definování roviny je dostatečný počet, jelikož k určení jsou potřebné body tři. Posledním elementem je kružnice, která je naměřena na vnitřním průměru kalibračního válce. Kružnici jsem definoval stejně jako u válce délkou kroku 0.1 mm

Kontrolované charakteristiky se vyhodnocují na základě naměřených základních elementů. Zvolil jsem rozměr válce 1, válcovitost, průměr kružnice, kruhovitost, kolmost a soustřednost. Například kolmost se vyhodnocuje mezi rovinou 2 a válcem 1 jak je vidět na obrázku 27.



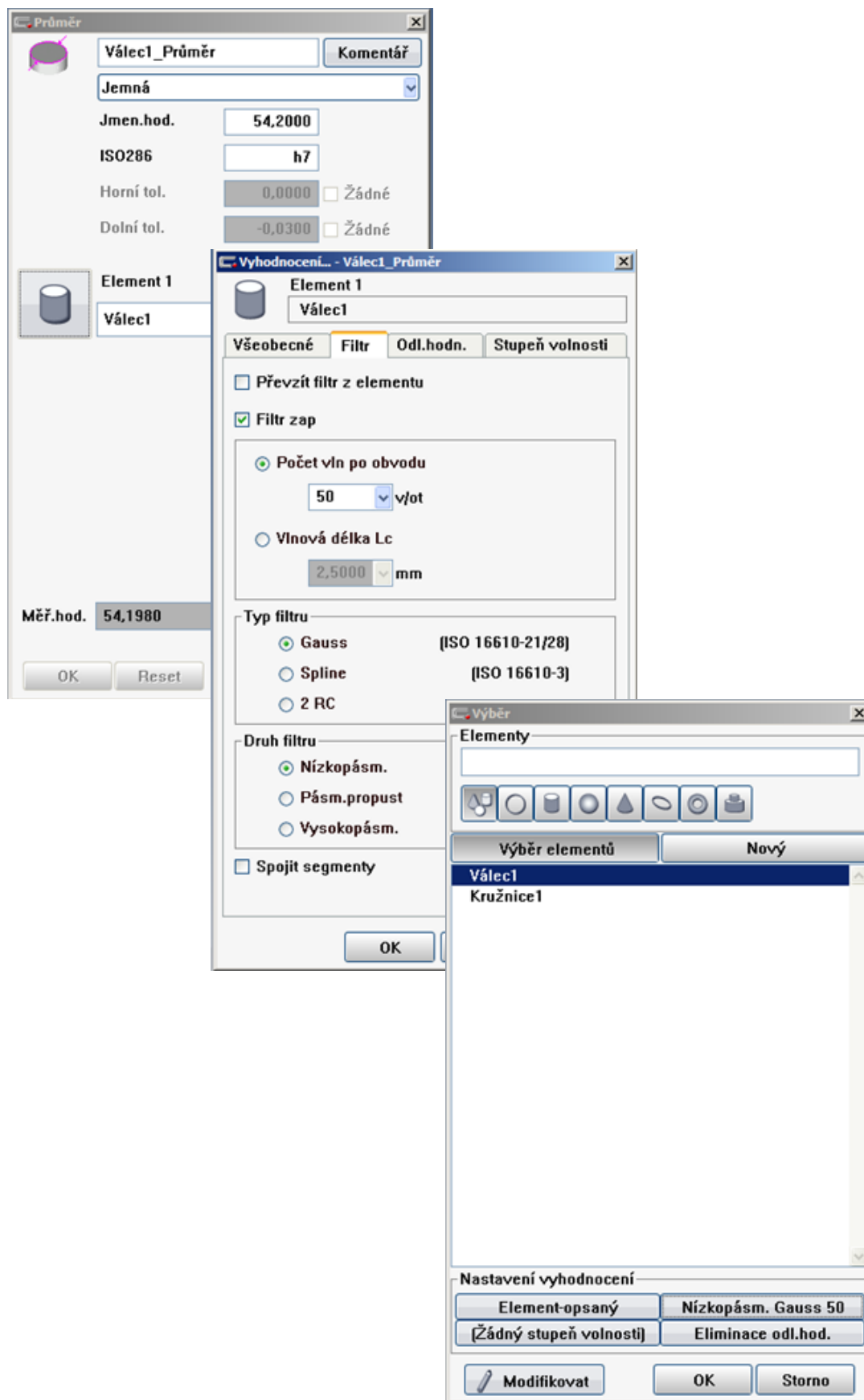
Obrázek 27: Definování kolmosti

Pro vyhodnocení soustřednosti bylo použito kružnice 1 a válce 1. Navíc je možné zde nastavit toleranci dané charakteristiky (obrázek 28).











Obrázek 28: Definování soustřednosti

Další důležitou částí pro vyhodnocení je nastavení parametrů filtru. Zde se určuje například počet vln po obvodu, vlnová délka, typ nebo druh filtru. Pro ukázkou jsou možnosti nastavení filtrů na obrázku 29.



Obrázek 29: Parametry filtru

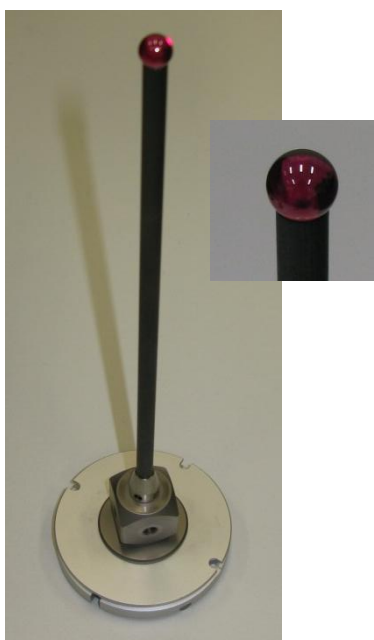
Měření probíhalo desetkrát při rychlostech 5, 10, 20, 30, 40, a 50 pro šest charakteristik. Výsledkem bylo tedy šedesát protokolů s naměřenými hodnotami, jeden protokol je zobrazen na obrázku 30.

ZEISS Calypso		ZEISS		
		Datum 27 April 2015		
Plán měření Muller_diplomka		Zakázka rychlost_20_		
Operátor Master		C.dílu inkrementálně 1		
Stroj Prismo				
Měř.hod.	Jm.hod.	Horní tol.	Dolní tol.	Odchyłka
				
Celkový výsledek				
Všechny charakteristiky: 6				
...v toleranci: 5				
...Mimo toleranci: 1				
...Nad výstražnou mezí: 0				
...Nevypočteno: 0				
Souř.systémů celkem: 1				
...Nevypočteno: 0				
Text.elementů celkem: 0				
<hr/>				
				
Válec1_Průměr				
54.1965	54.2000	0.0000	-0.0300	┌— -0.0035
<hr/>				
				
Válcovitost1				
0.0233	0.0000	0.0500		┌— 0.0233
<hr/>				
				
Kružnice1_Průměr				
33.9724	34.0000	0.0250	0.0000	-0.0276 -0.0276
<hr/>				
				
Kruhovitost1				
0.0017	0.0000	0.0100		┌— 0.0017
<hr/>				
				
Kolmost1				
0.0211	0.0000	0.0500		┌— 0.0211
<hr/>				
				
Soustřednost1				
0.0852	0.0000	0.2000		┌— 0.0852

Obrázek 30: Protokol měření

5.5. Vyhodnocení rychlosti snímání

Měření probíhalo při šesti různých rychlostech snímání bodů. Všechny ostatní parametry zůstaly neměnné. K měření byl použit souřadnicový měřicí stroj Prismo od firmy Zeiss ve školícím a měrovém středisku Carl Zeiss při ČVUT. Konfigurací snímacího systému byla jedna kulička o průměru 8 mm z rubínu (obrázek 31), na dlouhém dřívku délky 200 mm z materiálu thermofit. Pro vyhodnocení vlivu rychlosti snímání bodů jsem použil koeficient způsobilosti C_g a C_{gk} . Všechny potřebné výpočty jsem provedl, za pomoci programu excel.



Obrázek 31: Konfigurace snímače

První skupina měření probíhala bez zapnutí navigátoru, což bylo šest různých rychlostí při deseti opakování, z kterého jsem získal 360 naměřených hodnot. Naměřené průměrné hodnoty a rozpětí hodnot pro jednotlivé rychlosti a charakteristiky jsem zaznamenal do tabulek 6 a 7.

Tabulka 6: Průměrné hodnoty bez navigátoru

Rychlost	Válec průměr průměrná hodnota [mm]	Válcovitost průměrná hodnota [mm]	Kružnice průměr průměrná hodnota [mm]	Kruhovitost průměrná hodnota [mm]	Kolmost průměrná hodnota [mm]	Soustřednost průměrná hodnota [mm]
5	54,1933	0,0228	33,9702	0,0011	0,0201	0,0808
10	54,1940	0,0229	33,9692	0,0022	0,0200	0,0817
20	54,1965	0,0233	33,9723	0,0015	0,0212	0,0846
30	54,1983	0,0235	33,9735	0,0018	0,0213	0,0853
40	54,1983	0,0235	33,9735	0,0019	0,0218	0,0859
50	54,1983	0,0235	33,9735	0,0019	0,0219	0,0859

Tabulka 7: Rozpětí hodnot bez navigátoru

Rychlost	Válec průměr Rozpětí [μm]	Válcovitost Rozpětí [μm]	Kružnice průměr Rozpětí [μm]	Kruhovitost Rozpětí [μm]	Kolmost Rozpětí [μm]	Soustřednost Rozpětí [μm]
5	0,1	0,1	1,1	0,5	4,9	23
10	0,2	0,1	2,5	1,9	1,6	9,7
20	0,1	0,1	0,8	0,7	1	2,7
30	0,1	0,1	0,2	0,3	1	4
40	0,2	0,1	0,3	0,2	1	2
50	0,2	0,1	0,1	0,3	1,5	1,7

Pro druhou skupinu měření byly podmínky stejné s tím rozdílem, že byl zapnutý navigátor. Aktivní navigátor dokáže kompenzovat dynamické vlivy při skenování, jako je například zkroucení snímače. K tomu, aby bylo možné zapnout navigátor, se musí nejprve snímač kalibrovat metodou dynamický tenzor. Díky této kalibraci získají CMM hodnoty těchto dynamických vlivů a dokážou je kompenzovat. PRISMO navigátor umožňuje maximální přesnost při vysokorychlostním skenování. Další časová úspora je dosažena díky tangenciálnímu najíždění a snímání, skenování po šroubovici a rychlé dynamické kalibraci snímačů. Průměrné hodnoty a rozpětí těchto naměřených hodnot s navigátorem jsem zaznamenal do tabulek 8 a 9.

Tabulka 8: Průměrné hodnota s navigátorem

Rychlost	Válec průměr průměrná hodnota [mm]	Válcovitost průměrná hodnota [mm]	Kružnice průměr průměrná hodnota [mm]	Kruhovitost průměrná hodnota [mm]	Kolmost průměrná hodnota [mm]	Soustřednost průměrná hodnota [mm]
5	54,1929	0,0231	33,9699	0,0009	0,0150	0,0676
10	54,1930	0,0231	33,9701	0,0007	0,0148	0,0678
20	54,1930	0,0231	33,9698	0,0009	0,0148	0,0680
30	54,1930	0,0233	33,9692	0,0014	0,0154	0,0696
40	54,1931	0,0239	33,9681	0,0029	0,0127	0,0517
50	54,1932	0,0240	33,9675	0,0034	0,0131	0,0472

Tabulka 9: Rozpětí hodnot s navigátorem

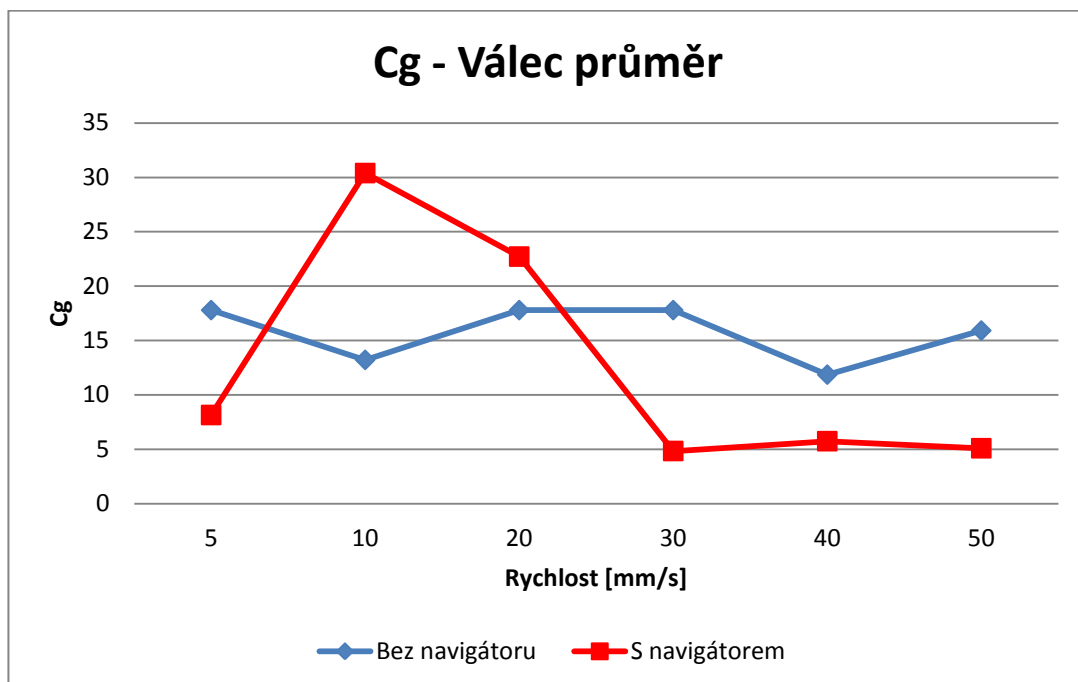
Rychlost	Válec průměr rozpětí [μm]	Válcovitost rozpětí [μm]	Kružnice průměr rozpětí [μm]	Kruhovitost rozpětí [μm]	Kolmost rozpětí [μm]	Soustřednost rozpětí [μm]
5	0,3	0,3	0,2	0,2	2,2	4,3
10	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	1,3
20	0,1	0,1	0,1	0,1	1,1	2,3
30	0,4	0,2	0,2	0,3	3,1	15,1
40	0,4	0,2	0,6	0,6	5,1	28,5
50	0,4	0,2	0,4	0,7	3,4	9,1

Jednotlivé závislosti koeficientů C_g a C_{gk} na rychlosti snímání jsem vynesl do grafů. Pro každou charakteristiku jsou vyneseny hodnoty bez použití navigátoru a při aktivování této kompenzace. Časy měření pro jeden cyklus jednotlivých rychlostí jsem vynesl do tabulky 10.

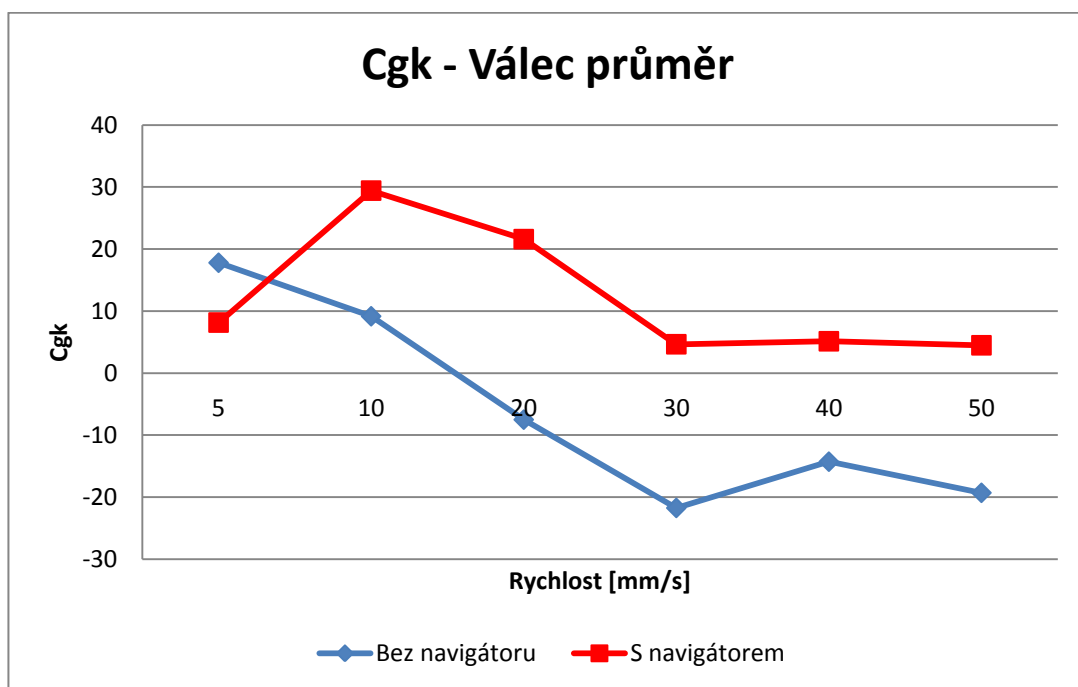
Tabulka 10: Časy měření

Rychlost	Bez navigátoru	S navigátorem
5	3:40	3:42
10	2:04	2:08
20	1:15	1:20
30	1:03	1:05
40	1:00	0:57
50	0:59	0:52

Graf 1: Závislost koeficientu C_g na rychlosti – Válec průměr



Graf 2: Závislost koeficientu C_{gk} na rychlosti – Válec průměr

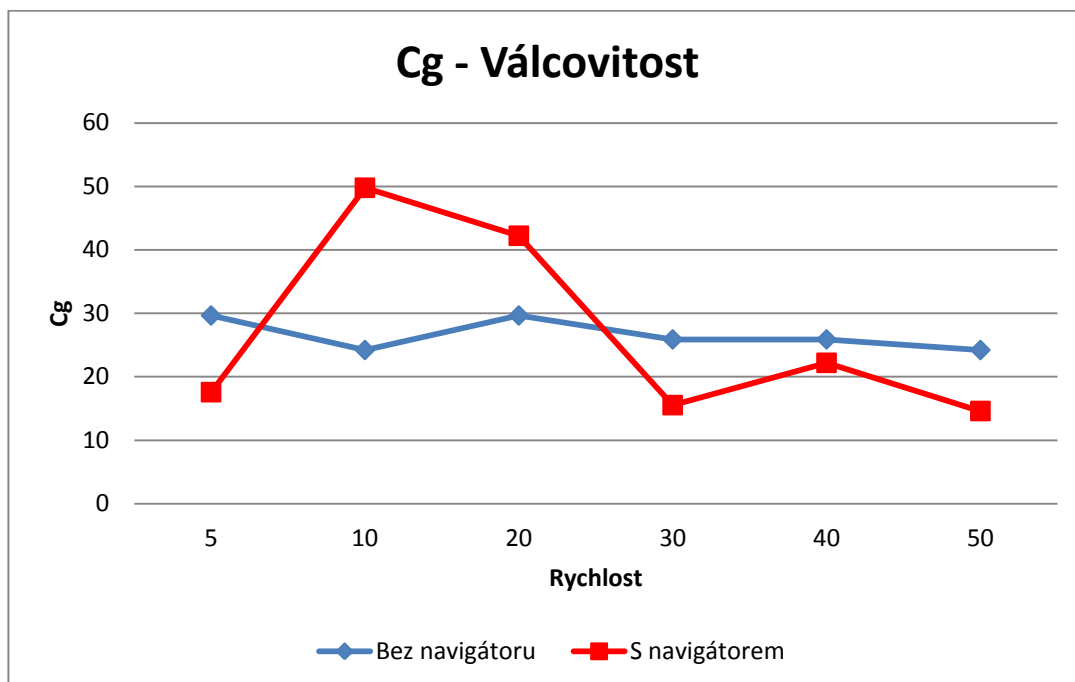


Tabulka 11: Hodnoty C_g a C_{gk} - Válec průměr

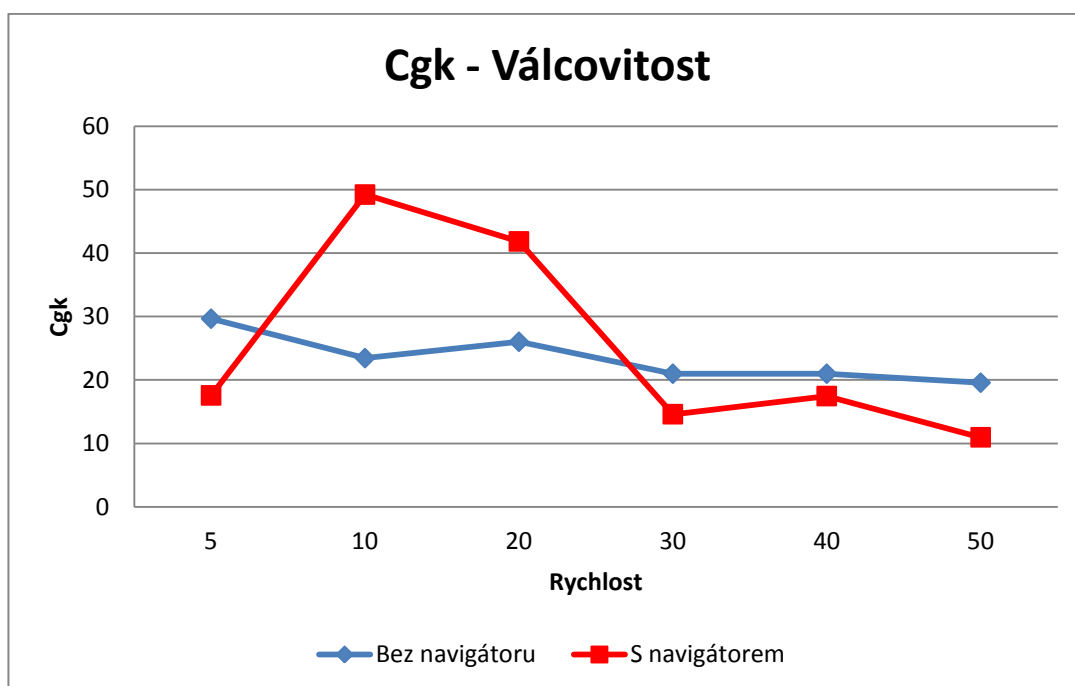
Válec průměr				
Rychlost	Bez navigátoru		S navigátorem	
	C_g	C_{gk}	C_g	C_{gk}
5	17,7880	17,7880	8,1450	8,1450
10	13,2120	9,1610	30,3870	29,4180
20	17,7880	-7,5100	22,7120	21,5950
30	17,7880	-21,7410	4,8350	4,6520
40	11,8590	-14,2830	5,7380	5,1330
50	15,9100	-19,3040	5,0890	4,4810

Vyhodnocení průměru válce bylo provedeno za pomoci koeficientu C_g a C_{gk} , tyto hodnoty jsou vyneseny v tabulce 11. Z hlediska variability se zdá měření způsobilé při zapnuté i vypnuté funkci navigátoru až do rychlosti 50 mm/s, ovšem experiment odhalil zajímavý fakt. Přesto že variabilita zůstává přijatelná i při vysokých rychlostech měření, zásadní zhoršení měřených hodnot nastalo z pohledu jejich strannosti. I přes zachování preciznosti se nezachovala správnost měření. Zda je měření správné, dokáže dobře popsat koeficient C_{gk} , a proto musí být z pohledu přijatelnosti dané rychlosti měření rozhodující. U vypnuté funkce navigátoru je přijatelný koeficient C_{gk} do rychlosti 10 mm/s, naopak za použití navigátoru až do rychlosti 50 mm/s.

Graf 3: Závislost koeficientu C_g na rychlosti – Válcovitost



Graf 4: Závislost koeficientu C_{gk} na rychlosti - Válcovitost

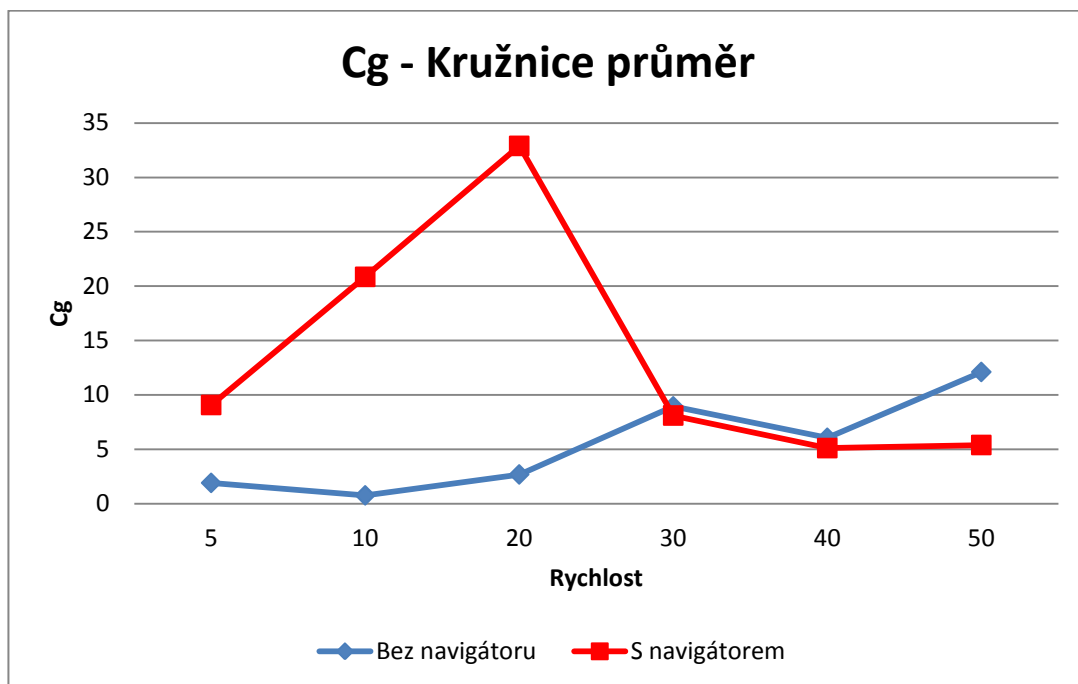


Tabulka 12: Hodnoty C_g a C_{gk} - Válcovitost

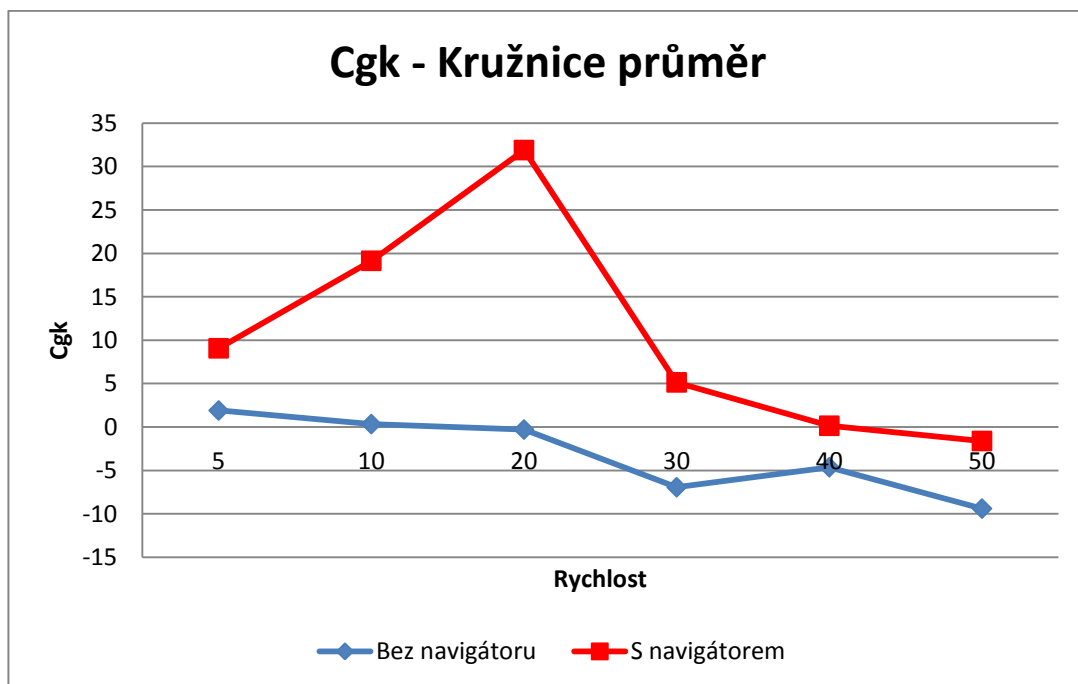
Válcovitost				
Rychlost	Bez navigátoru		S navigátorem	
	C_g	C_{gk}	C_g	C_{gk}
5	29,6460	29,6460	17,5600	17,5600
10	24,2060	23,4320	49,7810	49,2160
20	29,6460	26,0100	42,2150	41,8270
30	25,8770	20,9780	15,5160	14,5970
40	25,8770	20,9780	22,1870	17,4540
50	24,2060	19,5590	14,5940	10,9580

Vyhodnocení válcovitosti bylo provedeno za pomoci koeficientu C_g a C_{gk} , tyto hodnoty jsou vyneseny v tabulce 12. Z hlediska variability je měření způsobilé při zapnuté i vypnuté funkci navigátoru až do rychlosti 50 mm/s. Jak je vidět z grafu pro závislost C_{gk} na rychlosti tak i při vysokých rychlostech je zachována preciznost měření při zapnuté i vypnuté funkci navigátoru. Při vyhodnocení C_{gk} je z grafu vidět, že při vypnuté funkci navigátoru jsou hodnoty koeficientu lineární závislosti. Naopak za použití navigátoru dochází nejprve k nárůstu a poté poklesu až pod hodnoty bez navigátoru, ale stále se nacházejí v tolerančním poli.

Graf 5: Závislost koeficientu C_g na rychlosti - Kružnice průměr



Graf 6: Závislost koeficientu C_{gk} na rychlosti - Kružnice průměr

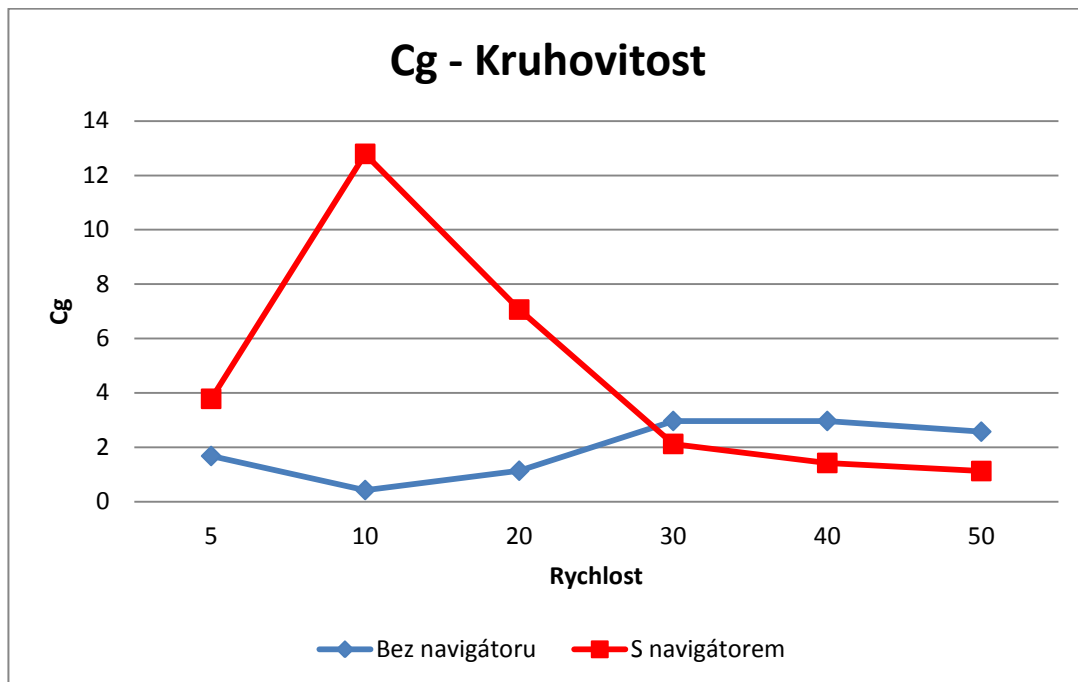


Tabulka 13: Hodnoty C_g a C_{gk} - Kružnice průměr

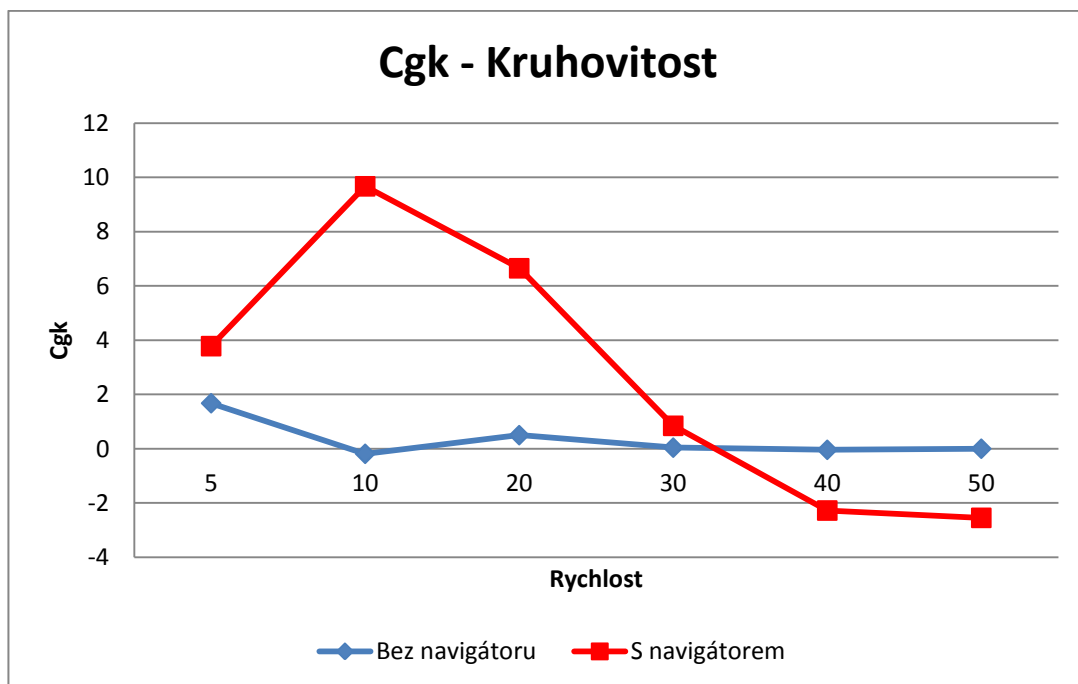
Kružnice průměr				
Rychlost	Bez navigátoru		S navigátorem	
	C_g	C_{gk}	C_g	C_{gk}
5	1,9050	1,9050	9,0670	9,0670
10	0,7560	0,3410	20,8480	19,1440
20	2,6810	-0,2930	32,8880	31,8940
30	8,9390	-6,9360	8,0970	5,1430
40	6,0520	-4,6310	5,1040	0,1470
50	12,1030	-9,3920	5,3880	-1,6070

Vyhodnocení průměru kružnice bylo provedeno za pomoci koeficientu C_g a C_{gk} , tyto hodnoty jsou vyneseny v tabulce 13. Z hlediska variability se zdá měření způsobilé při zapnuté i vypnuté funkci navigátoru až do rychlosti 50 mm/s s výjimkou rychlosti 10 mm/s bez navigátoru, ovšem experiment odhalil fakt, že i přes to variabilita zůstává přijatelná i při vysokých rychlostech měření, zásadní zhoršení měřených hodnot nastalo z pohledu jejich strannosti. I přes zachování preciznosti se nezachovala správnost měření. Zda je měření správné, dokáže dobře popsat koeficient C_{gk} , a proto musí být z pohledu přijatelnosti dané rychlosti měření rozhodující. U vypnuté funkce navigátoru je přijatelný koeficient C_{gk} do rychlosti 5 mm/s, naopak za použití navigátoru až do rychlosti 30 mm/s.

Graf 7: Závislost koeficientu C_g na rychlosti - Kruhovitost



Graf 8: Závislost koeficientu C_{gk} na rychlosti - Kruhovitost

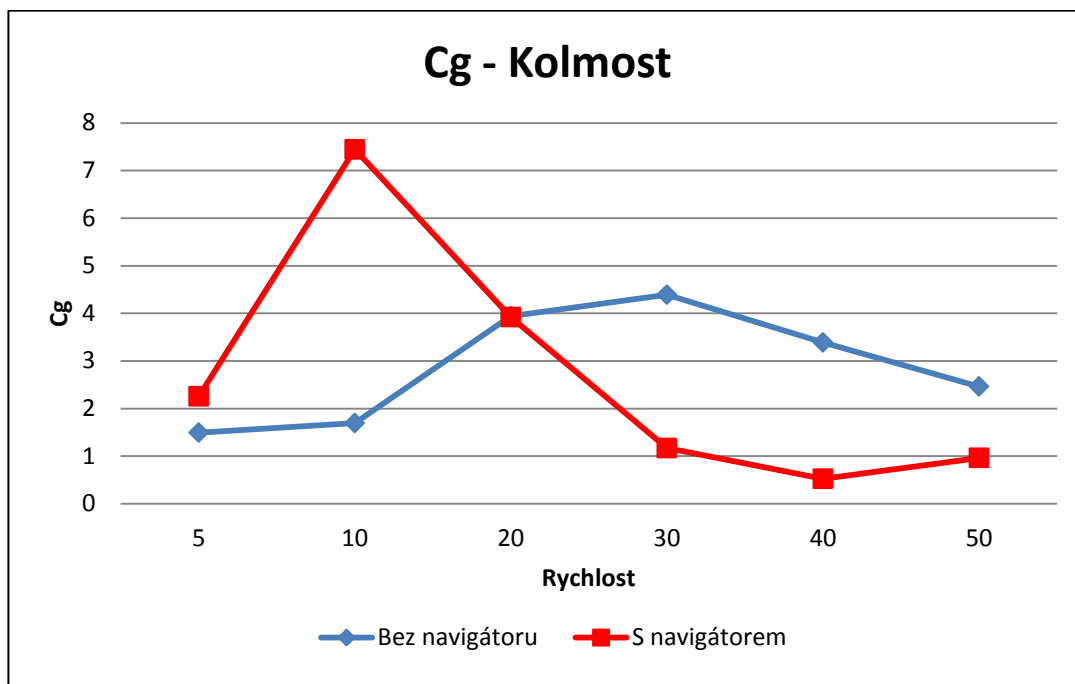


Tabulka 14: Hodnoty C_g a C_{gk} - Kruhovitost

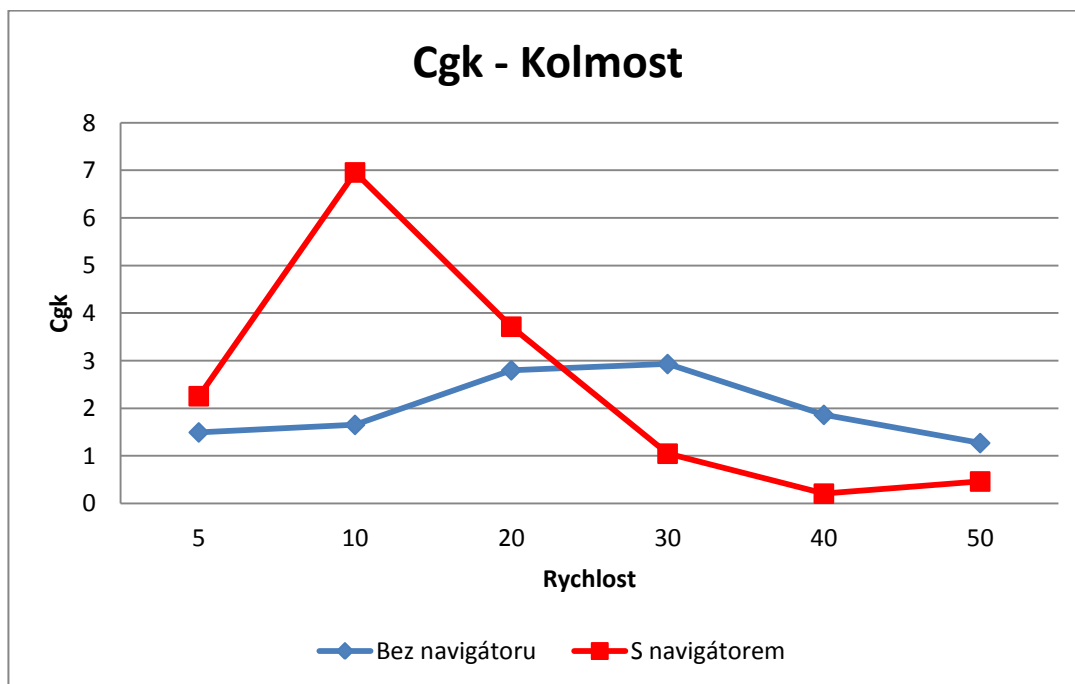
Kruhovitost				
Rychlost	Bez navigátoru		S navigátorem	
	C_g	C_{gk}	C_g	C_{gk}
5	1,6770	1,6770	3,7800	3,7800
10	0,4250	-0,1870	12,7880	9,6700
20	1,1360	0,5000	7,0620	6,6500
30	2,9650	0,0400	2,1210	0,8440
40	2,9650	-0,0400	1,4210	-2,2770
50	2,5720	0,0000	1,1240	-2,5480

Vyhodnocení kruhovitosti bylo provedeno za pomoci koeficientu C_g a C_{gk} , tyto hodnoty jsou vyneseny v tabulce 14. Z hlediska variability se zdá měření způsobilé při zapnuté i vypnuté funkci navigátoru až do rychlosti 50 mm/s s výjimkou rychlosti 10 mm/s bez navigátoru, ovšem experiment odhalil fakt, že i přes to variabilita zůstává přijatelná i při vysokých rychlostech měření, zásadní zhoršení měřených hodnot nastalo z pohledu jejich strannosti. I přes zachování preciznosti se nezachovala správnost měření. Zda je měření správné, dokáže dobře popsat koeficient C_{gk} , a proto musí být z pohledu přijatelnosti dané rychlosti měření rozhodující. U vypnuté funkce navigátoru je přijatelný koeficient C_{gk} do rychlosti 5 mm/s, naopak za použití navigátoru až do rychlosti 20 mm/s.

Graf 9: Závislost koeficientu C_g na rychlosti - Kolmost



Graf 10: Závislost koeficientu C_{gk} na rychlosti - Kolmost

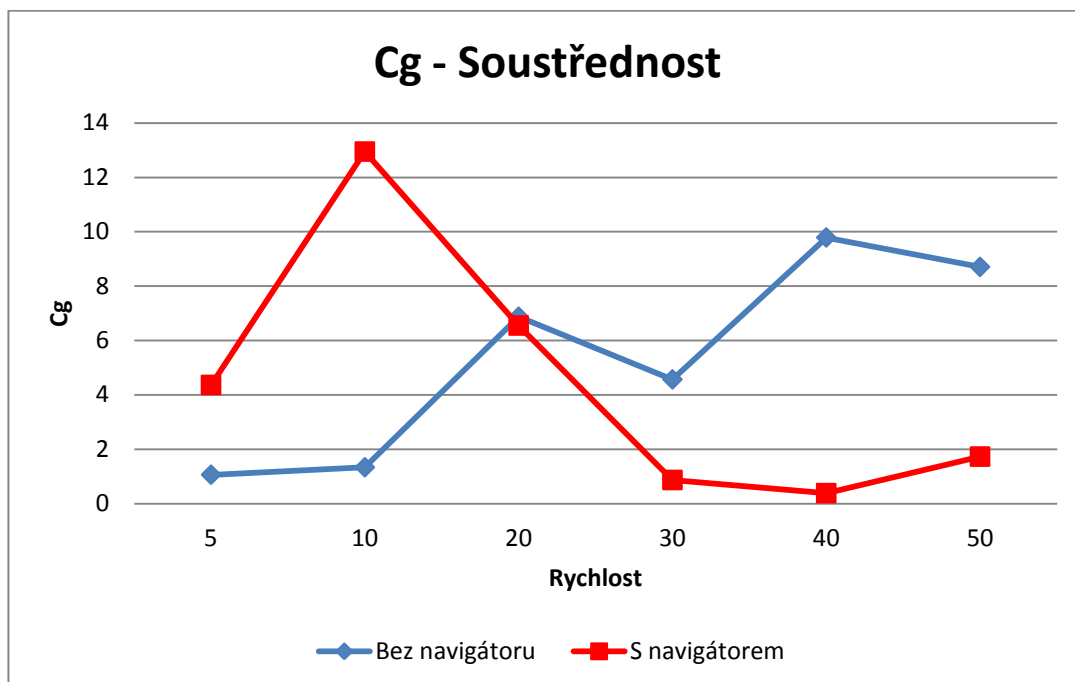


Tabulka 15: Hodnoty C_g a C_{gk} - Kolmost

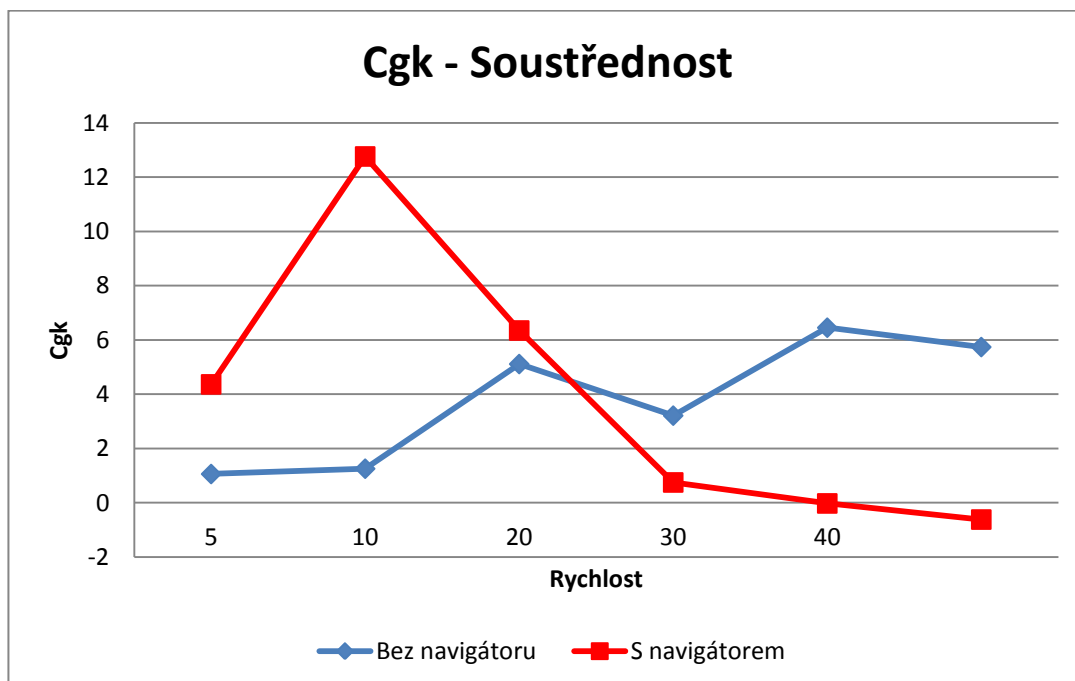
Kolmost				
Rychlost	Bez navigátoru		S navigátorem	
	C_g	C_{gk}	C_g	C_{gk}
5	1,4940	1,4940	2,2550	2,2550
10	1,6940	1,6520	7,4450	6,9580
20	3,9420	2,7990	3,9210	3,7150
30	4,3920	2,9310	1,1680	1,0470
40	3,3880	1,8630	0,5240	0,2070
50	2,4640	1,2700	0,9630	0,4630

Vyhodnocení kolmosti bylo provedeno za pomoci koeficientu C_g a C_{gk} , tyto hodnoty jsou vyneseny v tabulce 15. Z hlediska variability je měření způsobilé při zapnuté i vypnuté funkci navigátoru až do rychlosti 30 mm/s pro rychlost 40 a 50 mm/s pouze bez navigátoru. Zda je měření správné, dokáže dobře popsat koeficient C_{gk} , a proto musí být z pohledu přijatelnosti dané rychlosti měření rozhodující. U vypnuté funkce navigátoru je přijatelný koeficient C_{gk} do rychlosti 50 mm/s, naopak za použití navigátoru pouze do rychlosti 30 mm/s.

Graf 11: Závislost koeficientu C_g na rychlosti - Soustřednost



Graf 12: Závislost koeficientu C_{gk} na rychlosti - Soustřednost



Tabulka 16: Hodnoty C_g a C_{gk} - Soustřednost

Soustřednost				
Rychlost	Bez navigátoru		S navigátorem	
	C_g	C_{gk}	C_g	C_{gk}
5	1,0630	1,0610	4,3630	4,3630
10	1,3350	1,2570	12,9460	12,7630
20	6,8720	5,1130	6,5490	6,3490
30	4,5680	3,2120	0,8680	0,7490
40	9,7870	6,4530	0,3830	-0,0230
50	8,7050	5,7400	1,7280	-0,6170

Vyhodnocení soustřednosti bylo provedeno za pomoci koeficientu C_g a C_{gk} , tyto hodnoty jsou vyneseny v tabulce 16. Z hlediska variability je měření způsobilé při zapnuté i vypnuté funkci navigátoru až do rychlosti 20 mm/s pro rychlost 30, 40 a 50 mm/s pouze bez navigátoru. Zda je měření správné, dokáže dobře popsat koeficient C_{gk} , a proto musí být z pohledu přijatelnosti dané rychlosti měření rozhodující. U vypnuté funkce navigátoru je přijatelný koeficient C_{gk} do rychlosti 50 mm/s, naopak za použití navigátoru pouze do rychlosti 20 mm/s.

Tabulka 17: Optimální rychlosti jednotlivých charakteristik

Charakteristika	Rychlost [mm/s]	
	Bez navigátoru	S navigátorem
Válec průměr	10	50
Válcovitost	50	50
Kružnice průměr	5	30
Kruhovitost	5	20
Kolmost	50	30
Soustřednost	50	20

V tabulce 17 jsou zaznamenány optimální rychlosti pro jednotlivé charakteristiky při vypnuté i zapnuté funkci navigátoru. Provedením experimentu zaměřeného na produktivitu kontroly na CMM v závislosti na rychlosti snímání bodů při měření, je možné volit pro jednotlivé charakteristiky přijatelné rychlosti. Jak je také zřejmé z grafů závislostí C_{gk} na rychlosti snímání bodů. Pro některé charakteristiky je možné volit velmi vysoké rychlosti, v některých případech je prostor i pro vyšší než 50 mm/s. Naopak jsou charakteristiky jako jsou například kruhovitost a soustřednost, kde je potřeba volit nižší rychlosti pro zachování preciznosti měření. Díky optimální volbě je možné ušetřit až 60% času měření na CMM, to například u velkosériové kontroly hraje značnou roli.

Závěr

V současnosti má největší roli v kontrole kvality součástí právě souřadnicová měřicí technika. Spousta podniků vlastní velké množství CMM, ale málo z nich se zabývá produktivitou kontroly a maximální využívání kapacity jednotlivých strojů. Touto cestou je možné snížit náklady potřebné na kontrolu kvality. Přesto se stále jedná o nejefektivnější nástroj.

Obsahem této diplomové práce je kontrola kvality na souřadnicové měřicí technice, jejímž cílem je vliv produktivity na způsobilost procesu měření. V první řadě jsem popisoval postup měření na CMM, který je dán analýzou výkresu, volbou upnutí, konfigurací a kalibrací snímacího systému, extrakcí bodů, výpočtem geometrických prvků a vyhodnocením výsledných charakteristik. Následně jsem se zaměřil na způsoby ověření technického stavu CMM, který je dán přejímacími a periodickými zkouškami. Tyto zkoušky jsou popsány normou ISO 10360 a dělí se na devět částí. Každá část se zabývá jednotlivými specifickými technologiemi z oblasti souřadnicového měření. Pro mou práci jsou důležité druhá, čtvrtá a pátá část normy. Druhá část je zaměřena na přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů pro měření lineárních rozměrů. Čtvrtá se zabývá používáním CMM v režimu měření skenováním a pátá část je zaměřena na CMM používající snímací systém s jednotlivým a složeným snímacím dotykem.

Přejímací a periodické zkoušky mají za úkol ověřit konstrukci souřadnicové měřicí techniky za pomoci jednoduchých měření. Splněním přejímacích a periodických zkoušek se nezaručí způsobilost procesu kontroly na reálné součásti, neboť v těchto jednoduchých měření se nevyhodnocují geometrické tolerance a měření probíhá na etalonech. Reálným vyhodnocením a analýzou zjišťující zdroje nejistot v celém měření se zabývá metoda MSA. Proto jsem podrobněji také popsal analýzu systému měření, která má identifikovat rozdílnost měření. Další část je zaměřena na vhodný výběr komponentu, jelikož povrch všech součástí nebo výrobků je složen z rozdílných geometrických prvků, které jsou tvořeny základními tvary. Odchylky od základních tvarů jsou dány tím, že ve výrobním procesu působí velká řada vlivů, proto se nedá vyrobit součást s ideálním tvarem. Tak vznikají výrobky s větší, nebo menší odchylkou od ideálního

geometrického tvaru. Proto jsem vybral jako komponent kalibrační válec, jelikož je velmi přesně vyroben a umožňuje nasimulovat měření geometrických tolerancí.

V hlavní části jsem určil, proč se zabývám rychlostí snímání bodů jako parametrem, který ovlivňuje produktivitu kontroly kvality. Je to dáno tím, že rychlost snímání zaujímá velký časový podíl v měření, ať už se jedná o zakázkové nebo sériové kontroly kvality. Poté jsem vytvořil plán měření, jehož cílem bylo naměřit charakteristiky pro posouzení právě vlivu rychlosti snímání bodů na produktivitu měření na CMM. Jednalo se o vybrané charakteristiky, kterými byly průměr válce a kružnice, válcovitost, kruhovitost, kolmost a soustřednost. Plán měření byl vytvořen v softwaru Calypso od firmy Carl Zeiss. Byl tvořen na kalibračním válci bez použití CAD modelu. Základní geometrické prvky byly ručně nasnímány a přeneseny do Calypsa. Vyrovnání součásti a určení souřadného systému bylo definováno na základě hlavního válce a roviny na vrchu kalibračního válce. Vnější průměr byl vybrán jako geometrický prvek válec, na kterém bylo provedeno vyhodnocování válcovitosti. Vnitřní průměr byl definován kružnicí, která také sloužila pro výpočet kruhovitosti. Kolmost se vyhodnocovala mezi spodní plochou kalibračního válce a vnějším průměrem. Soustřednost je porovnávána mezi vnějším a vnitřním průměrem. Celé měření probíhalo na souřadnicovém měřicím stroji Prismo od firmy Zeiss, ve školícím a měrovém středisku Carl Zeiss při ČVUT. Konfigurací snímacího systému byla jedna kulička o průměru 8 mm z rubínu, na dlouhém dřívku délky 200 mm z materiálu thermofit.

Na závěr jsem provedl vyhodnocení pro všechny zvolené charakteristiky za pomoci koeficientů způsobilosti měřidla C_g a C_{gk} . Do grafů jsem vynesl závislost rychlosti snímání bodů na koeficienty způsobilosti, ze kterých je patrný vliv rychlosti snímání na způsobilost procesů měření, a také možnosti optimalizování tohoto parametru pro zvýšení produktivity. Optimální volbou rychlostí při kontrole na CMM je možné ušetřit až 60% času měření.

Seznam použité literatury

- [1] CHRISTOPH, Ralf a Hans Joachim NEUMANN. Multisenzorová souřadnicová měřicí technika. Uherské Hradiště: L. V. Print, 2008, 106 s.
- [2] BOSCH, John A. *Coordinate measuring machines and systems*. 2. vyd. New York: M. Dekker, c1995, xi, 444 p. ISBN 08-247-9581-4.
- [3] ČEPOVÁ, Lenka a Lenka PETŘKOVSKÁ. Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch: studijní opora [online]. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011, 125 s. [cit. 2013-05-18]. ISBN 978-80-248-2514-4.
- [4] Manuál – CALYPSO, návod k obsluze, Divize Industrielle Messtechnik GmbH D-73446 Oberkochen, Datum vydání: 03/11, 2011
- [5] A Proposal for the Metrological Characterization of Circular Features with Digital Optical Machines [online]. [cit. 2015-06-15]. Dostupné z: http://oa.upm.es/12647/2/INVE_MEM_2011_106986.pdf
- [6] CORPORATION ., DaimlerChrysler. *Measurement systems analysis: reference manual*. 4th ed. [Detroit, Mich: DaimlerChrysler, 2010. ISBN 978-160-5342-115.
- [7] ISO 10360-1. Geometrické požadavky na výrobky: Přejímací a periodické zkoušky CMM. září 2001. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví - slovník.
- [8] ISO 10360-2 Geometrické požadavky na výrobky: Přejímací a periodické zkoušky CMM. srpen 2010. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví -Souřadnicové měřicí stroje používané pro měření lineárních rozměrů
- [9] ISO 10360-4 Geometrické požadavky na výrobky: Přejímací a periodické zkoušky CMM. září 2001. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví - Souřadnicové měřicí stroje používané v režimu měření skenováním

[10] ISO 10360-5 Geometrické požadavky na výrobky: Přejímací a periodické zkoušky CMM. květen 2011. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví - Souřadnicové měřicí stroje používající snímací systém s jednotlivým a složeným snímacím dotekem

[11] Terminologie z oblasti metrologie [online]. 2. vydání. Francie, 2008 [cit. 2015-06-15]. Dostupné z:

http://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/podklady_vyuka/terminologie_metrolog2010.pdf

[12] Způsobilost kontrolních procesů. Management jakosti v automobilovém průmyslu. 112 stran, Česká společnost pro jakost, 2004. ISBN 80-02-01656-4

[13] DOC. ING. JIŘÍ PERNIKÁŘ, CSC., HODNOCENÍ ZPŮSOBILOSTI KONTROLNÍCH PROSTŘEDKŮ [online]. [cit. 2015-06-15]. Dostupné z:

http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/31_Pernikar_VUTBR.pdf

[14] Česká technická norma, ČSN EN ISO 14253-1 Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Zkoušení obrobků a měřidel měřením - Část 1: Pravidla rozhodování o prokazování shody nebo neshody se specifikacemi, Český normalizační institut, duben 2000 Praha

[15] Česká technická norma, ČSN, EN ISO 1101 , Geometrické specifikace výrobků (GPS) - Geometrické tolerování - Tolerance tvaru, orientace, umístění a házení, Český normalizační institut, duben 2006

Seznam obrázků

Obrázek 1: Rozměry dotyku, 1) průměr kuličky, 2) celková délka, 3) průměr dříku, 4) efektivní činná délka, 5) průměr stopky [3]	11
Obrázek 2: Základní geometrické prvky [3].....	16
Obrázek 3: Metody výpočtu	17
Obrázek 4: Diagram příčin a následků variability systému měření [6]	19
Obrázek 5: Vizualizace čtyř skenovacích drah [9]	25
Obrázek 6: Největší dovelené chyby (mezní čísla)[10].....	28
Obrázek 7: Dovolené rozpětí chyby tvaru při snímání [10]	29
Obrázek 8: Strannost a shodnost [12].....	37
Obrázek 9: Stabilita [12].....	38
Obrázek 10: Reprodukovatelnost [12].....	39
Obrázek 11: Diagram pro průměr - "Sdružený" [6]	46
Obrázek 12: Diagram pro průměr - "Rozložený"[6]	46
Obrázek 13: Diagram pro rozpětí "Sdružený" [6]	47
Obrázek 14: Průběh hodnot podle dílu [6]	48
Obrázek 15: Bodový diagram díl 1 – 5 [6]	49
Obrázek 16: Bodový diagram díl 6 – 10 [6]	49
Obrázek 17: Diagram chyb díl 1 – 5 [6]	50
Obrázek 18: Diagram chyb díl 6 – 10 [6]	50
Obrázek 19: Normalizovaný histogram [6]	51
Obrázek 20: Porovnávání grafů X – Y [6].....	52
Obrázek 21: Výsledek měření pomocí intervalů [14].....	58
Obrázek 22: Schéma shody a neshody zmenšený o nejistoty měření (1- pole specifikace, 2- mimo specifikace, 3- pole shody, 4- pole neshody, 5- rozsah nejistoty, 6- zvětšující se nejistota měření U) [14]	59
Obrázek 23: Kalibrační válec	64
Obrázek 24: Vyrovnání součástí.....	66
Obrázek 25: Vlevo základní geometrické prvky/ Vpravo měřené charakteristiky..	67
Obrázek 26: Parametry strategie elementu válec 1.....	68
Obrázek 27: Definování kolmosti.....	69
Obrázek 28: Definování soustřednosti.....	70
Obrázek 29: Parametry filtru	71
Obrázek 30: Protokol měření	72
Obrázek 31: Konfigurace snímače.....	73

Seznam tabulek

Tabulka 1: Seznam kalibračních metod[4]	13
Tabulka 2: Orientace v měřicím objemu [8].....	22
Tabulka 3: Orientace v měřicím objemu [8].....	23
Tabulka 4: Seznam použitých značek [10].....	30
Tabulka 5: Značky geometrických specifikací [15]	63
Tabulka 6: Průměrné hodnoty bez navigátoru	74
Tabulka 7: Rozpětí hodnot bez navigátoru	74
Tabulka 8: Průměrné hodnota s navigátorem	75
Tabulka 9: Rozpětí hodnot s navigátorem	75
Tabulka 10: Časy měření	75
Tabulka 11: Hodnoty C_g a C_{gk} - Válec průměr	77
Tabulka 12: Hodnoty C_g a C_{gk} - Válcovitost	79
Tabulka 13: Hodnoty C_g a C_{gk} - Kružnice průměr	81
Tabulka 14: Hodnoty C_g a C_{gk} - Kruhovitost.....	83
Tabulka 15: Hodnoty C_g a C_{gk} - Kolmost.....	85
Tabulka 16: Hodnoty C_g a C_{gk} - Soustřednost	87
Tabulka 17: Optimální rychlosti jednotlivých charakteristik	88

Seznam grafů

Graf 1: Závislost koeficientu C_g na rychlosti – Válec průměr	76
Graf 2: Závislost koeficientu C_{gk} na rychlosti – Válec průměr	76
Graf 3: Závislost koeficientu C_g na rychlosti – Válcovitost	78
Graf 4: Závislost koeficientu C_{gk} na rychlosti - Válcovitost	78
Graf 5: Závislost koeficientu C_g na rychlosti - Kružnice průměr	80
Graf 6: Závislost koeficientu C_{gk} na rychlosti - Kružnice průměr	80
Graf 7: Závislost koeficientu C_g na rychlosti - Kruhovitost	82
Graf 8: Závislost koeficientu C_{gk} na rychlosti - Kruhovitost	82
Graf 9: Závislost koeficientu C_g na rychlosti - Kolmost.....	84
Graf 10: Závislost koeficientu C_{gk} na rychlosti - Kolmost.....	84
Graf 11: Závislost koeficientu C_g na rychlosti - Soustřednost.....	86
Graf 12: Závislost koeficientu C_{gk} na rychlosti - Soustřednost.....	86