

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ
A METROLOGIE

**Využití GR&R analýzy rozměrové kontroly k optimalizaci plánů
měření CMM strojů**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Autor: Miroslav Nekolný

Vedoucí práce: Ing. Jan Urban

Praha, 2020



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Nekolný** Jméno: **Miroslav** Osobní číslo: **476499**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Využití GR&R analýzy rozměrové kontroly k optimalizaci plánů měření CMM strojů

Název bakalářské práce anglicky:

Using GR&R analysis of dimensional control to optimize measurement plan for CMM

Pokyny pro vypracování:

1. Popis tvorby plánu měření na CMM
2. Definice analýzy GR&R v oblasti rozměrové kontroly kvality
3. Možnosti využití GR&R při optimalizaci plánu měření na CMM
4. Provedení optimalizační úlohy v SW Calypso

Seznam doporučené literatury:

Česká společnost pro jakost - Analýza systému měření MSA
Česká společnost pro jakost - Statistické metody řízení jakosti
J.A.Bosh - Coordinate and measuring machines and systems

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


Ing. Jan Urban, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Ing. Jan Urban
podpis vedoucí(ho) práce


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


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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

23.6.2020

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Využití GR&R analýzy rozměrové kontroly k optimalizaci plánů měření CMM strojů

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Janu Urbanovi za jeho výpomoc při tvorbě práce, cenné rady a trpělivost.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím pramenů uvedených v příloze této práce.

V Praze dne

Podpis

Abstrakt

Bakalářská práce se zaměřuje na optimalizaci měřicího plánu pro měření vložek válců motoru. V první části se práce zabývá základy souřadnicového měření, dále druhy souřadnicových měřících strojů, systémy pro dotykové měření a typy dotykových sond. V druhé části práce je rozebírán postup měření, strategie měření a způsobilost měření. V poslední části práce je provedena optimalizace měřicího plánu pro měření vložek válců u bloku motoru a výsledky této optimalizace jsou zhodnoceny.

Klíčová slova

CMM, souřadnicový měřící stroj, dotykové snímací systémy, Cg, Cgk, opakovatelnost měření, strannost měření, způsobilost měření, strategie měření, optimalizace

Abstract

This bachelor thesis is focused on optimization of measurement plan for measuring engine cylinder liners. The thesis introduction describes basics of coordinate measurement, touch trigger tactile sensors systems and types of sensors. Then the thesis describes measurement process, measurement strategy and measurement capability. In last part of thesis, the optimization of process is done and results of this optimization are assessed and commented.

Keywords

CMM, coordinate measuring machine, touch trigger tactile sensors, Cg, Cgk, repeatability of measurement, measurement bias, measurement capability, measurement strategy, optimization

Obsah

| | |
|--|----|
| 1. Úvod..... | 7 |
| 2. Základy souřadnicového měření a metrologie | 7 |
| 2.1. Souřadný systém..... | 7 |
| 2.2. Kartézská soustava souřadnic..... | 7 |
| 2.3. Sférická soustava souřadnic” | 8 |
| 2.4. Válcová soustava souřadnic | 9 |
| 2.5. Souřadnicový systém stroje..... | 9 |
| 2.6. Souřadnicový systém součásti..... | 10 |
| 2.7. Vyrovnání součásti | 11 |
| 2.8. Element a charakteristika | 11 |
| 2.9. Překlad dat a rotace souřadného systému..... | 12 |
| 2.10. Změřené a vytvořené prvky | 13 |
| 2.11. Objemová kompenzace | 14 |
| 3. Druhy souřadnicových měřících strojů | 14 |
| 3.1. Portálová konstrukce | 14 |
| 3.2. Sloupová konstrukce | 15 |
| 3.3. Souřadnicový měřící stroj s horizontálním ramenem | 16 |
| 3.4. Souřadnicový měřící stroj s mostovou konstrukcí | 17 |
| 4. Dotykové snímací systémy | 18 |
| 4.1. Spínací dotykové systémy | 18 |
| 4.2. Indexovatelné snímací systémy | 19 |
| 4.3. Aktivní snímací systémy | 19 |
| 5. Měřící sondy..... | 20 |
| 5.1. Typy měřících sond..... | 20 |

| | |
|--|----|
| 5.2. Materiály používané na sondy..... | 21 |
| 6. Postup měření..... | 22 |
| 6.1. Analýza výkresové dokumentace..... | 23 |
| 6.2. Snímací systém..... | 24 |
| 6.3. Upnutí součásti..... | 24 |
| 6.4. Kalibrace snímacího systému..... | 24 |
| 6.5. Vyrovnání součásti..... | 25 |
| 6.6. Extrakce bodů..... | 26 |
| 6.7. Vyhodnocení..... | 27 |
| 7. Strategie měření..... | 27 |
| 8. Způsobilost měření..... | 27 |
| 9. Měření vložek válců na bloku motoru..... | 28 |
| 9.1. Původní měření..... | 29 |
| 9.2. První optimalizace..... | 30 |
| 9.3. Druhá optimalizace..... | 31 |
| 9.4. Třetí optimalizace..... | 32 |
| 9.5. Analýza měření pro první vložku válce v hloubce 5 mm..... | 34 |
| 9.6. Analýza měření pro první vložku válce v hloubce 110 mm..... | 35 |
| 9.7. Analýza výsledků pro celou první vložku válce..... | 37 |
| 9.8. Zhodnocení výsledků měření..... | 38 |
| 10. Závěr:..... | 40 |
| 11. Zdroje..... | 42 |
| 12. Seznam obrázků..... | 44 |

1. Úvod

Trendem poslední doby, souvisejícím s nástupem firem na koncept výroby Průmysl 4.0, je zvyšující se podíl automatizace výrobních procesů, a s tím související nahrazování lidských zaměstnanců stroji a roboty. Důvodem k tomuto je mimo jiné eliminace člověka jakožto nejvíce chybujícího článku výroby. Dalším důvodem nahrazování člověka je zrychlení výroby. V důsledku zrychlení výroby je nutno také zrychlit a zefektivnit kontrolu výrobků. Tato kontrola probíhá na souřadnicových měřicích strojích, jakožto strojích pro rychlou a přesnou kontrolu výrobků a jejich rozměrových charakteristik. Zrychlení a zefektivnění kontroly se dá dále provést například pomocí úpravy strategie měření. Právě úpravě strategie měření se věnuje tato práce.

2. Základy souřadnicového měření a metrologie

Principem souřadnicového měření je nasnímání polohy každého měřeného bodu v prostoru vzhledem k definovanému počátku soustavy souřadnic se souřadnicemi [0; 0; 0]. Jednotlivé změřené body a útvary a jejich vzájemná poloha se pak vyhodnocuje pomocí analytické geometrie.

2.1. Souřadný systém

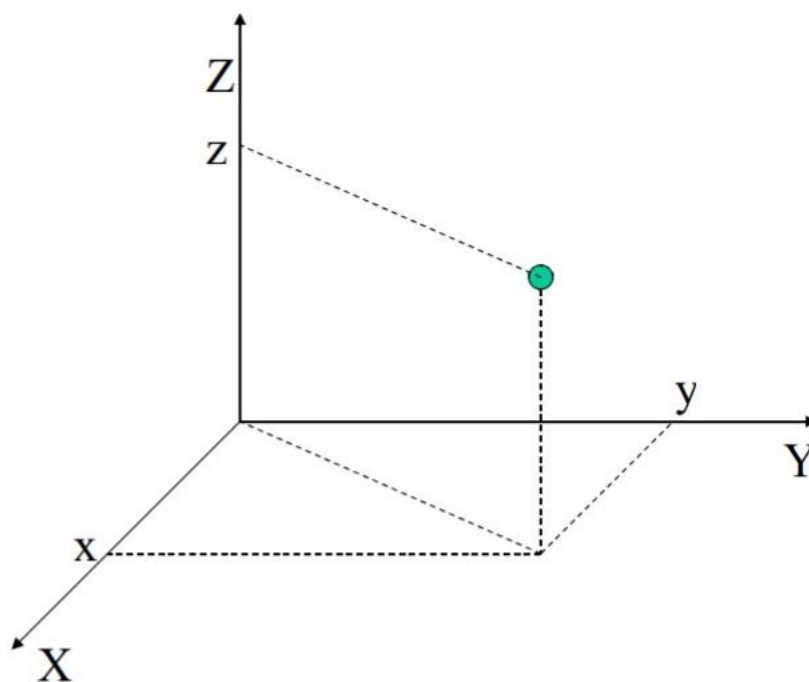
Existují tři hlavní soustavy souřadnic:

- 1) Kartézská soustava souřadnic
- 2) Sférická soustava souřadnic
- 3) Válcová soustava souřadnic

[10]

2.2. Kartézská soustava souřadnic

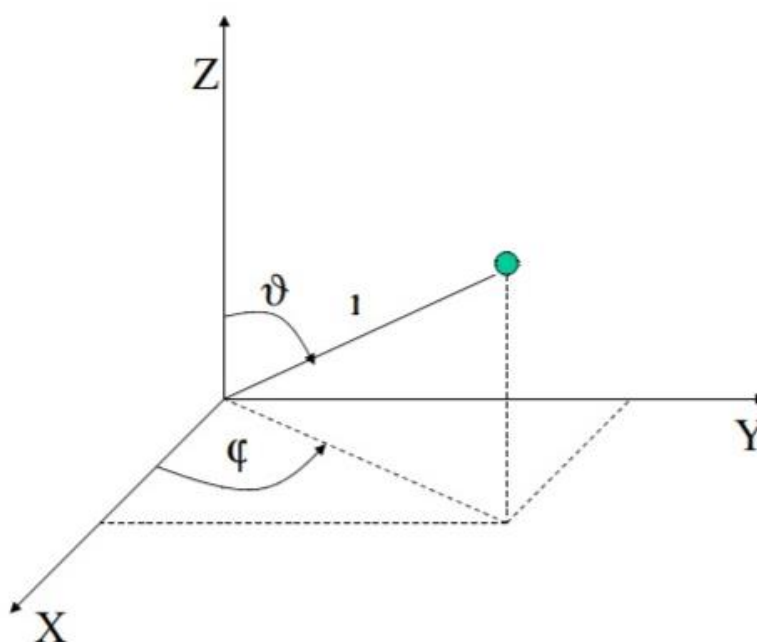
Jedná se o soustavu souřadnic, kde je každý bod definován třemi souřadnicemi – vzdáleností od počátku soustavy souřadnic na ose x, na ose y a na ose z. Tato soustava souřadnic se standardně používá v CMM strojích v laboratořích a ve výrobě. [10]



Obrázek 1: Kartézská soustava souřadnic [10]

2.3. Sférická soustava souřadnic

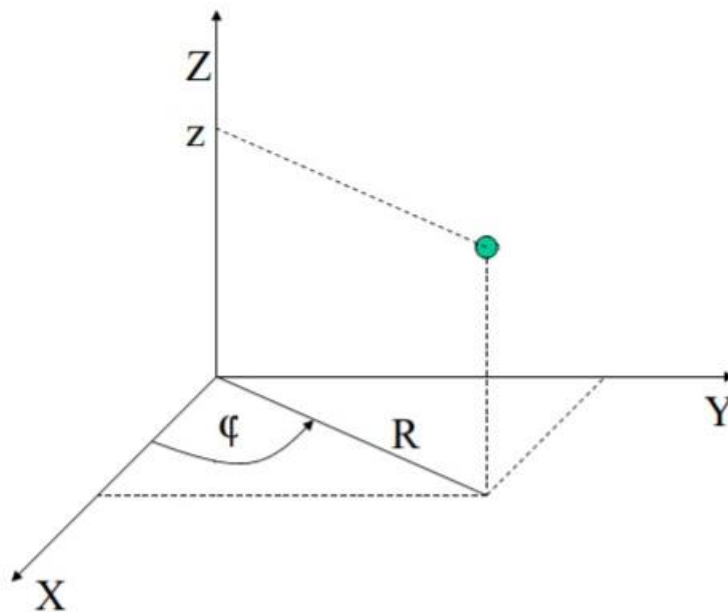
Jedná se o soustavu souřadnic, kde je každý bod definován vzdáleností bodu od soustavy souřadnic, dále úhlem mezi průvodičem a osou x a úhlem mezi průvodičem a osou z. Tato soustava souřadnic se běžně využívá u laser tracerů a laser trackerů. [10]



Obrázek 2: Sférická soustava souřadnic [10]

2.4. Válcová soustava souřadnic

Válcová (neboli cylindrická) soustava souřadnic je soustava souřadnic, kde je každý bod definován třemi souřadnicemi, kde první je vzdálenost bodu od osy z, dále souřadnice bodu na ose z a konečně úhlem průmětu průvodiče bodu do roviny xy od dané osy. Tato soustava souřadnic se nejčastěji využívá u ručních CMM. [10]



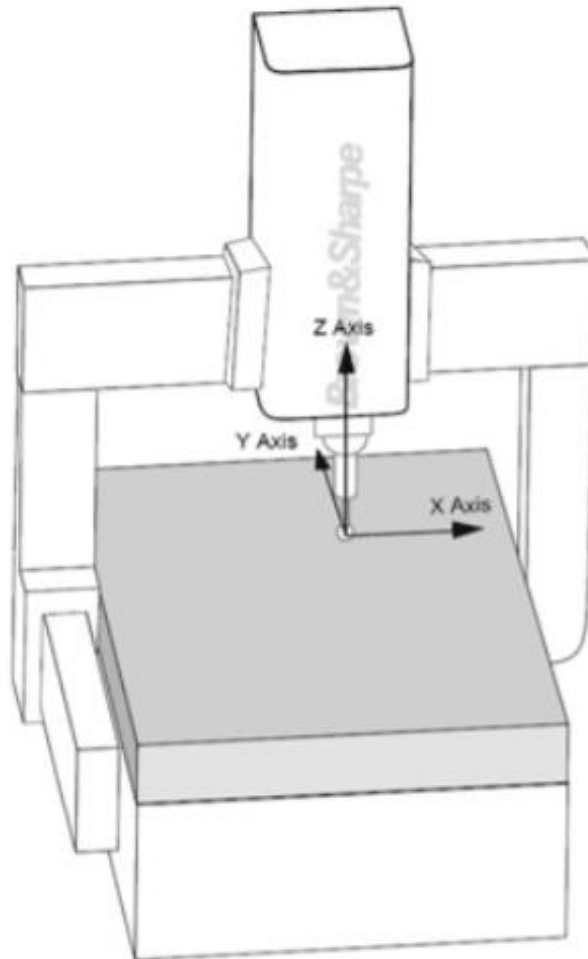
Obrázek 3: Válcová soustava souřadnic [10]

2.5. Souřadnicový systém stroje

V rámci souřadnicového měření existují dva hlavní postupy, jak měřit polohu jednotlivých bodů v prostoru. Jedná se o souřadnicový systém stroje a souřadnicový systém součásti.

V souřadnicovém systému stroje se měří poloha jednotlivých bodů vzhledem k definovanému počátku soustavy souřadnic na stroji, který je pevně umístěný.

Na stroji probíhá při pohledu zepředu osa X zleva doprava, osa Y zepředu dozadu a osa Z nahoru a dolů, svisle, kolmo k ostatním dvěma. [5]

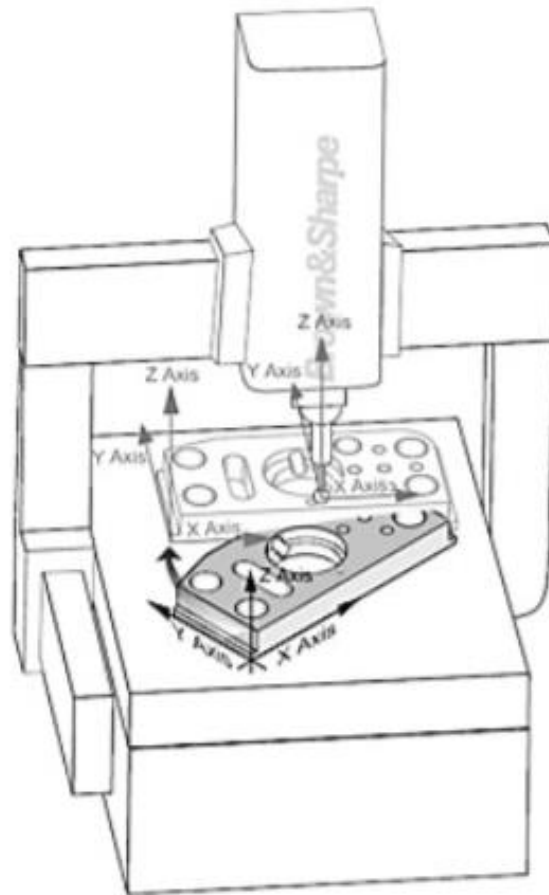


Obrázek 4: Souřadnicový systém stroje [5]

2.6. Souřadnicový systém součásti

Druhý souřadný systém se nazývá souřadnicový systém součásti, kde se tři osy vztahují k vztažným bodům nebo vlastnosti obrobku.

Před zavedením počítačového softwaru pro koordinaci měření musely být části fyzicky vyrovnány paralelně k osám stroje tak, aby systémy souřadnic stroje a součásti byly vzájemně rovnoběžné. Toto bylo velmi časově náročné a málo přesné. Když byla část kulatá nebo konturovaná, spíše než čtvercová nebo obdélníkový, měřicí úkol byl téměř nemožný [5]



Obrázek 5: Souřadnicový systém součásti [5]

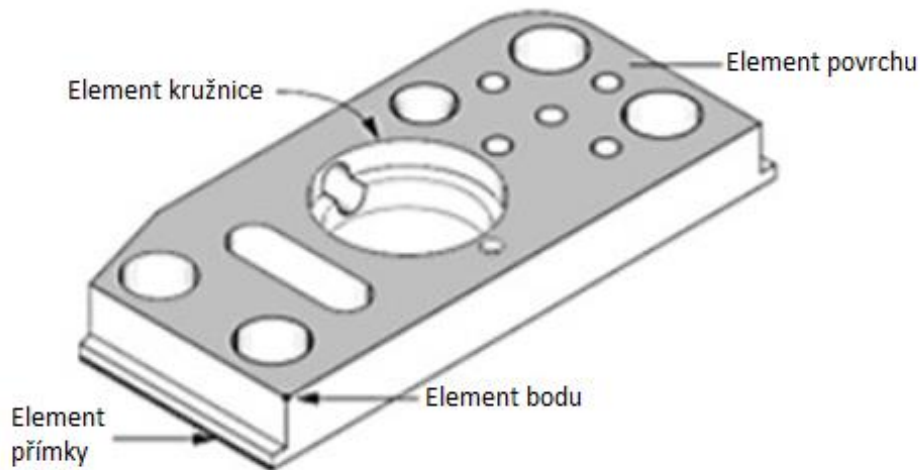
2.7. Vyrovnání součásti

Vyrovnání je nezbytný úkon, který je třeba provést, jelikož slouží k definici referenčních elementů výrobku. Když tyto referenční elementy definujeme, díl tím plně definujeme v prostoru, matematicky jej propojíme se souřadným systémem stroje a odebereme mu tím 6 stupňů volnosti.

Existuje několik postupů vyrovnání součásti, nejběžnější je tzv. metoda „3-2-1“, více v kapitole 6.5. [5]

2.8. Element a charakteristika

V metrologii pojem element označuje prvek na obrobku, jako je díra, povrch, nebo štěrbina. U těchto elementů se poté vypočítává charakteristika, což bývají geometrické údaje těchto elementů, například údaje o poloze, tvaru, případně vzájemné vzdálenosti elementů.



Obrázek 6: Elementy [5]

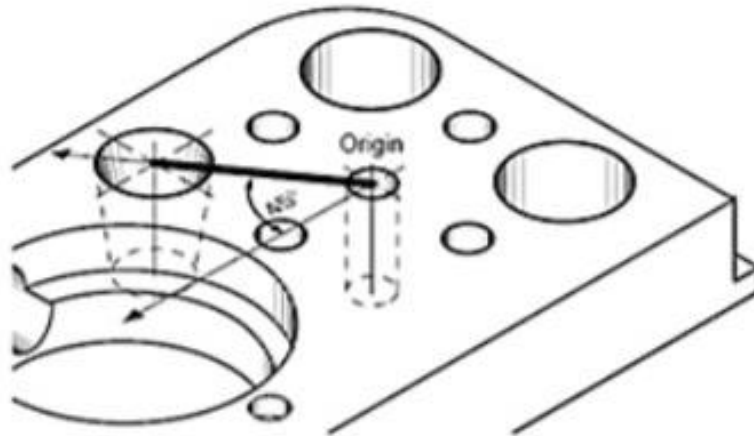
2.9. Překlad dat a rotace souřadného systému

Předpokládejme, že potřebujeme vědět, jak daleko je určitá vlastnost obrobku od jiné funkce. Vezměme například vzdálenost středů každého ze čtyř otvorů od středového otvoru. K tomu bychom nejprve změřili středovou díru, přeložili počátek do středu této díry a poté změřili každou ze čtyř okolních děr.

Přesunutí počátečního bodu (počátku) měření z jeho současné polohy na jiné místo na obrobku se nazývá překlad. Souřadnicový měřicí stroj to dělá matematicky, když od něj požadujeme rutinní zarovnání pro geometrické měření. Například v rámci softwaru Calypso je toto realizováno pomocí pomocných souřadných systémů s přesně daným matematickým vztahem k základnímu souřadnému systému měřeného dílu.

Ne všechny vztažené body jsou v pravém úhlu k ostatním vztažným bodům. Abychom mohli měřit vzdálenost mezi dvěma prvky, musíme původní souřadný systém pootočit a měření provedeme v novém, pootočeném.

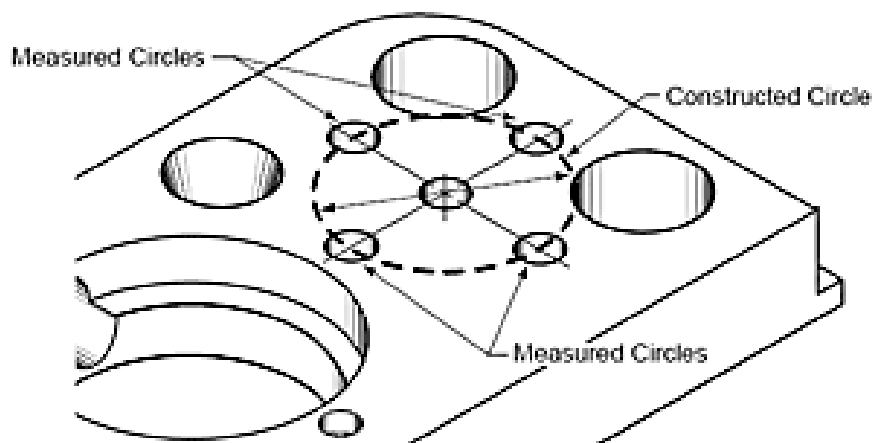
Konkrétně si tento postup rotace ukážeme pro obrobek na obrázku níže. Vzdálenost mezi dvěma otvory na obrobku lze měřit, jakmile se původní počátek přeloží na menší díru a souřadný systém součásti je zároveň matematicky otočen o 45° . Nyní oba otvory leží podél nové osy Y a vzdálenost může být vypočítána automaticky. [5]



Obrázek 7: Rotace souřadného systému [5]

2.10. Změřené a vytvořené prvky

Jaký je rozdíl mezi změřenými a vytvořenými prvky? Převážná většina obrobků je tvořena z jednoduchých geometrických prvků vzniklých obráběním či tvářením. Tyto primární prvky (roviny, hrany, válce, koule, kužely atd.) se dají změřit snadno. Když CMM dokáže změřit tyto prvky napřímo, dotykem povrchů, které tvoří prvek, sondou, tyto prvky pak nazýváme prvky změřenými. Ostatní prvky, jako jsou vzdálenost, symetrie, průsečíky, úhly atd. nemůžou být změřeny přímo, ale musí být zkonstruovány matematicky na základě naměřených dat. Tyto prvky pak nazýváme prvky vytvořenými. Například na obrázku níže je vytvořen velký kruh matematicky na základě naměření středů čtyř změřených kruhů. [5]



Obrázek 8: Změřené a vytvořené prvky [5]

Využití GR&R analýzy rozměrové kontroly k optimalizaci plánů měření CMM strojů

2.11. Objemová kompenzace

Objemová kompenzace (nebo také teplotní kompenzace) je děj, kdy jsou naměřené rozměry korigovány pomocí matematických modelů na základě znalosti teploty dílu a koeficientu teplotní roztažnosti materiálu, z něž je díl vyroben. V rámci měření toto probíhá tak, že stroj je vybaven teplotními čidly pro snímání teploty dílu a v rámci programu v počítači se provede korekce dat na základě znalosti teploty dílu a zadaného koeficientu teplotní roztažnosti. Měření musí být teplotně stabilní, nesmí se tedy během měření teplota měnit, jelikož měření teploty dílu probíhá pouze na začátku měření a při změně teploty by pak byla korekce dat nepřesná. [5]

3. Druhy souřadnicových měřících strojů

K měření je možno použít několik druhů souřadnicových měřících strojů, některé z nich, nejpoužívanější, uvedeme v této práci.

3.1. Portálová konstrukce

Souřadnicové měřící stroje s portálovou konstrukcí mohou být dvojího druhu. Prvním druhem je portálový souřadnicový měřící stroj s pohyblivým se „mostem“, druhým druhem je portálový souřadnicový měřící stroj s fixním „mostem“. [1] [2]

3.1.1. Souřadnicový měřící stroj s pohyblivým se mostem

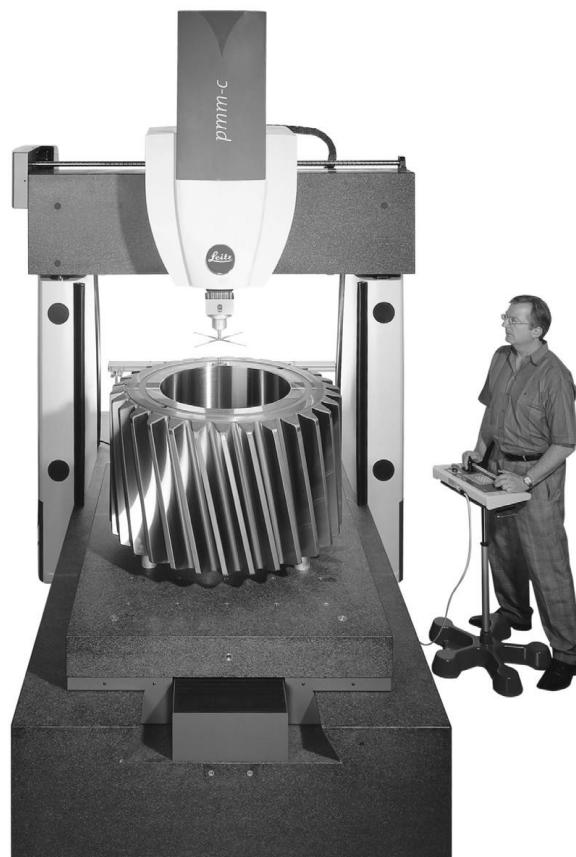
Tento druh stroje je nejvíce používaným a široce zastoupeným druhem CMM. Má pevný stůl na měřený obrobek a pohyblivý most. Výhoda strojů portálové konstrukce oproti strojům konstrukce konzolové je to, že efekt natačení se (ohýbání) může být značně zredukován díky přítomnosti dvou podpěrných mostů. Konstrukce souřadnicového měřícího stroje s pohyblivým mostem je využitelná pro malé až střední rozsahy měření, s relativně malými nejistotami. Hlavní nevýhodou této konstrukce je, že výsledek měření ovlivní fenomén krokování/natačení se, protože vzhledem k pohybu dvou sloupů či nohou odlišnou rychlostí může vzniknout zkroucení mostu. Toto ovlivní přesnost měření součástí na různých místech stolu měřícího stroje. [1]

3.1.2. Souřadnicový měřící stroj s nepohyblivým mostem

Ve strojích této konstrukce je most pevně připojen k loži stroje. Stůl, na kterém je obrobek, se může pohybovat ve směru jedné osy (obrázek níže). Tato konstrukce

Využití GR&R analýzy rozměrové kontroly k optimalizaci plánů měření CMM strojů

eliminuje problém s fenoménem krokování, který byl u předchozí konstrukce. Většina nejpřesnějších měřících strojů nabízených na trhu je právě tohoto druhu. Rychlost měření na tomto stroji je menší, protože stroj musí hýbat s celým svým těžkým stolem a obrobkem na něm. Jistým omezením také může být případná nižší hodnota maximální povolené hmotnosti obrobku, který se na stroji měří. Největší výhodou souřadnicových měřících strojů s nepohyblivým mostem je velmi pevná a velmi tuhá konstrukce stroje. Tím, že se stůl pohybuje uprostřed a měřič je také umístěn uprostřed, se významně redukuje Abbého chyba při pohybu stolu. Nevýhodou tohoto druhu stroje je potřeba velkého místa pro pohyb dlouhého stolu, s čehož vyplývá poměrně velký půdorys stroje. [1]



Obrázek 9: Souřadnicový měřící stroj portálové konstrukce [1]

3.2. Sloupová konstrukce

Tato konstrukce má pohyblivé konzolové rameno, které podporuje pohyb nosiče dovnitř a ven. Nosič podpírá rameno sondy pro vertikální pohyb. Měřená součást je umístěna na nepohyblivém stole. Jelikož stůl nemá ložisková vedení, můžou na něj být položeny i relativně těžké součásti, aniž by to ovlivnilo přesnost měření. Jelikož má tento stroj tři

Využití GR&R analýzy rozměrové kontroly k optimalizaci plánů měření CMM strojů

strany otevřené, poskytuje dobrý přístup k pracovnímu místu, ale zakládání stroje díly shora není možné. Nevýhodou těchto strojů je ohýbání, způsobené samotnou sloupovou konstrukcí stroje. Tento problém je většinou firm řešen (korigován) pomocí softwarových korekcí chyb. Sloupový design nabízí dlouhý stůl s relativně malými měřicími rozsahy ve zbývajících dvou osách, proto je zvláště vhodný pro měření dlouhých, tenkých dílů. [1][2][3][4]



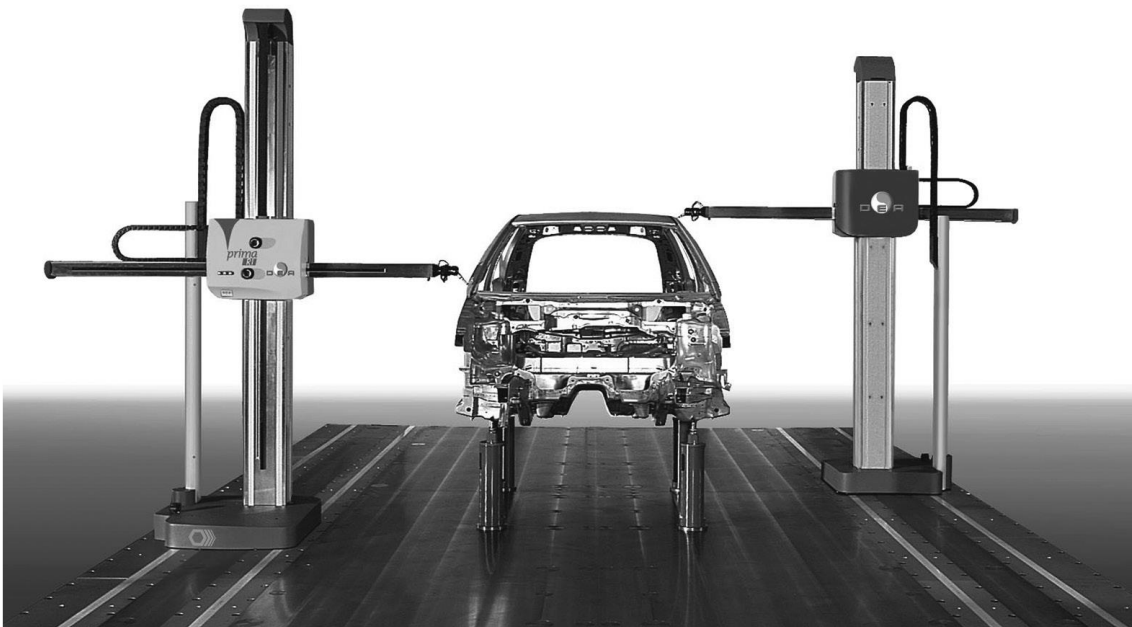
Obrázek 10: Souřadnicový měřicí stroj sloupové konstrukce [1]

3.3. Souřadnicový měřicí stroj s horizontálním ramenem

Stroje s horizontálním ramenem jsou ideální pro měření karoserií automobilů nebo jiných velkých součástí. Stroje s horizontálním ramenem mohou být například s pohyblivým stolem, s pohyblivým ramenem a s dvěma rameny. Toto rozložení umožňuje pohyb stolu podél jedné osy a pohyb sloupů s rameny podél ostatních os. Jako u jiných měřicích strojů s pohyblivým stolem, i zde se rychlost měření odvíjí od velikosti

Využití GR&R analýzy rozměrové kontroly k optimalizaci plánů měření CMM strojů

a hmotnosti měřené součásti. Kvůli pohybujícímu se ramenu a s tím související nižší dynamické tuhosti znamená konzolový design poměrně velké Abbeho chyby. Systém s dvěma rameny se skládá ze dvou horizontálních ramen, která se pohybují zrcadlově a měří současně ve stejných místech na dvou stranách měřené součásti. Hlavní výhodou měřících strojů tohoto typu je výborný přístup ke všem stranám součásti a poměrně vysoká rychlost měření. Nevýhodou je naopak omezená přesnost. Tyto stroje mohou mít velké měřicí oblasti, přičemž jedna osa je výrazně delší než ostatní. Stroje s horizontálním ramenem nabízí schopnost měřit podél osy do velikosti například až 25000 mm. [1][2][3]



Obrázek 11: Souřadnicový měřicí stroj s horizontálními rameny [1]

3.4. Souřadnicový měřicí stroj s mostovou konstrukcí

Pro velmi velké součásti, které vyžadují měření v prostorách 10 m³ či více a relativně velké tolerance, je nejlepší využít souřadnicové měřicí stroje s mostovou konstrukcí. Základ stroje je navržen jako masivní struktura, která omezuje průhyby, které by způsobily zkreslení struktury měřeného výrobku. Také je nutno zajistit, aby hmotnost výrobku nezapříčinila deformaci základny stroje a tím neovlivnila výsledky měření. Kvůli zabránění vzniku natočení cestujícího měřicího rámu se používají systémy s dvěma pohony. Pro korekci chyb způsobených při nakládání měřené součásti a změnou teploty se používá softwarových kompenzací. Navzdory velkým rozměrům

Využití GR&R analýzy rozměrové kontroly k optimalizaci plánů měření CMM strojů konstrukce (například $25000 \times 6000 \times 4000$ mm) je výhodou souřadnicového měřicího stroje s mostovou konstrukcí snadný přístup operátora ke všem součástem v operačním prostoru stroje. Jelikož se na stroji hýbe jen měřicí rám, který má poměrně nízkou hmotnost, je možno běžně dosahovat středí přesnosti i u velkých součástí. [1][4]



Obrázek 12: Souřadnicový měřicí stroj mostové konstrukce [1]

4. Dotykové snímací systémy

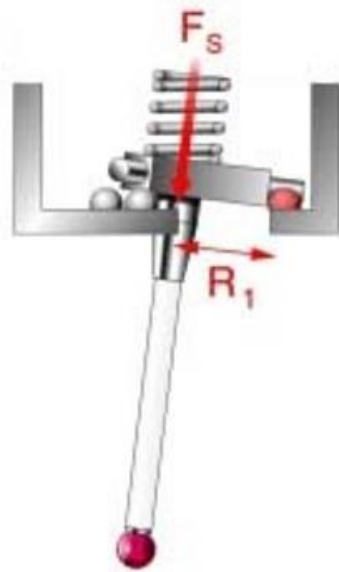
Dotykové snímací systémy fungují na principu přenesení souřadnice bodu při dotyku skenovací sondy s povrchem skenované součásti. Je několik typů dotykových snímacích systémů, respektive snímacích dotykových senzorů:

- Spínací dotykové systémy
- Indexovatelné snímací systémy
- Aktivní snímací systémy

4.1. Spínací dotykové systémy

Principem fungování těchto dotykových systémů je soustava tří bodů (viz obrázek 15). Snímací koule je upevněna na přímé sondě a tato soustava je uložena na trojbodovém uložení. V tomto trojbodovém rozložení funguje každý bod jako spínač. Modernější

Využití GR&R analýzy rozměrové kontroly k optimalizaci plánů měření CMM strojů systémy používají k získání souřadnic bodů ze snímací koule elektrické převodníky, například roztažné měřicí pásky nebo piezoelektrické prvky. Nevýhodou těchto snímacích systémů je nutnost najetí měřicí koule k měřenému bodu danou snímací rychlostí (většinou 5 mm/s). Tímto se může měření značně zpomalovat. Další nevýhodou tohoto je prohnutí snímačů v důsledku působení rozdílných snímacích sil v závislosti na směru snímání. Kvůli těmto nevýhodám tento typ snímacího systému v současné době z měřících center ustupuje. [8]



Obrázek 13: Spínací sonda [8]

4.2. Indexovatelné snímací systémy

Indexovatelné neboli polohovatelné snímače byly vyvinuty na základě rostoucí složitosti výrobků a s tím rostoucími požadavky na měření. Možnost polohování snímací sondy umožňuje zjednodušit konfigurace snímačů a tím ušetřit čas při jejich kvalifikaci. Nevýhodami tohoto druhu snímacího systému je jednak horší opakovatelnost měření v porovnání s pevnými systémy, jednak nemožnost zavěšení doteků větší hmotnosti (více než desítky gramů). [8]

4.3. Aktivní snímací systémy

Aktivní snímací systémy (nebo také měřicí snímací systémy) byly vyvinuty, protože průmysl vyžadoval stále rychlejší snímání bodů, jejich větší počet a lepší opakovatelnost měření. Tyto nároky aktivní snímací systém splňuje, proto je dnes

Využití GR&R analýzy rozměrové kontroly k optimalizaci plánů měření CMM strojů

nejvíce zastoupeným druhem snímacího systému. U většiny pevných skenovacích systémů je možné nastavit snímací sílu na základě používaného doteku a většina je také vybavena ochranou proti kolizi. Na rozdíl od indexovatelných snímacích systémů může být na snímací systém tohoto druhu zavěšena zátěž i přes 500 gramů, tudíž mohou být zavěšeny i jiné konfigurace než jen jednoduché doteky.

Aktivní snímací systémy si dokážou samy regulovat přítlačnou sílu. V měřící hlavě jsou tři paralelogramy obsahující cívky, jejichž úkolem je předvychylovat dotek pro sejmutí bodu. Proud v těchto cívkách je roven měřící dotekové síle, tím jsou odstraněny nežádoucí dynamické účinky. [8]



Obrázek 14: Aktivní snímací systém firmy Zeiss [16]

5. Měřicí sondy

5.1. Typy měřících sond

Dotykové měřicí sondy mohou být mnoha typů, níže jsou uvedené některé z nich:

- **Kuličkové přímé sondy**

Nejběžnější typ sondy, využívá se kvůli své všestrannosti.



Obrázek 15: Přímá sonda [9]

- **Diskové sondy**

Tento typ sondy je vyroben z části koule a často se používá k měření zahloubení a drážek.



Obrázek 16: Disková sonda [9]

- **Hvězdicovité sondy**

Jedná se o několik sond umístěných do tvaru hvězdice kvůli maximální využitelnosti/flexibilitě. Do hvězdicovitého rozložení se může nakombinovat libovolný počet sond. Běžně se tento typ sond používá pro měření rotačních ozubených součástí, jako jsou například ozubená kola.



Obrázek 17: Hvězdicovitá sonda [9]

- **Válečkové sondy**

Válečkové sondy mají, oproti ostatním sondám, větší měřicí povrch a používají se na spolehlivé změření tenkostěnných částí.



Obrázek 18: Válečková sonda [9]

- **Duté kuličkové sondy**

Tento typ sondy se využívá na měření hlubokých děr a drsných povrchů. Vyprázdněním koule se zmenší hmotnost, oproti plné kouli.

[9]



Obrázek 19: Dutá kuličková sonda [9]

5.2. Materiály používané na sondy

Používá se několik materiálů, z kterých se sondy vyrábí, níže jsou uvedené některé z nich:

- **Rubín**

Jedná se o nejrozšířenější materiál pro dotykové sondy díky své dostupnosti, ceně a kvalitě. Je to standardní materiál pro většinu aplikací a je extrémně tvrdý, což však může v kombinaci s některými materiály způsobovat hromadění materiálu, například s hliníkem.

- **Nitrid křemíku**

Nitrid křemíku má podobné vlastnosti jako rubín, ale nemá sklon k hromadění materiálu při měření hliníkových částí. Sondy z tohoto materiálu jsou odolnější než rubínové sondy.

- **Keramika**

Keramika je primárně používána na dlouhé či těžké sondy a na diskové sondy. Vzhledem k její odolnosti vůči opotřebení se keramika využívá na měření extrémně drsných povrchů, jako je litina.

- **Diamant**

Diamant je nejtvrdší dostupný materiál a je ideální na měření hliníkových částí, protože nemá sklon k hromadění materiálu. Diamantové sondy mohou být masivní nebo pouze potahy a mají maximální odolnost vůči opotřebení.

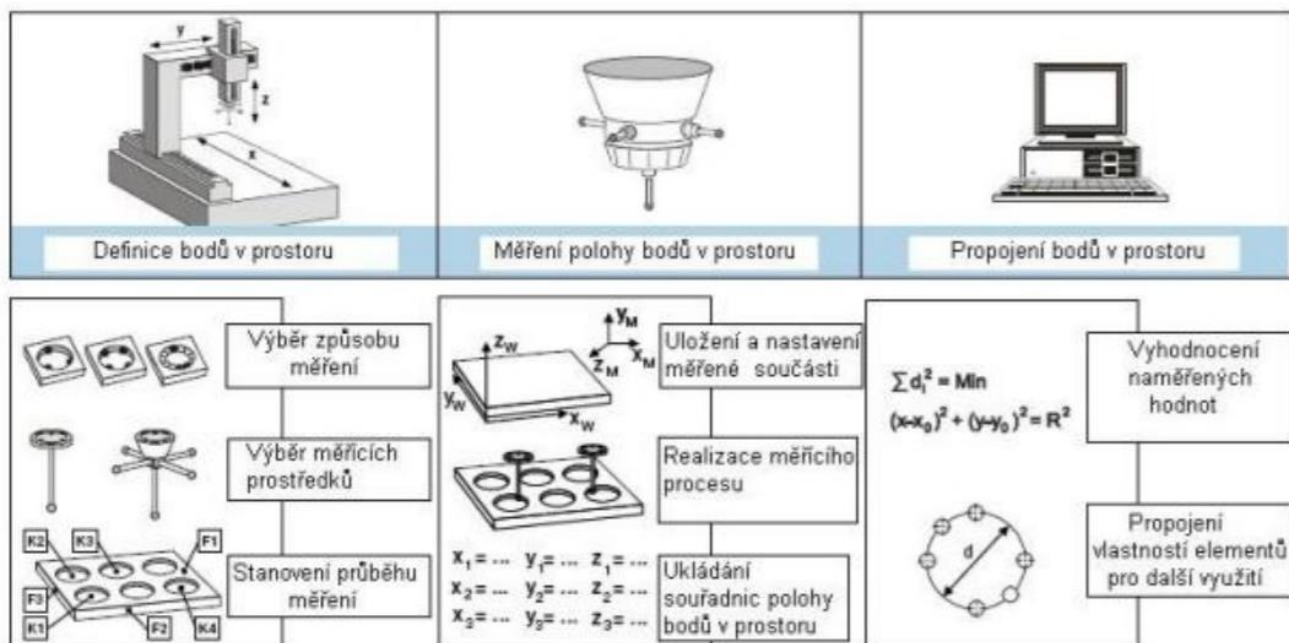
[9]

6. Postup měření

Měření má určitý postup, který se skládá z několika kroků:

- Analýza výkresové dokumentace
- Snímací systém
- Upnutí součásti
- Kalibrace snímacího systému
- Vyrovnání součásti
- Extrakce bodů
- Vyhodnocení

[11]



Obrázek 20: Princip měření pomocí CMM [2]

6.1. Analýza výkresové dokumentace

V této přípravné fázi měření probíhá analýza součásti a výběr vlastností, které budeme měřit a kontrolovat. Analyzují se rozměry výrobku a dále geometrické tolerance (GPS = Geometrical Product Specifications) z obrázku níže. [11]

| Geometrické tolerance | | Značka |
|-----------------------|--------------------------|--------|
| Tvaru | Přímosti | — |
| | Rovinnosti | ▭ |
| | Kruhovitosti | ○ |
| | Válcovitosti | ⊘ |
| | Tvaru profilu | ⌒ |
| | Tvaru plochy | ⌒ |
| Směru | Rovnoběžnosti | // |
| | Kolmosti | ⊥ |
| | Sklonu | ∠ |
| Polohy | Umístění | ⊕ |
| | Soustřednosti a sousostí | ⊙ |
| | Souměrnosti | ≡ |
| Házení | Kruhového | ↗ |
| | Celkového | ↘ |

Obrázek 21: GPS [11]

6.2. Snímací systém

Je třeba si stanovit, jaký druh snímacího systému budeme k měření dat používat. Běžně používané snímací systémy jsou popsány v této práci výše, nebudou tedy dále rozebírány. Pro další popis měření na souřadnicovém měřicím stroji byl zvolen dotykový snímací systém.

6.3. Upnutí součásti

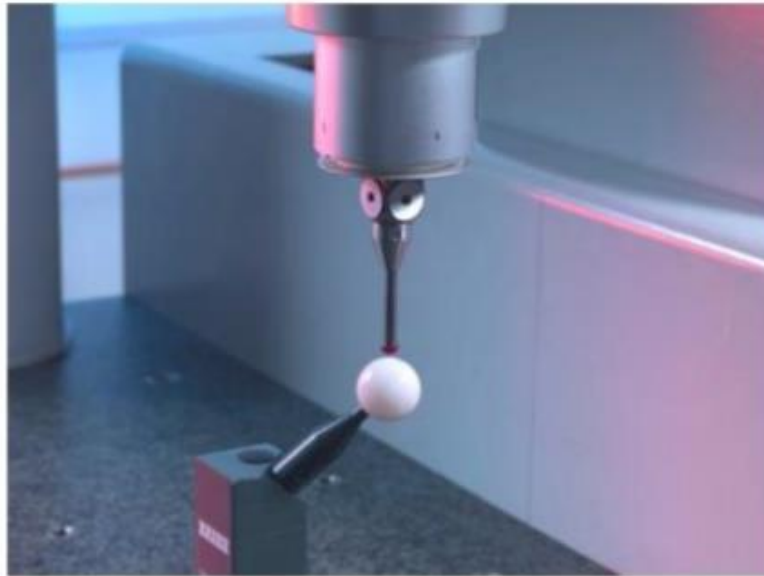
Při upínání součásti je nejdůležitější zajistit, aby byly všechny měřené prvky měřitelné (aby k nim měl měřicí stroj přístup). Upnutí součásti musí být pevné, protože případný pohyb součásti by hrubě ovlivnil výsledky. Při výběru druhu upnutí je třeba zvažovat sériovost zakázky. Zda pro upnutí používat stavebnicové upínací přípravky, nebo vyrobit jednoúčelový přípravek pro upnutí.

Jednou z možností je upnutí součásti na pracovní desku CMM s otvory pomocí upínacích přípravků. Jako příklady můžeme uvést upínací stavebnice, upínací desky, nebo upínací elementy. [12]

Další možností je vyrobit účelově upínací přípravek pro konkrétní měřenou součást. Výhodami tohoto druhu upnutí jsou nízká časová náročnost upnutí a vysoká tuhost upnutí. Nevýhodou tohoto druhu upnutí je naopak vyšší cena jednorázového upínacího prostředku. Při upínání do tohoto prostředku je třeba na korektní umístění součásti, dále na to, aby byl přípravek navrhnout tak, aby byla všechna měřená místa přístupná. [11]

6.4. Kalibrace snímacího systému

Kalibrace snímačů probíhá zaměřením polohy kalibrační koule referenčním snímačem a následně samotnými kalibrovanými snímači. Z nasnímaných výsledků jsou zjištěny hodnoty korekce snímače.



Obrázek 22: Zaměření kalibrační koule referenčním snímačem [13]

Pojem kalibrační koule označuje kouli známého průměru spojenou s měřícím stolem. Pro určení polohy této koule se použije referenční snímač. Průměr rubínové kuličky na referenčním snímači bývá běžně 8 mm. Kalibrační koule se snímá vždy, když dojde ke změně její polohy, když stroj najíždí do referenční polohy nebo když dojde ke změně teploty od posledního určení její polohy. Kalibrační koule jsou vyráběny ve velikostech 10–50 mm v průměru. Nejčastěji bývají z keramiky, která má nízkou tepelnou roztažnost a vysokou pevnost a tvrdost. [11]

6.5. Vyrovnání součásti

Pro stanovení souřadného systému součásti se používá pojem vyrovnání. Existuje mnoho způsobů, jak lze součást vyrovnat, pro ukázkou byl zvolen způsob používaný v programu Calypso.

Aby mohla být určena poloha součásti, souřadný systém musí být definován ve všech šesti stupních volnosti. 3 z těchto stupňů jsou stupně rotační (těleso může rotovat kolem tří os x , y , z) a zbylé 3 stupně jsou stupně translační (těleso se může posunovat ve směru os x , y a z). [14]

Nejčastěji probíhá definice souřadného systému postupem, kdy se nejprve změří na součásti jeden geometrický element (trojrozměrný, například válec, rovina nebo kužel) pro určení hlavního směru prostorové osy. Díky tomuto určení hlavního směru se

Využití GR&R analýzy rozměrové kontroly k optimalizaci plánů měření CMM strojů

součásti odeberou 2 stupně volnosti – dva rotační stupně. Abychom odebrali zbylý rotační stupeň volnosti, změří se na součásti dvojrozměrný prvek, například přímka. Aby byly odebrány 3 translační stupně volnosti, určí se počátek soustavy souřadnic.

Dalšími způsoby stanovení souřadného systému jsou například metoda RPS a její 2 varianty: RPS 321 (nevhodné pro volné tvary) a RPS volný tvar (vhodné pro volné tvary); metoda P6 (vhodné zejména pro vyrovnání trubek) a metoda 3D připásování (početní vyrovnání součástí, používá se pro volné tvary). [11]

6.6. Extrakce bodů

Při souřadnicovém měření můžeme měřit dva druhy součástí. Jedním druhem jsou součásti složené z obecných tvarových ploch, druhý druh jsou součásti tvořené geometrickými elementy, například válci, rovinami, kružnicemi, ... Počítačový software, jako například program Calypso, dokáže na základě změření několika bodů určit, o jaký geometrický element se jedná. [11]

| Element | Minimální počet snímání: |
|-----------------|---------------------------------|
| bod | 1 |
| 2D přímka | 2 |
| rovina | 3 |
| bod symetrie | 2 |
| kružnice | 3 |
| válec | 5 |
| kužel | 6 |
| koule | 4 |
| torus | 7 |
| rovina symetrie | 4 |
| elipsa | 5 |
| obdélník | 5 |
| podélný otvor | 5 |

Obrázek 23: Minimum potřebných bodů pro nasnímání elementů [14]

Využití GR&R analýzy rozměrové kontroly k optimalizaci plánů měření CMM strojů

6.7. Vyhodnocení

Po naměření bodů a dat probíhá pomocí porovnání s modelem součásti vyhodnocení měření. Software si z naměřených bodů vytvoří pomocí analytické geometrie model, na kterém hodnotí geometrické a rozměrové tolerance. [11]

7. Strategie měření

Strategie měření ovlivňuje jak kvalitu naměřených dat, tak trvání měřicího programu. Součástí strategie měření jsou tyto parametry:

- Délka a tvar dráhy snímače
- Rozestup mezi jednotlivými body (krok)
- Rychlost měření
- Filtrace a eliminace bodů
- Vyhodnocení bodů

Vhodné nastavení těchto parametrů ovlivňuje opakovatelnost a způsobilost měření. Největší vliv na dobu trvání celého cyklu měření mají první tři parametry, zejména pak rychlost měření, což je také cílem této práce, zoptimalizovat měřicí program pomocí úpravy strategie měření, konkrétně rychlosti snímání bodů, při dosažení stejné či lepší způsobilosti měření. [8]

8. Způsobilost měření

Způsobilost procesu byla posuzována dle dvou koeficientů způsobilosti C_g a C_{gk} .

Tato metoda posuzuje přesnost měření z hlediska opakovatelnosti a strannosti.

Využívá se především u zařízení, kde člověk neovlivňuje výsledek, tedy například také u souřadnicových měřících strojů.

Koeficient způsobilosti měřidla C_g se vypočítá dle následujícího vztahu:

$$C_g = \frac{0,2 * \Delta}{6 * s},$$

kde Δ je šířka tolerančního pole měřené vlastnosti a s je směrodatná odchylka měření.

Koeficient způsobilosti procesu měření C_{gk} se vypočítá dle následujícího vztahu:

Využití GR&R analýzy rozměrové kontroly k optimalizaci plánů měření CMM strojů

$$C_{gk} = \min \left(\frac{\bar{x} - (T - 0,1\Delta)}{3s}, \frac{(T + 0,1\Delta) - \bar{x}}{3s} \right),$$

kde Δ je šířka tolerančního pole měřené vlastnosti, T je referenční hodnota měřeného rozměru změřená o jeden řád přesnějším strojem, s je směrodatná odchylka měření a \bar{x} je aritmetický průměr naměřených hodnot.

Koeficient C_g posuzuje pouze opakovatelnost měření, koeficient C_{gk} bere v potaz také strannost měření. Proces měření je způsobilý, jsou-li oba koeficienty C_g i C_{gk} větší než 1,33.

Měření pomocí koeficientů C_g a C_{gk} určuje, zda výsledek leží s pravděpodobností 99,73 % ve zvoleném pásmu tolerance měřidla, tedy ve 20% šířky tolerance rozměru, který se měří. [15] [17]

9. Měření vložek válců na bloku motoru

Ve spolupráci s firmou Škoda auto byla cílem práce stanovena optimalizace měřícího programu na blok motoru, konkrétně na přeměřování třech vložek válců. Cílem práce bylo optimalizovat proces měření z hlediska úspory času, tedy najít optimální rychlost měření tak, aby byla co největší, ale proces měření byl pořád způsobilý.

V rámci měření na stroji jsou měřeny kružnice na vložkách válců v hloubce 5, 7, 9, 17, 24, 39, 70, 110 a 125 mm. Dále jsou měřeny 4 přímký po celé délce postupně v úhlech 0° , 180° , 270° a 90° na pomyslném řezu/kružnici vložky válce.

Vložky mají výkresový rozměr 74,5 mm na průměru s tolerancemi 0,005 mm a 0,015 mm. Hloubka válce je pak na výkresu předepsána 130 mm.

Vypočtenými prvky jsou: kruhovitosti v každé hloubce, přímosti jakožto charakteristika každé měřené přímký, rovnoběžnosti přímek $180^\circ - 0^\circ$ a přímek $90^\circ - 270^\circ$ a válcovitosti.

Měřeny jsou celkem 3 vložky válců, tudíž každá z výše popsaných sad měření probíhala celkem třikrát. Měření probíhala celkem desetkrát v rámci každé optimalizace a původního plánu měření. [

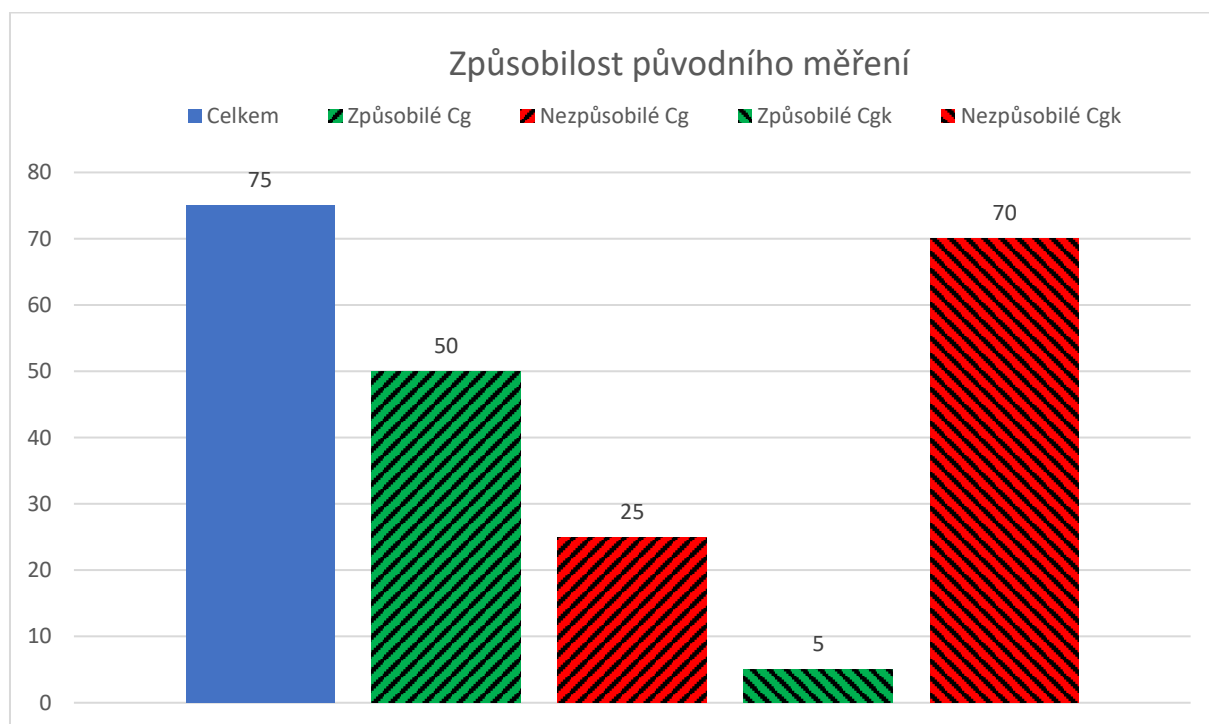
9.1. Původní měření

U původního plánu měření (ještě před optimalizací) byly nastaveny rychlosti pro měření kružnic 9 mm/s a pro měření přímků na 8 mm/s.

Po výpočtu koeficientů C_g a C_{gk} pro všech 75 údajů vyšly výsledky takto:

| | Vyhovující | Nevyhovující |
|---------------|------------|--------------|
| C_g | 50 | 25 |
| C_{gk} | 5 | 70 |
| Měření | 5 | 70 |
| Podíl z celku | 6,67 % | 93,33 % |

Tabulka 1: Výsledky koeficientů C_g a C_{gk} pro původní měření



Graf 1: Způsobilost původního měření

Z výsledků můžeme vyzorovat, že proces měření je nezpůsobilý.

Měření trvalo průměrně 25 minut 48 sekund.

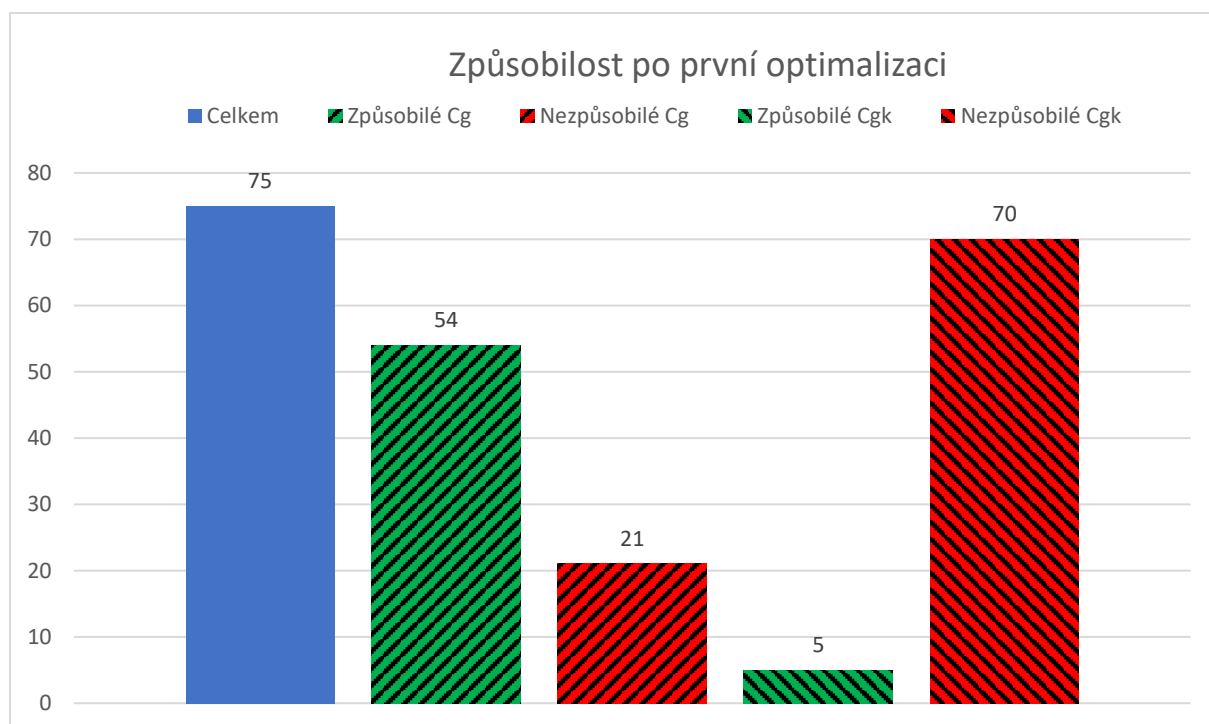
9.2. První optimalizace

Za účelem optimalizace měření pomocí zvýšení rychlosti měření byly upraveny (zvýšeny) rychlosti pro měření. Byl proveden experiment na kalibračních kroužcích, kdy byly zjištěny maximální rychlosti skenování pro různé průměry. Na základě tohoto experimentu byla rychlost pro měření kružnic na 26 mm/s a pro měření přímek na 16 mm/s. [18]

Po výpočtu koeficientů C_g a C_{gk} pro všech 75 údajů vyšly výsledky takto:

| | Vyhovující | Nevyhovující |
|---------------|------------|--------------|
| C_g | 54 | 21 |
| C_{gk} | 5 | 70 |
| Měření | 5 | 70 |
| Podíl z celku | 6,67 % | 93,33 % |

Tabulka 2: Výsledky koeficientů C_g a C_{gk} po první optimalizaci



Graf 2: Způsobilost po první optimalizaci

Z výsledků můžeme vyzorovat, že proces měření je nezpůsobilý.

Využití GR&R analýzy rozměrové kontroly k optimalizaci plánů měření CMM strojů

Měření trvalo průměrně 16 minut a 10 sekund. Můžeme tedy vidět úsporu času přes 9 a půl minuty (578 sekund), což při všech deseti měřeních dělá úsporu přes 96 minut, avšak podíl nevyhovujících měření je stále stejný.

9.3. Druhá optimalizace

Vzhledem k dosaženým výsledkům po přeměření původního plánu a po první optimalizaci byl cíl optimalizace přehodnocen místo úspory času na dosažení alespoň způsobilosti měření.

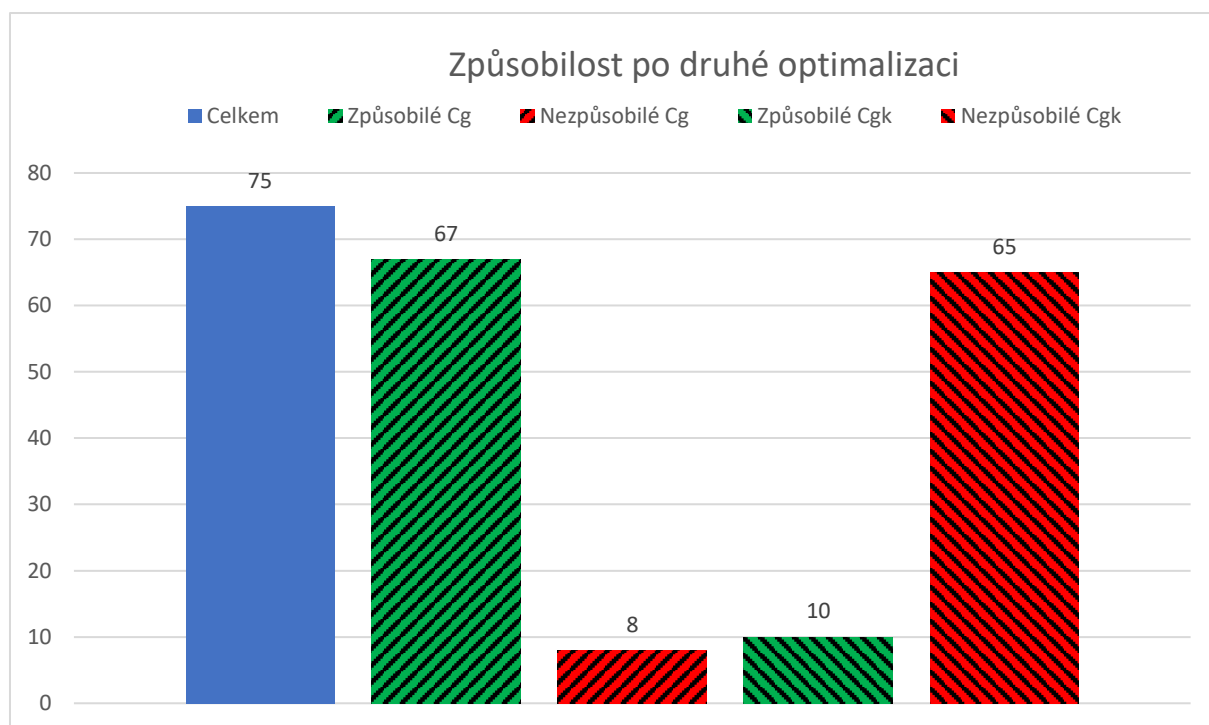
Rychlosti byly tedy tentokrát oproti předchozí optimalizaci naopak z hodnot 26 mm/s a 16 mm/s snižovány.

Nejprve byly nastaveny rychlosti pro měření kružnic na 15 mm/s a pro měření přímk na 4 mm/s. Rychlost pro měření přímk byla tedy tímto nastavena dokonce pod hodnotu rychlosti z původního plánu měření.

Po výpočtu koeficientů C_g a C_{gk} pro všech 75 údajů vyšly výsledky takto:

| | Vyhovující | Nevyhovující |
|---------------|------------|--------------|
| C_g | 67 | 8 |
| C_{gk} | 10 | 65 |
| Měření | 10 | 65 |
| Podíl z celku | 13,33 % | 86,67 % |

Tabulka 3: Výsledky koeficientů C_g a C_{gk} po druhé optimalizaci



Graf 3: Způsobilost po druhé optimalizaci

Z výsledků můžeme vypočítat, že proces měření je nezpůsobilý.

Měření trvalo průměrně 23 minut a 15 sekund. Došlo tedy k navýšení času vůči první optimalizaci o 7 minut a 5 sekund (na deseti měřeních je to rozdíl přes 70 minut), avšak snížil se podíl nevyhovujících měření, byť pouze o 5 případů ze 75 celkových.

Dalším krokem bylo snížit ještě jednou razantně rychlost měření kružnic a provést tak třetí optimalizaci.

9.4. Třetí optimalizace

Vzhledem k neuspokojivým výsledkům první a druhé optimalizace byla navržena ještě třetí, poslední optimalizace, při které došlo k velmi velkému snížení rychlosti měření kružnic.

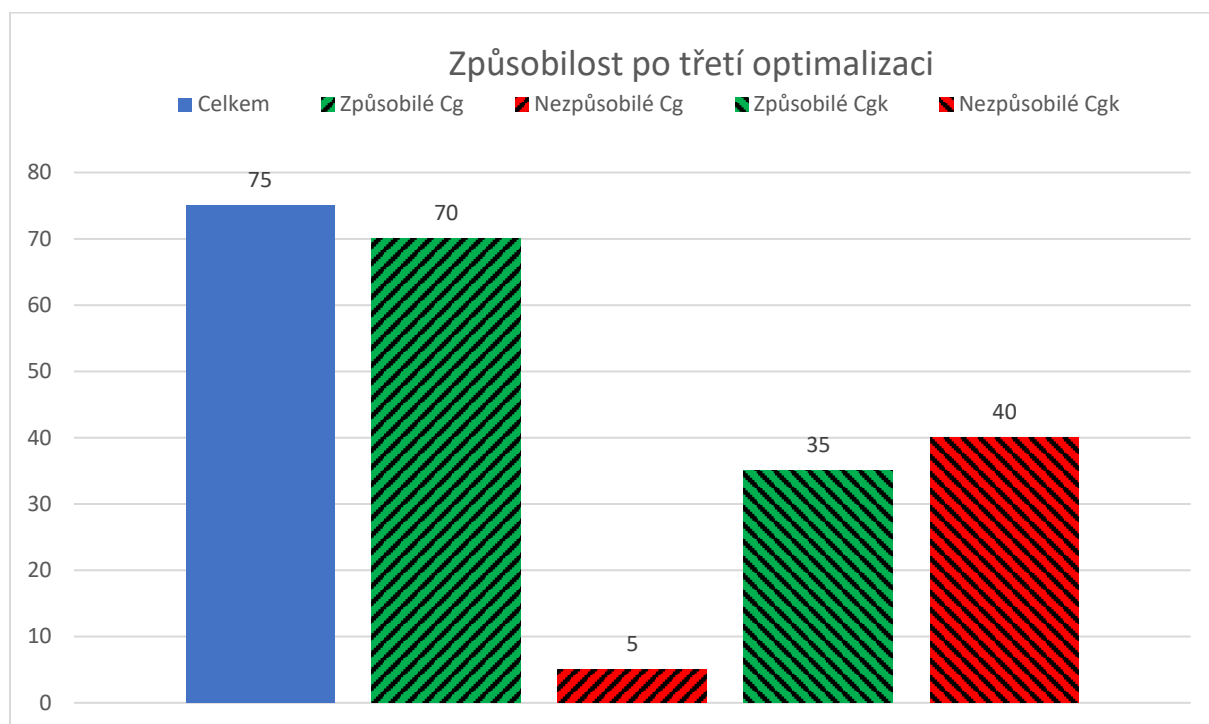
Rychlost pro měření kružnic byla snížena na 5 mm/s a rychlost pro měření přímků byla ponechána na hodnotě 4 mm/s. Rychlost pro měření kružnic tímto byla tedy nastavena dokonce pod hodnotu v původním plánu měření a tím pádem jsou pod hodnotami z původního měření již obě rychlosti.

Využití GR&R analýzy rozměrové kontroly k optimalizaci plánů měření CMM strojů

Po výpočtu koeficientů C_g a C_{gk} pro všech 75 údajů vyšly výsledky takto:

| | Vyhovující | Nevyhovující |
|---------------|------------|--------------|
| C_g | 70 | 5 |
| C_{gk} | 35 | 40 |
| Měření | 35 | 40 |
| Podíl z celku | 46,67 % | 53,33 % |

Tabulka 4: Výsledky koeficientů C_g a C_{gk} po třetí optimalizaci



Graf 4: Způsobilost po třetí optimalizaci

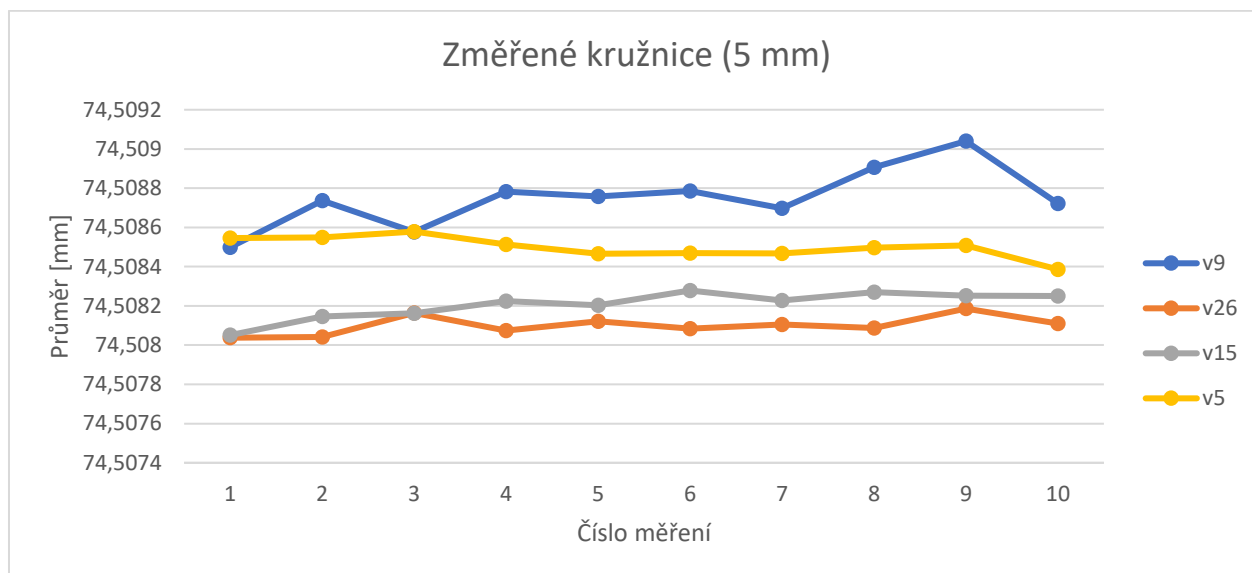
Z výsledků můžeme vyzorovat, že proces měření je nezpůsobilý

Měření trvalo průměrně 38 minut a 38 sekund. Došlo tedy k navýšení času vůči druhé optimalizaci o 15 minut a 23 sekund (na deseti měřeních je to rozdíl téměř 154 minut). Došlo dokonce k navýšení času oproti původnímu plánu měření (25 minut 48 sekund) o 12 minut a 50 sekund (na deseti měřeních jde o rozdíl přes 128 minut). Způsobilost měření se ovšem zlepšila o 25 případů z celkových 75 na 35 vyhovujících a 40 nevyhovujících. Stále je tedy více jak polovina z měření nezpůsobilých.

9.5. Analýza měření pro první vložku válce v hloubce 5 mm

Naměřené hodnoty ze všech deseti měření pro čtyři různé rychlosti byly vyneseny do tabulky a z těchto hodnot byly vytvořeny grafy.

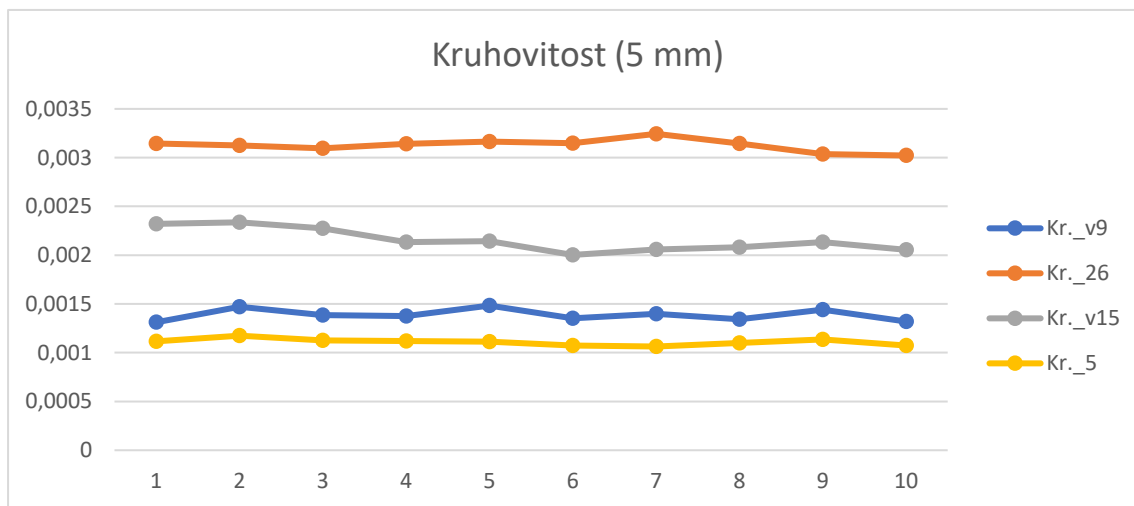
Prvním grafem je graf samotných změřených hodnot velikostí kružnic při rychlostech 9, 26, 15 a 5 mm/s:



Graf 5: Naměřené hodnoty v hloubce 5 mm

Z grafu můžeme pozorovat, že měření byla relativně stabilní, největší rozptyl hodnot byl pro rychlost 9 mm/s, a to 0,541 mikrometru, což je ale oproti tolerančnímu poli (10 mikrometrů) hodnota, která je nevýznamná. Toleranční meze jsou 74,505 a 74,515 mm.

Dalším grafem je graf vypočtených kruhovitostí pro každé měření a pro všechny 4 rychlosti:

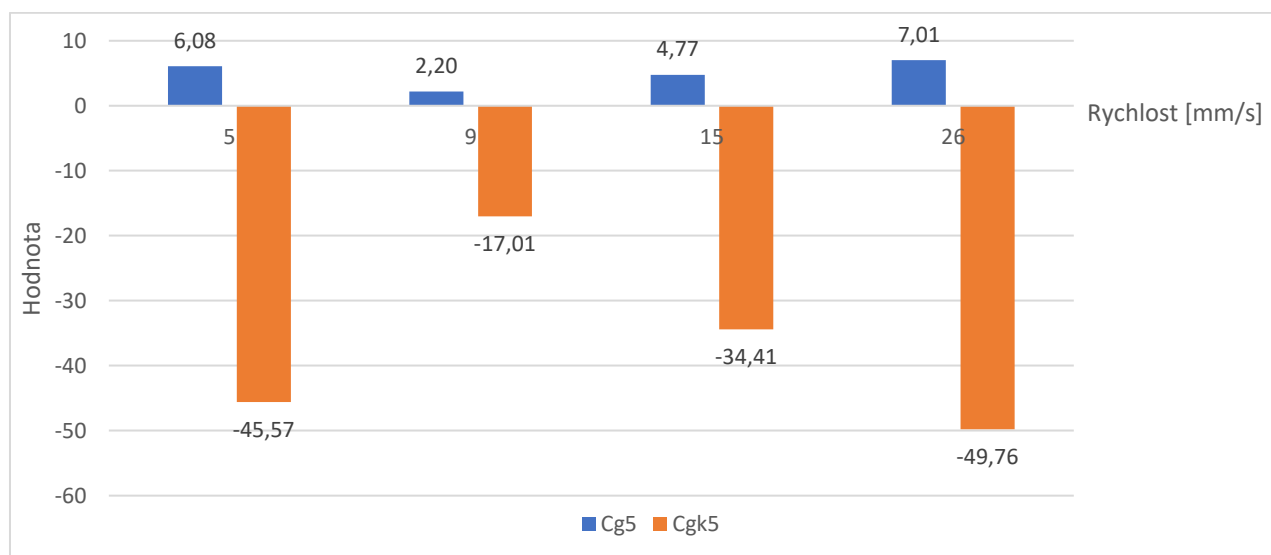


Graf 6: Hodnoty kruhovitosti v hloubce 5 mm

Využití GR&R analýzy rozměrové kontroly k optimalizaci plánů měření CMM strojů

Z grafu můžeme vidět, že kruhovitosti jsou stabilní a že pro nižší rychlosti jsou lepší hodnoty kruhovitosti. Pro rychlost 26 mm/s je kruhovitost ale oproti ostatním natolik velká, že měření rychlostí 26 mm/s už není vhodné. Toleranční meze pro kruhovitost jsou 0 a 0,006 mm.

Posledním grafem je porovnání koeficientů C_g a C_{gk} pro všechny čtyři rychlosti měření:



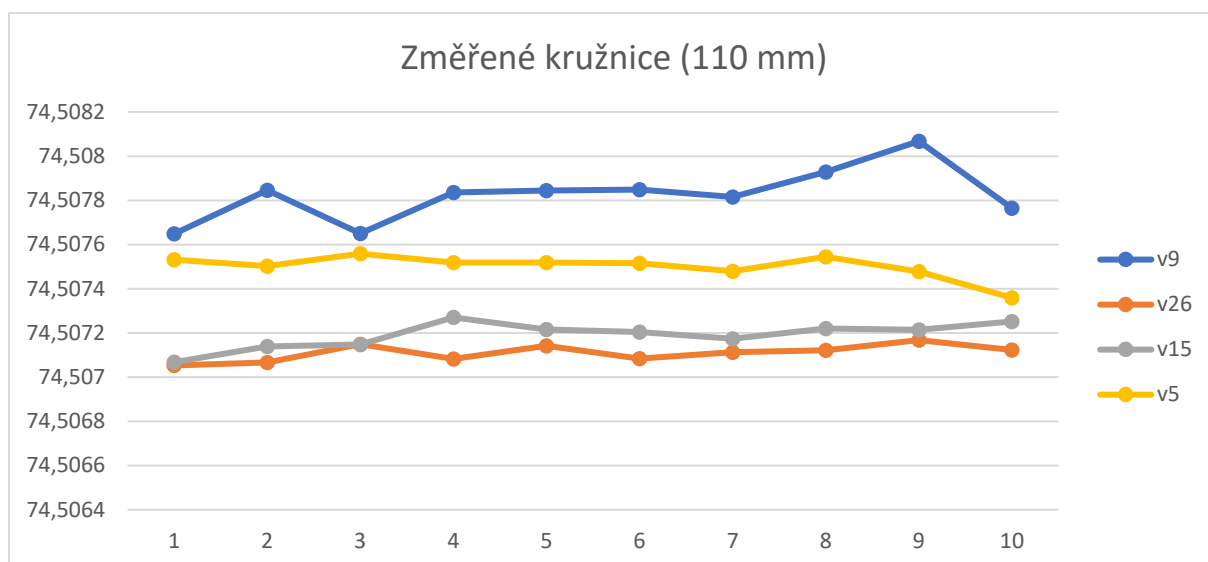
Graf 7: Hodnoty koeficientů C_g a C_{gk} v hloubce 5 mm pro všechny rychlosti

S grafu můžeme pozorovat, že ve všech případech vyšlo pro měření C_{gk} záporné, tudíž nevyhovující, ale C_g vyšlo nad 1,33, tudíž koeficient vyhovoval požadavkům. Nejlepší hodnoty koeficientů vyšly při rychlosti 9 mm/s, tudíž při přeměření původního plánu měření.

9.6. Analýza měření pro první vložku válce v hloubce 110 mm

Naměřené hodnoty ze všech deseti měření pro čtyři různé rychlosti byly vyneseny do tabulky a z těchto hodnot byly vytvořeny grafy.

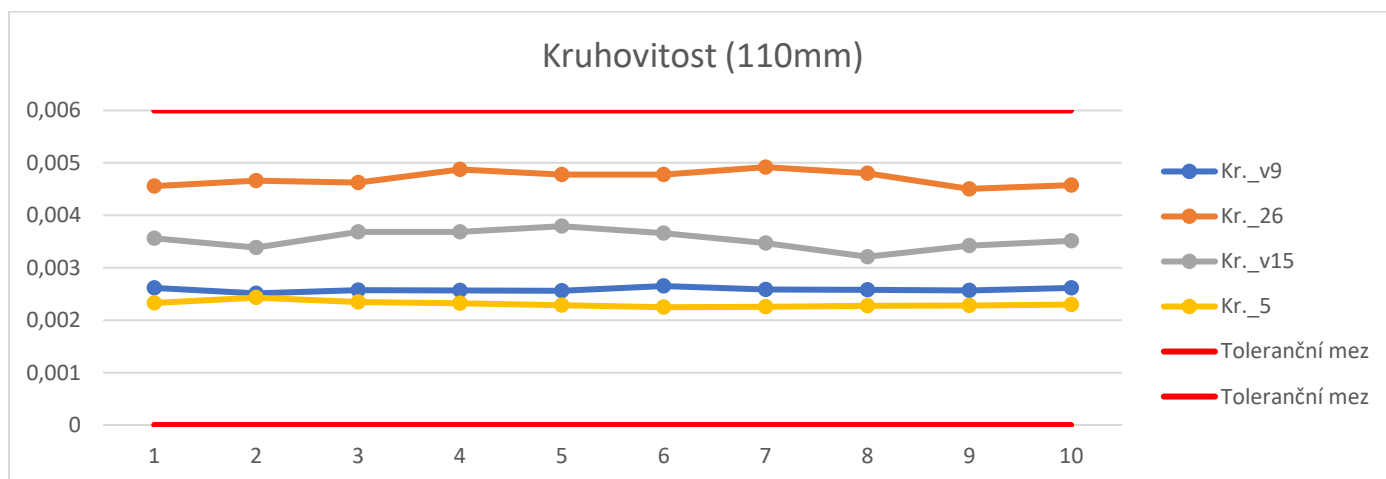
Prvním grafem je graf samotných změřených hodnot velikostí kružnic při rychlostech 9, 26, 15 a 5 mm/s.



Graf 8: Naměřené hodnoty v hloubce 110 mm

I u tohoto měření můžeme pozorovat, že měření byla relativně stabilní, největší rozptyl je opět u rychlosti 9 mm/s, ale pouze 0,419 mikrometru, což je opět v poměru k tolerančnímu poli (10 mikrometrů) nevýznamná hodnota. Toleranční meze jsou 74,505 a 74,515 mm.

Dalším grafem je graf vypočtených kruhovitostí pro každé měření a pro všechny 4 rychlosti:



Graf 9: Hodnoty kruhovitosti v hloubce 110 mm

U tohoto grafu můžeme pozorovat, že hodnoty kruhovitosti jsou stabilní a že hodnota kruhovitosti roste s rychlostí měření. Při vyšších rychlostech je tedy horší kruhovitost. Opět můžeme pozorovat, že kruhovitost pro 26 mm/s je opět velmi velká, přibližuje se k toleranční mezi a měření při této rychlosti je již takřka nepoužitelné.

Využití GR&R analýzy rozměrové kontroly k optimalizaci plánů měření CMM strojů

Třetím a posledním grafem je graf znázorňující závislost koeficientů C_g a C_{gk} na rychlosti měření:



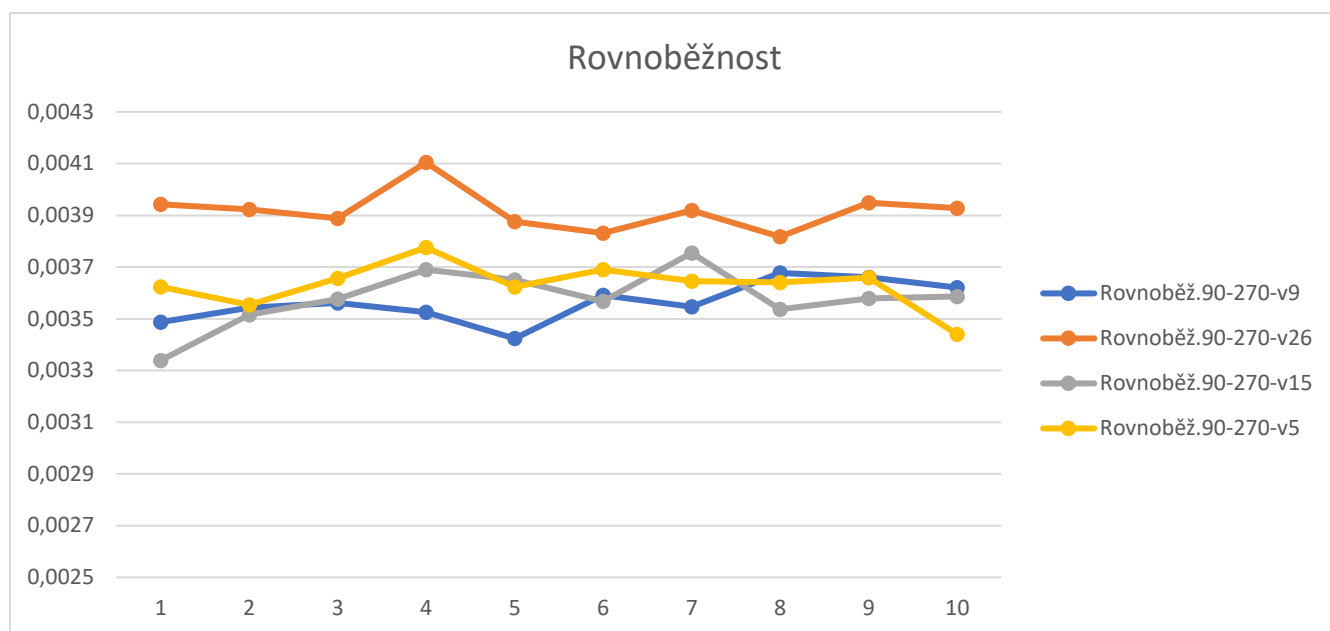
Graf 10: Hodnoty koeficientů C_g a C_{gk} v hloubce 110 mm pro všechny rychlosti

Z grafu můžeme pozorovat, že ve všech případech je hodnota koeficientu C_{gk} pod nulou, tudíž koeficient nevyhovuje požadavkům, naopak koeficient C_g ve všech případech požadavkům vyhovuje, protože je vždy nad hodnotou 1,33. „Nejlepší“ hodnoty koeficientů vychází pro rychlost měření 9 mm/s, tedy pro původní, neoptimalizovaný program.

9.7. Analýza výsledků pro celou první vložku válce

V rámci hodnocení jednotlivých výsledků bylo ještě provedeno vyhodnocení rovnoběžnosti přímků pod úhlem 90° a 270° na řezu vložkou válce.

Hodnoty byly vloženy do tabulky a z této byl vytvořen graf rovnoběžnosti pro všech deset měření při všech rychlostech.



Graf 11: Hodnoty rovnoběžnosti přímek 90°- 270° pro všechny rychlosti

Z grafu můžeme vyvodit, že hodnoty rovnoběžnosti pro rychlosti 5, 9 a 15 mm/s jsou dosti podobné, jen při rychlosti 26 mm/s hodnoty rovnoběžnosti od zbytku „odskakují“.

9.8. Zhodnocení výsledků měření

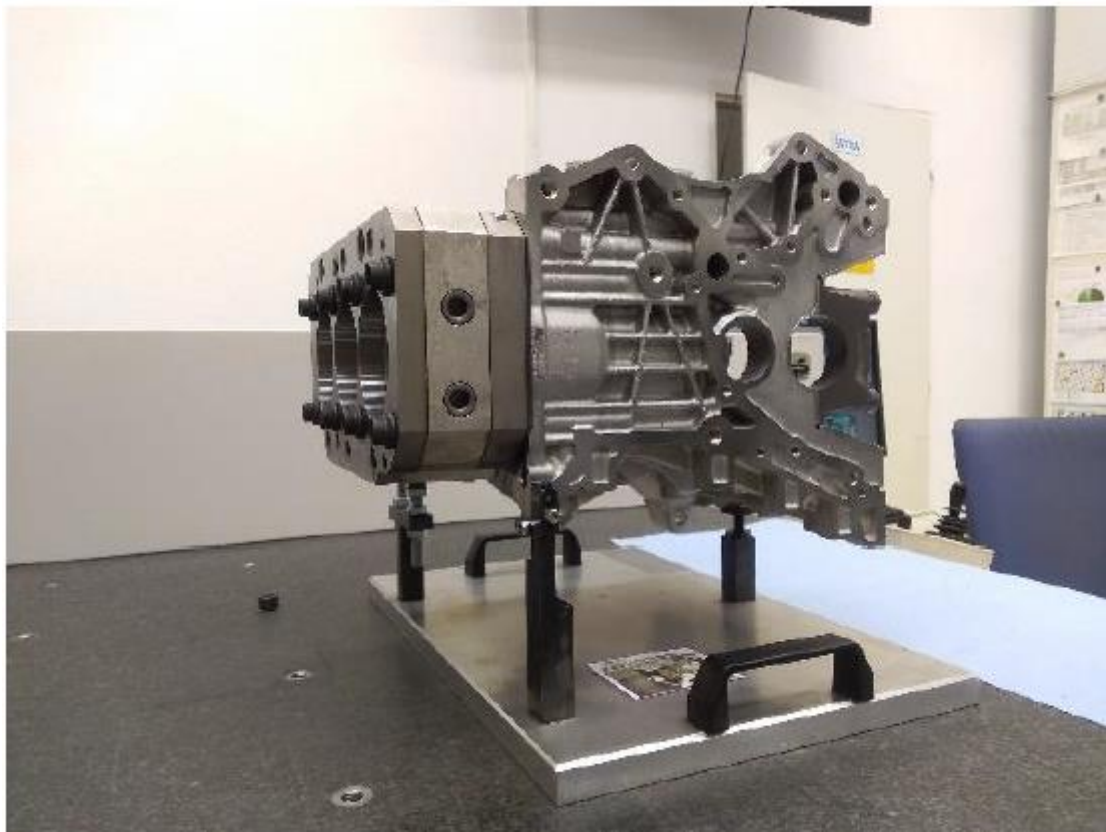
Po přeměření původního plánu měření (původní rychlost byla nastavena na 9 mm/s pro kružnice, respektive 8 mm/s pro přímky) bylo zjištěno, že už tento není způsobilý. Po provedení první optimalizace stále s původním cílem, tedy s cílem úspory času pomocí zvýšení rychlosti (ta byla zvýšena na 26 mm/s pro kružnice a 16 mm/s pro přímky), bylo zjištěno, že ani při maximální rychlosti není proces měření způsobilý. Plán optimalizace byl tedy změněn z časové optimalizace s cílem zkrácení času na optimalizaci procesu alespoň tak, aby byl způsobilý. Po provedení druhé optimalizace (zpomaleno na 15 mm/s a 4 mm/s) a třetí optimalizace (zpomaleno na 5 mm/s a 4 mm/s) bylo zjištěno, že proces ani po snížení rychlosti stále není způsobilý.

Po analýze kruhovitostí v hloubce 5 mm a 110 mm pro všechny rychlosti bylo zjištěno, že rychlost 26 mm/s se pro měření absolutně nehodí (kruhovitosti dosahují velkých hodnot), zatímco rychlosti 5 mm/s a 9 mm/s jsou pro měření vhodné. Rychlost 15 mm/s se pro měření ještě dá použít, výsledky ovšem nebudou dosahovat takových kvalit jako pro předchozí dvě hodnoty rychlosti.

Využití GR&R analýzy rozměrové kontroly k optimalizaci plánů měření CMM strojů

Po výpočtu koeficientů způsobilosti C_g a C_{gk} bylo zjištěno, že koeficient C_g vyšel při všech měřeních nad 1,33, tedy měření z hlediska opakovatelnosti vyhovuje, avšak koeficient C_{gk} ve všech případech vyšel záporný (měl by být opět nad 1,33), tudíž toto ukazuje, že měření není způsobilé z hlediska strannosti měření. Jelikož požadavkům nevyhovují oba koeficienty, ale vždy jen jeden, všechna měření byla prohlášena za nezpůsobilá.

Důvodem tohoto výsledku může být špatné zarovnání bloku motoru při měření, kdy je tento umístěn „na ležato“, přičemž na čele má umístěný přípravek na honování (viz obrázek č. 24 níže). Jelikož celý blok motoru sám váží 13 kilogramů (z hliníku) a přípravek na honování (z oceli) sám o sobě váží 40 kilogramů, působí na motor velký ohybový moment a vložky válců se tak prohýbají.



Obrázek 24: Upnutí bloku na CMM

Dalším z důvodů může být použití špatné měřící sondy, kdy je použita kuličková přímá sonda, jejíž dřík je vyroben z uhlíkového kompozitu (viz obrázek č. 25 níže). Jelikož je dřík vyroben z tohoto materiálu, vlivem špatné tuhosti materiálu pak relativně dlouhý

Využití GR&R analýzy rozměrové kontroly k optimalizaci plánů měření CMM strojů

dřík „pruží“ a toto zlepšuje měření. Na sondě byla také použita celkem velká měřicí kulička.



Obrázek 25: Měření bloku na CMM

Na základě posouzení procesů měření pomocí koeficientů C_g a C_{gk} bylo zjištěno, že nejlepších výsledků se dosahuje při původním plánu měření. Měření je nezpůsobivé, situace je ale nejlepší při rychlosti 9 mm/s. Při tlaku na produktivitu měření se dá případně rychlost zvýšit až k 15 mm/s, jelikož výsledky se příliš neliší.

10. Závěr:

S nástupem filozofie Průmysl 4.0 je stále větší tlak na zrychlení výroby a s tím spojené i kontroly dílů. Jednou z možností, jak toto vyřešit, je koupit nový, lepší měřicí stroj, avšak zde jde o investice v řádech až statisíců euro. Druhou možností je tedy úprava strategie a plánu měření tak, aby bylo měření zrychleno, avšak při zachování stejné či lepší kvality měřených bodů a při zachování způsobilosti měření.

Využití GR&R analýzy rozměrové kontroly k optimalizaci plánů měření CMM strojů

Cílem této práce bylo tedy optimalizovat plán měření tak, aby došlo k úspoře času, a to pomocí zvýšení rychlosti měření. Optimalizace byla posuzována dle koeficientů způsobilosti C_g a C_{gk} .

V průběhu optimalizace měření bylo zjištěno, že není způsobilé ani měření po první optimalizaci, tedy po zvýšení rychlosti na maximální možnou hodnotu, ani měření dle původní strategie. Cíl práce byl tedy změněn z časové optimalizace na optimalizaci plánu tak, aby bylo vůbec dosaženo způsobilosti měření.

Po druhé a třetí optimalizaci, kdy se rychlosti snižovaly dokonce až pod rychlosti z původního plánu bylo na základě koeficientů C_g a C_{gk} zjištěno, že není možno dosáhnout způsobilosti.

Důvody tohoto negativního výsledku optimalizace jsou především poloha měřeného dílu a zvolený senzor, podrobněji v kapitole 9.8.

11. Zdroje

- [1] *Coordinate measuring machines and systems* [online]. Second edition. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2012 [cit. 2020-07-02]. Manufacturing engineering and materials processing. ISBN 978-1-4200-1753-3.
- [2] DOLÁK, David. *Rešerše souřadnicových měřících strojů CMM a měřících ramen CMMs* [online]. Brno, 2010 [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=30059 . Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Miroslav Opl.
- [3] ŘEHOŘÍK, Josef. *Inovace rozměrového měření ve Škoda Auto* [online]. Praha, 2017 [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/reader/128479122> . Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Rudolf Dvořák, CSc.
- [4] STARKOVÁ, Rebeka. *Porovnání možností souřadnicových měřících strojů* [online]. Praha, 2017 [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73133/F2-BP-2017-Starkova-Rebeka-bakalarska%20prace.pdf?sequence=-1> . Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. BcA. Podaný Jan, Ph. D.
- [5] Intro to Coordinate Metrology: Hexagon Manufacturing Intelligence. *Hexagon* [online]. Hexagon AB and/or its subsidiaries, 2020 [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/solutions/technical-resources/metrology-101/intro-to-coordinate-metrology>
- [6] SAMADI, Ali. Structured-light 3D scanner[online]. 2013 [cit. 2020-06-28]. Dostupné z: https://www.academia.edu/1107159/Structuredlight_3D_scanner_-_Samadi
- [7] NAVRÁTIL, Robert. ATOS ScanBox -automatizované měření od firmy GOM[online]. 2016 [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/7714-atos-scanbox-automatizovane-mereni-od-firmy-gom.htm>
- [8] URBAN, Jan. Vliv strategie měření na výslednou způsobilost reálných měřících procesů na CMM [online]. Praha, 2017 [cit. 2020-07-26]. Studie k dizertační práci. České vysoké učení technické v Praze.
- [9] STYLI AND ACCESSORIES: Product catalogue [online]. In: . Hexagon AB and / or its subsidiaries and affiliates, 2019, s. 71 [cit. 2020-07-06]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/products/coordinate-measuring-machines/cmm-sensors/accessories/styli-and-accessories>
- [10] *Souřadné systémy* [online]. In: . Rumburk: Gymnázium Rumburk, s. 2-15. Dostupné z: http://www.gymrumburk.cz/personal/lib/exe/fetch.php?media=seifert:ujep:fpi:p02-souradnice_atp.pdf-accessories
- [11] HRBKOVÁ, Eliška. *Problematika měření obecných tvarových ploch s využitím CMM* [online]. Praha, 2016 [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/66029/F2-BP-2016-Hrbkova-Eliška-Bakalarska_prace.pdf?sequence=1&isAllowed=y . Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Libor Beránek, Ph.D.
- [12] *Upínací stavebnice pro CMM. Renishaw: apply inovation* [online]. Renishaw, 2020 [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/upinaci-stavebnice-pro-cmm-20851>
- [13] *Measurement Good Practice Guide: CMM measurement strategies* [online]. 2014 [cit. 2016-07-05]. ISSN 1368-6550.
- [14] CALYPSO – základní program, návod k obsluze, Divize Industrielle Messtechnik GmbH D-73446 Oberkochen, Datum vydání: 03/11, 2011
- [15] VALENTOVÁ, Karolína. *Vliv metod měření a kontroly kvality na kvalitu výroby v procesu obrábění* [online]. Liberec, 2017 [cit. 2020-07-26]. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/23189/Bakalarska_prace_Karolina_Valentova.pdf?

[sequence=-1&isAllowed=y](#) . Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Mgr. Jiří Rozkovec.

[16] Propagační materiály společnosti Zeiss dostupné na <http://www.Zeiss.com>

[17] HRDLIČKA, Martin. *Hodnocení přesnosti a způsobilosti souřadnicového stroje Pioneer DEA* [online]. Brno, 2015 [cit. 2020-07-26]. Dostupné z:

https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=103032 Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Pernikář, CSc.

[18] URBAN, Jan. *Disertationarbeit: Einfluss der Messstrategien auf die Fähigkeit der Realmessprozessen an der KMG* [online]. [cit. 2020-07-30].

12. Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obrázek 1: Kartézská soustava souřadnic [10]..... | 8 |
| Obrázek 2: Sférická soustava souřadnic [10] | 8 |
| Obrázek 3: Válcová soustava souřadnic [10] | 9 |
| Obrázek 4: Souřadnicový systém stroje [5]..... | 10 |
| Obrázek 5: Souřadnicový systém součásti [5]..... | 11 |
| Obrázek 6: Elementy [5]..... | 12 |
| Obrázek 7: Rotace souřadného systému [5] | 13 |
| Obrázek 8: Změřené a vytvořené prvky [5]..... | 13 |
| Obrázek 9: Souřadnicový měřicí stroj portálové konstrukce [1]..... | 15 |
| Obrázek 10: Souřadnicový měřicí stroj sloupové konstrukce [1] | 16 |
| Obrázek 11: Souřadnicový měřicí stroj s horizontálními rameny [1] | 17 |
| Obrázek 12: Souřadnicový měřicí stroj mostové konstrukce [1] | 18 |
| Obrázek 13: Spínací sonda [8]..... | 19 |
| Obrázek 14: Aktivní snímací systém firmy Zeiss [16] | 20 |
| Obrázek 15: Přímá sonda [9] | 20 |
| Obrázek 16: Disková sonda [9]..... | 21 |
| Obrázek 17: Hvězdicovitá sonda [9] | 21 |
| Obrázek 18: Válečková sonda [9]..... | 21 |
| Obrázek 19: Dutá kuličková sonda [9] | 21 |
| Obrázek 20: Princip měření pomocí CMM [2]..... | 23 |
| Obrázek 21: GPS [11] | 23 |
| Obrázek 22: Zaměření kalibrační koule referenčním snímačem [13] | 25 |
| Obrázek 23: Minimum potřebných bodů pro nasnímání elementů [14]..... | 26 |
| Obrázek 24: Upnutí bloku na CMM | 39 |
| Obrázek 25: Měření bloku na CMM..... | 40 |