



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

OPTICKÝ MĚŘICÍ PŘÍSTROJ SOL 311

OPTICAL MEASURING INSTRUMENT SOL 311

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michaela Kellerová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Róbert Jankových, CSc.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Studentka:	Michaela Kellerová
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Vedoucí práce:	doc. Ing. Róbert Jankových, CSc.
Akademický rok:	2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Optický měřicí přístroj SOL 311

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Hlavním úkolem je praktické ověření metrologických schopností zvoleného optického měřicího přístroje.

Cíle bakalářské práce:

Optické měřicí přístroje používané v průmyslu (rešerše).

Systémový rozbor řešené problematiky, návrh a zdůvodnění zvolených vzorků.

Provedení měření a jeho vyhodnocení.

Doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

CURTIS, Mark A. and Francis T. FARAGO. Handbook of dimensional measurement. Fifth edition. South Norwalk: Industrial Press, 2014. ISBN 978-0-8311-3465-5.

RABINOVICH, Semyon G. Evaluating measurement accuracy. New York: Springer, 2013. ISBN 978-1-4614-6716-8.

MONTGOMERY, Douglas C. Introduction to statistical quality control. 5th ed. Hoboken: John Wiley, 2005. ISBN 0-471-66122-8.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Hlavním přínosem této bakalářské práce je posouzení shody se specifikací v souladu se systémem ISO GPS. V teoretické části byly probány souřadnicové měřicí stroje s důrazem na multisenzorové měřicí stroje. Praktická část je zaměřena na vyhodnocení naměřených hodnot součástí na CMM SOL 311 podle normy ČSN EN ISO 14253-1:2018.

ABSTRACT

The main benefit of this bachelor thesis is the assessment of conformity with the specification in accordance with the ISO GPS system. In the theoretical part, coordinate measuring machines were discussed with emphasis on multisensor measuring machines. The practical part is focused on the evaluation of measured values of components on the CMM SOL 311 according to the standard ČSN EN ISO 14253-1: 2018.

KLÍČOVÁ SLOVA

Souřadnicové měřicí stroje, výsledek měření, nejistota měření, posouzení shody se specifikací

KEYWORDS

Coordinate measuring machines, measurement result, measurement uncertainty, assessment of conformity with specification

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KELLEROVÁ, Michaela. *Optický měřicí stroj SOL 311*, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2022, 64 s., Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Róbert Jankových, CSc.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu práce panu doc. Ing. Róbertu Jankových, CSc., za jeho rady a vstřícné vedení při vypracování této bakalářské práce. Dále patří obrovské díky mé rodině, která mě podporovala po celou dobu mého studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracovala jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Róberta Jankových, CSc. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 19. 4. 2022

.....
Kellerová Michaela

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	MOTIVACE	14
3	OPTICKÉ SOUŘADNICOVÉ MĚŘÍCÍ STROJE	15
3.1	CMM.....	15
3.2	Optický měřicí stroj Sol 311	22
4	POUŽITÍ OPTICKÝCH STROJŮ V PRAXI	26
4.1	ISO GPS.....	26
4.2	Vyhodnocení v chybovém a nejistotovém přístupu.....	31
4.3	Posouzení shody se specifikací.....	33
5	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	36
5.1	Kotva.....	37
5.2	Podložka.....	41
5.3	Ozubené kolo	46
5.4	Doporučení pro praxi	51
6	ZÁVĚR	52
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	53
8	SEZNAM TABULEK, OBRÁZKŮ, ZKRATEK A SYMBOLŮ	55
8.1	Seznam tabulek	55
8.2	Seznam obrázků	55
8.3	Seznam zkratk a symbolů	58
9	SEZNAM PŘÍLOH	60

1 ÚVOD

Rychlý vývoj souřadnicových měřicích strojů (dále jen CMM) v současnosti souvisí z upřesňováním a zrychlováním výrobního procesu, se kterým musí kontrolní technika držet krok. Moderní optické CMM představují pokračování vývoje mikroskopů a využívají principy CNC obráběcích strojů. [1]

CMM je založeno stejně jako jeho předchůdce (mikroskop) na pozorování výrobků nebo jeho částí při vhodném zvětšení. [25]

CMM měří řadu geometrických vlastností jednoduchých, ale i složitých dílů. Využívají přesné odměřovací systémy, které jsou propojeny s výpočetní technikou pomocí důmyslného softwaru. [2]

Tato bakalářská práce se věnuje CMM používaných v průmyslu, konkrétně měřicímu optickému stroji SOL 311 od firmy Micro-Vu (dále jen SOL 311). Tento měřicí stroj je součástí ucelené řady manuálních strojů SOL (existují verze SOL 161 a SOL 312), které vyplňují mezeru mezi manuálními a automatizovanými měřicími systémy. [3]

Hlavním cílem této práce je doložení praktického využití SOLu 311, jehož součástí je software InSpec.

Výstupem této práce je vyhodnocení výsledku měření s využitím nejistotového přístupu a posouzení shody se specifikací dle normy ČSN EN ISO 14253-1:2018.

Předložená bakalářská práce se skládá z úvodu, pěti kapitol a třinácti příloh.

Druhá kapitola se věnuje motivaci pro napsání této práce a upřesnění stanovených cílů.

Třetí kapitola pojednává o CMM. V této kapitole se nachází rozdělení CMM z různých hledisek s důrazem na multisenzorové stroje a popsání SOL 311 s důrazem na jeho software InSpec.

Čtvrtá kapitola se věnuje výsledku měření systémového rozboru řešené problematiky v souladu se systémem ISO GPS. Tato kapitola obsahuje vyhodnocení výsledku měření dle normy ČSN EN ISO 14253-1:2018 a objasňuje rozdíl mezi chybovým a nejistotovým přístupem.

Pátá kapitola pojednává o praktickém měření některých geometrických parametrů 3 vzorků (kotva, podložka a ozubené kolo) a vyhodnocení výsledku měření v souladu se systémem ISO GPS. Rovněž jsou zde uvedena doporučení pro využití SOL 311 v praxi.

V šesté kapitole je shrnuta celá bakalářská práce.

2 MOTIVACE

Souřadnicový měřicí stroj (dále jen CMM) je měřicí systém, který má prostředky pro pohyb snímacího systému a schopnost určovat prostorové souřadnice na povrchu měřené součásti. [4]

CMM slouží k měření některých geometrických vlastností rozměrů (délka, průměr, úhel), geometrických tolerancí (kruhovitost, rovnoběžnost, kolmost, přímost) a vzdáleností mezi prvky. První CMM byly modernizované mikroskopy, které byly představeny ve 2. polovině 20. století. První dotykové měřicí stroje s automatickým řízením vznikly již v roce 1970. CMM mají často současně optické i dotykové senzory, a tak sjednocuje optické i dotykové měření. [5]

Dle pokynů vedoucího práce bylo rozhodnuto plnit jednotlivé cíle práce takto:

Cíl číslo 1 – optické měřicí přístroje používané v průmyslu (rešerše) plnit charakterizováním těchto CMM dle ČSN EN ISO 10360-1:2001 a konkrétně popsat multisenzorové měřicí stroje. Dále bylo nutno objasnit konstrukci a funkci optického měřicího stroje SOL 311 (dále jen SOL 311) s důrazem na jeho software InSpec.

Cíl číslo 2 – systémový rozbor řešené problematiky charakterizovat v souladu s platným systémem ISO GPS s důrazem na geometrické charakteristiky rozměru, vzdálenosti a geometrických tolerancí prvků, které jsou navrženy v experimentální části. Dále také charakterizovat chybový a nejistotový přístup při vyhodnocení výsledku měření s důrazem na nejistotový přístup. Rovněž objasnit princip posouzení shody se specifikací dle ČSN EN ISO 14253:2018.

Dále bylo nutné v rámci cíle číslo 2 – navrhnout a zdůvodnit zvolené vzorky. Pro experimentální část byly zvoleny vzorky „Kotva“, „Podložka“ a „Ozubené kolo“ (viz přílohy 7, 8, 9).

Cíl číslo 3 – provedení měření a jeho vyhodnocení řešit vytvořením programů s cílem změřit:

- u kotvy: „Kružnici B“ a vyhodnotit toleranci profilu tvaru,
- u podložky: „Úhel α “,
- u ozubeného kola: „Střední hodnotu rozměru přes zuby“ dle norem ČSN 01 4682:1980 a ČSN 01 4675:1953.

Cíl číslo 4 - doporučení pro praxi formulováním praktických závěrů s důrazem na výhody a nevýhody SOL 311 vůči jiným CMM.

3 OPTICKÉ SOUŘADNICOVÉ MĚŘÍCÍ STROJE

Tato kapitola se dělí na 2 podkapitoly. V podkapitole 3.1 jsou popsány souřadnicové měřicí stroje (anglicky Coordinate Measuring Machine, dále jen CMM). V této podkapitole byly popsány CMM dle konstrukce a dále rozdělení dle ČSN EN ISO 10360-1:2001. Konkrétně jsou objasněny multisenzorové měřicí stroje s důrazem na souřadnicové měřicí stroje s křížovým stolem, souřadnicové měřicí stroje s vodicími prvky v jedné rovině, souřadnicové měřicí stroje s portálem, souřadnicové měřicí stroje s otočnými osami, souřadnicové měřicí stroje pro dvourozměrné měření a souřadnicové měřicí stroje se senzorem počítačové tomografie.

V následující podkapitole 3.2 byl charakterizován konkrétní optický měřicí stroj SOL 311 (dále jen SOL 311) s důrazem na software InSpec, kde bylo vysvětleno rozhraní tohoto softwaru. V tomto softwaru byly vytvářeny 3 programy k experimentální části.

3.1 CMM

CMM je měřicí systém, který obsahuje prostředky pro pohyb snímacího systému a má schopnost určit prostorové souřadnice na povrchu měřené součásti. Snímací systém je složený ze snímací hlavy a snímacího doteku. Snímací hlava je zařízení, které vytváří signál během snímání. Snímací dotek je mechanické zařízení, které se skládá z hrotu snímacího dotyku a dřívku. [4]

Princip CMM měření je založen na stanovení základního bodů v prostoru a polohy dalších bodů na měřené součásti, kde se měří formou souřadnicových rozměrů v osách X, Y, Z. Na rozdíl od konvenčních metod je výhodou určení základního bodu v jakémkoliv místě pracovního prostoru. [6]

Konstrukce CMM se skládá:

1. **Pracovní deska** se většinou používá granitová případně litinový odlitek a horní plocha je broušená. Na konci desky je připevněno vedení, na kterém pojíždí most.
2. **Most** je složená uzavřená konstrukce.
3. **Vozík** je deska s kalenými vodicími plochami kde uvnitř desky je závěs pro uložení objímky pinoly nebo projektoru bříty, popřípadě dotekové sondy.
4. **Pinola** je litinová nebo duralová tyč ve tvaru H a vyvažování pinoly je mechanické, tj. pomocí 2 souměrných závaží.
5. **Vedení** by mělo být s minimálním třením a opotřebením a maximálních tuhostí. Vedení je součást, která umožňuje pohyb části vozíku. Pohyblivé části, které se mohou posouvat s maximálních přesností a při minimálních rychlostech, které se vyskytují v koncových polohách. [6]

CMM se dělí podle konstrukce na:

1. jednosouřadnicové měřicí stroje měřící v jedné ose,
2. dvousouřadnicové měřicí stroje měřící ve dvou osách,
3. třísouřadnicové měřicí stroje měřící ve třech osách. [2]

Rozdělení podle normy ČSN EN ISO 10360-1:

Většina těchto typů CMM využívá 3 pohyblivé části, které jsou na sebe kolmé a pohybují se podél vedení. Část se snímací hlavou se pohybuje vertikálně na rozdíl od zbývajících částí a spojená soustava první a druhé části se pohybuje horizontálně vůči třetí části. Toto platí pro většinu typů CMM, pokud není uvedeno jinak. [4]

1. **Výložníkový CMM s pevným stolem** využívá 3 pohyblivých částí, které jsou kolmé, a pohybují se podél vedení. Část se snímací hlavou se pohybuje vertikálně na rozdíl od zbývajících částí. Třetí část je podepřena na jednom konci a pohybuje se horizontálně. [4]
2. **CMM s pohyblivým portálem** je na rozdíl od výložníkových CMM s pevným stolem podepřena na 2 nohách, které stojí na protějších stranách základny stroje. [4]
3. **Mostový CMM**, jehož třetí část se pohybuje po 2 zvýšených vedení na obou stranách nad základnou stroje. [4]
4. **CMM s mostem ve tvaru L**, třetí část má stejně jako mostový CMM 2 vedení, ale jedno vedení je pod nebo v úrovni základny stroje druhé vedení je zvýšené nad základnu stroje. [4]
5. **CMM s pevným portálem**, kde na třetí části je upnuta měřená součástka. [4]
6. **Výložníkový CMM s pohyblivým portálem**, jehož třetí část se pohybuje horizontálně vůči základně a stejně jako CMM s pevným portálem je měřená součástka upnuta na třetí části. [4]
7. **Stojanový CMM** na rozdíl u ostatních typů je druhá část upevněna na základně stroje a pohybuje se v horizontální rovině a měřená součástka je na ni upnutá. [4]
8. **CMM s pohyblivým sloupem a pohyblivým vodorovným ramenem**, jehož třetí část se pohybuje horizontálně vzhledem k základně stroje a je na této části upnuta. [4]
9. **CMM s pevným stolem a vodorovným ramenem**, kde druhá část se pohybuje horizontálně vůči třetí části a na třetí části je upnuta měřená součástka. [4]
10. **CMM s pohyblivým stolem s vodorovným ramenem**, kde na třetí části je upnutá měřená součástka. [4]

Dle pokynů vedoucího práce dále byly zpracovány multisenzorové měřicí stroje:

1. Souřadnicové měřicí stroje s křížovým stolem

Tento stroj (viz Obr. 1)) je založen na principu, že obsluha zaostří nitkovým křížem měřené body objektu a potom přečte souřadnice na měřících lištách měřicího stroje. [5]

Stroje založené na této konstrukci se dnes používají zejména pro nejjednodušší měřicí úlohy. Největší nevýhoda těchto strojů je v přímém zaostření na měřicí body, které provádí obsluha při vizuálním ostření a tím má přímý vliv na výsledek měření. Obrazovka s nitkovým křížem přebírá funkci mikroskopu měřících projektorů. [5]

Moderní souřadnicové měřicí stroje s optoelektronickými senzory velmi často pracují s mechanicky polohovanými křížovými stoly. U těchto strojů je osa z také mechanicky nastavitelná. V dnešní době jsou tyto stroje z větší části plně automatizované ve všech třech osách. Jejich měřicí rozsah je přibližně 200 mm až 400 mm. Zásadně větší měřicí rozsahy jsou u této konstrukční řady nevhodné. [5]

Křížový stůl se vyrábí v různých třídách přesnosti. Použitím jednoduchých, mechanicky předinstalovaných vodících prvků je umožněna pouze průměrná přesnost. [5]



Obr. 1) Souřadnicové měřicí stroje s křížovým stolem [5]

2. Souřadnicové měřicí stroje s vodicími prvky v jedné rovině

Optické úlohy měření jsou často prováděny na relativně plochých objektech měření. Z důvodu toho, že vodicí prvky jsou v jedné rovině, jsou odchylky vodicích prvků na výsledek měření zanedbatelné. [5]

Kontrola kvality ve výrobních procesech je hlavní oblastí použití těchto strojů. Pro zjednodušení převozu, se tyto stroje (viz Obr. 2)) sestavují často přímo ve výrobě. Konstrukční návrh potom zohledňuje teplotní výkyvy a nečistoty, které v tomto prostředí vznikají. Prvky, které jsou určující pro přesnost jsou vyrobeny z oceli nebo tvrdého kamene, tedy z materiálů, které mají podobné koeficienty roztažnosti. [5]

Díky tomuto konstrukčnímu řešení, které je optimalizováno pro výstupní kontrolu, dosahujeme měřících nejistot až několik málo mikrometrů. Tyto stroje jsou používány výstupní kontrolou, např. při obrábění a řezání, při výrobě plechových dílů, výrobě plastových výlisků nebo ve výrobě nástrojů a při vstupní kontrole zboží. [5]



Obr. 2) Souřadnicové měřicí stroje s vedením v jedné rovině [5]

3. Souřadnicové měřicí stroje s portálem

Konstrukce portálového stroje je ekonomicky výhodná pro rozsahy měření větší než přibližně 400 mm. Společnou vlastností portálových strojů je to, že pinola se senzory je instalována s možností vertikálního a horizontálního posunu na základní konstrukci ve formě brány, třetí nutný směr pohybu se provádí posunem celého portálu nebo měřicího stolu.

Odlišnost strojů s pevným nebo pohyblivým portálem je například v přesnosti a v prostorové náročnosti. [5]

a. Souřadnicové měřicí stroje s pohyblivým portálem

CMM s pohyblivým portálem (viz Obr. 3) představují v současné době nejčastější konstrukční princip používaný u velkých strojů. Za pomoci integrace všech měřících os do pohyblivého portálu zůstává dílec během měření v klidu. To umožňuje měření i velice těžkých dílců. Stroje tohoto typu jsou přednostně vybavené pouze dotykovou sensorikou. Vzájemně sladěné pohyblivé osy omezují přípustnou hmotnost a tím i užití komplexních instalací sensorů. Relativně nákladné konstrukční řešení je dáno použitím vysoce kvalitního spodního osvětlení pro celý rozsah. Toto řešení je často nutné pro souřadnicové měřicí stroje se zpracováním obrazu. Existují zde tyto možnosti:

- plošné světelné pole ve velikosti rozsahu měření,
- liniové světelné pole, pohyblivé s portálem,
- ve dvou osách pohyblivé bodově světelné pole. [5]

Díky nepohyblivému měřicímu stolu je prostorová náročnost tohoto měřicího stroje menší než u stroje s pevným portálem. U stroje s pevným portálem zabere manipulační prostor se stolem minimálně dvojnásobný měřicí rozsah. [5]



Obr. 3) Souřadnicové měřicí stroje s pohyblivým portálem [5]

b. Souřadnicové měřicí stroje s pevným portálem

Obě hlavní osy pohybu u CMM s pevným portálem (viz Obr. 4)) jsou vzájemně nezávislé. Pohonné systémy a měřítka všech tří os bývají nastaveny zpravidla v centrální poloze. Tím se dosahuje o něco lepší dodržení komparátorového principu. To vede ve spojení s vysokou tuhostí k velmi nízkým nejistotám měření. Využitím celkově stabilnější konstrukce je velice vhodné pro instalaci vyššího množství sensorů na jedné pinole. To usnadňuje použití více pinol. [5]

Při provádění měření je měřený objekt položen na skleněnou desku měřicího stolu nebo se připevní do přípravku na měřícím stole. Odchyly dosahované při měření s touto řadou strojů leží pod hodnotou 1 mikrometru. Při použití je ovšem nutné dbát na to, aby u všech sensorů byl zajištěn přístup k měřenému dílu. Toto konstrukční řešení se uplatňuje přibližně pro rozsahy 2000 mm x 2000 mm x 1000 mm. Tento typ strojů lze použít i pro rozměrově menší díly. [5]

Pomocí lineárních pohonů se optimalizuje měřicí rychlost portálových strojů, které se používají při kontrole ve výrobě. Dosahované nejistoty měření jsou srovnatelné s nejistotami dosahovaných u standartních strojů. Konstrukce s pevným portálem a aerostatickým uložením se osvědčila také pro stroje se zvláště vysokými požadavky na přesnost. [5]

S použitím vysoce přesné softwarové geometrické korektury lze docílit odchylek při měření délky o hodnotě přibližně $0,1 \mu\text{m}$. pro maximální možné využití schopností stroje, musí být použity senzory s maximální odchylkou. Z tohoto důvodu jsou vhodné senzory se zpracováním obrazu, mikrosonda a některé optické senzory. Hlavní využití těchto strojů je hlavně při kontrole dílů s maximální výrobní tolerancí v pásmu několika málo mikrometrů. [5]



Obr. 4) Souřadnicové měřicí stroje s pevným portálem [5]

4. Souřadnicové měřicí stroje s otočnými osami

Konstrukce speciálních souřadnicových měřících systémů s integrovanou vertikální otočnou osou a horizontálně nastavenou pinolou se používá pro měření rotačně symetrických dílců. Toto konstrukční řešení umožňuje vertikální umístění dílců s následujícími výhodami:

- zamezení prohnutí měřeného objektu,
- dobrá přístupnost,
- jen osově zatížení při umístění mezi hroty,
- malá náročnost na plochu u dlouhých dílů. [5]

Otočný stůl se polohuje společně s dílcem ve vertikální rovině. Jedna nebo dvě pinoly jsou společně uloženy na jednom vodícím stole. V horizontálním směru je umožněno vysouvání pinol se senzory. Tato konstrukční možnost vede u dlouhých dílců k velké výšce stroje. [5]

Stroje s horizontální pinolou se vyrábějí za účelem měření dílenských měřících úloh mechanickým ložiskovým systémem. Další použití je u měření precizních nástrojů, s aerostatickými ložisky. Při použití aerostatických ložisek je možné dosáhnout výchylek rotace s hodnotou několika málo $0,1 \mu\text{m}$. Rotační osy jsou vybaveny přesnými úhlovými systémy pro precizní dílčí měření. Je možné využít i stroje se dvěma pinolami pro multisenzorové užití. Využití je pro měření ozubených kol, hřídelí a řezných nástrojů. [5]

5. Souřadnicové měřicí stroje pro dvourozměrné měření

Při měření dílců s dvourozměrnými prvky jako řezy profilů tlakového lisu, vodících desek a jiné ploché dílce se zpravidla používá senzor pro zpracování obrazu. Pokud nejsou měřené objekty příliš velké a zároveň nejsou nároky na přesnost ve vztahu k rozsahu měření příliš vysoké, je možné takové dílce kompletně změřit „v obraze“. V konstrukci speciálních strojů (viz Obr. 5) se proto používají telecentrické objektivy a kamery s vysokým rozlišením. Při měření v rozsahu několika mm se odchylka pohybuje kolem 0,1 μm , při měření do cca 200 mm je odchylka kolem 10 μm . [5]

Proces ostření lze zcela vynechat použitím telecentrických objektivů. Celková konstrukce je hermeticky uzavřená s možností odizolování proti chvění z důvodu ochrany proti vnějším vlivům od výroby. Vedení jsou umístěna na pevném rámu přibližně v jedné rovině. [5]



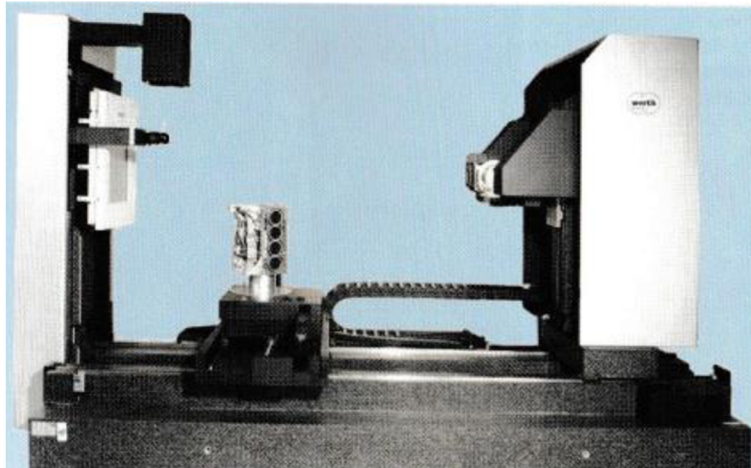
Obr. 5) Souřadnicové měřicí stroje pro dvourozměrné měření [5]

6. Souřadnicové měřicí stroje se senzorem počítačové tomografie

Základem pro konstrukci tohoto stroje je pevná žulová deska. Velmi přesná rotační osa na aerostatickém ložisku je na základě principu tomografie vždy integrována. Systémové komponenty, jako měřítka, lineární osy, pohony a rotační osa, vycházejí z klasických souřadnicových měřicích strojů. [5]

Souřadnicové stroje této konstrukce (viz Obr. 6) jsou flexibilní na základě mnoha pohyblivých os. V závislosti na požadované přesnosti mohou být lineární osy uloženy buď mechanicky nebo aerostaticky. Toto slouží k nastavení zvětšení rentgenové sensoriky, k rastrování u tomografického měření a u multisenzorových strojů. Zároveň se využívá k měření pomocí dotykových a optických senzorů. [5]

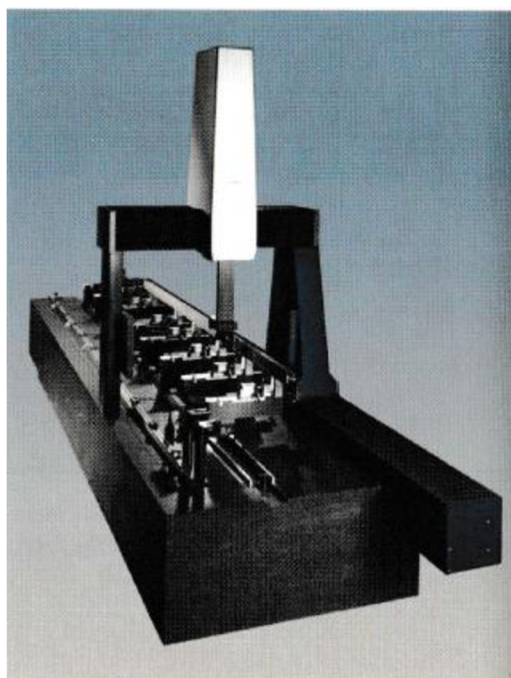
Za účelem rastrování, pohybem rentgenky a detektoru se provádí vertikální vztažný pohyb mezi sensorikou a otočným stolem případně měřeným objektem. Rastrování kolmo k otočné ose je možné provádět posunutím otočného stolu s objektivem. Horizontálním posuvem rentgenek se potom nastavuje vrcholový úhel kužele. Dotykové a optické senzory se používají při souhře vertikální sensorové osy s osami stolu. [5]



Obr. 6) Souřadnicové měřicí stroje se senzorem počítačové tomografie [5]

7. Souřadnicové měřicí stroje pro speciální použití

Výše popsané třídy strojů jsou vyráběny sériově. Z těchto programů jsou odvozeny konfigurace strojů pro speciální úlohy. Speciální stroje (viz Obr. 7) vznikají za pomoci použití sériových komponentů, které jsou vhodné pro speciální požadavky. Jako příklad je možné uvést rychlé měření válcových fréz, měření kuličkových vřeten s délkou více než 6 m nebo měření lopatek turbín v elektrárnách. [5]



Obr. 7) Souřadnicové měřicí stroje pro speciální použití [5]

3.2 Optický měřicí stroj Sol 311

Velkou výhodou multisenzorových strojů od firmy Micro-Vu je jejich univerzálnost, intuitivní a přívětivé ovládání a dlouhá životnost. [7]

Mezi měřicí stroje od americké firmy Micro-Vu patří EXCEL, SOL a VERTEX. V současnosti se v praxi především využívají automatické verze tohoto stroje (VERTEX). Tato bakalářská práce se zaměřuje na konvenční typ tohoto stroje. Jedná se tedy o typ s ručním ovládáním. [7]

Tato bakalářská práce se týká optického stroje SOL 311 (dále jen SOL 311, viz Obr. 8.) Dále existují typy SOL 161 a Sol 312. Hlavním senzorem SOL 311 je jeho kamera, která pracuje na principu analýzy obrazu. Díky tomu je SOL 311 schopen měřit s rozlišitelností na mikrometry, a to jak v rovině XY, tak i v ose Z a maximálních dovolených chyb (dále MPE) dle Tab 1. [3],[7]



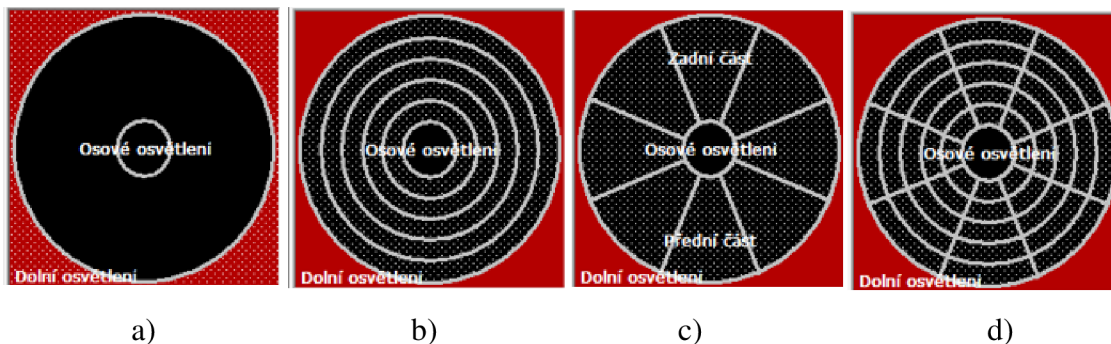
Obr. 8) SOL 311

Tab 1) Základní technické parametry SOL 311 (upraveno dle [3], [7])

	SOL 311	Jednotky	Poznámka
MPE v rovině XY	4,5+L/150	μm	L v mm
MPE v ose Z	2,8+L/100	μm	L v mm
Měřicí rozsah	315x315x160	mm	-
Hmotnost měřeného vzorku	MAX 10	kg	Doporučená prodejcem je hmotnost 3 kg
Rozměry stroje	827x1043x824	mm	-
Váha stroje	132	kg	-
Úhly		°	ISO 2768-m ČSN EN ISO 14405-3
Geometrické tolerance		μm	ČSN EN ISO 12181-1 ČSN EN ISO 12180-1

Při volbě osvětlení se zohledňuje, aby bylo dosaženo co nejostřejšího zobrazení hran. Jednoduché grafické rozhraní ovládá bílé LED diody, které mají dlouhou životnost. Pro lepší viditelnost se hrany osvětlují pomocí mezikruží, oktantů, kvadrantů a segmentů. Osvětlení má SOL 311 povrchové, osové a profilové. [8]

Povrchové osvětlení nebo také kruhové osvětlení je kruh, který je tvořený LED diodami po obvodu objektivu. Toto osvětlení se ovládá po mezikružích, oktantech, kvadrantech nebo segmentech, viz Obr. 9). Tohoto osvětlení se dosahuje kruhovým osvětlovačem po obvodu objektivu. [8]



Obr. 9) Typy ovládání: a) v mezikružích b) v oktantech c) v kvadrantech d) segmentech (upraveno dle [8])

Profilové osvětlení se nachází pod měřenou součástkou. Toto osvětlení se nejvíce používá při měření otvorů a hran dílů. Nejnižší intenzita osvětlení se používá z důvodu zobrazení měřené součástky jako černé a prázdná oblast jako světle šedá. Nejvíce se používá pro osvětlení plochých součástek. [8]

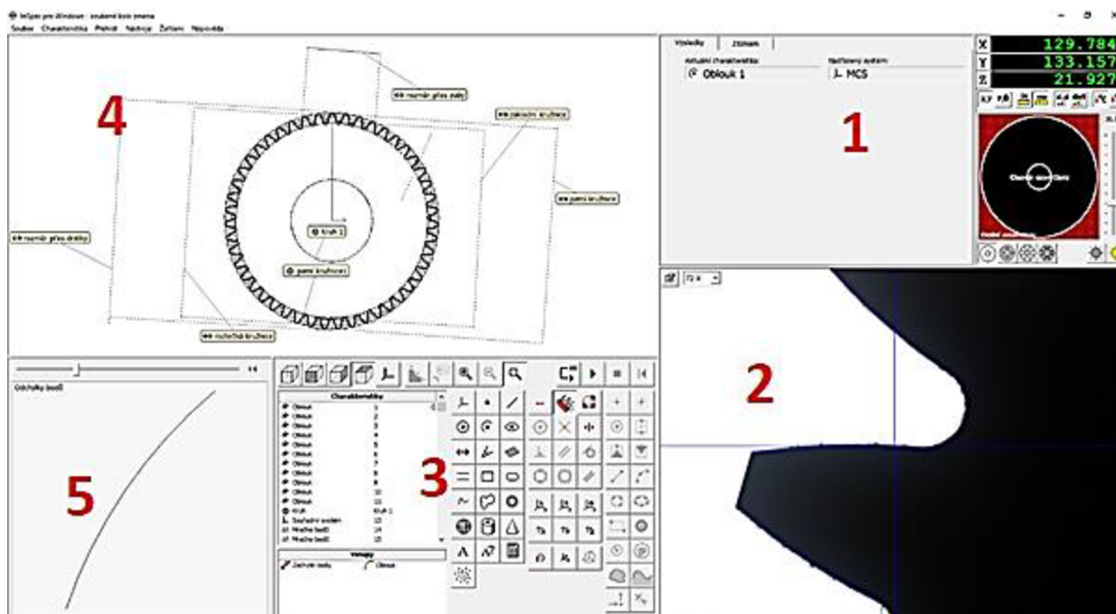
Osově osvětlení se nachází na straně zoomovacího objektivu a odráží se od 45° pùleného zrcátka v objektivu. Součástku osvětluje přímo středovou osou objektivu. Použití tohoto osvětlení se používá při velkém zvětšení. Zdroj tohoto osvětlení je souběžný s optickou osou. [8]

Při zahájení programu měření součástky se musí věnovat potřebný čas nastavení osvětlení. Program bude spolehlivější, když budou dobře osvětlené hrany. V případě lesklé součástky se musí vypnout 1 nebo více kvadrantů. Pro měření profilových hran se z důvodu odrazů detekcí hran vypíná povrchové osové osvětlení. Při práci blízko okna se musí dbát na okolní osvětlení z důvodu snížení účinnosti programovatelného osvětlení. [8]

Osvětlení se ovládá v softwaru InSpec. Jedná se o metrologický software InSpec, který měří aplikace pro optické a multisenzorové stroje. Jedná se o výkonný měřicí nástroj, který umožňuje jednoduché a přívětivé programování. [8]

V tomto softwaru lze nalézt mnoho typů geometrických charakteristik jako například hrana, výška a otvor měřeného dílu. Při měření charakteristik vypočte software InSpec jejich polohu, velikost a tvar charakteristiky. [8]

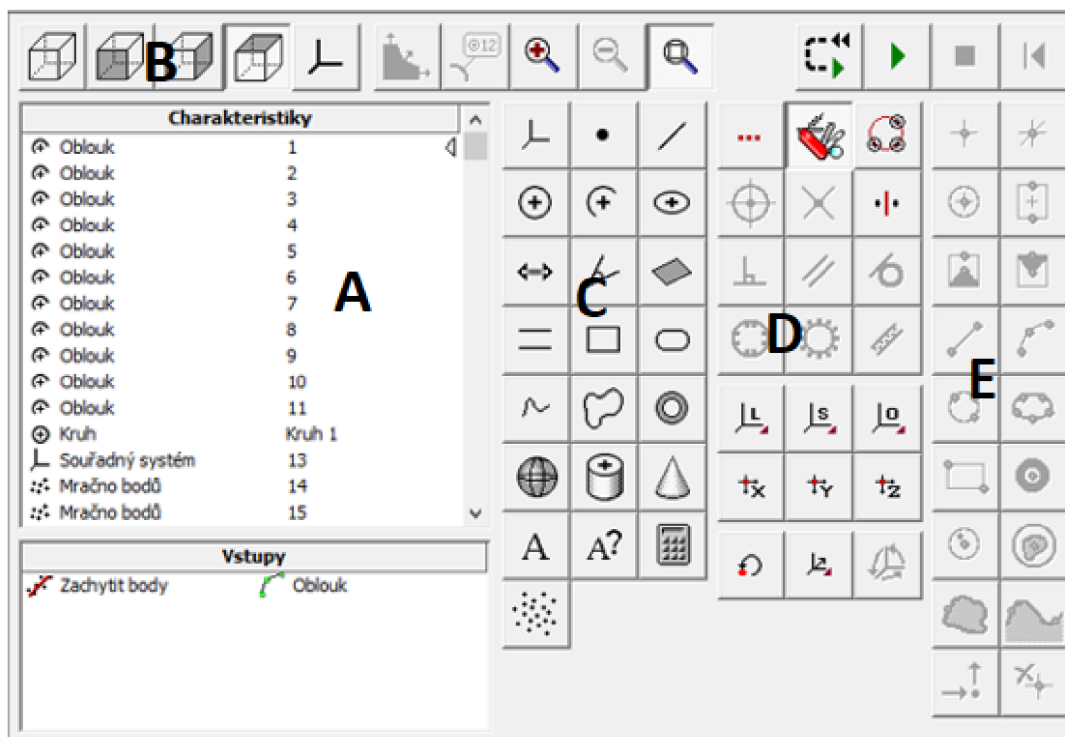
Software automaticky zaznamenává výsledky měření měřené součástky. Měří charakteristiky s použitím datových bodů. Pro různé typy charakteristik je nutné používat určitý minimální počet datových bodů. Například přímka vyžaduje minimálně dva body nebo kružnice 3 body. Při použití vyššího počtu těchto bodů se dosáhne větší přesnosti a reprodukovatelnosti. [8]



Obr. 10) Hlavní obrazovka softwaru InSpec: 1 Okno s výsledky a osvětlení; 2 Kamera; 3 Program obsahující charakteristiky, konstrukce a ikony nástrojů; 4 Okno schématu; 5 Zobrazení odchylek (upraveno podle [9])

Na Obr. 10) se nachází okna 1 až 5. V okně číslo 1 se nachází panel nastavení osvětlení. Osvětlení je plně programovatelné. V programu se uloží intenzita kanálu pro každý nástroj. Každý nástroj může pro každou charakteristiku používat vlastní nastavení. Osvětlení lze zkalkulovat pro každý stroj, takže jeho intenzitu použitou na jednom stroji lze následně reprodukovat na jiném stroji, což umožňuje použití téhož programu na různých strojích. Osvětlení lze rozdělit na povrchové, osové a profilové osvětlení. Dále se v této části nachází údaje o aktuální poloze a panel nastavení intenzity osvětlení. Lze zde vidět také informace o aktuální měřené charakteristice, grafické schéma a záznam o charakteristikách.[8]

V okně číslo 2 (viz Obr. 10) se nachází okno s kamerou. Zobrazuje reálný obraz měřeného dílu. V závislosti na tom, zda program vytváříme nebo spouštíme, se může obraz zobrazovat v reálném čase nebo také statické snímky. [8]



Obr. 11) Přiblížení okna číslo 3 v Obr. 2.10: A Aktuální program; B Okno pohledů a popisek; C charakteristiky; D konstrukce; E Optické nástroje

V Obr. 11) se nachází v části A aktuální program, kde je vypsán program dané součásti. Zde jsou vypsány jednotlivé prvky a jejich vlastnosti jako kruhovitost, profil povrchu a podobně. V části B je okno schématu, kde se nachází schématické pohledy například pohledy v rovinách XZ, ZY a XY. Dále se v této části nachází ikony přiblížení a oddálení a popisky, které se zobrazí v Okně 4 v Obr. 10). V části C se nachází charakteristiky jako například souřadnicový systém, bod, přímka, kruh, oblouk, elipsa, vzdálenost, úhel, rovina, mezer, obdélník, ovál, křivky, O-kroužek, koule, válec, kužel, text, pobídka, kalkulačka a mračno bodů. V části D se nachází ikona více vstupů, která umožňuje zadat více bodů k danému prvku. Dále se zde v této části nachází automatický režim, přichycení ke středu, středový bod, průsečík, symetrála, kolmost, rovnoběžnost, tečnost, vyhodnocení podle opsané kružnice, vyhodnocení podle vepsané kružnice, vyhodnocení podle minimální zóny, vyrovnaní souřadnic, natočení souřadnic, počátek souřadnic, natočení X, natočení Y, natočení Z. Dále se zde nachází vyvolání charakteristiky, posun a pracovní rovina. V části E se nachází optické nástroje, jako jsou manuální bod, bod zaostření, nejlepší hrana, první hrana, nejbližší hrana, nejvzdálenější hrana, přímka, oblouk, kruh, elipsa, obdélník, O-kroužek, profil kruhu, uzavřený profil, sledování uzavřené a otevřené křivky, přesun a zrušit. (upraveno dle [8])

V okně číslo 4 na Obr. 10) se zobrazuje grafický záznam měřené součástky. [8]

V okně číslo 5 na Obr. 10) se nachází zobrazení odchylek. Zobrazují se zde odchylky bodů, tvaru nebo tolerance tvaru profilu. [8]

4 POUŽITÍ OPTICKÝCH STROJŮ V PRAXI

Tato kapitola je rozdělena na tři podkapitoly a je zaměřena na systémový rozbor. První podkapitola je věnována ISO GPS. V této podkapitole jsou rozebrány dle pokynů vedoucího práce pouze charakteristiky, které jsou zmíněné ve výkresech.

Podkapitola 4.2 je zaměřena na výsledek měření v nejistotovém a chybovém přístupu s důrazem na nejistotový přístup. Podkapitola 4.3 je zaměřena na posouzení shody se specifikací, kde jsou objasněna pravidla. Na základě podkapitol 4.1, 4.2 a 4.3 byly zpracovány naměřené hodnoty v experimentální části.

4.1 ISO GPS

ISO je celosvětová federace národních normalizačních orgánů. ISO GPS jsou geometrické specifikace produktu dle norem ISO, které pokrývají všechny možné požadavky (uvedené na technickém výkresu) na:

- geometrii průmyslových obrobků, tj. tolerování rozměrů např. velikost, vzdálenost,
- jeho geometrické tolerance, tj. tvar, orientace, umístění, házení,
- mikrogeometrii tj. např. drsnost povrchu, vlnitost povrchu, atd.
- vady povrchu. [10], [11]

Filozofii ISO GPS představuje devět geometrických vlastností, tj. rozměr, vzdálenost, tvar, orientace, umístění, házení, profil textury povrchu, plocha textury povrchu, nedokonalosti povrchu. [12]

Existují 3 druhy ISO norem o GPS:

- základní normy,
- obecné normy,
- doplňkové normy. [13]

Základní normy definují pravidla a zásady vztahující se na všechny kategorie a všechny řetězce v matici ISO GPS. [13]

Obecné normy jsou normy ISO GPS vztahující se na jednu nebo více kategorií geometrických vlastností a na jeden nebo více článků řetězce, ale nejedná se o základní normy ISO GPS. [13]

Doplňkové normy stanovují pravidla pro konkrétní výrobní proces nebo pro konkrétní strojní prvky. [13]

V následující Tab 2) jsou geometrické vlastnosti lineárních a úhlových rozměrů a lineární vzdálenosti. Tyto vlastnosti jsou zde popsány z důvodu výskytu v experimentální části a na výkresech, které jsou v příloze.

Tab 2) Geometrické vlastnosti (upraveno dle [14], [15], [16])

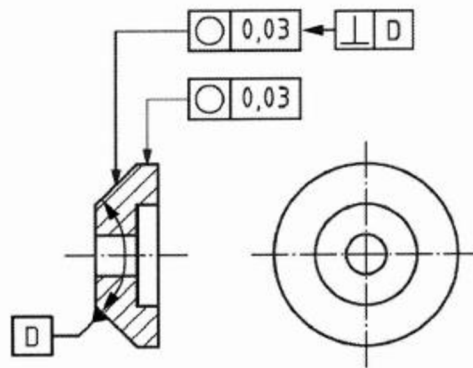
Geometrická vlastnost	Rozdělení	Popis	Článek
Rozměr	Lineální	Přiřazovací kritérium nejmenších čtverců (GG)	3.7.1.1
		Přiřazovací kritérium minimálního opsání (GN)	3.7.1.3
	Úhlové	Globální úhlový rozměr s přiřazovacím kritériem nejmenších čtverců (GG)	-
Vzdálenost	Lineární	Lineární úhlový rozměr s přiřazovacím kritériem nejmenších čtverců	7.3

V Tab 3) jsou znázorněny značky, pod kterými jsou jednotlivé charakteristiky znázorněny na výkresech a v experimentální části. Dále je v tabulce uvedeno, zdali je nutná základna a taky se v tabulce uvádí v jakém článku v normě ČSN EN ISO 1101:2017, kde jednotlivé charakteristiky můžeme nalézt. Charakteristiky, které jsou uvedené na výkresech součástek v experimentální části jsou popsány níže.

Tab 3) Značky charakteristik [10]

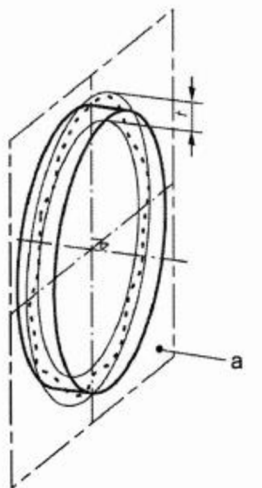
Specifikace	Charakteristika	Značka	Nutná základna	Článek
Tvar	Kruhovitost		Ne	17.4
	Válcovitost		Ne	17.5
	Profil povrchu		Ne	17.8
Orientace	Kolmost		Ano	17.11.6
Házení	Obvodové házení		Ano	17.16

Kruhovitost má charakter a tvar tolerovaného prvku explicitně stanoven jako kruhovitou křivku, nebo soubor kruhových křivek, které jsou libovolným prvkem. [10]



Obr. 12) Indikace kruhovitosti [10]

Na Obr. 12) lze vidět znázorněnou kruhovitost, kde extrahovaná čára musí ležet na příčném průřezu povrchu, která musí ležet mezi dvěma koplanárními soustřednými kružnicemi s rozdílem poloměrů 0,03. [10]



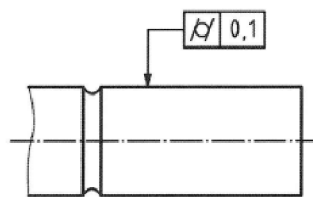
Obr. 13) Definice tolerančního pole kruhovitosti [10]

Na Obr. 13) je znázorněno toleranční pole v příčném průřezu povrchu, které je vymezeno 2 soustřednými kružnicemi s rozdílem poloměru t . [10]

Kruhovitost se vyhodnocuje pomocí:

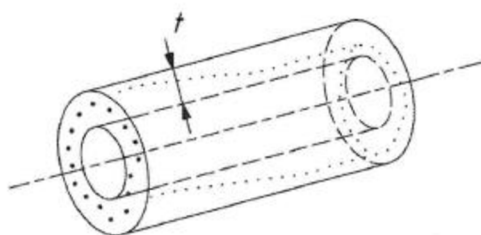
- referenční kružnice minimální zóny,
- referenční kružnice nejmenších čtverců (bylo použito v experimentální části),
- minimální opsané referenční kružnice (bylo použito v experimentální části),
- maximální vepsané referenční kružnice. [17]

Válcovitost má charakter a tvar jmenovitého tolerovaného prvku explicitně stanoven jako válcový prvek, který je plošný. [10]



Obr. 14) Indikace válcovitosti [10]

Na Obr. 14) je znázorněna válcovitost, kde válcový povrch musí ležet mezi 2 sousými válci s rozdílem poloměru 0,1. [10]



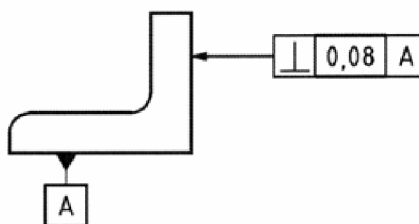
Obr. 15) Definice tolerančního pole válcovitosti [10]

Na Obr. 15) je znázorněno toleranční pole, které je vymezeno 2 sousými válci z rozdílem poloměru t . [10]

Válcovitost se vyhodnocuje pomocí:

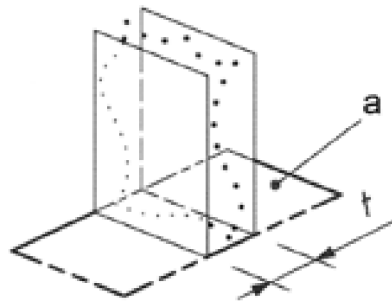
- referenčního válce minimální zóny,
- referenčního válce nejmenších čtverců (bylo použito v experimentální části),
- minimální opsaného referenčního válce (bylo použito v experimentální části),
- maximální vepsaného referenčního válce. [18]

Kolmost má charakter jmenovitého prvku, který je stanoven jako lineární prvek, soubor lineárních prvků, nebo plošný prvek a tvar každého jmenovitého tolerovaného prvku je vyjádřen jako přímka, nebo rovinný prvek. [10]



Obr. 16) Indikace kolmosti [10]

Na Obr. 16) je znázorněna kolmost, jejíž extrahovaný povrch musí ležet mezi 2 rovnoběžnými rovinami vzdálenými od sebe 0,08 a zároveň jsou kolmé k základní rovině A. [10]

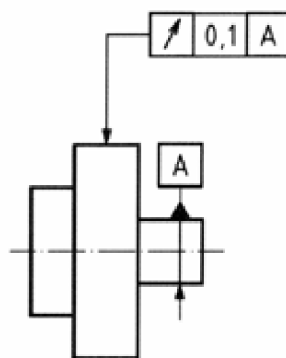


Obr. 17) Definice tolerančního pole kolmosti [10]

Na Obr. 17) je znázorněno toleranční pole, které je stanoveno 2 rovnoběžnými rovinami se vzdáleností t od sebe a je kolmé k základní ose. [10]

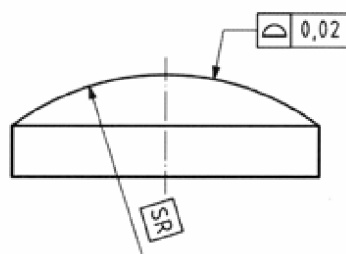
Obvodové házení má charakter a tvar jmenovitého tolerovaného prvku explicitně stanoven jako kruhová čára, nebo soubor kruhových čar, které jsou lineárním prvkem. [10]

Na obrázku Obr. 18) lze vidět indikaci obvodového házení, jehož extrahovaná čára leží v rovině příčného průřezu kolmé k základní ose A, která musí ležet mezi 2 koplanárními soustřednými kružnicemi s rozdílem poloměru 0,1. [10]



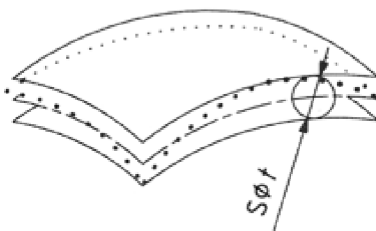
Obr. 18) Indikace obvodového házení [10]

Profil povrchu, který se nevztahuje k základně je charakter jmenovitého prvku explicitně stanovený jako plošný prvek a tvar jmenovitého tolerovaného prvku musí být dán úplnou indikací na výkrese. [10]



Obr. 19) Indikace profilu povrchu nevztahující se k základně [10]

Na Obr. 19) lze vidět indikaci profilu povrchu, kde povrch musí ležet mezi 2 nenkvídistantními povrchy obklopujícími koule o průměru 0,02, jejichž středy jsou umístěny na povrchu, který má teoreticky exaktní geometrický tvar. [10]

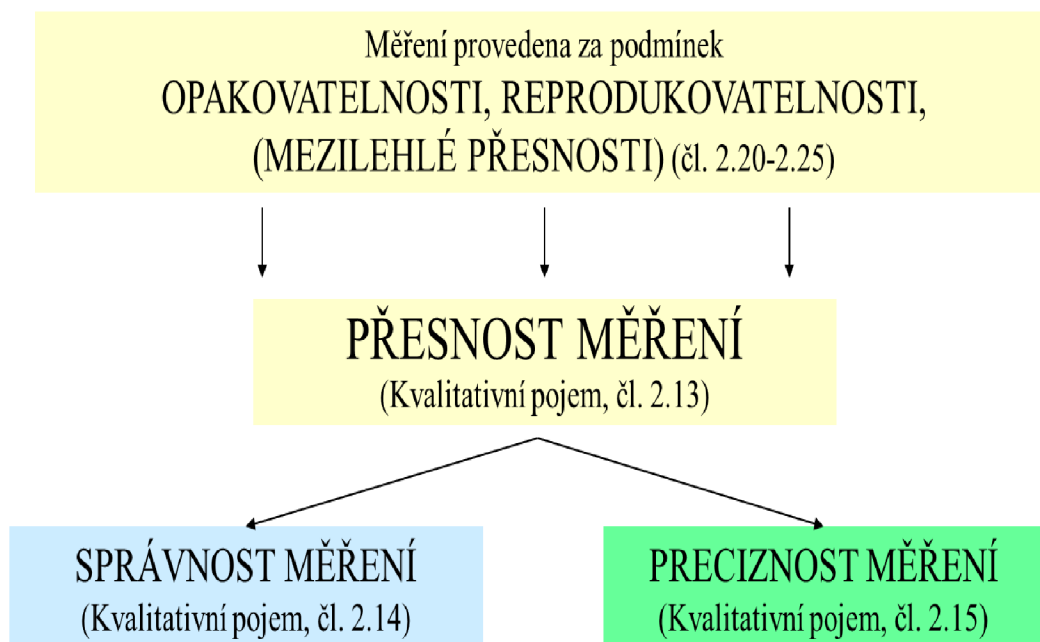


Obr. 20) Definice tolerančního pole profilu povrchu [10]

Na Obr. 20 je znázorněno toleranční pole, které je vymezeno 2 povrchy obklopujícími koule o průměru t , jejichž středy jsou umístěny na povrchu, který má teoreticky exaktní geometrický tvar. [10]

4.2 Vyhodnocení v chybovém a nejistotovém přístupu

Na Obr. 21) je znázorněna filozofie přesnosti měření podle mezinárodního metrologického slovníku VIM 3 (dále je VIM). [19]

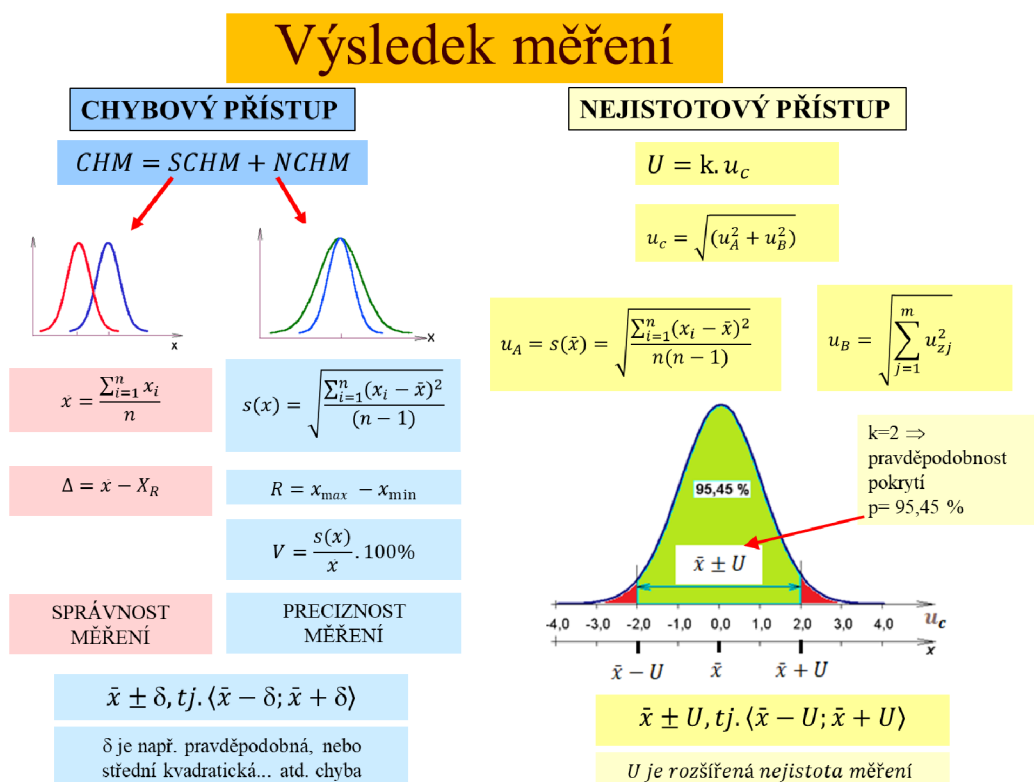


Obr. 21) Pojmy přesnost, správnost a preciznost měření dle VIM (převzato z [12])

Přesnost měření vyjadřuje těsnost shody mezi naměřenou hodnotou veličiny a pravou hodnotou měřené veličiny. Jelikož přesnost vnímáme jako kvalitativní pojem, můžeme konstatovat, že čím je měření přesnější, tím nabízí menší chybu měření. Tato filozofie představuje chybový přístup, který se používal hlavně ve 20. století. V dnešní době se spíše přiklání k nejistotovému přístupu, která se představuje jako nezáporný parametr charakterizující rozptýlení hodnot veličiny přiřazených k měřené veličině na základě použité informace. [19]

Výsledek měření v chybovém přístupu můžeme vidět na levé straně Obr. 22). Podle tohoto přístupu se stanoví výsledek pomocí hodnoty odhadu pravé hodnoty, která je co nejtěsnější k jediné pravé hodnotě. Odchylka od pravé hodnoty je složena z náhodné a systematické chyby, které jsou vždy rozlišitelné, a proto se musí různě zpracovávat. [19]

Ve 21. století je perspektivnější nová filozofie nejistotového přístupu, která je založena na matematickém přístupu k nejistotě měření prostřednictvím modelu měření za předpokladu, že měřená hodnota může být v podstatě jedinou hodnotou. Teorie nejistoty měření se chápe jako nezáporný parametr charakterizující rozptýlení hodnot veličin přiřazených k měřené veličině na základě vhodných informací. Jedná se tedy o soubor pravých hodnot, které jsou měřené ve shodě s definicí. Volbou vhodného koeficientu k zajistíme vhodnost pokrytí. Nejčastěji se používá pokrytí o velikosti 95,45 %. [19]



Obr. 22) Výsledek měření dle chybového a nejistotového přístupu (převzato z [12])

Předpokládejme jednotlivé složky nejistot měření, které tvoří kombinovanou nejistotu měření s normálním rozdělením pravděpodobností s parametry $N(\mu, \sigma^2)$. Za předpokladu, že pravděpodobnost pokrytí je 95,45 %, můžeme použít koeficient $k = 2$. Tento koeficient se v praxi používá nejčastěji. Pak interval $\langle \bar{x} - U; \bar{x} + U \rangle$ obsahuje soubor pravých hodnot měřených veličin X . Tento interval představuje význam zapsaného výsledku a vypočítá se podle vztahu (1)[12]

$$X = \bar{x} \pm U, \tag{1}$$

kde \bar{x} je aritmetický průměr naměřených dat, vypočtený podle vztahu (2) [26]

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}. \tag{2}$$

Rozšířená nejistota měření U je vypočtena podle vztahu (3)

$$U = k \cdot u_c. [12] \quad (3)$$

Kombinovaná standardní nejistota u_c je vyjádřena z nejistoty měření typu A a z nejistoty měření typu B podle vztahu (4) [12]:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}, \quad (4)$$

kde standardní nejistota typu A za předpokladu, $n \geq 10$ je tvořena z matematického hlediska směrodatnou odchylkou výběrového průměru, vypočteme podle vztahu (5)

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}. [12] \quad (5)$$

Standardní nejistota typu B, za předpokladu nekorelovaných zdrojů nejistot, se vypočte podle vztahu (6)

$$u_B = \sqrt{\sum_{j=1}^m u_{zj}^2}. [12] \quad (6)$$

Každá dílčí část nejistoty typu B ve vztahu (6) musí matematicky představovat směrodatnou odchylku příslušného vlivu na výsledek měření. [12]

Nejprve vytypujeme všechny možné zdroje nejistot z_j . Mezi zdroje patří například nejistota při kalibraci, nedokonalost konstrukce měřicího stroje, použité měřicí metody, nepřesné hodnoty konstant, způsob vyhodnocování a někdy i omezená zkušenost pracovníků v laboratoři. Následně pro každý zdroj nejistoty odhadneme rozsah odchylek $\pm \Delta z_{j\max}$ od jmenovité hodnoty tak, aby jeho překročení bylo málo pravděpodobné. Potom určíme, jakému rozdělení pravděpodobnosti odpovídají odchylky ΔZ v intervalu $\pm \Delta z_{j\max}$ a nakonec určíme hodnoty nejistoty u_{zj} , který vypočteme podle vztahu (7) [12]

$$u_{zj} = c_j \frac{\Delta z_{j\max}}{\chi}, \quad (7)$$

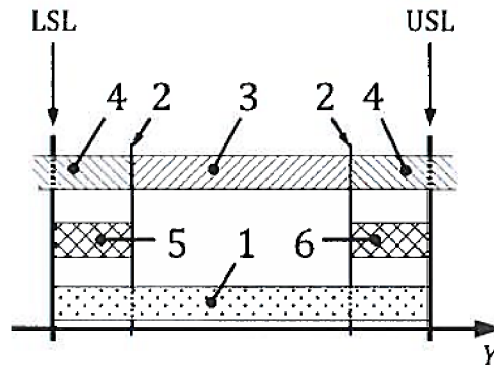
kde c_j je koeficient citlivosti a χ koeficient příslušného rozdělení. [12]

Výsledek měření závisí nejen na kvalitě měřicího stroje, ale také na mnoha dalších faktorech, včetně lidských faktorů (pokud měření není automatické). Z tohoto důvodu jednota měření obecně je limitující stav, o který je třeba usilovat, ale který jako jakýkoli ideál je nedosažitelný. [20]

4.3 Posouzení shody se specifikací

Shoda se specifikací je ověřena v případě, že naměřená hodnota spadá do pole přijetí. Pole přijetí je pole specifikace, které je sníženo o ochranná pásma s ohledem na limit pravděpodobnosti shody. Pokud je funkce hustoty pravděpodobnosti naměřených hodnot normální rozdělení se standardní odchylkou výrazně menší, než je velikost zóny specifikace, tak výchozí limita pravděpodobnosti shody 95 % odpovídá faktoru ochranného pásma 1,65, což je ekvivalent ochranného pásma. Šířka je pak 1,65násobek kombinované standardní nejistoty. [21]

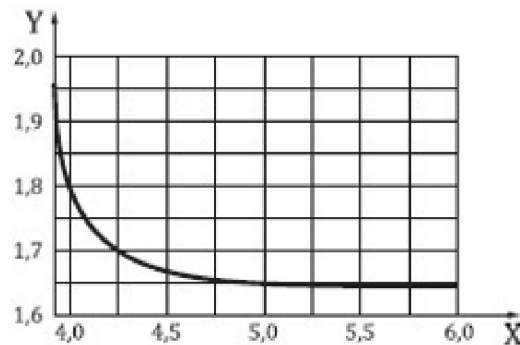
Pravidla pro ověření shody s danou tolerancí pro charakteristiky obrobku, nebo s danými největšími dovolenými chybami pro metrologickou charakteristiku měřicího zařízení, včetně případů, kdy naměřená hodnota klesne blízko specifikačním limitům, s ohledem na nejistotu měření. [21]



Obr. 23) Specifikace definovaná pomocí obou mezí [21]

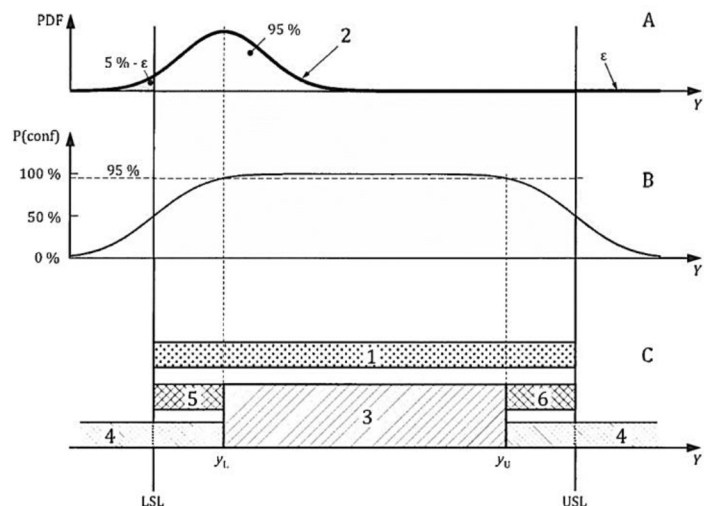
Na Obr. 23 lze vidět specifikace, které jsou definovány pomocí obou mezí. Pod polem 1 můžeme vidět pole specifikací, které zobrazuje intervaly hodnot, charakteristiky obrobku nebo největší dovolenou chybu metrologické charakteristiky měřidla, splňující specifikaci. Pole 2 je hranice přijetí. Pole 3 se nazývá pole přijetí, kterou tvoří soubor jednoho nebo více intervalů přijetí. Pole 4 je pole zamítnutí, které tvoří soubor jednoho nebo více intervalů zamítnutí. Pole 5 se nazývá ochranné pásmo na LSL, kde LSL je dolní mezní hodnota. Pole 6 je ochranné pásmo na USL, kde USL je horní mezní hodnota. Pole ochranné pásmo na LSL je g_{LA} a ochranné pásmo na USL je g_{UA} se vypočítají dle vztahu (8). [21]

$$g_{LA} = g_{UA} = g_A \cdot u_C \quad (8)$$



Obr. 24) Faktor ochranného pásma g pro pravděpodobnost pokrytí 95,45 % [21]

Na Obr. 24) je faktor ochranného pásma g pro pravděpodobnost pokrytí 95,45 % jako funkce poměru mezi šířkou pole specifikace a kombinovanou nejistotou měření u_C . Osa X se nazývá $(USL - LSL)/u_C$ a osa Y se nazývá hodnota faktoru g . Můžeme vidět na obrázku, že maximální hodnota pro g je 1,96, tedy platí, že $(USL - LSL)/u_C$ se rovná $2 \times 1,96 = 3,92$ a minimální hodnota pro g je 1,65. [21]

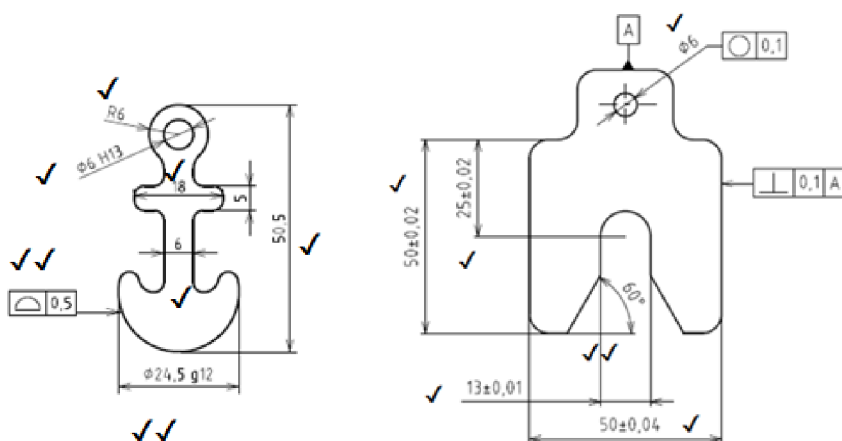


Obr. 25) Ověřování shody se specifikací [21]

Na Obr. 25) lze vidět v horní části A hustotu pravděpodobnosti měřené hodnoty y_L tj. nejmenší naměřená hodnota, pro kterou může být shoda ověřena. Pole 2 je hustota pravděpodobnosti v místě $LSL + g_{LA}$ a ε je nekonečný malý zbytek. V prostřední části B lze vidět pravděpodobnost shody a v dolní části C je pole přijetí při ověřování shody, kde pole 1 je pole specifikace, pole 3 je standardní pole přijetí, pole 4 standardní pole zamítnutí, pole 5 je ochranné pásmo g_{LA} na LSL a pole 6 je ochranné pásmo g_{UA} na USL. Osa Y znázorňuje naměřenou hodnotu a y_U znázorňuje největší naměřenou hodnotu. [21]

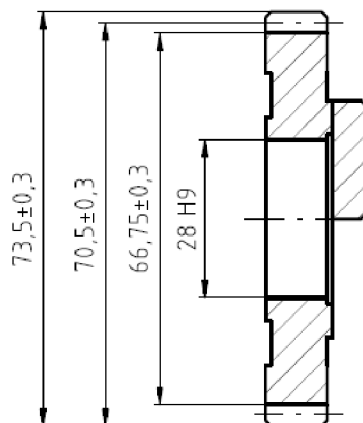
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Tato kapitola se věnuje praktické části. Dle pokynů vedoucího práce byly vybrány pro měření tyto vzorky: kotva, podložka a ozubené kolo. Tyto vzorky byly vybrány proto, aby na nich byly ukázány různé měřené prvky, jako například kruh, přímka, oblouk, bod a podobně a jejich vlastnosti (průměr, vzdálenost, úhel, kruhovitost atd.) viz Obr. 26), kde jsou vyznačené značkou ✓ prvky, které byly vyhodnoceny v přílohách 11 a 12. Značkou ✓✓ jsou vyznačeny prvky, které jsou vyhodnoceny v experimentální části. Výkresy těchto vzorků je možné nalézt v přílohách 7, 8, 9.



a)

b)



+ „Střední hodnota rozměru přes zuby“ ✓✓

c)

Obr. 26) a) Schéma „Kotva“ b) Schéma „Podložka“ c) Schéma „Ozubené kolo“

5.1 Kotva

První měřený vzorek je „Kotva“, která slouží jako přívěsek na klíče viz Obr. 27) a). Jedná se o symetrickou součástku. Při měření kotvy se musel vytvořit nejprve program, díky kterému se potom změřily rozměry a jeho vlastnosti dle Tab 4). Na Obr. 27) lze vidět začátek tohoto programu v softwaru InSpec.

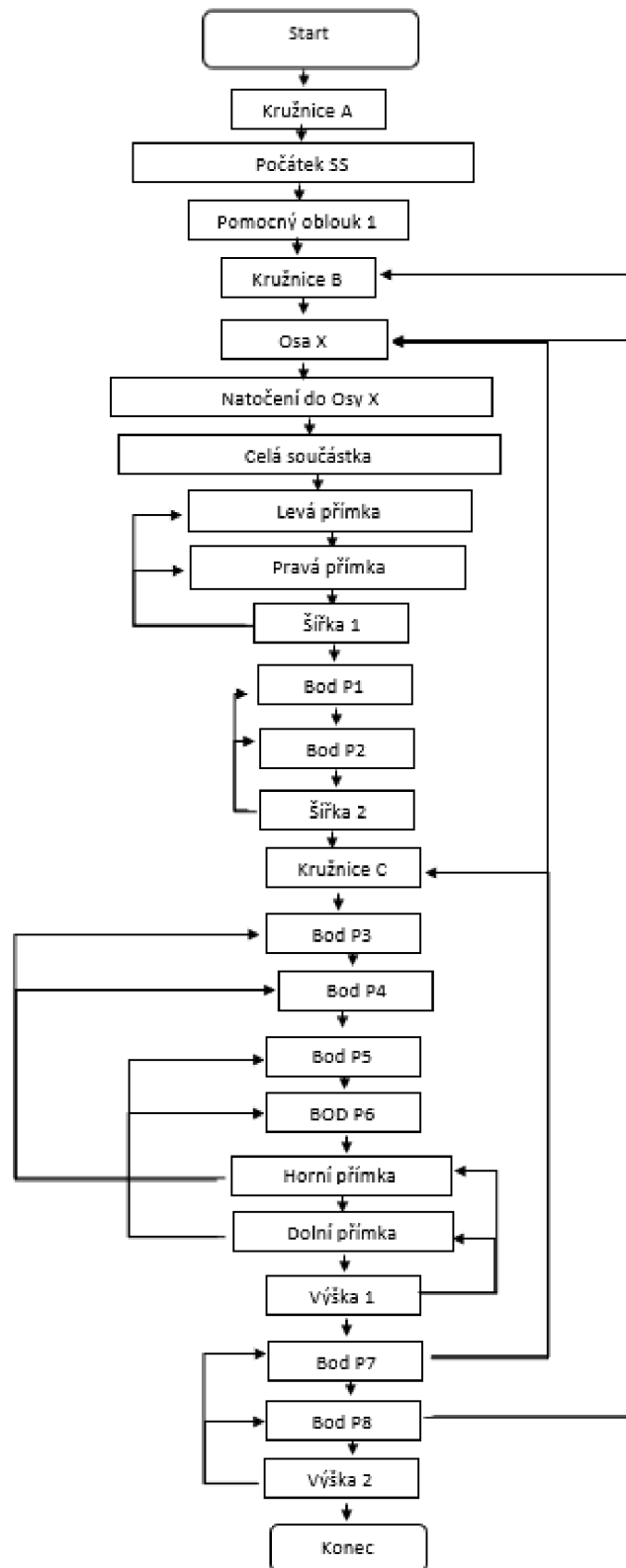
Charakteristiky		^
⊕ Kruh	1 Kružnice A	◀
└ Souřadný systém	2 Počátek SS	
⊕ Oblouk	3 Pomocný obl	
⊕ Kruh	4 Kružnice B (G	
/ Přímka	5 Osa X	
└ Souřadný systém	6 Natočení do	
⊕ Mračno bodů	7 Celá součást	
/ Přímka	8 Levá přímka	
/ Přímka	9 Pravá přímka	
↔ Vzdálenost	10 Šířka 1	
• Bod	11 Bod P1	
• Bod	12 Bod P2	
↔ Vzdálenost	13 Šířka 2	▼

Obr. 27) Začátek programu „kotva“ v softwaru InSpec

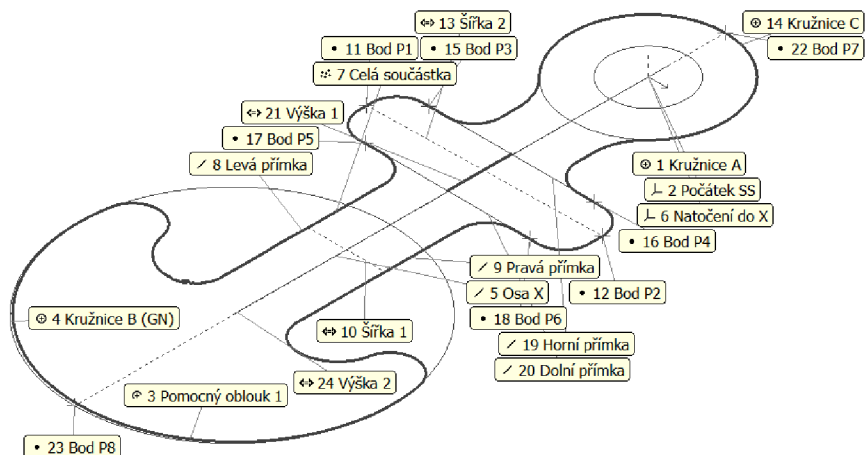
Tab 4) Prvky a jejich vlastnosti součástky „kotva“

Geometrická vlastnost	Prvek	Vlastnosti	Jednotky
Lineární a úhlové rozměry	Kružnice A	Kruhovitost	mm
	Kružnice B	Kruhovitost	mm
		Profil tvaru	mm
	Kružnice C	Kruhovitost	mm
	Šířka 1	-	mm
	Šířka 2	-	mm
	Výška 1	-	mm
	Výška 1	-	mm

V Obr. 28) lze vidět diagram programu „Kotva“, kde jsou zaznamenány jednotlivé kroky měření. Celý program je popsán v tabulce „Program kotva“, která se nachází v příloze 1.



Obr. 28) Vývojový diagram proměření programu „Kotva“



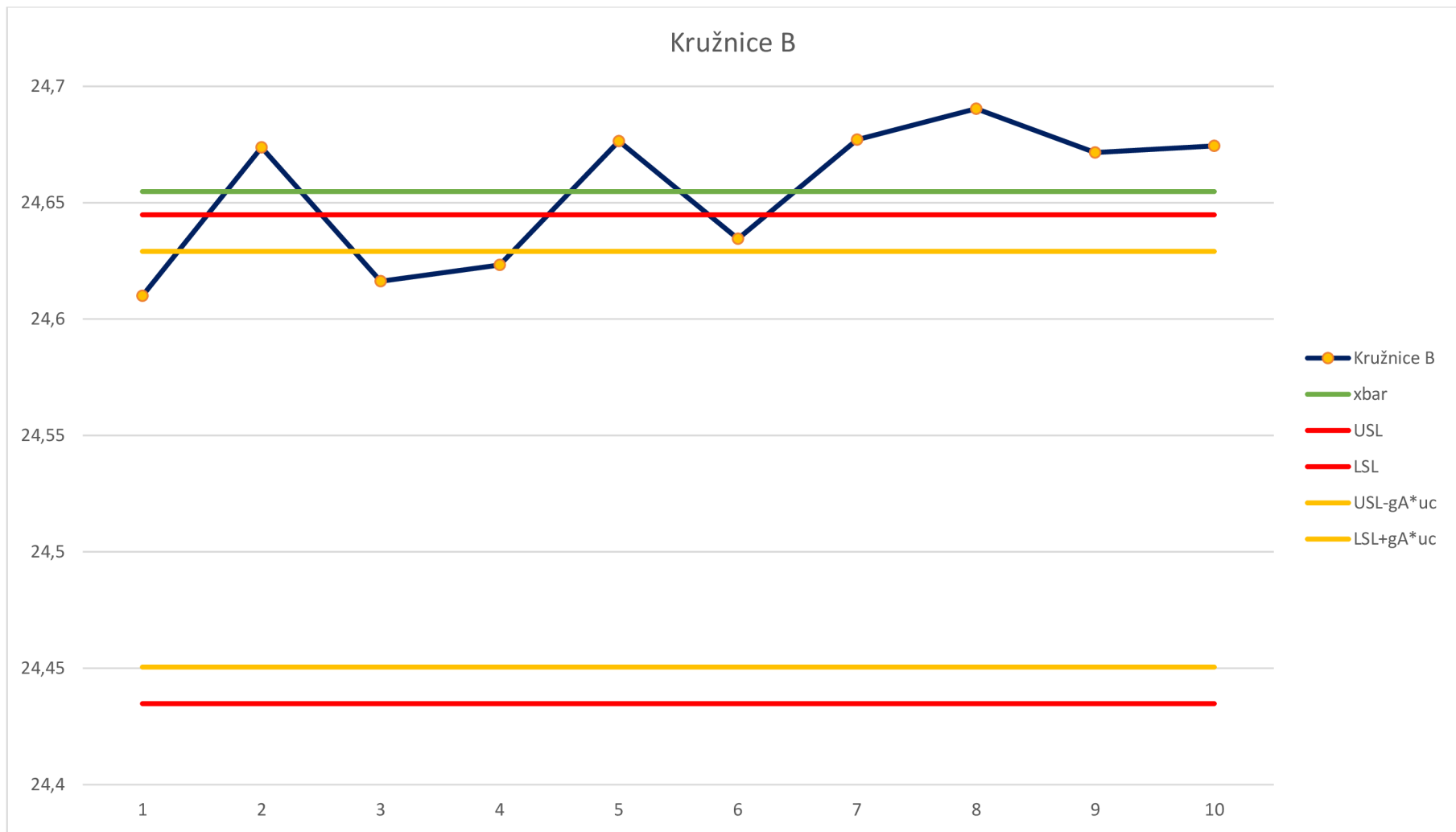
Obr. 29) Schéma „Kotva“ v programu InSpec

Na Obr. 29) je znázorněno schéma „Kotva“, které bylo vytvořeno v programu InSpec. Ve schématu jsou znázorněny jednotlivé prvky programu.

Tab 5) Naměřené hodnoty „Kružnice B“

	Kružnice B [mm]
1	24,6100
2	24,6738
3	24,6163
4	24,6233
5	24,6764
6	24,6345
7	24,6771
8	24,6904
9	24,6716
10	24,6744
x bar	24,6548
s(x)	0,0301
u _A	0,00952
u _B	0,00026
u _C	0,00952
U=u _C *2	0,01904
Výsledek	24,66±0,02
Specifikace	24,5 g12
(USL-LSL) /u _C	22,0555
g _A	1,65
g _A * u _C	0,0157

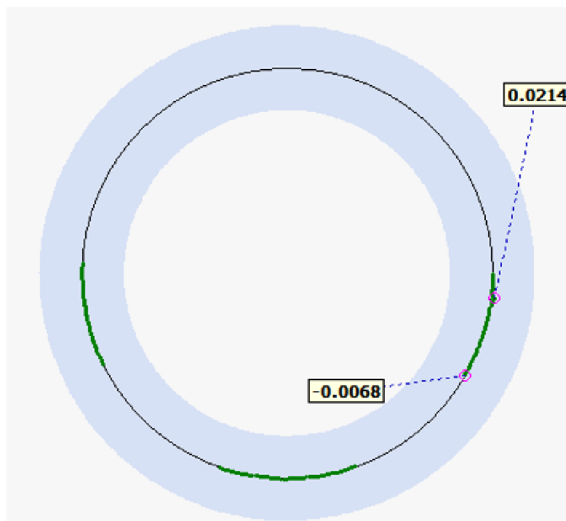
V Tab 5) lze vidět naměřené hodnoty „Kružnice B“. Tato hodnota byla naměřena 10krát a následně byl vypočítán průměr z naměřených hodnot (x bar), nejistota měření typu A (u_A), nejistota měření typu B (u_B), jejichž jednotlivé složky jsou vypočteny v příloze 11. [12], [27]. Kombinovaná nejistota (u_C) a rozšířená nejistota (U), kde byl zvolen pro pravděpodobnost pokrytí 95,45% koeficient rozšíření 2. Následně bylo vypočteno ochranné pásmo (g_A*u_C).



Obr. 30) Posouzení shody se specifikací „Kružnice B“

Na Obr. 30) lze vidět posouzení shody „Kružnice B“. Zde je možné vidět, že průměrná hodnota naměřených hodnot nespadá do pole přijetí. Tolerance g12 byla zvolena z důvodu názorné ukázky, když průměrná hodnota nespadá do pole přijetí. „Kružnice B“ byla vytvořena pomocí minimální opsané referenční kružnice. Nejistota měření je poměrně velká 20 μm a ochranné pásmo 15,7 μm .

Dále byla vyhodnocena tolerance tvaru profilu, kde povrch musí ležet mezi dvěma povrchy obklopující koule o průměru 0,5. Z Obr. 31) lze vidět, že měřená tolerance tvaru povrchu spadá do této tolerance. Maximální odchylka je 0,0214 a minimální odchylka je -0,0068. Tento obrázek je zvětšen 10x.



Obr. 31) Tolerance tvaru profilu

5.2 Podložka

Druhá měřená součástka je „Podložka“ viz Obr. 26) b). Jedná se o symetrickou součástku. Při měření součástky se musel vytvořit program, díky kterému se potom změřili rozměry a další vlastnosti viz Tab. 6. Na Obr 32 lze vidět začátek tohoto programu.

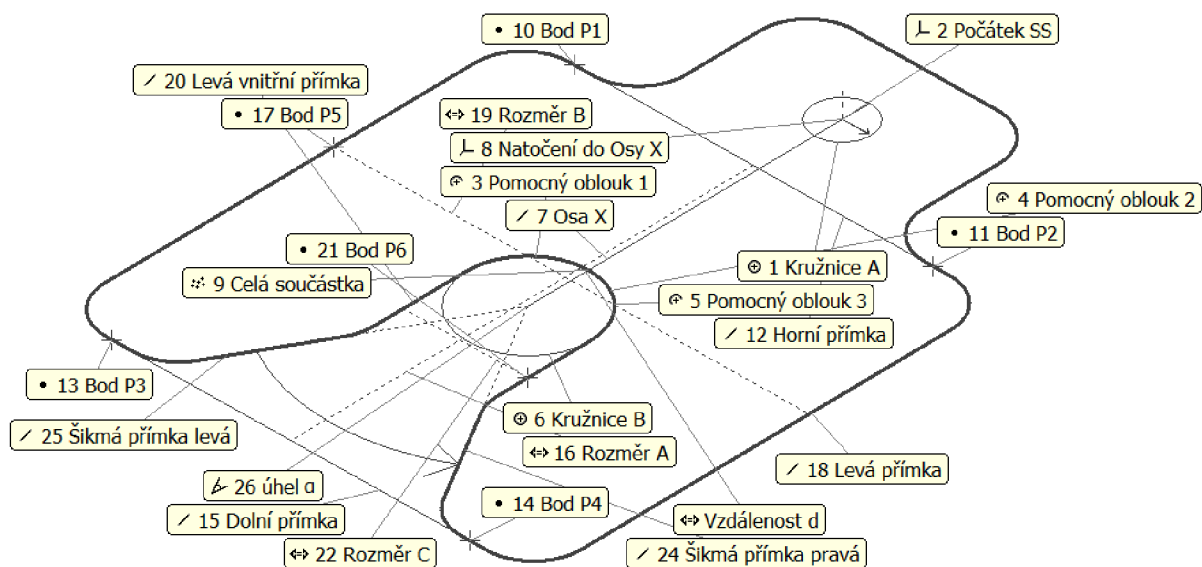
Charakteristiky	
⊕ Kruh	1 Kružnice A
└ Souřadný systém	2 Počátek SS
⊕ Oblouk	3 Pomocný ob
⊕ Oblouk	4 Pomocný ob
⊕ Oblouk	5 Pomocný ob
⊕ Kruh	6 Kružnice B
/ Přímka	7 Osa X
└ Souřadný systém	8 Natočení do
::: Mračno bodů	9 Celá součás
• Bod	10 Bod P1
• Bod	11 Bod P2
/ Přímka	12 Horní přím
• Bod	13 Bod P3

Obr. 32) Začátek programu „Podložka“ v softwaru InSpec

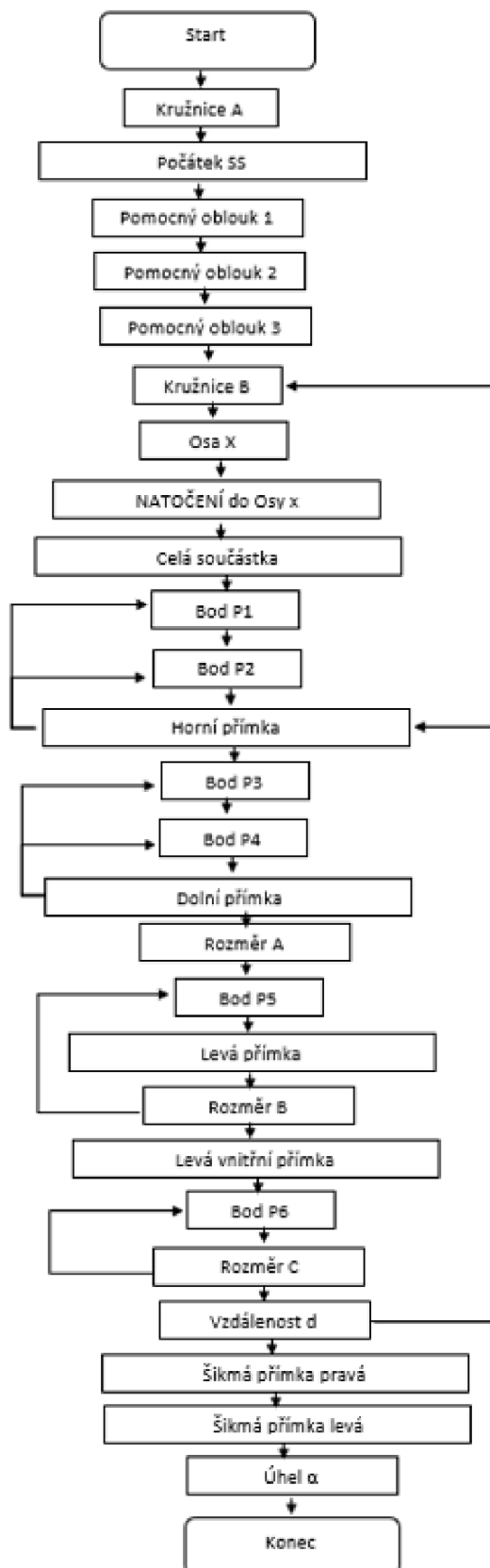
Tab 6) Prvky a jejich vlastnosti součástky „Podložka“

Název	Prvek	Vlastnosti	Jednotky
Lineární, úhlové rozměry a geometrické tolerance	Kružnice A	Kruhovitost	mm
	Pomocný oblouk 1	-	mm
	Kružnice B	Kruhovitost	mm
	Rozměr A	-	mm
	Rozměr B	-	mm
	Rozměr C	-	mm
	Úhel α	Úhel	$^{\circ}$
Vzdálenosti	Vzdálenost d	-	mm

V Obr. 34) lze vidět diagram programu „Podložka“, kde jsou zaznamenány jednotlivé kroky měření. Celý program je popsán pak v tabulce „Program podložka“, která se nachází v příloze 2. Na Obr. 33) je znázorněno schéma „Podložka“, které bylo vytvořeno v programu InSpec. Ve schématu jsou znázorněny jednotlivé prvky programu.



Obr. 33) Schéma „podložka“ v programu InSpec



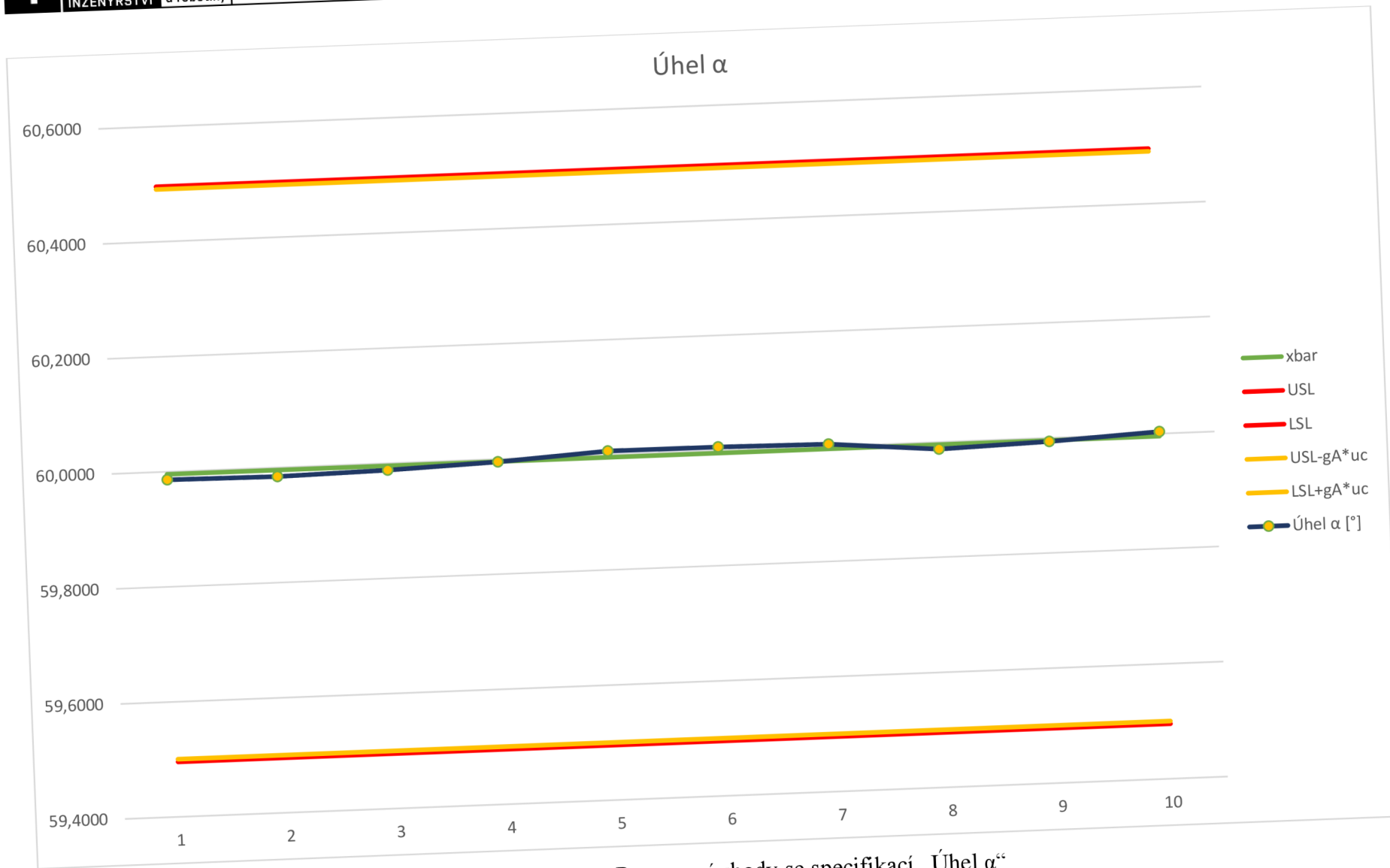
Obr. 34) Vývojový diagram pro měření programu „Podložka“

Tab 7) Naměřené hodnoty „Úhel α “

	Úhel α [°]
1	59,9860
2	59,9844
3	59,9881
4	59,9952
5	60,0066
6	60,0064
7	60,0039
8	59,9877
9	59,9937
10	60,0034
x bar	59,9956
s(x)	0,00885
u_A	0,0028
u_B	0,00041
u_C	0,00283
$U=u_C*2$	0,005657
výsledek	59,996±0,006
Specifikace	60±0,02
(USL-LSL) / u_C	14,1414
g_A	1,65
$g_A * u_C$	0,00467

V Tab 7) lze vidět naměřené hodnoty požadované hodnoty „Úhel α “. Tento rozměr byl naměřen 10x a byl následně vypočítán průměr z naměřených hodnot (x bar), nejistota měření typu A (u_A), nejistota měření typu B (u_B), jejichž jednotlivé složky jsou vypočteny v příloze 11. [12], [27]. Kombinovaná nejistota (u_C) a rozšířená nejistota (U), kde byl zvolen pro pravděpodobnost pokrytí 95,45% koeficient rozšíření 2. Následně bylo vypočteno ochranné pásmo ($g_A * u_C$).

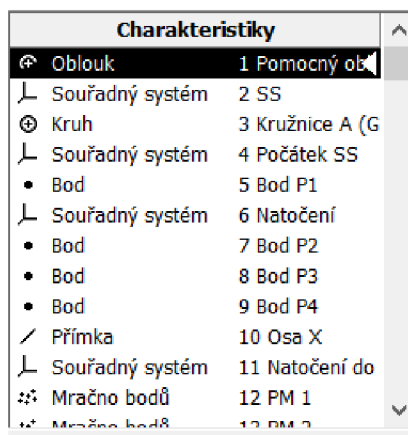
Na Obr. 35) lze vidět posouzení shody „Úhel α “. Lze vidět, že průměrná hodnota úhlu α spadá do pole přijetí. Jelikož se nejedná o funkční prvek, tak byla zvolena tolerance dle normy o všeobecných tolerancích (ISO 2768-m). Vhodné je použití SOL 311 pro tuto součástku, protože je plochá a má jednoduché tvary. Další výhodou je malá nejistota měření 6 μm a ochranné pásmo jen 4,7 μm .



Obr. 35) Posouzení shody se specifikací „Úhel α “

5.3 Ozubené kolo

Jako poslední měřený vzorek bylo zvoleno ozubené kolo viz Obr. 26) c). Jedná se o symetrickou součástku. Také zde se vytvořil speciální program v softwaru InSpec. Při měření součástky se musel vytvořit program, díky kterému potom byly změřeny rozměry a další geometrické vlastnosti viz Tab. 8. Na Obr. 36) lze vidět začátek tohoto programu.



Obr. 36) Začátek programu „Ozubené kolo“ v softwaru InSpec

Tab 8) Prvky a jejich vlastnosti ozubeného kola

Geometrická vlastnost	Prvek	Vlastnosti	Jednotky
Lineární, úhlové rozměry a geometrické tolerance	Základní kružnice	Kruhovitost	mm
	Roztečná kružnice	Kruhovitost	mm
	Patní kružnice	Kruhovitost	mm
	Boky zubů	Vzdálenost (Střední hodnota rozměru přes zuby)	mm

Nejprve je třeba definovat některé rozměry ozubeného kola

Poloměr roztečné kružnice se vypočítá dle vztahu (9)

$$R = m \cdot z. [24] \quad (9)$$

Poloměr hlavové kružnice vyjádřena dle vztahu (10)

$$R_a = R + h_a, \quad (10)$$

kde h_a je výška hlavy zubů, který se rovná modulu dle vztahu (11)

$$h_a = m. [24] \quad (11)$$

Poloměr patní kružnice je vyjádřen dle vztahu (12)

$$R_f = R - h_f, \quad (12)$$

kde h_f je výška paty zubů, který je 1,25násobek modulu dle vztahu (13)

$$h_f = 1,25m. [24] \quad (13)$$

Rozměr přes zuby se vypočítá dle vztahu (14)

$$W = m * \cos\alpha [\pi * (z' - 0,5) + z * (tg\alpha - arca)]. [12] \quad (14)$$

Počet zubů, přes které se měří je vyjádřen vztahem (15)

$$z' = \frac{\alpha}{180} * z + 0,5. [23] \quad (15)$$

Horní mez střední hodnoty přes zuby

$$W_{mH} = W - |E_{WmS}|. [12] \quad (16)$$

Dolní mez střední hodnoty přes zuby

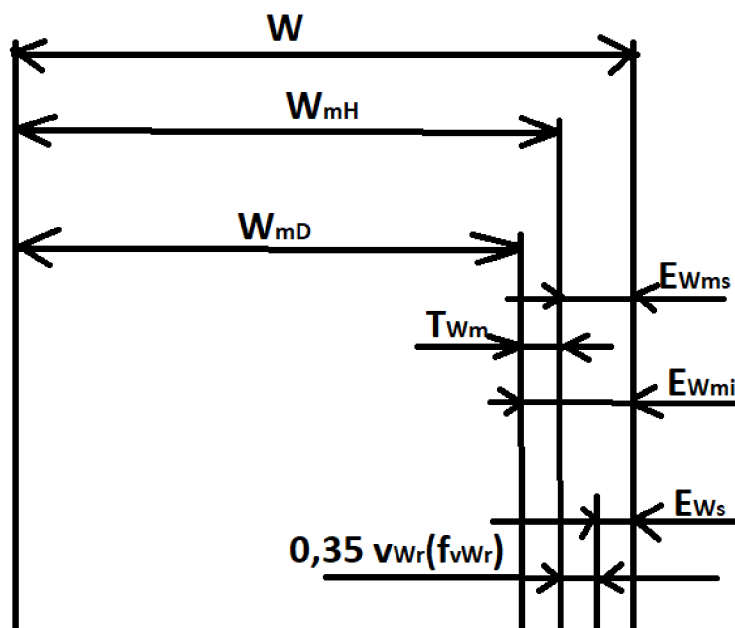
$$W_{mD} = W - |E_{WmS}| - T_{Wm}. [12] \quad (17)$$

V Tab 9) se nachází vypočítané i tabulkové hodnoty zvoleného ozubeného kola.

Tab 9) Hodnoty měřeného ozubeného kola [12], [22], [23]

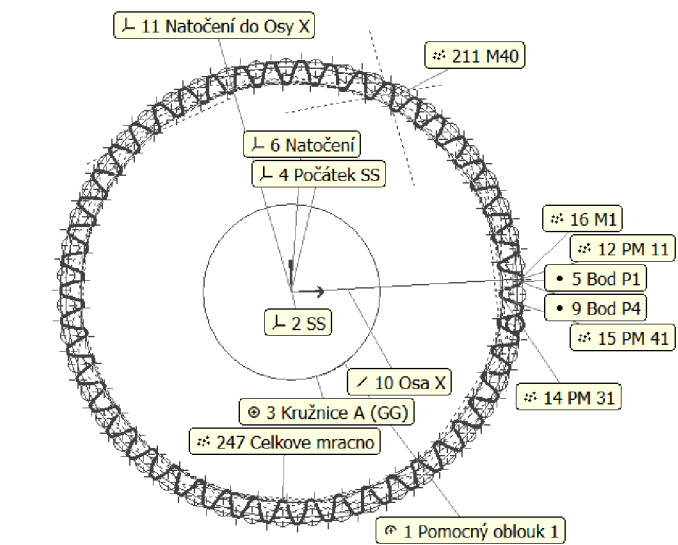
Název	Tabulková hodnota [mm], [-], [°]	Vypočtená hodnota [mm]
Počet zubů z		47
Modul m		1,5
Roztečná kružnice d		70,5
Hlavová kružnice d _b		66,75
Patní kružnice d _f		73,5
Jmenovitý rozměr přes zuby W	25,3423	25,2823
Počet zubů přes, který se měří z'	6	5,72≈6
Úhel záběru α		20
Hlavová vůle c		0,375
Nejmenší úchylka rozměru přes zuby pro vnější ozubení -E _{Ws}	0,06	-
Mezní obvodové házení ozubení F _r	0,045	-
Tolerance rozměru přes zuby T _w	0,08	-
Nejmenší úchylka střední hodnoty rozměru přes zuby -E _{WmS}	0,071	-
Tolerance střední hodnoty rozměru přes zuby T _{Wm}	0,06	-
Horní mez střední hodnoty přes zuby W _{mH}	25,2713	-
Dolní mez střední hodnoty přes zuby W _{mD}	25,2113	-

Na Obr. 37) lze vidět vyznačené tolerance „Střední hodnota rozměru přes zuby“



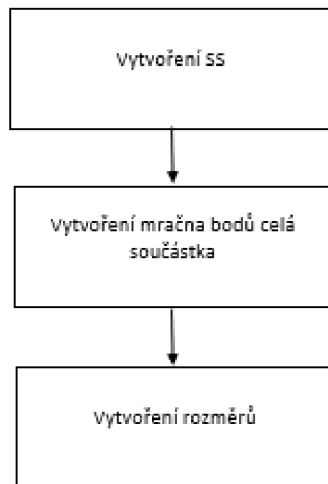
Obr. 37) Tolerance pro střední hodnotu rozměru přes zuby (upraveno dle [12])

Celý program je popsán pak v tabulce „Program ozubené kolo“, která se nachází v příloze 3. Na Obr. 38) je znázorněno schéma ozubeného kola, jehož program byl vytvořen v softwaru InSpec. Ve schématu jsou znázorněny některé prvky programu.



Obr. 38) Schéma ozubeného kola v programu InSpec

Na Obr. 39) lze vidět zkrácený diagram programu ozubeného kola.



Obr. 39) Zkrácený vývojový diagram ozubeného kola

Celý vývojový diagram „Ozubené kolo“ je v příloze 10.

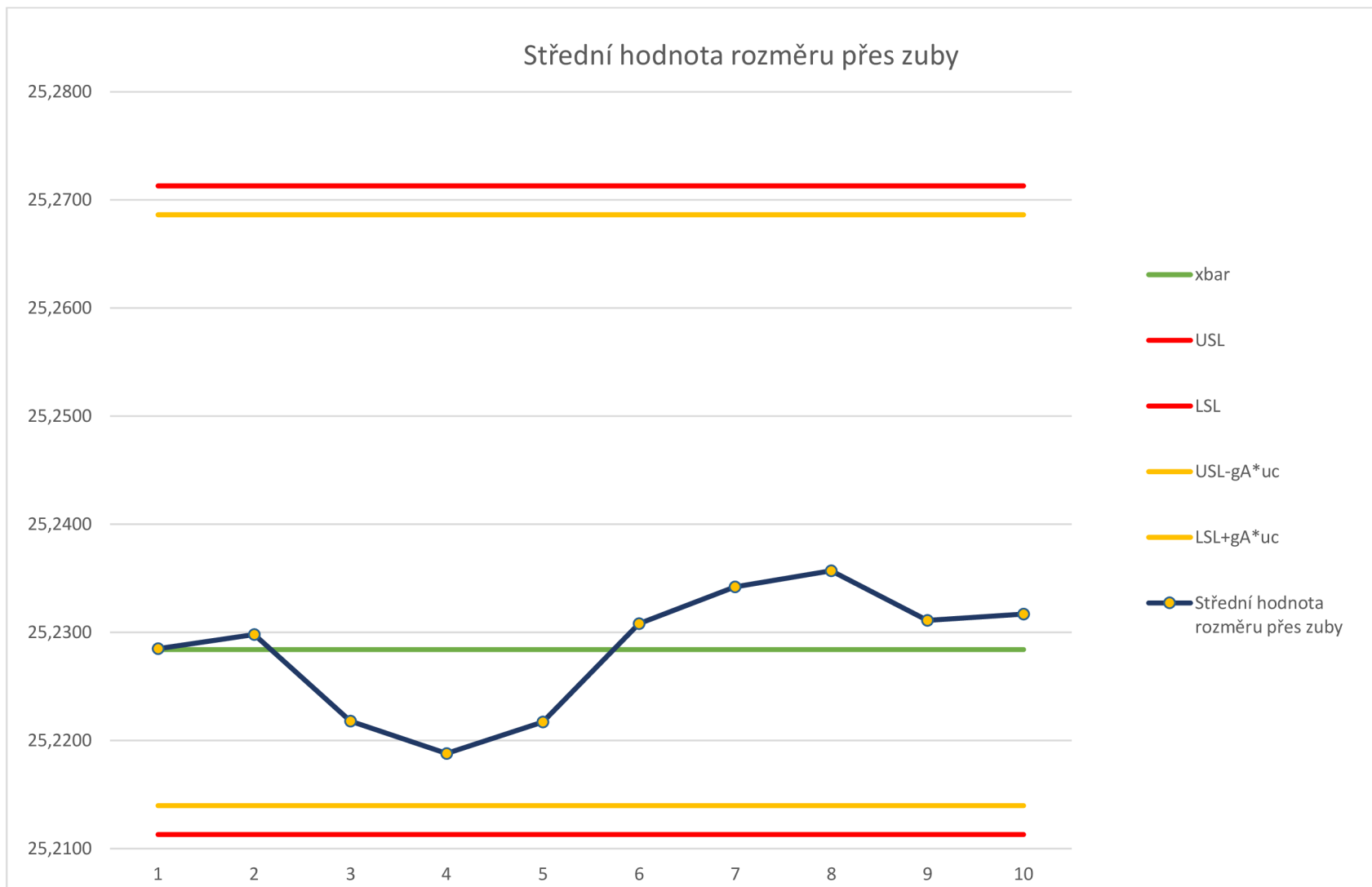
V Tab 10) lze vidět naměřenou požadovanou hodnotu „Střední hodnotu rozměru přes zuby“. Každý rozměr byl měřen 10x a následně bylo vyhodnoceno, zda leží v poli přijetí. Rozměr přes zuby byl měřen vždy přes 6 zubů. Tento rozměr byl měřen přes všechny zuby a následně se z naměřených hodnot udělal průměr (viz příloha 13).

Následně byl vypočítán průměr z naměřených hodnot, nejistota měření typu A (u_A) nejistota měření typu B (u_B), jejichž jednotlivé složky jsou vypočteny v příloze 11. [12], [27]. Kombinovaná nejistota (u_C) a rozšířená nejistota (U), kde byl zvolen pro pravděpodobnost pokrytí 95,45% koeficient rozšíření 2. Následně bylo vypočteno ochranné pásmo ($g_A * u_C$).

Na obrázku Obr. 41) lze vidět posouzení shody „Střední hodnoty rozměru přes zuby, který vyšel do pole přijetí. Horní mezní rozměr a dolní mezní rozměr se vypočítal pomocí tabulek a vztahů podle rovnic (16) a (17).

Tab 10) Naměřené hodnoty „Střední hodnoty rozměru přes zuby“

	Střední hodnota rozměru přes zuby [mm]	Výsledek vyhodnocení [mm]	
1	25,2285	x bar	25,228410
2	25,2298	s(x)	0,005710
3	25,2218	u_A	0,001806
4	25,2188	u_B	0,000296
5	25,2217	u_C	0,001830
6	25,2308	$U = u_C * 2$	0,003660
7	25,2342	výsledek	25,206±0,004
8	25,2357	Specifikace	25,3423 ^{-0,071} _{-0,131}
9	25,2311	$(USL - LSL) / u_C$	32,790050
10	25,2317	g_A	1,65
		$g_A * u_C$	0,00267



Obr. 40) Posouzení shody se specifikací „Střední hodnota rozměru přes zuby“

5.4 Doporučení pro praxi

Na základě doposud provedených experimentů lze zformulovat pravidla pro použití optických měřicích strojů SOL 311 (dále jen SOL 311) v praxi:

1. Pro zachování zabezpečení přesnosti měření je nutné provádět pravidelnou kalibraci a verifikaci stroje. Za vhodné je možné uvažovat i ověření kalibrace pomocí vhodných etalonů před důležitým měřením.
2. Je nutné důkladně očistit a odmastit měřenou součástku. Nečistoty na součástce mohou vést k velkým odchylkám od skutečnosti.
3. Vliv na přesnost měření má i teplota okolního vzduchu. Z důvodu změny roztažnosti součástky záleží, jestli teplota roste nebo klesá. Z tohoto důvodu lze vždy doporučit provádění měření v klimatizovaném prostředí.
4. Je možné doporučit nižší zoom pro měření z důvodu větší viditelnosti části součástky ve vzorném poli. Výrobce doporučuje pro větší reprodukovatelnost střední nebo velký zoom pro měření malých prvků. [8]
5. Z důvodu kvality obrazu kamery a přesného zobrazení měřených hran je důležité zvolit vhodné osvětlení.
6. Z důvodu přívětivosti a intuitivního programování v softwaru InSpec je výhodné měřit jednoduché součástky (podložka, přívěsek, plechy). U složitějších programů je vždy nutné vytvořit podrobný popis programu.
7. Je nutné zaostřit obraz kamery ve správné výšce osy „Z“ tak, aby bylo dosaženo maximálního kontrastu. Nad nebo pod touto výškou je obraz často rozmazaný a měření je pak nepřesné.

6 ZÁVĚR

Tato práce se zabývá praktickým využitím optického měřicího stroje SOL 311 (dále jen SOL 311) od americké firmy Micro-Vu, který se nachází na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně, na Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky. Toto praktické využití bylo doloženo na 3 zvolených vzorcích: kotva, podložka a ozubené kolo.

Prvním cílem bylo charakterizovat optické souřadnicové měřicí stroje (dále jen CMM) používané v průmyslu. Tento cíl byl splněn ve 3. kapitole. Tato kapitola objasnila rozdělení CMM a je zde stručně popsána konstrukce CMM v souladu s normou ČSN EN ISO 10360-1:2018. Následně jsou popsány multisenzorové měřicí stroje. Dále byl popsán SOL 311 s důrazem na jeho software InSpec.

Druhým cílem byl popis systémového rozboru řešené problematiky v souladu se systémem ISO GPS. Tento cíl byl splněn ve 4. kapitole. Podrobně zde byly popsány geometrické vlastnosti prvků, které se nacházejí na technických výkresech v experimentální části.

Dále kapitola objasňuje pravidla pro posouzení shody se specifikací dle normy ČSN EN ISO 14253-1:2018. Rovněž zde byl objasněn rozdíl vyhodnocení výsledku v chybovém a nejistotovém přístupu. Pro 21. století je perspektivnější nejistotový přístup.

V kapitole 5 byl splněn cíl „Návrh a zdůvodnění zvolených vzorků“. Pro měření byly vybrány vzorky: kotva, podložka a ozubené kolo. Tyto vzorky byly zvoleny z důvodu potvrzení měřicích schopností SOL 311.

Třetím cílem byla realizace měření a jeho vyhodnocení. Tento cíl byl splněn rovněž v kapitole 5. V této kapitole byly vyhodnoceny požadované rozměry a vzdálenosti, které byly naměřeny pomocí programů v softwaru InSpec na SOL 311.

U vzorku „Kotva“ byl dle pokynů vedoucího práce vyhodnocen průměr „Kružnice B“ pomocí minimální opsané referenční kružnice.

U 2. vzorku „Podložka“ byl vyhodnocen „Úhel α “ jako globální úhlový rozměr s přiřazovacím kritériem nejmenších čtverců.

U posledního vzorku „Ozubené kolo“ byla hodnocena „Střední hodnota rozměru přes zuby“ jako globální lineární rozměr s přiřazovacím kritériem nejmenších čtverců.

Čtvrtým cílem bylo formulovat doporučení použití stroje pro praxi, který byl splněn v kapitole 5.1.

Tato bakalářská by mohla sloužit jako podklad pro kombinované studium v předmětu Průmyslové metrologie (DPM-K).

Na základě doposud uvedeného je možné doporučit následujících pokračování této práce:

1. Hodnocení způsobilosti SOL 311 při měření geometrických tolerancí.
2. Ověření metrologických vlastností SOL 311 při měření v prostoru.
3. Posouzení metrologických vlastností SOL 311 při měření v různých polohách a v různém natočení měřených součástí.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Souřadnicová měřicí technika. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/souradnicova-merici-technika>
- [2] Souřadnicová měřicí stroje. *ELUC* [online]. [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: doi:<https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1111>
- [3] SOL: Manual Vision System. 3D *Metrisoft* [online]. Santiago de Querétaro: 3D Metrisoft, c2021 [cit. 2021-11-5]. Dostupné z: <https://cmms.mx/wp-content/uploads/2019/08/Sol.pdf>
- [4] ČSN EN ISO 10360-1. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) – Část 1: Slovník. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2001. Třídící znak 252011.
- [5] CHRISTOPH, Ralf a Hans Joachim NEUMANN. Multisenzorová souřadnicová měřicí technika: Dimenzování měření optikou, dotykovým senzorem a počítačovou tomografií. Uherský Brod: PRIMA BILAVČÍK, 2015. ISBN 978-3-86236-050-5.
- [6] Souřadnicové měřicí stroje [online]. [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <http://ksa.tul.cz/getFile/id:2522>
- [7] *Micro-Vu – 3D optické měřicí stroje* [online]. Praha: Control Check, 2021 [cit. 2022-2-9]. Dostupné z: <https://www.controlcheck.cz/>
- [8] INSPEC METROLOGY SOFTWARE: FOR AUTOMATED SYSTEMS. Windsor, 2019.
- [9] SLÍŽ, Michal. Posouzení vhodnosti optického měřicího stroje [online]. Brno, 2021 [cit. 2022-01-15]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/137022>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce doc. Ing. Róbert Jankových, CSc.
- [10] ČSN EN ISO 1101. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Geometrické tolerování – Tolerance tvaru, orientace, umístění a házení. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020. Třídící znak 014120.
- [11] Welcome to ISO/TC 213. *ISO/TC213: Dimensional and geometrical product specifications and verification* [online]. [cit. 2021-12-23]. Dostupné z: <https://committee.iso.org/home/tc213>
- [12] JANKOVÝCH, Róbert. Prezentace. Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky.
- [13] ČSN EN ISO 14638. Geometrické specifikace produktu (GPS) – Maticový model. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021. Třídící znak 014104.
- [14] ČSN EN ISO 14405-1. Geometrické specifikace produktu (GPS) – Tolerování rozměrů – Část 1: Lineární rozměry. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2022. Třídící znak 014115.
- [15] ČSN EN ISO 14405-2. Geometrické specifikace produktu (GPS) – Tolerování rozměrů – Část 2: Rozměry jiné než lineární a úhlové rozměry. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2022. Třídící znak 014115.

- [16] ČSN EN ISO 14405-3. Geometrické specifikace produktu (GPS) – Tolerování rozměrů – Část 3: Úhlové rozměry. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2022. Třídící znak 014115.
- [17] ČSN EN ISO 12181-1. Geometrické specifikace produktu (GPS) – Kruhovitost – Část 1: Slovník a parametry kruhovitosti. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. Třídící znak 014151.
- [18] ČSN EN ISO 12181-1. Geometrické specifikace produktu (GPS) – Válcovitost – Část 1: Slovník a parametry válcovitosti. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. Třídící znak 014156.
- [19] TNI 01 0115:2009. Mezinárodní metrologický slovník - Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM). Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009, 90 s. Třídící znak: 83031.
- [20] RABINOVICH, Semyon G. Evaluating measurement accuracy. New York: Springer, 2013. ISBN 978-1-46146716-8.
- [21] ČSN EN ISO 14253-1. Geometrické specifikace produktu (GPS) – Zkouška obrobků a měřidel měřením – Část 1: Pravidla rozhodování pro prokázání shody nebo neshody se specifikacemi. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018. Třídící znak 014100.
- [22] ČSN 01 4682. Ozubené převody čelní. Lícování. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1980. Třídící znak 014682.
- [23] ČSN 01 4675. Ozubená kola. Měření ozubených kol čelních s přímými zuby. Rozměr přes zuby. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1953. Třídící znak 014675.
- [24] ČSN 01 4602. Názvosloví ozubených kol. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1985. Třídící znak 014602.
- [25] CURTIS, Mark A. and Francis T. FARAGO. Handbook of dimensional measurement. Fifth edition. South Norwalk: Industrial Press, 2014. ISBN 978-0-8311-3465-5.
- [26] MONTGOMERY, Douglas C. Introduction to statistical quality control. 5th ed. Hoboken: John Wiley, 2005. ISBN 0-471-66122-8.
- [27] FULOVÁ, S. Stanovenie neistoty optického meracieho stroja pomocou laserinterferometra [online]. Brno, 2021 [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/137022>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Šrámek, Ph.D.

8 SEZNAM TABULEK, OBRÁZKŮ, ZKRATEK A SYMBOLŮ

8.1 Seznam tabulek

TAB 1) ZÁKLADNÍ TECHNICKÉ PARAMETRY SOL 311 (UPRAVENO DLE [3], [7])	23
TAB 2) GEOMETRICKÉ VLASTNOSTI (UPRAVENO DLE [14], [15], [16])...	27
TAB 3) ZNAČKY CHARAKTERISTIK [10]	27
TAB 4) PRVKY A JEJICH VLASTNOSTI SOUČÁSTKY „KOTVA“	37
TAB 5) NAMĚŘENÉ HODNOTY „KRUŽNICE B“	39
TAB 6) PRVKY A JEJICH VLASTNOSTI SOUČÁSTKY „PODLOŽKA“	42
TAB 7) NAMĚŘENÉ HODNOTY „ÚHEL A“	44
TAB 8) PRVKY A JEJICH VLASTNOSTI OZUBENÉHO KOLA.....	46
TAB 9) HODNOTY MĚŘENÉHO OZUBENÉHO KOLA [12], [22], [23]	47
TAB 10) NAMĚŘENÉ HODNOTY „STŘEDNÍHO HODNOTY ROZMĚRU PŘES ZUBY“	49

8.2 Seznam obrázků

OBR. 1) SOUŘADNICOVÉ MĚŘICÍ STROJE S KŘÍŽOVÝM STOLEM [5]....	17
OBR. 2) SOUŘADNICOVÉ MĚŘICÍ STROJE S VEDENÍM V JEDNÉ ROVINĚ [5] 17	
OBR. 3) SOUŘADNICOVÉ MĚŘICÍ STROJE S POHYBLIVÝM PORTÁLEM [5] 18	
OBR. 4) SOUŘADNICOVÉ MĚŘICÍ STROJE S PEVNÝM PORTÁLEM [5]....	19
OBR. 5) SOUŘADNICOVÉ MĚŘICÍ STROJE PRO DVOUROZMĚRNÉ MĚŘENÍ [5].....	20
OBR. 6) SOUŘADNICOVÉ MĚŘICÍ STROJE SE SENZOREM POČÍTAČOVÉ TOMOGRAFIE [5]	21
OBR. 7) SOUŘADNICOVÉ MĚŘICÍ STROJE PRO SPECIÁLNÍ POUŽITÍ [5]	21
OBR. 8) SOL 311	22
OBR. 9) TYPY OVLÁDÁNÍ: A) V MEZIKRUŽÍ B) V OKTANTECH C) V KVADRANTECH D) SEGMENTECH (UPRAVENO DLE [8])	23
OBR. 10) HLAVNÍ OBRAZOVKA SOFTWARE INSPEC: 1 OKNO S VÝSLEDKY A OSVĚTLENÍ; 2 KAMERA; 3 PROGRAM OBSAHUJÍCÍ CHARAKTERISTIKY, KONSTRUKCE A IKONY NÁSTROJŮ; 4 OKNO SCHÉMATU; 5 ZOBRAZENÍ ODCHYLEK (UPRAVENO PODLE [9]) ..	24

OBR. 11) PŘIBLÍŽENÍ OKNA ČÍSLO 3 V OBR 2.10: A AKTUÁLNÍ PROGRAM; B OKNO POHLEDŮ A POPISEK; C CHARAKTERISTIKY; D KONSTRUKCE; E OPTICKÉ NÁSTROJE	25
OBR. 12) INDIKACE KRUHOVITOSTI [10]	28
OBR. 13) DEFINICE TOLERANČNÍHO POLE KRUHOVITOSTI [10]	28
OBR. 14) INDIKACE VÁLCOVITOSTI [10]	29
OBR. 15) DEFINICE TOLERANČNÍHO POLE VÁLCOVITOSTI [10].....	29
OBR. 16) INDIKACE KOLMOSTI [10]	29
OBR. 17) DEFINICE TOLERANČNÍHO POLE KOLMOSTI [10].....	30
OBR. 18) INDIKACE OBVODOVÉHO HÁZENÍ [10]	30
OBR. 19) INDIKACE PROFILU POVRCHU NEVZTAHUJÍCÍ SE K ZÁKLADNĚ [10] 30	
OBR. 20) DEFINICE TOLERANČNÍHO POLE PROFILU POVRCHU [10].....	31
OBR. 21) POJMY PŘESNOST, SPRÁVNOST A PRECIZNOST MĚŘENÍ DLE VIM (PŘEVZATO Z [12])	31
OBR. 22) VÝSLEDEK MĚŘENÍ DLE CHYBOVÉHO A NEJISTOTOVÉHO PŘÍSTUPU (PŘEVZATO Z [12])	32
OBR. 23) SPECIFIKACE DEFINOVANÁ POMOCÍ OBOU MEZÍ [21]	34
OBR. 24) FAKTOR OCHRANNÉHO PÁSMU G PRO PRAVDĚPODOBNOST POKRYTÍ 95,45 % [21]	34
OBR. 25) OVĚŘOVÁNÍ SHODY SE SPECIFIKACÍ [21]	35
OBR. 26) A) SCHÉMA „KOTVA“ B) SCHÉMA „PODLOŽKA“ C) SCHÉMA „OZUBENÉ KOLO“	36
OBR. 27) ZAČÁTEK PROGRAMU „KOTVA“ V SOFTWARE INSPEC	37
OBR. 28) VÝVOJOVÝ DIAGRAM PROMĚŘENÍ PROGRAMU „KOTVA“	38
OBR. 29) SCHÉMA „KOTVA“ V PROGRAMU INSPEC.....	39
OBR. 30) POSOUZENÍ SHODY SE SPECIFIKACÍ „KRUŽNICE B“	40
OBR. 31) TOLERANCE TVARU PROFILU	41
OBR. 32) ZAČÁTEK PROGRAMU „PODLOŽKA“ V SOFTWARE INSPEC	41
OBR. 33) SCHÉMA „PODLOŽKA“ V PROGRAMU INSPEC	42
OBR. 34) VÝVOJOVÝ DIAGRAM PRO MĚŘENÍ PROGRAMU „PODLOŽKA“	43
OBR. 35) POSOUZENÍ SHODY SE SPECIFIKACÍ „ÚHEL A“	45
OBR. 36) ZAČÁTEK PROGRAMU „OZUBENÉ KOLO“ V SOFTWARE INSPEC 46	
OBR. 37) TOLERANCE PRO STŘEDNÍ HODNOTU ROZMĚRU PŘES ZUBY (UPRAVENO DLE [12])	48
OBR. 38) SCHÉMA OZUBENÉHO KOLA V PROGRAMU INSPEC.....	48
OBR. 39) ZKRÁCENÝ VÝVOJOVÝ DIAGRAM OZUBENÉHO KOLA	49

**OBR. 40) POSOUZENÍ SHODY SE SPECIFIKACÍ „STŘEDNÍ HODNOTA
ROZMĚRU PŘES ZUBY“50**

8.3 Seznam zkratek a symbolů

CMM	Coordinate Measuring Machine
CNC	Computer Numerical Control
SOL 311	Optický měřicí přístroj SOL 311
GPS	Geometrické specifikace produktu
ISO	Celosvětová federace národních normalizačních orgánů
ČSN	Česká normalizační norma
MPE	Maximální dovolená chyba
L	Měřený rozměr
GG	Kritérium nejmenších čtverců
GN	Kritérium minimálního opsání
VIM	Mezinárodní metrologický slovník
δ	Pravděpodobná chyba
CHM	Chyba měření
SCHM	Systematická chyba
NCHM	Náhodná chyba měření
V	Variační koeficient
Δ	Míra správnosti
X_R	Referenční hodnota
R	Variační rozpětí
x_{\max}	Maximální hodnota
x_{\min}	Minimální hodnota
x	Měřená veličina
\bar{x}	Aritmetický průměr
U	Rozšířená nejistota měření
n	Počet měření
x_i	Jednotlivé naměřené hodnoty
k	Koeficient rozšíření
u_c	Kombinovaná standardní nejistota
u_A	Nejistota měření typu A
u_B	Nejistota měření typu B
$s(\bar{x})$	Směrodatná odchylka výběrového průměru
u_{zj}	Nejistoty z_j
c_j	Koeficient citlivosti
χ	Koeficient příslušného rozdělení
$\Delta z_{j\max}$	Rozsah odchylek

LSL	Dolní mezní hodnota
USL	Horní mezní hodnota
g_{LA}	Ochranné pásmo na LSL
g_{UA}	Ochranné pásmo na USL
g_A	Faktor ochranného pásma
ε	Nekonečný malý zbytek
SS	Souřadnicový systém
R	Poloměr roztečné kružnice
m	Modul
z	Počet zubů
R_a	Poloměr hlavové kružnice
h_a	Výška hlavy zubu
R_f	Poloměr patní kružnice
h_f	Výška paty zubů
W	Rozměr přes zuby
α	Úhel záběru
z'	Počet zubů
d	Roztečná kružnice
d_b	Hlavová kružnice
$-E_{Ws}$	Nejmenší úchylka rozměru přes zuby pro vnější ozubení
F_r	Mezní obvodové házení ozubení
T_w	Tolerance rozměru přes zuby
$-E_{WmS}$	Nejmenší úchylka střední hodnoty rozměru přes zuby (1. část boční vůle)
T_{Wm}	Tolerance střední hodnoty přes zuby
W_{mH}	Horní mez střední hodnoty přes zuby
W_{mD}	Dolní mez střední hodnoty přes zuby
$0,35 v_{Wr} (f_{vWr})$	Druhá část boční vůle
u_E	Vliv použitého etalonu
u_M	Vliv rozlišovací schopnosti
u_{BT}	Složka nejistoty rozdílů teplot od etalonu
u_{T20}	Složka nejistoty rozdílů teplot od 20 °C
u_T	Složka nejistoty rozdílů teploty stroje a objektu
$u_{\Delta\alpha}$	Vliv rozdílů teplot etalonu a přístroje
$u_{\Delta 20}$	Vliv způsobené rozdílem teplot od 20 °C

9 SEZNAM PŘÍLOH

- Elektronická příloha 1 – Program kotvy (tabulka)
- Elektronická příloha 2 – Program podložky (tabulka)
- Elektronická příloha 3 – Program ozubené kolo (tabulka)
- Elektronická příloha 4 – Kotva (software InSpec)
- Elektronická příloha 5 – Podložka (software InSpec)
- Elektronická příloha 6 – Ozubené kolo (software InSpec)
- Elektronická příloha 7 – Výkres kotvy
- Elektronická příloha 8 – Výkres podložky
- Elektronická příloha 9 – Výkres ozubeného kola
- Elektronická příloha 10 – Vývojový diagram Ozubeného kola
- Elektronická příloha 11 – Naměřené hodnoty „Kotva“
- Elektronická příloha 12 - Naměřené hodnoty „Podložka“
- Elektronická příloha 13 – Střední hodnota rozměru přes zuby