

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B0715A270013 – Strojní inženýrství
Studijní specializace: Strojírenská technologie - technologie
obrábění

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Výpočet nejistoty měření na optických zařízeních

Autor: Tomáš FRANTA
Vedoucí práce: Ing. Nikola SKŘIVANOVÁ

Akademický rok 2023/2024

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Tomáš FRANTA**
Osobní číslo: **S23B0207P**
Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**
Specializace: **Strojírenská technologie-technologie obrábění**
Téma práce: **Výpočet nejistoty měření na optických zařízeních**
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování

- Úvod
- Teoretický rámec a rešerše
- Experimentální část
- Závěr

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- Terminologie z oblasti metrologie (2. vydání) dostupné z [https://www.unmz.cz/files/Sborniky TH/Terminologie v oblasti metrologie_DEF.pdf](https://www.unmz.cz/files/Sborniky_TH/Terminologie_v_oblasti_metrologie_DEF.pdf)
- TICHÁ, Šárka. Strojírenská metrologie [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská, Technická univerzita Ostrava, 2013, Dostupné z: <http://books.fs.vsb.cz/StrojMetro/strojirenska-metrologie.pdf>
- Pokyny pro vyjadřování nejistoty měření dostupné z [https://www.unmz.cz/files/Sborniky TH/GUM-celek-DEF.pdf](https://www.unmz.cz/files/Sborniky_TH/GUM-celek-DEF.pdf)

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Nikola Skřivanová**
Katedra technologie obrábění

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Dana Kubátová, Ph.D.**
Regionální technologický institut

Datum zadání bakalářské práce: **16. října 2023**
Termín odevzdání bakalářské práce: **24. května 2024**

L.S.

Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.
děkan

Doc. Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Rád bych touto cestou vyjádřil své upřímné poděkování Ing. Nikole Skřivanové za její odborné vedení a nepostradatelnou podporu, kterou mi poskytla během psaní této bakalářské práce. Taktéž bych chtěl poděkovat Ing. Daně Kubátové, Ph.D., za její cenné konzultace, jež přispěly k vylepšení obsahu této práce.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Tomáš	Jméno Franta	
STUDIJNÍ PROGRAM	B0715A270013 Strojní inženýrství		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Skřivanová	Jméno Nikola	
PRACOVISŤE	ZČU - FST – KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Výpočet nejistoty měření na optických zařízeních		

FAKULTA	Strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2024
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	75	TEXTOVÁ ČÁST	75	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	<p>Tato bakalářská práce se zabývá výpočtem nejistot měření na optickém komparátoru Keyence IM řady 7000. V rešerši jsou podrobně popsány optické měřicí přístroje a nejistoty měření. Praktická část se zabývá samostatným průběhem měření a výpočtem nejistot. V závěru práce se nachází zhodnocení této bakalářské práce.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	<p>optické měření, výpočet nejistoty, Keyence</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Franta	Name Tomáš	
STUDY PROGRAMME	B0715A270013 Mechanical Engineering		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Skřivanová	Name Nikola	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Evaluation of measurement uncertainties for optical devices		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KTO	SUBMITTED IN	2024
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	75	TEXT PART	75	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This bachelor's thesis deals with the calculation of measurement uncertainties on the Keyence IM series 7000 optical comparator. The research section provides a detailed description of optical measuring instruments and measurement uncertainties. The practical part addresses the individual measurement process and the calculation of uncertainties. The conclusion of the thesis contains an evaluation of this bachelor's thesis.
KEYWORDS	optical measurement, calculation of uncertainty, Keyence

Obsah

Zadání BP	2
Prohlášení o autorství	3
Přehled použitých zkratk a symbolů.....	10
Seznam obrázků	12
Seznam tabulek	13
1 Úvod.....	14
1.1 Cíl práce	14
2 Teoretický rámec a řešerše.....	15
2.1 Optická měřicí zařízení [1; 2].....	15
2.1.1 Části optických měřicích zařízení	16
2.1.2 Optické komparátory.....	18
2.1.2.1 Základní části optických komparátorů	18
2.1.2.2 Princip optických komparátorů [5; 6; 7]	18
2.1.2.3 Měřicí metody optických komparátorů [8]	19
2.1.2.4 Rozdělení optických komparátorů	19
2.1.3 Měřicí mikroskopy	22
2.1.3.1 Základní části měřicích mikroskopů	22
2.1.3.2 Princip měřicích mikroskopů	22
2.1.3.3 Měřicí metody měřicích mikroskopů [8]	23
2.1.3.4 Rozdělení měřicích mikroskopů.....	23
2.1.4 Souřadnicové měřicí stroje.....	25
2.1.4.1 Základní části souřadnicových měřicích strojů [15]	25
2.1.4.2 Rozdělení souřadnicových měřicích přístrojů [16]	26
2.1.4.3 Princip souřadnicových měřicích přístrojů	27
2.1.4.4 Snímací systémy souřadnicových měřicích strojů [16].....	28
2.2 Nejistota měření	29
2.2.1 Zdroje nejistoty měření	30
2.2.2 Standartní nejistota typu A (u_A).....	31
2.2.2.1 Stanovení standartní nejistoty typu A [21].....	31
2.2.3 Standartní nejistota typu B (u_B).....	34
2.2.3.1 Zdroje nejistoty typu B [21][22]	34
2.2.3.2 Stanovení standartní nejistoty typu B.....	35
2.2.4 Kombinovaná standartní nejistota (u_C)	37
2.2.4.1 Stanovení kombinované standartní nejistoty.....	37

2.2.5	Rozšířená nejistota U	38
2.2.5.1	Stanovení rozšířené nejistoty [21; 22].....	38
2.2.6	Vyjádření výsledků měření[22].....	39
2.2.7	Norma ČSN EN ISO/IEC 17025:2018 [24].....	40
3	Experimentální část.....	41
3.1	Popis použitého měřicího přístroje [25].....	41
3.1.1	Specifikace měřicího systému Keyence IM – 7000	43
3.1.2	Výhody měřicího systému Keyence IM - 7000	44
3.2	Průběh experimentu.....	45
3.2.1	Definování experimentu	45
3.2.2	Pomůcky použité při experimentu.....	45
3.2.3	Vytvoření programu	48
3.2.4	Průběh měření	55
3.3	Výpočet nejistot.....	57
3.3.1	Výpočet nejistoty typu A u_A	57
3.3.2	Výpočet nejistoty typu B u_B	64
3.3.3	Výpočet standartní kombinované nejistoty u_C	67
3.3.4	Výpočet standartní rozšířené nejistoty U	70
4	Závěr.....	72
	Seznam použitých zdrojů	73

Přehled použitých zkratk a symbolů

ZČU	Západočeská univerzita v Plzni
FST	Fakulta strojní
KTO	Katedra technologie obrábění
ČSN	Česká státní technická norma
EN	Evropská norma
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizace
IEC	Mezinárodní elektrotechnická komise
IM	Image Dimension Measurement System
LED	Light Emitting Diode
CCD	Charged-Coupled Device
CMOS	Complementary Meta-Oxide-Semiconductor
CAD	Computer-aided design
3D	Trojrozměrný
CMM	Coordinate Measurement Machine
SMS	Souřadnicový měřicí stroj
GUM	Guide to the expression of uncertainty in measurement
$s(\bar{x})$	Směrodatná odchylka
σ^2	Rozptyl základního souboru
σ	Směrodatná odchylka základního souboru
s^2	Výběrový rozptyl
s	Výběrová směrodatná odchylka náhodného výběru
u_A	Standartní nejistota typu A
u_B	Standartní nejistota typu B
u_C	Kombinovaná standartní nejistota
U	Rozšířená nejistota
\bar{X}	Výběrový aritmetický průměr
X_i	Hodnota i -tého měření
n	Počet naměřených hodnot
k_{u_A}	Bezpečnostní koeficient
k_U	Koeficient rozšířeného zdroje nejistoty
k	Koeficient rozšíření zdroje nejistoty
U_z	Rozšířená nejistota po zaokrouhlení
y	Odhad parametru polohy

u_{Bnp}	Vliv nedokonalosti přístroje Keyence
u_{Bkm}	Vliv nepřesnosti koncových měrek a nastavného kroužku
u_{Bzt}	Vliv změny teploty prostředí
P	Pravděpodobnost
N	Interval rozdělení hustoty pravděpodobnosti
u_{Bi}	Zdroj standartní nejistota typu B
$u_{Bi \max}$	Největší zdroj standartní nejistota typu B
Z_{MAX}	Maximální odchylka od zdroje nejistoty
χ	Koeficient statistického rozdělení
l_n	Jmenovitá délka
t_e	Dovolená úchylka v libovolném bodě
α	Součinitel délkové teplotní roztažnosti
mm	Milimetr
μm	Mikrometr
$m\Omega$	Miliohm
kg	Kilogram
$^{\circ}C$	Stupeň Celsia
N	Newton
GB	Gigabyte
MPx	Megapixel
V	Volt
A	Ampér
VA	Voltampér
Hz	Hertz
Cp	Capability Process
Cpk	Capability Process Index
USB	Universal Serial Bus
LAN	Local area network
XGA	Extended Graphics Array

Seznam obrázků

Obrázek 2.1-1 - Části optického komparátoru [5].....	18
Obrázek 2.1-2 - Tradiční optický komparátor [9]	20
Obrázek 2.1-3 - Digitální optický komparátor [28]	21
Obrázek 2.1-4 - Části měřicího mikroskopu [10]	22
Obrázek 2.1-5 - Optický měřicí mikroskop [11].....	23
Obrázek 2.1-6 - Digitální měřicí mikroskop [29]	24
Obrázek 2.1-7 - Optický měřicí souřadnicový systém [14]	25
Obrázek 2.1-8 - Části souřadnicových měřicích strojů [15]	25
Obrázek 2.1-9 - Stojanový typ CMM [8].....	26
Obrázek 2.1-10 - Výložníkový typ CMM [8]	26
Obrázek 2.1-11 - Portálový typ CMM [8].....	27
Obrázek 2.1-12 - Mostový typ CMM [8].....	27
Obrázek 2.1-13 - Laserový systém od společnosti Zeiss [19].....	28
Obrázek 2.1-14 - Kamerový systém od společnosti Zeiss [20].....	28
Obrázek 2.2-1 - Obecné schéma nejistot měření [22]	29
Obrázek 3.1-1 - Keyence IM – 7000.....	41
Obrázek 3.1-2 - Řez optickou soustavou přístroje Keyence [26]	42
Obrázek 3.1-3 - Různé způsoby osvětlení [26]	42
Obrázek 3.2-1 - Měrka o velikosti 2,500 mm	45
Obrázek 3.2-2 - Soustava měrek o velikosti 23,502 mm	46
Obrázek 3.2-3 - Soustava měrek o velikosti 58,466 mm	46
Obrázek 3.2-4 - Soustava měrek o velikosti 86,509 mm	47
Obrázek 3.2-5 – Nástavný kroužek o velikosti 19,9987 mm	47
Obrázek 3.2-6 - Úvodní obrazovka přístroje Keyence.....	48
Obrázek 3.2-7 - Zaregistrování měřeného vzoru	48
Obrázek 3.2-8 - Vytvoření přímek	49
Obrázek 3.2-9 - Vytvoření základních souřadnic X a Y	49
Obrázek 3.2-10 - Vytvoření půlící přímky	50
Obrázek 3.2-11 - Vytvoření průsečíku přímek.....	50
Obrázek 3.2-12 - Vytvoření potřebných kót	51
Obrázek 3.2-13 - Stisknutí tlačítka pro měření	51
Obrázek 3.2-14 - Uložení programu	52
Obrázek 3.2-15 - Program pro měrku o velikosti 2,500 mm	52
Obrázek 3.2-16 - Program pro soustavu měrek o velikosti 23,502 mm.....	53

Obrázek 3.2-17 - Program pro soustavu měrek o velikosti 58,466mm.....	53
Obrázek 3.2-18 - Program pro soustavu měrek o velikosti 86,509 mm.....	54
Obrázek 3.2-19 - Program pro kalibrační kroužek o velikosti 19,9987 mm.....	54
Obrázek 3.2-20 - Směry měření u koncových měrek.....	55
Obrázek 3.2-21 - Proces samostatného měření	56

Seznam tabulek

Tabulka 2.2-1 - Závislost koeficientu na počtu měření[8]	32
Tabulka 2.2-2 – Koeficient χ pro výpočet dílčí nejistoty typu B	36
Tabulka 2.2-3 - Hodnoty koeficientu rozšíření k_U v závislosti na intervalu rozdělení hustoty pravděpodobnosti N [22].....	38
Tabulka 3.1-1 - Specifikace přístroje Keyence IM -7000 [26]	43
Tabulka 3.3-1 - Naměřené hodnoty pro výpočet nejistot typu a.....	57
Tabulka 3.3-2 - Vypočítané hodnoty aritmetického průměru	60
Tabulka 3.3-3 - Vypočítané hodnoty nejistot měření typu A.....	64
Tabulka 3.3-4 – Dovolené úchytky délky pro jednotlivé velikosti měrek [27]	65
Tabulka 3.3-5 - Vypočítané hodnoty nejistot měření typu B od různých zdrojů.....	66
Tabulka 3.3-6 – Vypočítané hodnoty celkových nejistot typu B.....	67
Tabulka 3.3-7 - Vypočítané hodnoty standartní kombinované nejistoty	69
Tabulka 3.3-8 - Vypočítané hodnoty rozšířené nejistoty	71

1 Úvod

Tato bakalářská práce pojednává o vyčíslení nejistot měření na optických zařízeních. Optické měřicí přístroje jsou čím dál tím častěji využívány při úlohách kontroly kvality. Nabízejí bezkontaktní přístup k měření různých vlastností objektů, což eliminuje riziko jejich poškození a umožňuje měření složitých tvarů a povrchů. Díky vysoké rychlosti a přesnosti měření jsou tyto zařízení klíčovou součástí moderních průmyslových procesů, kde je kladen důraz na kvalitu a efektivitu výroby.

I přes pokrok v technologiích měření zůstává každý měřicí proces pod vlivem různých faktorů, což způsobuje, že výsledky měření nejsou nikdy absolutně přesné. Jejich spolehlivost je ovlivněna faktory jako je přesnost přístroje, zvolená metoda měření, vlastnosti okolního prostředí, či vliv obsluhy. Pro vyhodnocení výsledků by mělo být nezbytné zohlednit příslušný rozsah hodnot, který je přidělen k výsledku měření – nejistotu měření.

Rešerše této práce je rozdělena na dvě části. První část se zaměřuje na optické měřicí zařízení a jejich důležité části, a také popisuje jednotlivé nejvýznamnější přístroje v této oblasti. Druhá část rešerše seznamuje čtenáře s nejistotami měření. Konkrétně uvádí teoretický základ, rozdělení a stanovení jednotlivých typů nejistot, ale také vyjadřování výsledků měření a vztah nejistot vzhledem k normě ČSN EN ISO/IEC 17025:2018.

Praktická část je rozdělena na 3 hlavní podkapitoly. Ta první se zabývá použitým přístrojem a zmiňuje jeho vlastnosti a výhody oproti konvenčním přístrojům. Druhá podkapitola se zabývá samostatným průběhem experimentu. Popisuje použité pomůcky, které byly využity k provádění měření, zahrnuje proces tvorby programu na přístroji Keyence a také průběh měření. Ve finální podkapitole experimentální části může čtenář pozorovat samostatný výpočet nejistot měření – od standardní nejistoty typu A, přes standardní nejistotu typu B, a kombinovanou standardní nejistotu, až po nejistotu rozšířenou.

1.1 Cíl práce

Cílem této práce je vyčíslení nejistot měření na optickém komparátoru Keyence IM řady 7000. Toto vyčíslení bude následně použito k rozšíření akreditace laboratoře praktik experimentálních metod v obrábění dle normy ČSN EN ISO/IEC 17025:2018, která stanovuje obecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří pro akreditovaná pracoviště.

Vyčíslení nejistoty měření umožňuje posoudit spolehlivost výsledků, zvyšuje kvalitu procesu měření a celkovou důvěryhodnost laboratoře. Již zmíněná norma vyžaduje, aby laboratoře měly definované postupy pro vyčíslení nejistoty měření. *Tato práce je tedy klíčová pro rozšíření akreditace laboratoře.*

2 Teoretický rámec a řešerše

2.1 Optická měřicí zařízení [1; 2]

Technologický vývoj v oblasti optiky byl v několika posledních letech velmi značný. Rostoucí rozlišení a zvyšující se kvalita obrazu snímacích kamerových systémů zásadně přispělo k oblíbenosti měření rozměrů pomocí optických zařízení, které se díky tomu stává čím dál tím vyhledávanější úlohou kontroly kvality.

Optická měřicí zařízení jsou zařízení, která využívají vlastností světla a optických principů k měření různých vlastností objektů. Široké spektrum aplikací zahrnuje různá průmyslová odvětví – automobilový a letecký průmysl, potravinářství, zdravotnictví apod.

Jednou ze zásadních výhod optických měřicích zařízení je bezkontaktní průběh měření. Měření lze tedy provádět bez fyzického kontaktu s měřenou součástí, což eliminuje riziko poškození nebo jakoukoliv změnu vlastností. Vysoká rychlost měření pak umožňuje udržet vysokou efektivitu, což je pro moderní průmyslové procesy klíčové.

Další významnou vlastností optických měřicích zařízení je jejich vysoká přesnost. Díky pokročilým optickým technologiím a sofistikovaným algoritmům zpracování dat jsou schopny poskytovat opakovatelné měření s vysokou přesností.

Tato zařízení jsou také velmi flexibilní a jak již bylo zmíněno, mohou být použity pro různé aplikace a prostředí. Existuje nepřeberné množství optických prostředků, které lze použít v závislosti na požadovaných vlastnostech měření a podmínkách provozu. Od laserové interferometrie po optickou mikroskopii, tyto zařízení nabízejí široké spektrum možností pro různé průmyslové aplikace.

Díky výhodám a možnostem aplikací do různých odvětví je již dnes zřejmé, že optické měřicí zařízení budou hrát klíčovou roli v oblasti kontroly a kvality i v budoucnosti. Jejich schopnost poskytovat rychlá, přesná a spolehlivá měření je pro moderní průmyslové procesy s konstantně zvyšujícími se nároky na kvalitu a efektivitu vysoce přínosné.

2.1.1 Části optických měřicích zařízení

V dnešní době existuje velké množství optických měřicích zařízení. Konkrétní zařízení se liší existencí a provedením jednotlivých částí, obecně se ale optická zařízení skládají z:

a) Zdrojová část [3]

Jedná se v podstatě o vlastní zdroje záření. Rozdělují se dále na několik různých typů:

- **Monochromatické zdroje světla**

Do této kategorie patří nízkotlaké spektrální výbojky, lasery a kombinace žárovek a monochromatických interferenčních filtrů.

- **Zdroje bílého světla**

Za zdroje bílého světla lze považovat halogenové žárovky, vysokotlaké výbojky nebo svítící obrazovky.

- **Zvláštní zdroje světla**

Polovodičové zdroje záření – LED se v poslední době často využívají a patří mezi zvláštní zdroje záření.

Zdroje záření v měřicích optických zařízeních se nevyužívají vždy. Některé přístroje využívají okolního světla (např. slunečního záření). Nutností je ale využití zvláštních detektorů záření vzhledem ke změnám podmínek při měření.

b) Část úpravy záření zdroje [3]

Záření ze zdroje ve většině případů musí být upraveno. Soustavy, které upravují toto záření se nazývají kondenzory. Mohou být jednočlenné nebo mohou mít i velice složitou konstrukci. Využívají čočky a zrcadla k usměrnění a případnému zesílení zdroje záření. Zvláštním případem této kategorie jsou kolimátory, které umožňují zobrazovat předměty “z nekonečna”.

c) Vlastní pracovní část [3]

Vlastní pracovní část využívá klasické optické soustavy jako jsou:

- mikroskopové soustavy,
- dalekohledové soustavy,
- snímací objektivy a další.

V pracovním bloku vlastně probíhají technologické činnosti, ke kterým je daný optický měřicí přístroj určen.

d) Detektor záření

Detektory záření se využívají k zachycení světelného signálu, nebo záření v rámci daného měření. Tyto detektory lze rozdělit do dvou podskupin podle toho, zda registrují pouze intenzitu záření, či i prostorové rozložení tohoto záření.[3]

Při zachycení prostorového rozložení je výsledným výstupem obraz. Za první obrazový detektor lze považovat lidské oko. Následným hojně využívaným detektorem byla fotocitlivá vrstva, jednoduše řečeno film. Ten je již v dnešní době zastaralý a byl nahrazen další technologií – obrazovými senzory (snímací obrazu).[4]

Snímače obrazu jsou jednou z důležitých částí kamer. Jedná se o elektronické zařízení, které slouží k zachycení světelných informací a jejich převodu na digitální obraz, s kterým lze následně pracovat. Existuje několik různých typů senzorů, ale ty nejpoužívanější jsou CCD a CMOS.[4]

e) Registrační část [3]

Existuje mnoho různých způsobů, jak zaznamenat výsledky technologických procesů prováděných pomocí optických měřicích přístrojů. Někdy výsledek není zaznamenán vůbec, zejména pokud se jedná o subjektivní pozorování, které si člověk pouze pamatuje. V dnešní době jsou ale většinou optické přístroje přímo propojeny s počítačem, který zajišťuje záznam výsledků, není tedy problém uchovávat výsledky pro další zpracování.

2.1.2 Optické komparátory

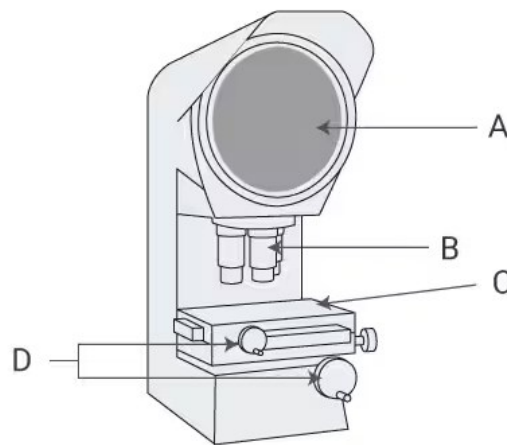
Optický komparátor neboli také profil projektor je druh optického měřicího přístroje, který se používá k měření, porovnávání a inspekci rozměrů vyrobených dílů. Využívá optického systému k projekci zvětšené siluety dílu na obrazovku. Tímto způsobem lze díl porovnávat s předepsanými limity a identifikovat případné vady nebo nepřesnosti. [5; 6]

Optické komparátory jsou důležitým nástrojem pro kontrolu jak dimenzionální přesnosti, tak i vad na povrchu, jako jsou škrábance a prohlubně, což byl i jejich původní účel. Jsou schopny provádět bezkontaktní měření a pozorování, minimalizovat manipulaci a umožňovat detailní inspekci dílů. [5; 7]

2.1.2.1 Základní části optických komparátorů

Optické komparátory mají čtyři typické části (Obrázek 2.1-1):

- A) Projekční obrazovka (plátno)
- B) Projekční optická soustava
- C) Posuvná pracovní plocha
- D) Kličky pro posuv pracovní plochy [5]



Obrázek 2.1-1 - Části optického komparátoru [5]

2.1.2.2 Princip optických komparátorů [5; 6; 7]

První komparátor byl představen ve 20. letech 20. století a od té doby se jeho princip fungování změnil velmi málo. Technologie zvětšení, digitální a softwarová vylepšení a kalibrační metody byly postupně přidány k zvýšení přesnosti a celkovému zlepšení přístroje.

Tradiční optický komparátor nasvětluje ze spodu (případně seshora) díl, který je položen na pracovní ploše. Silueta pracovního dílu je následně promítána na obrazovku, pomocí čočky a zrcadel. Z tohoto důvodu se tento přístroj označuje také jako profil projektor. U digitálních komparátorů jsou čočky a zrcadla využívané k přenesení siluety nahrazeny snímačem obrazu objektivem.

Zvětšení promítaného obrazu probíhá většinou pomocí telecentrického optického systému, který umožňuje přesné zvětšení promítnutého obrazu dílu, ať je umístěn kdekoliv na pracovní ploše. Díky tomuto systému čoček se lze také vyhnout problému s perspektivou, kdy se blízké objekty zdají být větší než ty vzdálené.

2.1.2.3 Měřicí metody optických komparátorů [8]

Celkově existují tři různé měřicí procesy pro komparátory:

a) Měření siluety

Nejjednodušší měřicí metoda spočívá v promítnutí siluety dílu na obrazovku pro měření. Díky známému zvětšení lze siluetu použít k získání přesných měření.

b) Porovnání bodů

Druhá měřicí metoda spočívá v porovnání siluety obrazu s předepsanými body na obrazovce. Silueta dílu je zarovnána na střed obrazovky a uživatel pohybuje pracovní plochou tak, aby dosáhl různých bodů na obrazovce. Tím se měří, o kolik se musela pracovní plocha posunout, aby se jednotlivé body shodovaly.

c) Analýza softwarem

Poslední měřicí proces je digitální. Využívá software k analýze a měření obrazu generovaného optickým komparátorem. Na rozdíl od přechodících dvou metod, které se využívají u tradičních komparátorů, se tato metoda využívá pouze u digitálního komparátoru a celý proces je prováděn automaticky.

2.1.2.4 Rozdělení optických komparátorů

Optické komparátory lze rozdělit podle několika různých parametrů.

Dle orientace světelného paprsku se tyto přístroje rozdělují na:

a) Horizontální komparátory

U horizontálního optického komparátoru světlo cestuje vodorovně. To znamená, že se pozorovatel dívá na siluetu pořízenou ze strany dílu. Tento typ komparátoru nejlépe funguje pro součásti, které lze zafixovat jen v některé pozici, jakou jsou např. šrouby, či odlitky uchycené v upínacím mechanismu. [6]

b) Vertikální komparátory

U vertikálního optického komparátoru světlo putuje svisle, takže se pozorovatel dívá na díl shora. Tento typ komparátoru nejlépe funguje pro ploché součásti, jako jsou např. těsnění, či pro jakékoliv díly, které při měření mohou ležet na pracovní ploše. [6]

Optické komparátory také rozdělít do dvou skupin podle provedení:

a) Tradiční komparátory

Tradiční optické komparátory (Obrázek 2.1-2) fungují na principu vizuálního porovnání dílů s předem připravenými překryvy. Proces použití je relativně jednoduchý. Zahrnuje umístění dílu na pracovní plochu, zarovnání překryvu s obrazem dílu a následné srovnání s nákresem. Tyto přístroje jsou omezeny schopností měření pouze ve 2D a mohou být náchylné k lidské chybě. Jsou pracnější a méně efektivní při inspekci většího množství dílů, neboť mohou měřit pouze jeden díl najednou. Vyžadují vyšší míru školení a časově náročnější provoz. Poskytují omezené množství dat a obtížně kvantifikovatelné výsledky měření. [6; 9]



Obrázek 2.1-2 - Tradiční optický komparátor [9]

b) Digitální komparátory

Digitální optické komparátory (Obrázek 2.1-3) využívají sofistikovaného softwaru a kamer k automatické analýze a měření dílů. Proces použití je zjednodušený, operátor pouze umístí díl na pracovní plochu a systém provede potřebné měření, včetně automatického zarovnání. Některé přístroje dokonce umožňují měření ve všech třech rozměrech. Digitální optické komparátory jsou schopny rychle a velmi přesně analyzovat více dílů současně, což zvyšuje produktivitu a snižuje náklady. Díky automatizaci jsou méně náchylné k chybě pracovníka a poskytují podrobné a snadno kvantifikovatelné výsledky měření. Poskytují širokou škálu funkcí, včetně možnosti referování na CAD výkresy a sběru analytických dat. [6; 7]



Obrázek 2.1-3 - Digitální optický komparátor [28]

2.1.3 Měřicí mikroskopy

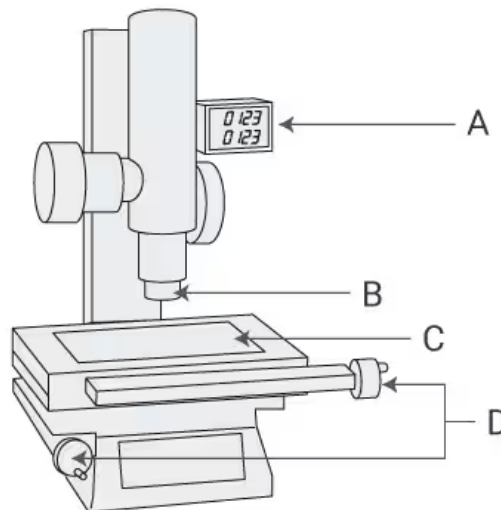
Měřicí mikroskopy jsou přístroje, které kombinují optický mikroskop s posuvným stolem schopným vysoce přesného pohybu. Jsou využívány v zásadě pouze pro měření délek a úhlů. Oproti klasickým mikroskopům poskytují nižší zvětšení, aby umožnily jasnější a ostřejší obraz kombinovaný s širokým zorným polem. Opět díky bezkontaktnímu měření a pozorování, umožňují detailní inspekci dílů a minimalizují manipulaci. [10]

Měřicí mikroskopy jsou běžně používány v různých odvětvích průmyslu, ve výzkumných centrech a laboratořích pro analýzu a kontrolu kvality malých a precizních součástek a materiálů.

2.1.3.1 Základní části měřicích mikroskopů

Měřicí mikroskopy mají čtyři typické části (Obrázek 2.1-4):

- A) Projekční obrazovka (plátno)
- B) Mikroskopická optická soustava
- C) Posuvná pracovní plocha
- D) Kličky pro posuv pracovní plochy [10]



Obrázek 2.1-4 - Části měřicího mikroskopu [10]

2.1.3.2 Princip měřicích mikroskopů

Měřicí mikroskopy používají systém čoček k zvětšení a zaostření světla pro vytvoření zvětšeného obrazu pozorovaného objektu. Tento obraz je pak pozorován přímo skrze okulární čočku, která umožňuje uživateli detailně měřit a analyzovat objekt. U digitálního měřicího mikroskopu je okulární čočka nahrazena kamerovým snímačem.

Obdobně jako optické komparátory, i měřicí mikroskopy využívají telecentrický optický systém. Tento systém zajišťuje konzistentní zvětšení a perspektivu při pozorování různých částí objektu, což přispívá k přesnějším a konzistentnějším výsledkům měření.

2.1.3.3 Měřicí metody měřicích mikroskopů [8]

Při měření mikroskopem se využívá především tři měřicích metod:

a) Měření stínovým obrazem

Součástí, která je předmětem měření se vloží do svazku paralelních paprsků a následně je mikroskopem pozorován stínový obraz.

b) Měření v osovém řezu

Při měření přímkového profilu jsou přisunuty měřicí nožíky s ryskami k objektu, aby bylo možné určit rovinu, ve které má být profil měřen. Namísto zaměřování na samotný obrys objektu se obsluha zaměří na přesné rysky nožíku. Tato metoda je podstatně přesnější než metoda stínového obrazu.

c) Analýza softwarem

Stejně jako u optických komparátorů, dnešní doba umožňuje měřit různé vlastnosti objektů měřicím mikroskopem za pomoci softwaru. Tato metoda se využívá pouze u digitálních měřicích mikroskopů.

2.1.3.4 Rozdělení měřicích mikroskopů

Stejně jako optické komparátory i měřicí mikroskopy se rozdělují dle provedení:

a) Optické měřicí mikroskopy (Obrázek 2.1-5)

Optické měřicí mikroskopy jsou založeny na principu vizuálního měření, kdy obsluha přístroje má za úkol provést samostatnou úlohu měření. I když proces není nějak zásadně složitý, oproti digitálnímu měřicímu mikroskopu musí být obsluha dostatečně proškolená. Zároveň tyto mikroskopy poskytují nižší rozlišení a přesnost, nemají možnost automatizace či dokumentace a celkově je měřicí proces mnohem pomalejší. Výhodami je ale zásadně nižší cena a jednoduchost konstrukce. [11]



Obrázek 2.1-5 - Optický měřicí mikroskop [11]

b) Digitální měřicí mikroskopy (Obrázek 2.1-6)

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.1.3.1, digitální měřicí mikroskopy využívají místo okulárů digitální kamery. Optický systém společně s kamerou mikroskopu umožňuje zobrazit měření na monitoru. Software přístroje pak umožňuje provádět měření (délek, ploch, objemů či úhlů), ale také dokumentovat jednotlivé měření. Oproti optickým mikroskopům dokážou tyto mikroskopy poskytnout rychlejší a přesnější měření a minimalizují chybu obsluhy. Lze je také snadno integrovat do dalších systémů a zajistit tak automatizaci procesů. Díky možnosti provádět různé druhy měření jsou digitální měřicí mikroskopy flexibilní nástroje, které lze použít v různých aplikacích a odvětvích jako např. průmyslová výroba, vědecké výzkumy či zdravotnictví. [12]



Obrázek 2.1-6 - Digitální měřicí mikroskop [29]

c) Speciální měřicí mikroskopy

Do této skupiny lze zařadit mikroskopy využívající specifické technologie pro získání adekvátních měření. Patří se například:

- **3D laserový skenovací mikroskop**

Tento mikroskop využívá laserové technologie pro získání vysoce přesného měření profilu, drsnosti a tloušťky vrstvy jakéhokoliv materiálu nebo tvaru s přesností na mikrometry. [13]

- **Velkoplošný 3D mikroskop**

Velkoplošný 3D mikroskop je schopen rychle a přesně měřit velké plochy. Je velmi užitečný pro měření drsnosti, rovinnosti, tvaru profilu a pro porovnávání údajů z 3D skenování. [13]

2.1.4 Souřadnicové měřicí stroje

Do optických měřicích zařízení patří také CMM (Coordinate Measuring Machine) – souřadnicové měřicí stroje (SMS) (Obrázek 2.1-7). Tyto zařízení patří k těm nejvýznamnějším inovacím v oblasti měření rozměrů. Byly vyvinuty zejména kvůli potřebě přesného měření složitých součástí v automobilovém a leteckém průmyslu.[8; 14]

Souřadnicové měřicí přístroje jsou složité měřicí systémy, které měří v rovině či prostoru. Výhodami tohoto stroje je možnost automatizace měření a vyhodnocování, vysoká přesnost, flexibilita a možnost měření v prostoru. Zároveň jsou tato zařízení ale drahá, časově a prostorově náročná a vyžadují správně proškoleného pracovníka. [8]

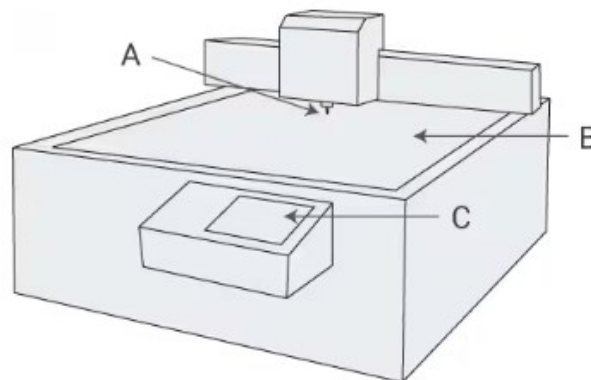


Obrázek 2.1-7 - Optický měřicí souřadnicový systém [14]

2.1.4.1 Základní části souřadnicových měřicích strojů [15]

Souřadnicové měřicí stroje mají tři typické části (Obrázek 2.1-8):

- A) CCD kamera
- B) Pracovní plocha
- C) Kontrolní panel



Obrázek 2.1-8 - Části souřadnicových měřicích strojů [15]

2.1.4.2 Rozdělení souřadnicových měřicích přístrojů [16]

Souřadnicové měřicí přístroje lze rozdělit podle několika různých kritérií. Tím prvním je typ konstrukce, který rozděluje CMM na 3 základní skupiny:

a) Jednosouřadnicové měřicí stroje

Jak název napovídá, tyto přístroje dokážou měřit pouze v jedné ose - x. Výhodou těchto přístrojů je vysoká přesnost i na větší vzdálenosti.

b) Dvousouřadnicové měřicí stroje

Měření na těchto přístrojích se uskutečňuje ve dvou vzájemně kolmých osách v jedné rovině – x a y. Do této kategorie lze zařadit již zmíněné profilprojektory a měřicí mikroskopy. K povaze celé práce jsou ale popsány samostatně v předešlých kapitolách 2.1.2 a 2.1.3.

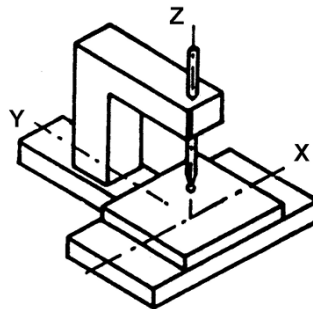
c) Třísouřadnicové měřicí stroje

Třísouřadnicové měřicí stroje jsou klasickým zástupcem CMM. Umožňují měřit ve třech vzájemně kolmých osách – x, y a z. Využívají se především pro složité rozměrové měření v prostoru.

Dále je možné CMM rozdělit dle geometrického uspořádání CMM lze tyto přístroje rozdělit na:

a) Stojanový (sloupový) typ (Obrázek 2.1-9)

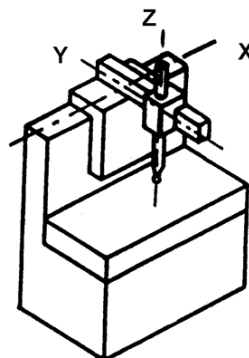
Tento typ je jeden z nejpřesnějších, má velkou tuhost a dobrý přístup k měřenému objektu. Je určen pro malé rozsahy měření.



Obrázek 2.1-9 - Stojanový typ CMM [8]

b) Výložníkový typ (Obrázek 2.1-10)

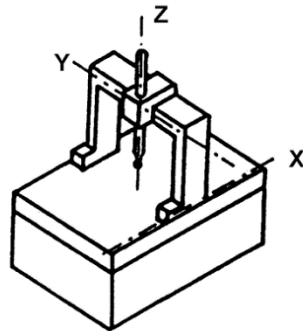
Kvůli nutnosti vyvažování pinoly je rozsah měření v ose y krátký. Díky dobrému přístupu k dílu je vhodný pro měření dlouhých úzkých objektů.



Obrázek 2.1-10 - Výložníkový typ CMM [8]

c) Portálový typ (Obrázek 2.1-11)

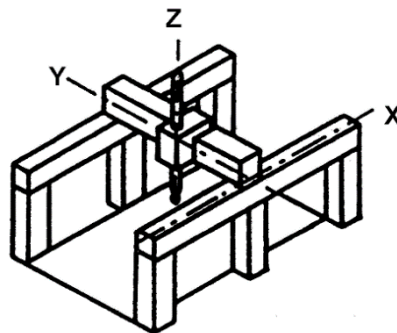
Jedná se o nejrozšířenější CMM. Má vysokou tuhost a je vhodný pro střední až velké rozsahy měření.



Obrázek 2.1-11 - Portálový typ CMM [8]

d) Mostový typ (Obrázek 2.1-12)

Používá se pro měření nadrozměrných dílů. Nejčastěji je využíván v leteckém a automobilovém průmyslu.



Obrázek 2.1-12 - Mostový typ CMM [8]

2.1.4.3 Princip souřadnicových měřicích přístrojů

Princip měření na souřadnicovém měřicím přístroji spočívá v identifikaci základního bodu v prostoru a následném odměřování dalších bodů součásti od určeného základního bodu. Tyto polohy jsou popsány pomocí souřadnicových rozměrů v osách x, y, z. CMM často pracují se dvěma souřadnicovými systémy – souřadnicový systém stroje a souřadnicový systém měřeného dílu. Na základě těchto naměřených souřadnic jsou na počítači vypočteny parametry popisující povrch skutečného obrobku, které slouží k ověření shody geometrického tvaru s konstrukčními požadavky. [8; 17; 18]

2.1.4.4 Snímací systémy souřadnicových měřicích strojů [16]

Jednou z částí CMM je snímací systém. Tento systém je využíván k získání potřebných bodů měření. V dnešní době CMM využívají především dotykové (kontaktní) snímací systémy. Ze zařazení těchto strojů v této práci lze ale odvodit, že se používají i bezdotykové snímací systémy, které využívají optiku.

Typickým představitelem optických bezdotykových systémů jsou právě již zmíněné dvousouřadnicové stroje (měřicí mikroskopy a profilprojektory), ale optické snímací systémy lze nalézt i u třísouřadnicových strojů. Využívány jsou především:

- **Laserové systémy** (Obrázek 2.1-13)

Tyto systémy využívají dva různoběžné laserové paprsky. Tyto paprsky jsou nastavené tak, aby se protínaly v přesně definované vzdálenosti. Pokud jsou namířeny na objekt a v určitém okamžiku dojde k protnutí, vyhodnocovací jednotka zaregistruje dotyk. Následným přepočítáním je získán konkrétní bod v prostoru. [19]



Obrázek 2.1-13 - Laserový systém od společnosti Zeiss [19]

- **Kamerové systémy** (Obrázek 2.1-14)

U těchto systémů je využita digitální CCD kamera. Digitální obraz získaný pomocí této kamery následně zpracovává software, který vyhodnocuje jednotlivé body a skládá celkový potřebný rozměrový model dílu. [20]



Obrázek 2.1-14 - Kamerový systém od společnosti Zeiss [20]

2.2 Nejistota měření

I přes vyspělost dnešní doby není žádný měřicí proces absolutně přesný. Samostatné měření je ovlivněno velkým množstvím faktorů jako jsou např.: přesnost přístroje, vybraný postup měření, vliv okolí či obsluhy a další. Kvůli těmto faktorům výsledek měření není téměř nikdy totožný se skutečnou hodnotou měřené veličiny. Měl by se proto dle patřičných norem vyhodnocovat příslušný rozsah hodnot, který bude přidružen k výsledku měření a ve kterém se bude nacházet skutečný výsledek. Tento rozsah by měl být k výsledku přiřazen odůvodněně a nazývá se nejistota měření.

Definice dle sborníku Pokyn pro vyjadřování nejistoty měření (GUM): „*Nejistota měření je parametr spojený s výsledkem měření, který charakterizuje rozptýlení hodnot, které mohou být důvodně přiřazeny měřené veličině.*“ (2012, s. 16) [18]

Definice dle knihy Metrologie a hodnocení procesů: „*Nejistota měření (výsledku měření) je takový nezáporný parametr, který charakterizuje rozptýlení hodnot přiřazených k měřené veličině na základě určité použité informace.*“ (Olga Tůmová, 2009, s. 116) [21]

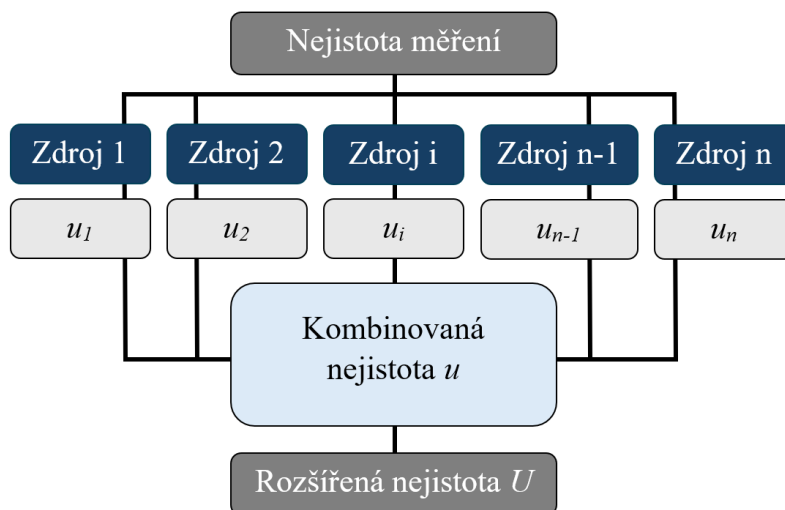
Nejistota měření se nemusí vztahovat pouze k výsledkům měření, ale také k parametrům měřidel, hodnotám užívaných konstant, použitým korekcím apod. Musí však být na těchto parametrech závislá. [21; 8]

Základem určení nejistoty měření je princip pravděpodobnosti. Očekává se, že rozsah vypočítané nejistoty zahrne naměřené hodnoty. Jak se tyto naměřené hodnoty od těch skutečných mohou odlišovat udává předpoklad rozdělení pravděpodobnosti.[21]

Základním znakem nejistoty měření je standardní nejistota u . Tato standardní nejistota je dána hodnotou směrodatně odchyly $s(\bar{x})$. Standardní nejistoty měření se dále rozlišují podle způsobu vyhodnocování na dva typy:

- a) **Standardní nejistoty typu A**
- b) **Standardní nejistoty typu B**

Obecně se nejistota měření skládá z několika různých složek, kterými jsou směrodatné odchylky zdrojů (Obrázek 2.2-1). [8]



Obrázek 2.2-1 - Obecné schéma nejistot měření [22]

2.2.1 Zdroje nejistoty měření

Za zdroje nejistoty měření lze označit veškeré jevy, které mají za následek ovlivnění výsledku měření. Některé ze zdrojů mohou být spjaty pouze s výpočtem nejistoty typu A, nebo typu B, jiné se zase objevují u obou nejistot. Je důležité věnovat těmto zdrojům značnou pozornost, neboť opomenutí některého z nich může mít za následek významné zkreslení výsledků. Mezi zdroje nejistoty měření se řadí spousta jevů, jako je např. nevhodná volba přístroje, vzorků proměření, postupu měření, zaokrouhlení převzatých hodnot, nevhodné vlivy prostředí, subjektivní vlivy operátorů atd.

2.2.2 Standartní nejistota typu A (u_A)

Standartní nejistoty typu A jsou dány náhodnými chybami, obecně však není známo, co přesně tyto chyby způsobuje. Vyhodnocování těchto nejistot probíhá metodou typu A. Tuto metodu vyhodnocení lze využít pouze v případě, že se jedná o opakované měření prováděné za stejných podmínek. S rostoucím počtem měření hodnota nejistoty typu A klesá. Díky technickým prostředkům této doby je možné vyhodnocování velkého množství naměřených hodnot a tím zmenšení velikosti této nejistoty měření. [22; 8]

2.2.2.1 Stanovení standartní nejistoty typu A [21]

Standartní nejistota typu A se určuje pomocí statického vyhodnocení série opakovaného měření. „*Je-li n nezávislých pozorování provedeno za stejných podmínek, je odhad výsledné hodnoty prezentován hodnotou výběrového aritmetického průměru \bar{X} .*“ (Olga Tůmová, 2009, s. 116) [21; 22]

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (1)$$

\bar{X}Aritmetický průměr z naměřených hodnot

X_iHodnota i -tého měření

n Počet naměřených hodnot

Tím nejdůležitějším pro určení standartní nejistoty typu A je rozptyl a odmocnina tohoto rozptylu. Tato odmocnina vyjadřuje směrodatnou odchylku. Pro stanovení základního rozptylu a náhodného výběru platí následující vztahy:

- Rozptyl základního souboru:

$$\sigma^2(X_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (2)$$

- Směrodatná odchylka základního souboru:

$$\sigma(X_i) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (3)$$

- Odhad rozptylu náhodného výběru označovaný jako výběrový rozptyl:

$$s^2(X_i) = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (4)$$

- Výběrová směrodatná odchylka náhodného výběru:

$$s(X_i) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (5)$$

Standartní nejistota typu A se poté určí jako výběrová směrodatná odchylka výběrových průměrů následovně:

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

s Směrodatná odchylka z opakovaných naměřených hodnot

u_A Standartní nejistota typu A

Ze vztahu (6) lze vypočítat, že standartní směrodatná odchylka bude tím menší, čím bude větší množství prováděného měření, a zároveň čím bude menší rozptyl u naměřených hodnot. Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.3, vysokým počtem měření lze ovlivnit výslednou nejistotu měření. Samostatná nejistota je ale ovlivněna i velmi nízkým počtem měření, kdy počet opakování měření n je menší než 10. Důvodem je, že při takto malém počtu měření není odhad rozptylu dostatečně spolehlivý. V takovémto případě se zavádí následující vztah:

$$u_A = k_{u_A} \cdot s(\bar{X}) \quad (7)$$

k_{u_A} ...Bezpečnostní koeficient

Tento bezpečnostní koeficient závisí na počtu měření. Závislost je zobrazena v tabulce 2.2-1 níže. V dnešní době se však doporučuje provádět měření s 10 a více opakování a tabulku využívat pouze výjimečně v případech kdy bylo provedeno 5 až 10 opakování.

Tabulka 2.2-1 - Závislost koeficientu na počtu měření[8]

Závislost bezpečnostního koeficientu k_{u_A} [-] na počtu měření, kdy $n < 10$									
n	2	3	4	5	6	7	8	9	10 a více
k_{u_A}	7	2,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1

Stanovení nejistot typu A by mělo probíhat v podmínkách opakovatelnosti. Tím jsou myšleny podmínky, za kterých hodnoty zdrojů určené metodou typu B zůstávají konstantní. To znamená, že by mělo měření probíhat v takových podmínkách, které odpovídají běžnému stavu měření, a ne v uměle vytvořených podmínkách, či v podmínkách, kde se běžně takové měření neprovádí. Pro důvěryhodné stanovení všech působících neznámých vlivů je nutné tyto vlivy nechat působit. Pokud tedy byla stanovena nejistota na určitém místě a v určitých podmínkách, je vhodné provádět měření v tomto prostředí. Standartní nejistotu typu A lze vypočítat pouze jednou, a využívat této hodnoty opakovaně, pokud je zachováno právě měřicí prostředí. Jakákoliv změna tedy vyústí k nutnosti určit novou hodnotu nejistoty typu A.

2.2.3 Standartní nejistota typu B (u_B)

Standartní nejistoty typu B jsou známé a odhadnutelné jak z hlediska příčiny, tak z hlediska velikosti variability, nebo statistického chování. Hodnota tohoto typu nejistot není závislá na počtu měření, ale vychází z různých zdrojů. Nelze ji tedy určit statistickými metodami. Výsledná nejistota je superpozicí jednotlivých složek, které označujeme jako zdroje typu B. Počet těchto složek určuje samotná obsluha přístroje.[22]

Pro určení těchto složek operátor využívá:

- a) Své znalosti
- b) Specifikace od výrobce měřidla
- c) Kalibrační protokoly
- d) Odbornou literaturu, příručky, manuály
- e) Předchozí měření [23]

2.2.3.1 Zdroje nejistoty typu B [21][22]

Zdroje nejistoty typu B jsou ovlivněny nedokonalostí:

- a) Měřicích prostředků
- b) Použitých metod měření
- c) Nestálostí místních podmínek
- d) Operátora
- e) Ostatních vlivů
- f) Vztahů, konstant či závislostí použitých při vyhodnocování

Vlivy měřicích prostředků – jsou způsobeny nedokonalostí etalonů, měřicích přístrojů a použitého příslušenství. Patří sem například nejistoty způsobené kalibrací, stabilitou měřicích přístrojů, vnitřní tření (u analogových přístrojů), dynamické chyby přístrojů, hystereze atd.

Vlivy použitých metod měření – zahrnují ovlivnění způsobené ztrátami, svodovými proudy či interakcí s objektem měření, vliv reálných parametrů apod.

Vlivy nestálostí místních podmínek – jsou dány vlivem fyzikálních podmínek a jejich případné změny. To zahrnuje například působení elektrického či magnetického pole, vlhkosti, teploty a tlaku prostředí, hustoty vzduchu, prašnosti, osvětlení aj.

Vlivy operátora – zvyklosti pracovníka, paralaxa nebo např. vyzařované teplo také mohou mít za následek ovlivnění měření.

Ostatní vlivy – vlivy způsobené denní dobou, ročním obdobím atd.

Pro určení optimálního počtu zdrojů všeobecně platí poučka, která udává, že zdroj standartní nejistoty typu B lze považovat za nepodstatný, pokud je menší než jedna šestina toho největšího zdroje z dané skupiny. Toto vyjadřuje vztah:

$$u_{Bi} < \frac{u_{Bi \max}}{6} \quad (8)$$

u_{Bi} Zdroj standartní nejistoty typu B

$u_{Bi \max}$...Největší zdroj standartní nejistoty typu B

2.2.3.2 Stanovení standartní nejistoty typu B [21; 22; 24]

Postup určení nejistoty typu B je následný:

1. Nejprve se vytipují zdroje nejistot typu B (viz předchozí kapitola 2.2.3.1),
2. poté se určí jejich stálé (referenční) hodnoty,
3. dále se určí variabilní složky vytipovaných zdrojů (patří sem symetrie a meze těchto složek),
4. následně se posoudí statistické rozdělení pravděpodobnosti,
5. v předposledním kroku se vypočítá přírůstek u_{Bi} k celkové nejistotě každého i -tého zdroje.
6. nakonec se stanoví celková standartní nejistota typu B.

Standartní nejistoty určené metodou typu B lze vypočítat různými způsoby:

- a) Z rozšířené nejistoty měření, kterou již známe přepočtem na nejistotu kombinovanou
- b) Odhadem z variability zdroje a statistického rozdělení
- c) Ze známých údajů kombinované nejistoty (např. z certifikátů a tabulek, z ověřených literárních zdrojů, kvalifikovaným odhadem atd.)

V případech, kdy jsou nejistoty typu B určovány externě, zejména pak při kalibraci, je výstupem měření protokol, který specifikuje hodnotu výsledné rozšířené nejistoty tohoto měření. Z této hodnoty je zapotřebí odvodit zdroj nejistoty typu B s ohledem na jeho charakteristiky podle vztahu:

$$u_{Bi} = \frac{U}{k} \quad (9)$$

URozšířená nejistota zdroje

kKoeficient rozšíření zdroje nejistoty

V případě, že je nejistotu typu B nutné odhadnout na základě variability známého zdroje, je výpočet uskutečněn dle vztahu:

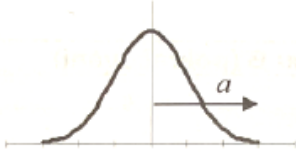
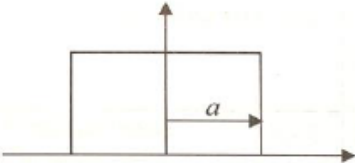
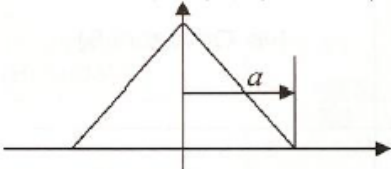
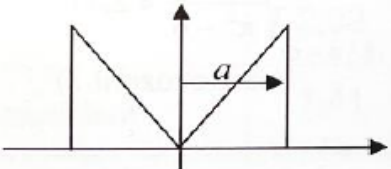
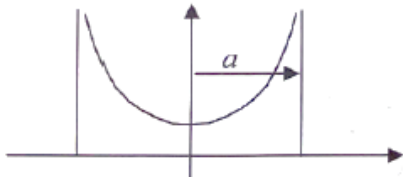
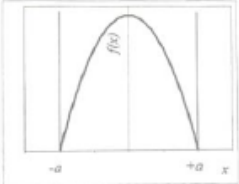
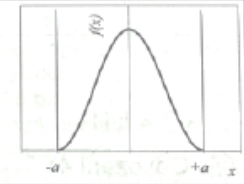
$$u_{Bi} = \frac{Z_{MAX}}{\chi} \quad (10)$$

Z_{MAX}Maximální odchylka od zdroje nejistoty

χKoeficient statistického rozdělení

Číselník u vzorce (10) popisuje známý rozptyl zdroje nejistoty a jmenovatel je určen k přepočtu na směrodatnou odchylku příslušného rozdělení. Závislost tohoto koeficientu závisí jen na statistickém rozdělení zdroje nejistoty (tabulka 2.2-2).

Tabulka 2.2-2 – Koeficient χ pro výpočet dílčí nejistoty typu B

Statistické rozdělení	z_{\max}	χ
<p>Normální (Gaussovo)</p> 	$a = 2 s$ $a = 3 s$ $a = h s$ s - směrodatná odchylka rozdělení zdroje nejistot	2 3 h
<p>Rovnoměrné (Pravoúhlé)</p> 	a	$\sqrt{3} \approx 1,73$
<p>Trojúhelníkové (Simpsonovo)</p> 	a	$\sqrt{6} \approx 2,45$
<p>Trojúhelníkové (Bimodální)</p> 	a	$\sqrt{2} \approx 1,41$
<p>U - rozdělení</p> 	a	$\sqrt{2} \approx 1,41$
<p>Kvadratické</p> 	a	$\sqrt{5} \approx 2,24$
<p>Kosinové</p> 	a	$\sqrt{\frac{\pi^2}{\pi^2-8}} \approx 2,30$

Jak již bylo zmíněno, posledním krokem je stanovení celkové standardní nejistoty typu B. Ta se stanoví jako geometrický součet, a to dle následujícího vztahu:

$$u_B = \sqrt{\sum u_{Bi}^2} \quad (11)$$

u_BCelková standardní nejistota typu B

2.2.4 Kombinovaná standardní nejistota (u_C)

Kombinovaná standardní nejistota je geometrickým průměrem standardní nejistoty typu A a standardní nejistoty typu B a udává interval, ve kterém se při normálním rozdělení pravděpodobnosti objevuje skutečná hodnota měřené veličiny s pravděpodobností $P = 68,27 \%$. [21]

2.2.4.1 Stanovení kombinované standardní nejistoty

Kombinovaná standardní nejistota se určuje dle následujícího vztahu:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (12)$$

u_C Kombinovaná standardní nejistota

u_A Standardní nejistota typu A

u_B Standardní nejistota typu B

Je-li hodnota nejistoty měření typu A zásadně větší než hodnota nejistoty měření typu B, je zapotřebí předpokládat, že se v systému měření objevují především náhodné vlivy a na tyto vlivy se tedy zaměřit. [22]

V opačném případě lze předpokládat, že se v systému objevují dominantní zdroje typu B, anebo je nevhodně navržen celý systém měření, kdy rozlišitelnost nedokáže dostatečně popsat variabilitu. [22]

2.2.5 Rozšířená nejistota U

Jak bylo vysvětleno v kapitole 2.2.4, kombinovaná standartní nejistota udává interval, kde se nachází skutečná hodnota s pravděpodobností $P = 68,27 \%$. To může být z hlediska následného využití a stanovení rizik neshody nevýhodné. Pokud je tedy požadována větší pravděpodobnost výskytu skutečné hodnoty, zavádí se tzv. rozšířená nejistota.[21]

2.2.5.1 Stanovení rozšířené nejistoty [21; 22]

Rozšířená nejistota je dána základním vztahem:

$$U = k_U \cdot u_C \quad (13)$$

URozšířená nejistota

k_UKoeficient rozšíření zdroje nejistoty

u_C Kombinovaná standartní nejistota

Číselně lze rozšířenou nejistotu měření vyjádřit několika způsoby. Nejpoužívanějším je (pokud platí normální rozdělení pravděpodobnosti) zjednodušený princip. U tohoto principu využíváme koeficient rozšíření pro úpravu pravděpodobnosti výskytu skutečné hodnoty. Předpokladem je lineární výsledek měření a platnost jedné ze 3 podmínek:

1. Existuje jeden jediný dominantní příspěvek k nejistotě měření, u kterého při normálním rozdělení přesahují stupně volnosti hodnotu 30
2. Tři největší zdroje nejistoty mají srovnatelnou velikost
3. Tři největší příspěvky přesahují stupeň volnosti 30

Jak hodnoty koeficientu rozšíření zdroje nejistoty ovlivňují rozdělení hustoty pravděpodobnosti je zobrazeno v tabulce 2.2-3:

Tabulka 2.2-3 - Hodnoty koeficientu rozšíření k_U v závislosti na intervalu rozdělení hustoty pravděpodobnosti N [22]

Rozdělení N [μ , σ^2]	Pravděpodobnost P [%]	Koeficient rozšíření k_U [-]
	68,27	1,00
	95,00	1,96
	95,45	2,00
	99,00	2,58
	99,73	3,00

2.2.6 Vyjádření výsledků měření[22]

Vyjádřování výsledků měření má svá určitá pravidla.

1. Uvedená nejistota měření neodlučitelně patří ke zpracování naměřených hodnot.
2. Nejistota měření neoddělitelně patří k výsledku měření.
3. Musí být rozlišeno, zda se jedná o kombinovanou nejistotu měření u , nebo o (v dnešní době preferovanou) nejistotu měření rozšířenou U .
4. Při zapsání výsledku s použitím rozšířené nejistoty musí být u výsledku uveden i koeficient rozšíření.
5. Absolutní a relativní nejistoty jsou u výsledku rovnocenné v závislosti na okolnostech a dalším použití.
6. Samostatná nejistota měření se vyjadřuje na 2 platné číslice.
7. Je preferováno zaokrouhlování směrem vzhůru.
8. Na vyšší počet číslic se nejistota zaokrouhluje pouze pokud bude následně matematicky zpracována.

Výsledné vyjádření výsledků měření se tedy skládá dle následujícího vztahu:

$$y \pm U \quad (14)$$

yOdhad parametru polohy

URozšířená nejistota

K tomuto vyjádření výsledku se ještě přidávají povinné doplňující údaje ohledně koeficientu rozšíření a výsledné pravděpodobnosti pokrytí.

Při zaokrouhlování výsledků by nemělo dojít ke snížení nejistoty o více než 5 %. I z tohoto důvodu je doporučeno zaokrouhlování směrem vzhůru. Platí tedy vztah:

$$U_z \geq 0,95 \cdot U \quad (15)$$

U_z ... Rozšířená nejistota po zaokrouhlením

U ...Rozšířená nejistota před zaokrouhlením

2.2.7 Norma ČSN EN ISO/IEC 17025:2018 [25]

Norma ČSN EN ISO/IEC 17 025:2018 stanovuje obecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří pro akreditovaná pracoviště. Uvádí, že je nutné vyjádřit neurčitost výsledků měření pomocí nejistot. Tento požadavek platí pro laboratoře, které provádějí kalibrace, metrologické úkony i diagnostické testy a jsou, nebo chtějí být akreditované.

Obecně tato norma požaduje:

- a) Uvádět nejistoty měření u všech výsledků práce laboratoře a zahrnout je do veškerých dokumentů, jako jsou například kalibrační listy
- b) Podrobně zpracovat metodiky analýzy všech faktorů, které mohou významně ovlivnit výsledky měření
- c) Určit úroveň přesnosti a použití vhodných metod pro odhad nejistot
- d) Uvádět nejistoty u všech numerických výsledků testů a zkoušek akreditovaných laboratoří
- e) Nejistotu není třeba uvádět u výsledků testů, které mají kvalitativní charakter, například jednoduché zhodnocení "vyhovuje" nebo "nevyhovuje", jinak je ale další nutností uvádět nejistoty

Norma ČSN EN ISO/IEC 17 025:2018 tedy stanovuje důležité požadavky, které musí být dodrženy v akreditovaných laboratořích a pracovištích, aby se zajistila spolehlivost a přesnost výsledků měření, což je v této práci velmi důležité.

Následuje experimentální část, která se týká popisu použitého přístroje a měřicího procesu a výpočtu nejistot.

3 Experimentální část

3.1 Popis použitého měřicího přístroje [26]

Keyence IM - 7000 (Obrázek 3.1-1) je optický komparátor “nové generace“. Tento systém okamžitého měření kombinuje vlastnosti konvenčních měřicích nástrojů a nahrazuje je. Mezi tyto běžně používané nástroje patří optický komparátor, měřicí mikroskop, systém pro měření profilů, optický CMM, či posuvné měřidlo nebo mikrometr. Využití tento přístroj nachází ve všech různých průmyslových odvětvích např. při vstupní a výstupní kontrole, při procesní kontrole vzorků a dílů, nebo při kontrole prvních prototypů součástí.



Obrázek 3.1-1 - Keyence IM – 7000

Tento přístroj využívá 1" černobílý obrazový snímač CMOS s rozlišením 6,6 Mpx. Objektivem snímáče je dvojitá telecentrická čočka. Přístroj disponuje dvěma režimy zorného pole, které se liší přesností měření:

- a) **Režim měření se širokým polem**
Zorné pole o velikosti 100x100 mm zajišťuje rychlejší měření.
- b) **Režim měření s vysokou přesností**
Zorné pole o velikosti 20x20 mm nabízí vysokou přesnost.

Obrazovkou je 10.4" LCD monitor s rozlišením 1024 x 768 pixelů.

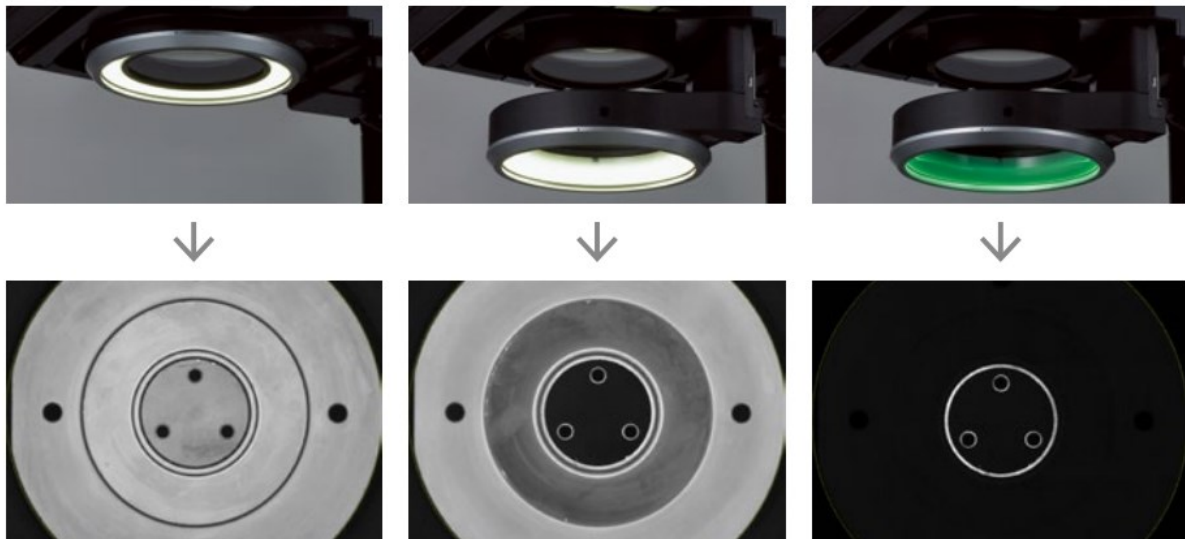
Na obrázku 3.1-2 je zobrazen řez celou touto optickou soustavou.



Obrázek 3.1-2 - Řez optickou soustavou přístroje Keyence [26]

Osvětlení dílu je možné hned několika způsoby (Obrázek 3.1-3):

- Spodní nasvícení (Základní nasvícení – není na obrázku zobrazeno)
- Vysoko položené osvětlení v různých úhlech
- Nízko položené osvětlení v různých úhlech
- Kruhové osvětlení



Obrázek 3.1-3 - Různé způsoby osvětlení [26]

3.1.1 Specifikace měřicího systému Keyence IM – 7000

V následující tabulce 3.1-1 jsou zobrazeny specifikace přístroje udávány výrobcem.

Tabulka 3.1-1 - Specifikace přístroje Keyence IM -7000 [26]

Model		IM-7000	
Obrazový snímač		1" černobílý senzor CMOS s rozlišením 6,6 [Mpx]	
Displej		10. 4" monitor LCD (XGA: 1024 x 768)	
Objektiv snímače		Dvojitá telecentrická čočka	
Měření obrazu	Zorné pole	Režim měření se širokým polem 200 x 200 [mm] (4 x R50)	
		Režim měření s vysokou přesností: 125 x 125 [mm]	
	Minimální zobrazená jednotka		0,1 [μm]
	Opakovatelnost	Bez pohybu inspekční plochy	Režim měření se širokým polem ±1 [μm] Režim měření s vysokou přesností: ±0,5 [μm]
		S pohybem inspekční plochy	Režim měření se širokým polem ±2 [μm] Režim měření s vysokou přesností: ±1,5 [μm]
	Přesnost měření (±2σ)	Bez spojení	Režim měření se širokým polem ±5 [μm] Režim měření s vysokou přesností: ±2 [μm]
		Se spojením	Režim měření se širokým polem ±(7 + 0,02 L) [μm] Režim měření s vysokou přesností: ±(4 + 0,02 L) [μm]
Měření světelnou sondou	Oblast měření (XY)		90 × 90 [mm]
	Maximální hloubka měření		30 [mm]
	Průměr světelné sondy		ø3 [mm]
	Síla měření		0,015 [N]
	Opakovatelnost		±2 [μm]
	Přesnost měření		±(8 + 0,02 L) [μm]
Externí dálkový vstup		Beznapěťový vstup (s kontaktem a bez něj)	
Externí výstup	OK/NESPRÁVNÝ/CHYBA/MĚŘ.		Výstup PhotoMOS Jmenovité zatížení 24 [V] DC, 0,5 [A] Spínací odpor 50 [mΩ] nebo nižší
	Rozhraní		LAN RJ-45 (10BASE-T/100BASE-TX/1000BASE-T)
	USB 2.0 typu A		6 portů (vpředu: 2, vzadu: 4)
Záznam	Pevný disk	500 [GB]	
Systém osvětlení	Transparentní		Telecentrické transparentní osvětlení
	Kruhové		Čtyřdílné všesměrové osvětlení (elektrické), kruhové (směrové) osvětlení (elektrické)
Stojan XY	Rozsah pohybu	100 x 100 mm (elektrický)	
Inspekční plocha	Nejvyšší zátěž		5 [kg]
	Rozsah pohybu		75 [mm] (elektrický)
Napájecí zdroj	Napájecí napětí		100 až 240 [V] AC 50/60 [Hz]
	Spotřeba energie		430 [VA] nebo nižší
Odolnost vůči prostředí	Stupeň znečištění		2
	Kategorie přepětí		II
	Okolní teplota		+10 až +35 °C
	Relativní vlhkost		20 až 80 % RV (bez kondenzace)
Hmotnost		Cca 8 [kg]	

3.1.2 Výhody měřicího systému Keyence IM - 7000

Tento přístroj společnosti Keyence má hned několik zásadních výhod oproti ostatním nástrojům:

1) Snadné vytváření programů

Keyence IM-7000 disponuje uživatelsky přívětivým softwarem, ve kterém je možné vytvářet měřicí programy a analyzovat a ukládat data z měření. Při vytváření měřicího programu lze využít řadu pomocných měřicích nástrojů, které pomohou uživateli nastavit i velmi složitá měření.

2) Snadné a rychlé měření

Po vytvoření programu je již samostatné měření velice jednoduché. Stačí umístit potřebnou součást na měřicí plochu a stisknout tlačítko měření. Přístroj dokáže měřit až 100 dílů s 99 různými prvky během několika sekund. Zároveň měřené díly mohou být různé bez změny programu. Vyhodnocení a ukládání výsledků měření probíhá automaticky. Celkový čas měření je tedy velmi krátký a efektivita vysoká.

3) Automatická analýza měření

Systém automaticky počítá a zobrazuje nejdůležitější statistické hodnoty pro každé měření, jako například zda jsou výsledky chybné, maximální a minimální rozměr, průměr, C_p , C_{pk} a další. Ověření trendu měření lze pomocí histogramu a vývojového grafu.

4) Vysoká přesnost měření

Přesnost měření na tomto přístroji může dosahovat až 2 mikrometrů.

5) Eliminace chyb operátora

Neboť přístroj nevyžaduje přesné umístění součástí, automaticky rozpoznává hrany a zaostřuje na daný díl, dosahuje stejnoměrných výsledků bez vlivu operátora.

6) Eliminace nutnosti laboratoře

Velmi pevná konstrukce zařízení a prostorová úspornost umožňují instalaci přístroje prakticky kdekoliv. Integrovaný teplotní senzor zajišťuje stabilnější měření.

Celkově se jedná o velmi vospělý přístroj, který umožňuje zefektivnit kontrolu kvality. V dnešní době společnost Keyence již vyvinula přístroj řady IM – 8000, který nabízí další vylepšení.

3.2 Průběh experimentu

Pro výpočet nejistoty je nejprve potřeba provést potřebná měření. Tato měření byla uskutečněna v laboratoři Praktik experimentálních metod v obrábění na Katedře technologie obrábění. Laboratoř se nachází ve dvou místnostech – UX124 a UX 125. Použitý měřicí přístroj Keyence se nachází v první z jmenovaných místností.

3.2.1 Definování experimentu

V předchozí kapitole 3.1 bylo zmíněno, že přístroj Keyence IM – 7000 využívá dva režimy měření. Při tomto experimentu byl využit pouze režim měření se širokým polem o zorném poli 100x100 mm.

I přes velikost inspekční plochy 200x200 mm byl vzhledem k povaze bakalářské práce a velkému množství dat, které by bylo nutné nasbírat, zvolen rozsah plochy měření 100x100 mm. To znamená, že přístroj nemusí detekovat celou inspekční plochu, a pořizovat několik snímků, které by následně propojoval dohromady, ale nechává ji prakticky fixně na jednom místě.

3.2.2 Pomůcky použité při experimentu

Kromě samostatného měřicího přístroje byly použity následující pomůcky:

a) Koncové měrky přesnosti A (2) – dílenské

Pro obsáhnutí celého rozsahu měřicí plochy byly zvoleny čtyři různé velikosti různě poskládaných koncových měrek následovně:

1) 2,500 [mm] (Obrázek 3.2-1)

Zde byla využita pouze samostatná měrka, neboť složení dvou velmi tenkých koncových měrek způsobovalo vyklánění těchto měrek v ose z a ovlivňování přesnosti experimentu.

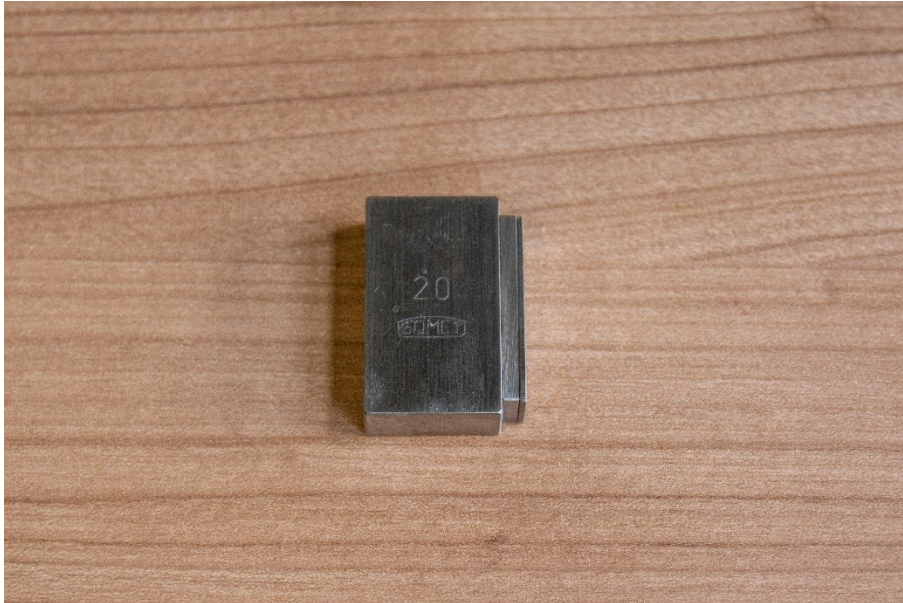


Obrázek 3.2-1 - Měrka o velikosti 2,500 mm

2) **23,502 [mm]** (Obrázek 3.2-2)

Tento rozměr byl složen za pomoci tří měrek:

- 20,000 mm
- 2,500 mm
- 1,002 mm



Obrázek 3.2-2 - Soustava měrek o velikosti 23,502 mm

3) **58,466 [mm]** (Obrázek 3.2-3)

Pro dosažení této velikosti byly použity čtyři koncové měrky:

- 50,000 mm
- 6,000 mm
- 1,460 mm
- 1,006 mm



Obrázek 3.2-3 - Soustava měrek o velikosti 58,466 mm

4) 86,509 [mm] (Obrázek 3.2-4)

Poslední měřený rozměr byl složen opět ze tří měrek:

- 80,000 mm
- 5,500 mm
- 1,009 mm



Obrázek 3.2-4 - Soustava měrek o velikosti 86,509 mm

b) Nástavný kroužek o vnitřním průměru 19,9987 [mm] (Obrázek 3.2-5)

Nástavný kroužek byl zvolen s vnitřním průměrem **19,9987** mm.



Obrázek 3.2-5 – Nástavný kroužek o velikosti 19,9987 mm

c) Prostředky pro očištění koncových měrek

Použitými prostředky byl technický benzín, vata a optické utěrky.

d) Plastické mazivo pro konzervaci koncových měrek

3.2.3 Vytvoření programu

Nejprve bylo vždy nutné připravit koncové měřky pro měření. To znamená očištění měrek od plastického maziva a v případě použití více kusů pospojování a připravení potřebné celkové velikosti.

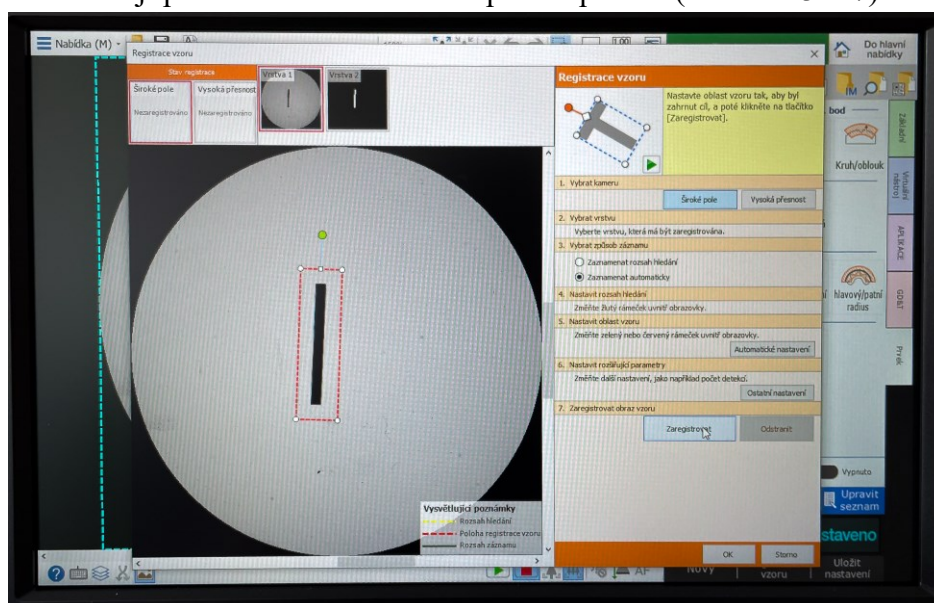
Po připravení měrek následovalo vytvoření potřebného programu. Pro každou měřenou soustavu je nutné vytvoření vlastního programu. Postup vytvoření programu je následovný:

- 1) Nejprve je vybráno tlačítko “Program“ (Obrázek 3.2-6), následně je vybrána možnost nového programu a zvolen režim měření a velikost měřené plochy. V tomto případě byl zvolen širokoúhly režim a velikost měřené plochy 100x100 mm.



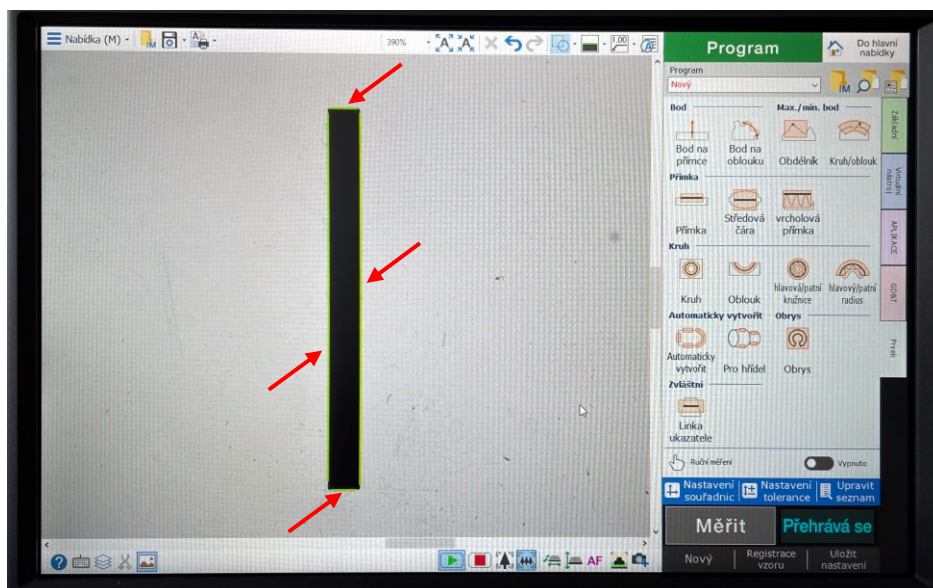
Obrázek 3.2-6 - Úvodní obrazovka přístroje Keyence

- 2) Dále je nutné zaregistrovat měřený vzor. Díky této registraci přístroj rozpozná měřenou součást a lze ji pokládat kamkoliv na inspekční plochu (Obrázek 3.2-7).



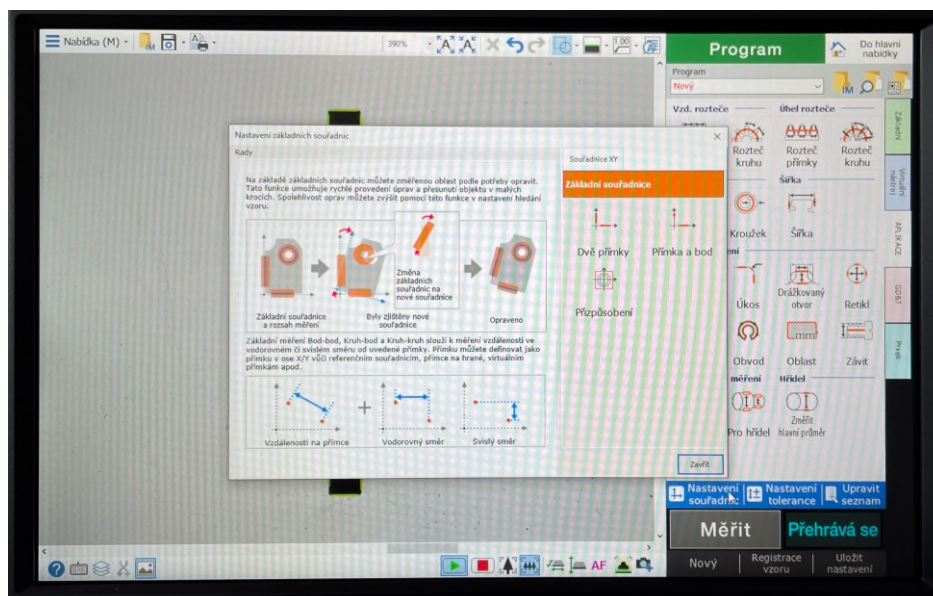
Obrázek 3.2-7 - Zaregistrování měřeného vzoru

- 3) Následně je použit jednoduchý element – přímka. Tento element je vytvořen na několika různých místech – podélně (použit při kroku č. 7 – vytvoření měření mezi přímkami) a příčně (použit při kroku č. 5 – vytvoření půlicí přímky) k měřené velikosti měřky (červené šipky naznačují místa vytvoření přímek) (Obrázek 3.2-8).



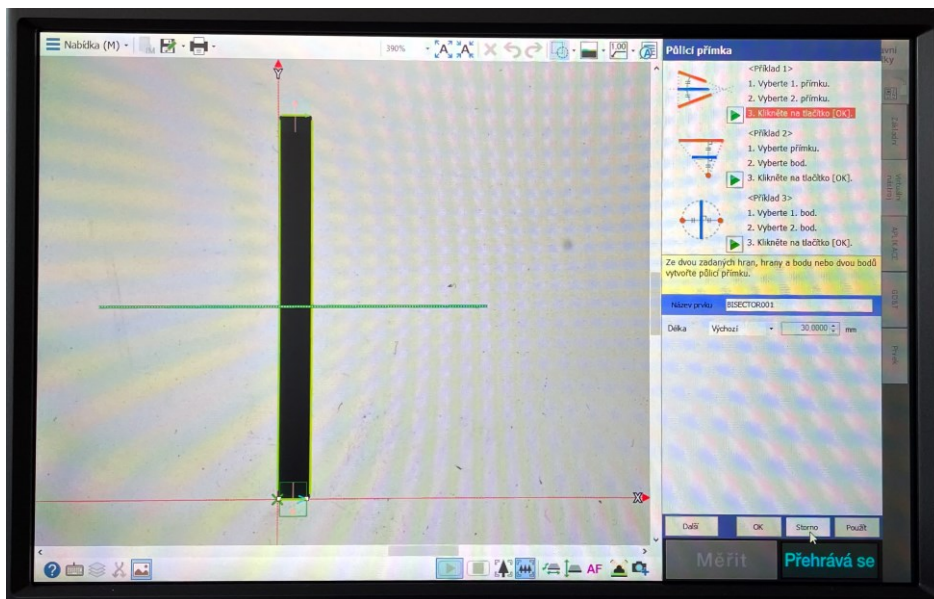
Obrázek 3.2-8 - Vytvoření přímek

- 4) V dalším kroku je vytvořen souřadný systém (základní souřadnice X a Y). Tyto souřadnice přidávají možnost provedení úprav a přesunutí objektu v malých krocích (Obrázek 3.2-9).



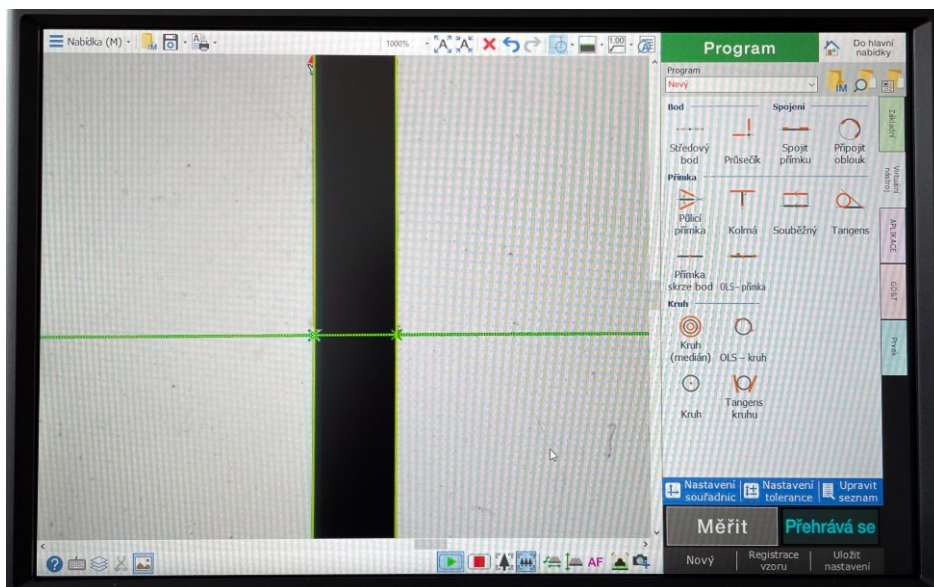
Obrázek 3.2-9 - Vytvoření základních souřadnic X a Y

- 5) Pátým krokem je využití elementu půlící přímka. Tento element je použit pro vytvoření půlící přímky mezi dvěma rovnoběžnými či různoběžnými přímkami (Obrázek 3.2-10).



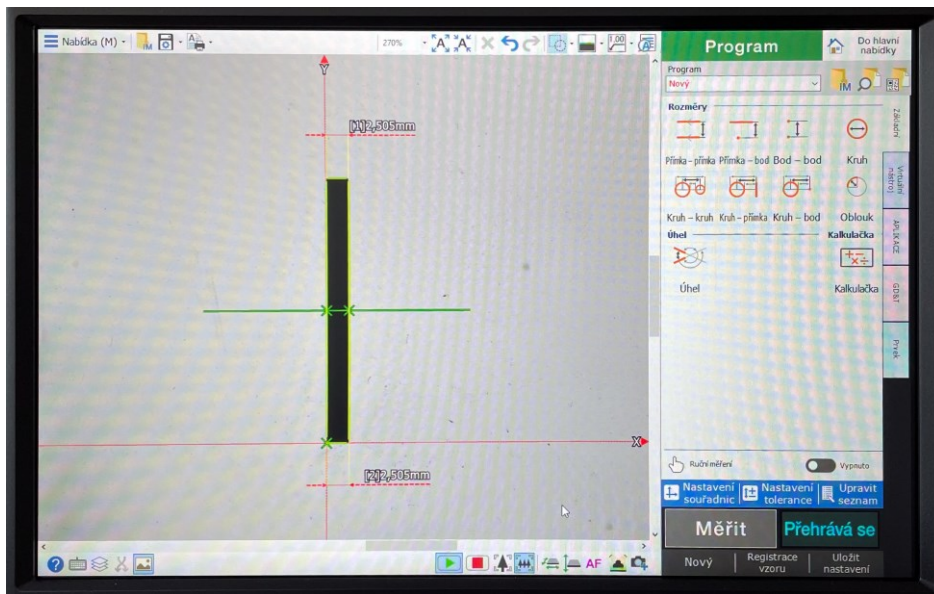
Obrázek 3.2-10 - Vytvoření půlící přímky

- 6) Po vytvoření půlící přímky je použit element průsečíků. V místech průtnutí půlící přímky s dvěma kolmými přímkami jsou vytvořeny dva body (Obrázek 3.2-11).



Obrázek 3.2-11 - Vytvoření průsečíku přímek

- 7) Nyní je připraveno vše pro vytvoření kót, které určují měření. Každá soustava měrek je měřena dvakrát – mezi vytvořenými body a vytvořenými přímkami (Obrázek 3.2-12).



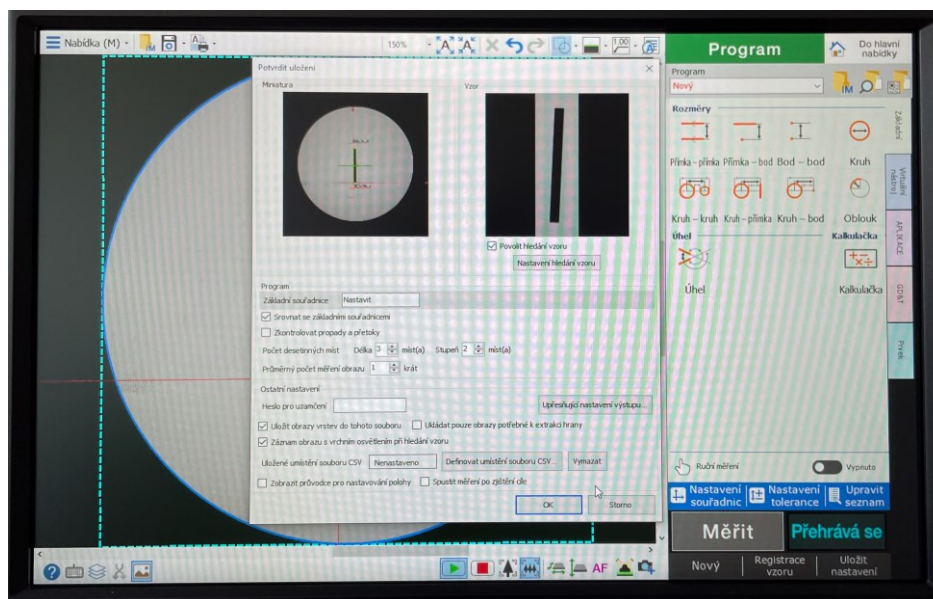
Obrázek 3.2-12 - Vytvoření potřebných kót

- 8) Následuje stisknutí tlačítka “Měřit“ (Obrázek 3.2-13). Stisknutím tohoto tlačítka se ověří funkčnost vytvořeného programu.



Obrázek 3.2-13 - Stisknutí tlačítka pro měření

- 9) Posledním krokem je již pouze samostatné uložení vytvořeného programu (Obrázek 3.2-14).



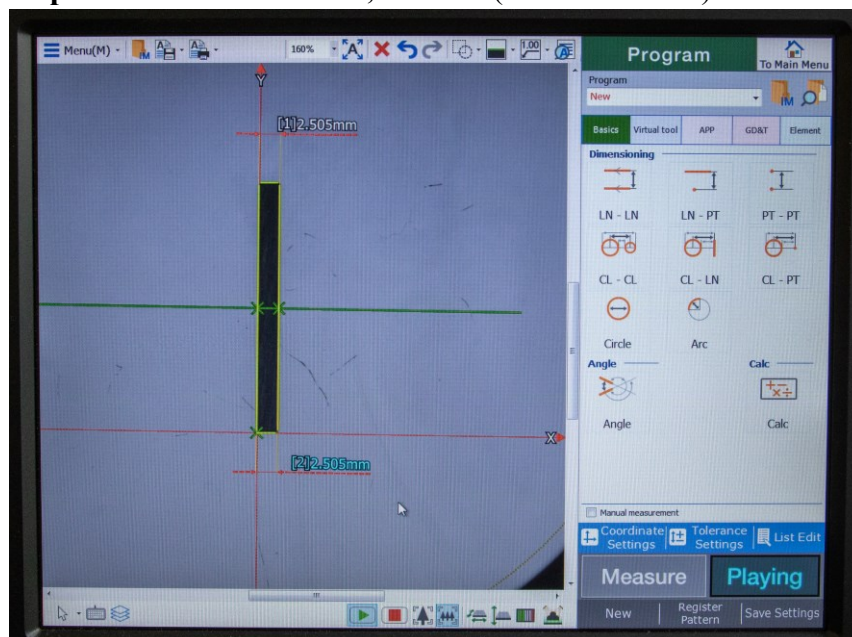
Obrázek 3.2-14 - Uložení programu

Takto byl vytvořen program pro každou soustavu měrek. Díky registraci vzoru se pro měření různých směrů program nemění, stačí vytvoření pouze jednoho.

Vytvoření programu pro nastavný kroužek probíhalo velmi podobně. Rozdílem bylo použití elementu kruh místo elementu přímka. Dále byly vynechány kroky č. 5 a č. 6 a krok č. 7 využíval na místo měření vzdálenosti dvou přímek a dvou bodů velikost průměru.

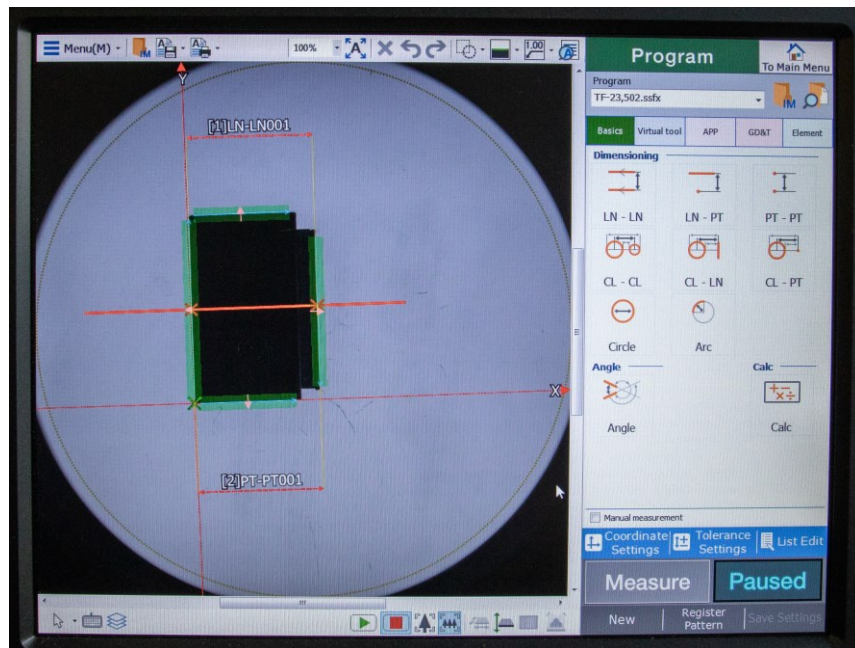
Na následujících několika obrázcích lze pozorovat programy vytvořené přímo pro konkrétní měřené objekty.

- a) Program pro měrku o velikosti 2,500 mm (Obrázek 3.2-15)



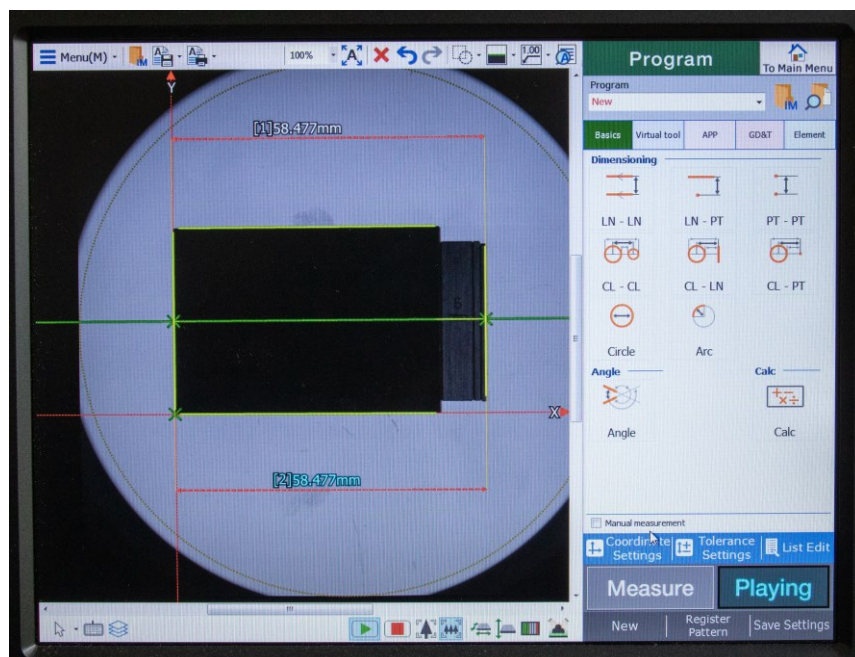
Obrázek 3.2-15 - Program pro měrku o velikosti 2,500 mm

b) Program pro soustavu měrek o velikosti 23,502 mm (Obrázek 3.2-16)



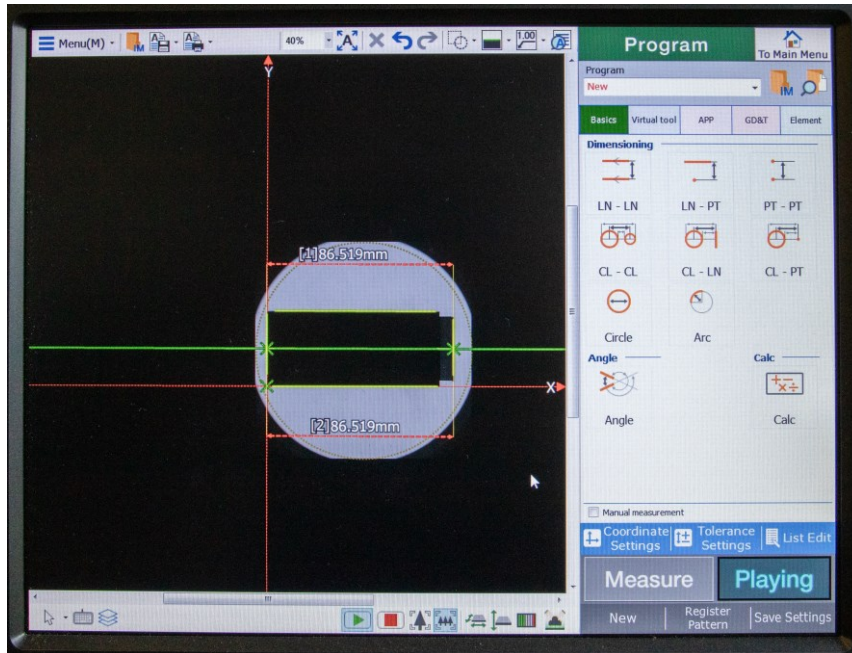
Obrázek 3.2-16 - Program pro soustavu měrek o velikosti 23,502 mm

c) Program pro soustavu měrek o velikosti 58,466mm (Obrázek 3.2-17)



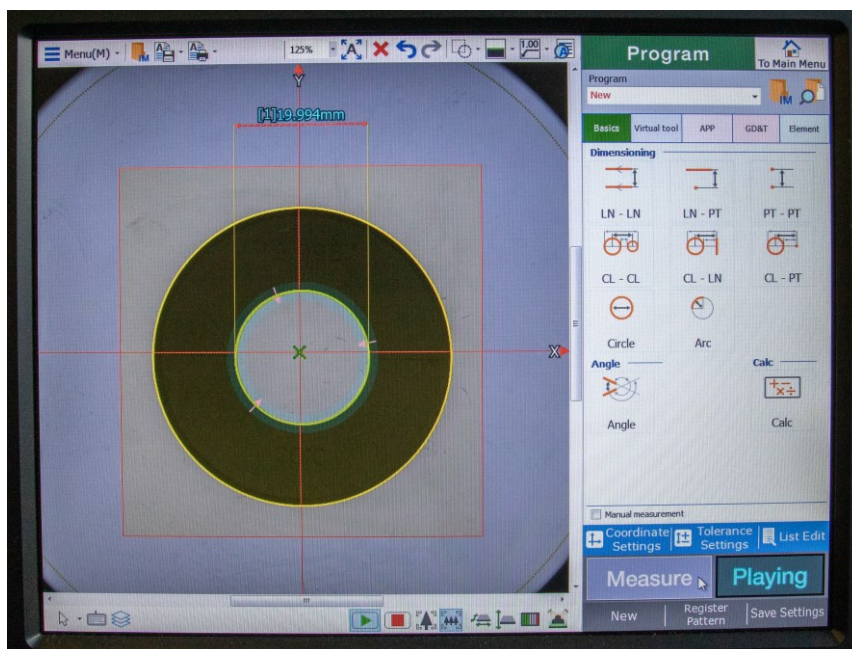
Obrázek 3.2-17 - Program pro soustavu měrek o velikosti 58,466mm

d) Program pro soustavu měrek o velikosti 86,509 mm (Obrázek 3.2-18)



Obrázek 3.2-18 - Program pro soustavu měrek o velikosti 86,509 mm

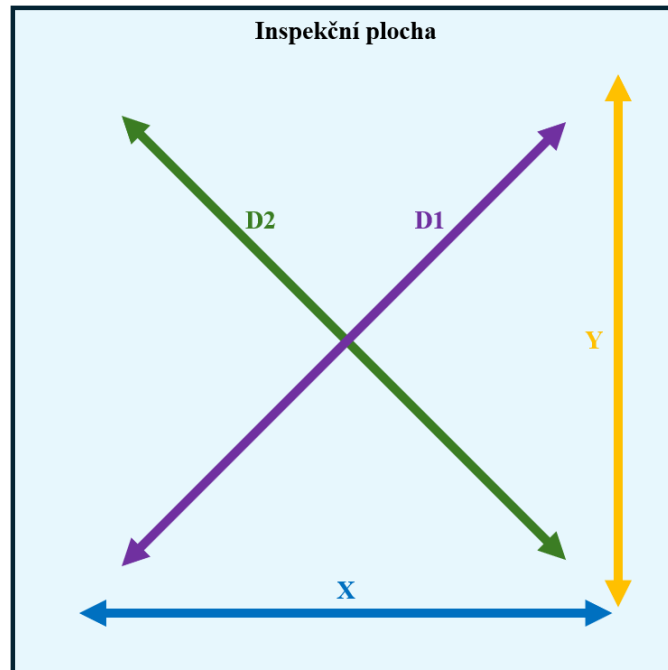
e) Program pro nastavný kroužek o průměru 19,9987 mm (Obrázek 3.2-19)



Obrázek 3.2-19 - Program pro kalibrační kroužek o velikosti 19,9987 mm

3.2.4 Průběh měření

Po vytvoření programu následovalo měření. To probíhalo u koncových měrek ve čtyřech směrech (Obrázek 3.2-20). Nejprve ve směru osy X, poté ve směru osy Y a dále ve dvou diagonálních směrech jedna a dvě.



Obrázek 3.2-20 - Směry měření u koncových měrek

V každém z těchto směrů bylo měření prováděno 10krát. Kalibrační kroužek byl měřen také 10krát.

Samotný průběh měření byl následovný:

1. byl zvolený potřebný vytvořený program,
2. koncová měrka, soustava měrek, či kalibrační kroužek byly položeny na inspekční plochu,
3. následovalo stisknutí fyzického tlačítka “MEASURE“ (Měřit),
4. samotné měření probíhá cca 3 vteřiny (Obrázek 3.2-21), po uplynutí této doby a ověření výsledku na displeji byl měřený předmět přesunut a opět se stisklo tlačítko.

Takto probíhalo celé měření, dokud nebylo provedeno potřebné opakování. Následovala další měřená soustava. Celkem bylo naměřeno 330 hodnot. Veškeré *použité* naměřené hodnoty lze zhlédnout v kapitole 3.3, konkrétně v tabulce 3.3-1.



Obrázek 3.2-21 - Proces samostatného měření

Finální a zároveň tou hlavní částí experimentu je výpočet a vyjádření nejistot měření. Tímto problémem se zabývá následující kapitola 3.3.

3.3 Výpočet nejistot

Po realizaci experimentu přišel na řadu samotný výpočet nejistoty měření. Výpočet byl prováděn v tabulkovém procesoru Excel od firmy Microsoft. Nejprve jsou vypočítány nejistoty typu A z naměřených hodnot. Následuje určení a vyhodnocení nejistot typu B. Nakonec vypočítáním kombinované a rozšířené nejistoty je získán potřebný výsledek.

3.3.1 Výpočet nejistoty typu A u_A

Vyhodnocování nejistot typu A probíhá u koncových měrek pouze z měření mezi body (PT-PT). Následující tabulka 3.3-1 zobrazuje veškeré potřebné naměřené hodnoty pro tento typ nejistot.

Tabulka 3.3-1 - Naměřené hodnoty pro výpočet nejistot typu A

		Naměřené hodnoty [mm]										
Číslo měření:		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	
Soustavy měrek	2,500 [mm]	Ve směru X:	2,501	2,501	2,499	2,499	2,498	2,502	2,502	2,501	2,504	2,501
		Ve směru Y:	2,502	2,502	2,503	2,502	2,502	2,502	2,502	2,502	2,502	2,502
		V diagonálním směru 1:	2,501	2,501	2,501	2,501	2,502	2,502	2,502	2,501	2,502	2,502
		V diagonálním směru 2:	2,501	2,501	2,502	2,503	2,503	2,502	2,501	2,501	2,503	2,503
	23,502 [mm]	Ve směru X:	23,506	23,505	23,505	23,505	23,505	23,505	23,505	23,505	23,505	23,505
		Ve směru Y:	23,507	23,507	23,507	23,507	23,508	23,507	23,507	23,507	23,507	23,507
		V diagonálním směru 1:	23,507	23,507	23,507	23,507	23,507	23,507	23,507	23,507	23,507	23,507
		V diagonálním směru 2:	23,508	23,503	23,506	23,507	23,505	23,505	23,504	23,504	23,506	23,505
	58,466 [mm]	Ve směru X:	58,476	58,475	58,475	58,475	58,477	58,477	58,478	58,478	58,477	58,476
		Ve směru Y:	58,476	58,475	58,475	58,475	58,475	58,474	58,474	58,475	58,474	58,474
		V diagonálním směru 1:	58,475	58,475	58,474	58,474	58,474	58,474	58,474	58,475	58,474	58,474
		V diagonálním směru 2:	58,476	58,478	58,478	58,478	58,478	58,478	58,478	58,479	58,475	58,478
	86,509 [mm]	Ve směru X:	86,519	86,522	86,518	86,518	86,519	86,517	86,519	86,519	86,519	86,518
		Ve směru Y:	86,52	86,519	86,52	86,519	86,519	86,519	86,519	86,519	86,519	86,519
		V diagonálním směru 1:	86,518	86,518	86,518	86,518	86,518	86,518	86,518	86,519	86,519	86,518
		V diagonálním směru 2:	86,517	86,517	86,518	86,517	86,518	86,518	86,518	86,518	86,518	86,518
Kroužek Ø19,9987 [mm]	Průměr:	19,994	19,994	19,993	19,994	19,994	19,995	19,995	19,995	19,993	19,993	

Nejprve je nutné vypočítat aritmetický průměr z naměřených hodnot, a to za pomoci vztahu (1).

- Aritmetický průměr pro koncovou měrku o velikosti **2,500 [mm]**:

a) *Ve směru X*

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \frac{1}{10} \cdot (2,501 + 2,501 + 2,499 + \dots + 2,504 + 2,501)$$

$$\bar{X} = \mathbf{2,500800 \text{ mm}}$$

b) *Ve směru Y*

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \frac{1}{10} \cdot (2,502 + 2,502 + 2,503 + \dots + 2,502 + 2,502)$$

$$\bar{X} = \mathbf{2,502100 \text{ mm}}$$

c) *V diagonálním směru 1*

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \frac{1}{10} \cdot (2,501 + 2,501 + 2,501 + \dots + 2,502 + 2,502)$$

$$\bar{X} = \mathbf{2,501500 \text{ mm}}$$

d) *V diagonálním směru 2*

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \frac{1}{10} \cdot (2,501 + 2,501 + 2,502 + \dots + 2,503 + 2,503)$$
$$\bar{X} = \mathbf{2,502000 \text{ mm}}$$

e) *Sečtení všech směrů*

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \frac{1}{40} \cdot (2,501 + 2,501 + 2,499 + \dots + 2,503 + 2,503)$$
$$\bar{X} = \mathbf{2,501600 \text{ mm}}$$

- Aritmetický průměr pro soustavu měrek o velikosti **23,502 [mm]**:

a) *Ve směru X*

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \frac{1}{10} \cdot (23,506 + 23,505 + 23,505 + \dots + 23,505 + 23,505)$$
$$\bar{X} = \mathbf{23,505100 \text{ mm}}$$

b) *Ve směru Y*

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \frac{1}{10} \cdot (23,507 + 23,507 + 23,507 + \dots + 23,507 + 23,507)$$
$$\bar{X} = \mathbf{23,507100 \text{ mm}}$$

c) *V diagonálním směru 1*

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \frac{1}{10} \cdot (23,507 + 23,507 + 23,507 + \dots + 23,507 + 23,507)$$
$$\bar{X} = \mathbf{23,507000 \text{ mm}}$$

d) *V diagonálním směru 2*

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \frac{1}{10} \cdot (23,508 + 23,503 + 23,506 + \dots + 23,506 + 23,505)$$
$$\bar{X} = \mathbf{23,505300 \text{ mm}}$$

e) *Sečtení všech směrů*

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \frac{1}{40} \cdot (23,506 + 23,505 + 23,505 + \dots + 23,506 + 23,505)$$
$$\bar{X} = \mathbf{23,506125 \text{ mm}}$$

- Aritmetický průměr pro soustavu měrek o velikosti **58,466 [mm]**:

a) *Ve směru X*

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \frac{1}{10} \cdot (58,476 + 58,475 + 58,475 + \dots + 58,477 + 58,476)$$
$$\bar{X} = \mathbf{58,476400 \text{ mm}}$$

b) *Ve směru Y*

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \frac{1}{10} \cdot (58,476 + 58,475 + 58,475 + \dots + 58,474 + 58,474)$$
$$\bar{X} = \mathbf{58,474700 \text{ mm}}$$

c) *V diagonálním směru 1*

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \frac{1}{10} \cdot (58,475 + 58,475 + 58,474 + \dots + 58,474 + 58,474)$$
$$\bar{X} = \mathbf{58,474300 \text{ mm}}$$

d) *V diagonálním směru 2*

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \frac{1}{10} \cdot (58,476 + 58,478 + 58,478 + \dots + 58,475 + 58,478)$$
$$\bar{X} = \mathbf{58,477600 \text{ mm}}$$

e) *Sečtení všech směrů*

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \frac{1}{40} \cdot (58,476 + 58,475 + 58,475 + \dots + 58,475 + 58,478)$$
$$\bar{X} = \mathbf{58,475750 \text{ mm}}$$

- Aritmetický průměr pro soustavu měrek o velikosti **86,509 [mm]**:

a) *Ve směru X*

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \frac{1}{10} \cdot (86,519 + 86,522 + 86,518 + \dots + 86,519 + 86,518)$$
$$\bar{X} = \mathbf{86,518800 \text{ mm}}$$

b) *Ve směru Y*

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \frac{1}{10} \cdot (86,520 + 86,519 + 86,520 + \dots + 86,519 + 86,519)$$
$$\bar{X} = \mathbf{86,519200 \text{ mm}}$$

c) *V diagonálním směru 1*

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \frac{1}{10} \cdot (86,518 + 86,518 + 86,518 + \dots + 86,519 + 86,519)$$
$$\bar{X} = \mathbf{86,518300 \text{ mm}}$$

d) V diagonálním směru 2

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \frac{1}{10} \cdot (86,517 + 86,517 + 86,518 + \dots + 86,518 + 86,518)$$

$$\bar{X} = \mathbf{86,517700 \text{ mm}}$$

e) Sečtení všech směrů

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \frac{1}{40} \cdot (86,519 + 86,522 + 86,518 + \dots + 86,518 + 86,518)$$

$$\bar{X} = \mathbf{86,518500 \text{ mm}}$$

- Aritmetický průměr pro nastavný kroužek o průměru **19,9987 [mm]**:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \frac{1}{10} \cdot (19,994 + 19,994 + 19,993 + \dots + 19,993 + 19,993)$$

$$\bar{X} = \mathbf{19,994000 \text{ mm}}$$

Výsledky aritmetického průměru pro veškeré měřené soustavy a směry lze také pozorovat v následující tabulce 3.3-2.

Tabulka 3.3-2 - Vypočítané hodnoty aritmetického průměru

Vypočítané hodnoty aritmetického průměru [mm]			
Soustavy měrek	2,500 [mm]	Ve směru X:	2,500800
		Ve směru Y:	2,502100
		V diagonálním směru 1:	2,501500
		V diagonálním směru 2:	2,502000
		Sečtení všech směrů:	2,501600
	23,502 [mm]	Ve směru X:	23,505100
		Ve směru Y:	23,507100
		V diagonálním směru 1:	23,507000
		V diagonálním směru 2:	23,505300
		Sečtení všech směrů:	23,506125
	58,466 [mm]	Ve směru X:	58,476400
		Ve směru Y:	58,474700
		V diagonálním směru 1:	58,474300
		V diagonálním směru 2:	58,477600
		Sečtení všech směrů:	58,475750
	86,509 [mm]	Ve směru X:	86,518800
		Ve směru Y:	86,519200
		V diagonálním směru 1:	86,518300
		V diagonálním směru 2:	86,517700
		Sečtení všech směrů:	86,518500
Kroužek Ø19,9987 [mm]		Průměr:	19,994000

Dále lze již vypočítat standardní nejistoty typu A dle vztahu (6).

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

- Standardní nejistoty typu A pro koncovou měрку o velikosti **2,500 [mm]**:

a) *Ve směru X*

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{10 \cdot (10-1)} \cdot ((2,501 - 2,500800)^2 + \dots + (2,501 - 2,500800)^2)}$$

$u_A = 0,000553775 \text{ mm}$

b) *Ve směru Y*

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{10 \cdot (10-1)} \cdot ((2,502 - 2,502100)^2 + \dots + (2,502 - 2,502100)^2)}$$

$u_A = 0,000100000 \text{ mm}$

c) *V diagonálním směru 1*

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{10 \cdot (10-1)} \cdot ((2,501 - 2,501500)^2 + \dots + (2,502 - 2,501500)^2)}$$

$u_A = 0,000166667 \text{ mm}$

d) *V diagonálním směru 2*

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{10 \cdot (10-1)} \cdot ((2,501 - 2,502000)^2 + \dots + (2,503 - 2,502000)^2)}$$

$u_A = 0,000298142 \text{ mm}$

e) *Sečtení všech směrů*

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{40 \cdot (40-1)} \cdot ((2,501 - 2,501600)^2 + \dots + (2,503 - 2,501600)^2)}$$

$u_A = 0,000178311 \text{ mm}$

- Standardní nejistoty typu A pro koncovou měрку o velikosti **23,502 [mm]**:

a) *Ve směru X*

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{10 \cdot (10-1)} \cdot ((23,506 - 23,505100)^2 + \dots + (23,505 - 23,505100)^2)}$$

$u_A = 0,000100000 \text{ mm}$

b) *Ve směru Y*

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{10 \cdot (10 - 1)} \cdot ((23,507 - 23,507100)^2 + \dots + (23,507 - 23,507100)^2)}$$
$$u_A = \mathbf{0,000100000 \text{ mm}}$$

c) *V diagonálním směru 1*

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{10 \cdot (10 - 1)} \cdot ((23,507 - 23,507000)^2 + \dots + (23,507 - 23,507000)^2)}$$
$$u_A = \mathbf{0 \text{ mm}}$$

d) *V diagonálním směru 2*

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{10 \cdot (10 - 1)} \cdot ((23,508 - 23,505300)^2 + \dots + (23,505 - 23,505300)^2)}$$
$$u_A = \mathbf{0,000472582 \text{ mm}}$$

e) *Sečtení všech směřů*

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{40 \cdot (40 - 1)} \cdot ((23,506 - 23,506125)^2 + \dots + (23,505 - 23,506125)^2)}$$
$$u_A = \mathbf{0,000190100 \text{ mm}}$$

- Standartní nejistoty typu A pro koncovou měřku o velikosti **58,466 [mm]**:

a) *Ve směru X*

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{10 \cdot (10 - 1)} \cdot ((58,476 - 58,476400)^2 + \dots + (58,476 - 58,476400)^2)}$$
$$u_A = \mathbf{0,0,000371184 \text{ mm}}$$

b) *Ve směru Y*

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{10 \cdot (10 - 1)} \cdot ((58,476 - 58,474700)^2 + \dots + (58,474 - 58,474700)^2)}$$
$$u_A = \mathbf{0,000213437 \text{ mm}}$$

c) *V diagonálním směru 1*

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{10 \cdot (10 - 1)} \cdot ((58,475 - 58,474300)^2 + \dots + (58,474 - 58,474300)^2)}$$
$$u_A = \mathbf{0,000152753 \text{ mm}}$$

d) *V diagonálním směru 2*

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{10 \cdot (10 - 1)} \cdot ((58,476 - 58,477600)^2 + \dots + (58,478 - 58,477600)^2)}$$
$$u_A = \mathbf{0,000371184 \text{ mm}}$$

e) Sečtení všech směrů

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{40 \cdot (40 - 1)} \cdot ((58,476 - 58,475750)^2 + \dots + (58,478 - 58,475750)^2)}$$

$$u_A = \mathbf{0,000255077 \text{ mm}}$$

- Standartní nejistoty typu A pro koncovou měрку o velikosti **86,509 [mm]**:

a) Ve směru X

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{10 \cdot (10 - 1)} \cdot ((86,519 - 86,518800)^2 + \dots + (86,518 - 86,518800)^2)}$$

$$u_A = \mathbf{0,000416333 \text{ mm}}$$

b) Ve směru Y

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{10 \cdot (10 - 1)} \cdot ((86,520 - 86,519200)^2 + \dots + (86,519 - 86,519200)^2)}$$

$$u_A = \mathbf{0,000133333 \text{ mm}}$$

c) V diagonálním směru 1

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{10 \cdot (10 - 1)} \cdot ((86,518 - 86,518300)^2 + \dots + (86,519 - 86,518300)^2)}$$

$$u_A = \mathbf{0,000152753 \text{ mm}}$$

d) V diagonálním směru 2

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{10 \cdot (10 - 1)} \cdot ((86,517 - 86,517700)^2 + \dots + (86,518 - 86,517700)^2)}$$

$$u_A = \mathbf{0,000152753 \text{ mm}}$$

e) Sečtení všech směrů

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{40 \cdot (40 - 1)} \cdot ((86,519 - 86,518500)^2 + \dots + (86,518 - 86,518500)^2)}$$

$$u_A = \mathbf{0,000147631 \text{ mm}}$$

- Standartní nejistoty typu A pro nastavný kroužek o průměru **19,9987 [mm]**:

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{10 \cdot (10 - 1)} \cdot ((58,476 - 58,475750)^2 + \dots + (58,478 - 58,475750)^2)}$$

$$u_A = \mathbf{0,000258199 \text{ mm}}$$

Vzhledem k počtu měření – deset, je koeficient bezpečnosti k_{u_A} jedna (Tabulka 2.2-1 v kapitole 2.2.2.1), a tudíž není nutné s ním počítat. Veškeré výsledky lze opět pozorovat v následující tabulce 3.3-3.

Tabulka 3.3-3 - Vypočítané hodnoty nejistot měření typu A

Vypočítané hodnoty nejistot měření typu A [mm]			
Soustavy měrek	2,500 [mm]	Ve směru X:	0,000553775
		Ve směru Y:	0,000100000
		V diagonálním směru 1:	0,000166667
		V diagonálním směru 2:	0,000298142
		Sečtení všech směrů:	0,000178311
	23,502 [mm]	Ve směru X:	0,000100000
		Ve směru Y:	0,000100000
		V diagonálním směru 1:	0,000000000
		V diagonálním směru 2:	0,000472582
		Sečtení všech směrů:	0,000190100
	58,466 [mm]	Ve směru X:	0,000371184
		Ve směru Y:	0,000213437
		V diagonálním směru 1:	0,000152753
		V diagonálním směru 2:	0,000371184
		Sečtení všech směrů:	0,000255077
	86,509 [mm]	Ve směru X:	0,000416333
		Ve směru Y:	0,000133333
		V diagonálním směru 1:	0,000152753
		V diagonálním směru 2:	0,000152753
		Sečtení všech směrů:	0,000147631
Kroužek Ø19,9987 [mm]		Průměr:	0,000258199

Nyní jsou veškeré potřebné hodnoty pro nejistoty typu A spočteny. Následuje výpočet nejistot typu B.

3.3.2 Výpočet nejistoty typu B u_B

Pro určení nejistoty typu B je nutné stanovit zdroje nejistot tohoto typu. Prvním z těchto zdrojů je nedokonalost přístroje Keyence. Výrobce udává přesnost přístroje v širokoúhlém režimu bez spojování jednotlivých zachycených obrazů ± 5 [μm]. Pro výpočet nejistoty lze tuto hodnotu společně s koeficientem rozšíření zdroje nejistoty k dosadit do vztahu (9). Předpokládá se, že požadovaná spolehlivost intervalu je přibližně 95 %. Z tohoto důvodu je koeficient stanoven na hodnotu 2.

$$u_{Bnp} = \frac{U}{k} = \frac{5}{2}$$

$$u_{Bnp} = 2,5 \mu\text{m} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

Neboť tato nejistota nezávisí na velikosti měřeného objektu, je pro všechny koncové měrky a kalibrační kroužek stejná.

Dalším zdrojem je nepřesnost koncových měrek a nastavného kroužku. Měrky použité při experimentu mají stupeň přesnosti "2". Dovolené úchytky jmenovitých délek jednotlivých měrek udává norma ČSN EN ISO 3650:1998, která pojednává o geometrických požadavcích na výrobky, konkrétně pak pro koncové měrky. Jednotlivé úchytky zobrazuje následující tabulka 3.3-4, která bere hodnoty právě z této normy.

Tabulka 3.3-4 – Dovolené úchytky délky pro jednotlivé velikosti měrek [27]

Jmenovitá délka l_n [mm]	Dovolená úchytky v libovolném bodě $\pm t_c$ [μm]
$0,5 < l_n \leq 10$	0,45
$10 < l_n \leq 25$	0,6
$25 < l_n \leq 50$	0,8
$75 < l_n \leq 100$	1,2

Pro výpočet je použit vztah (10). Předpokládá se, že každá hodnota z rozpětí úchytky má stejnou pravděpodobnost výskytu. Je tedy použito rovnoměrné rozdělení - $\chi = \sqrt{3}$.

- Nejistota pro měrku o velikosti **2,500 [mm]**:

$$u_{Bkm} = \frac{Z_{MAX}}{\chi} = \frac{0,45}{\sqrt{3}} = \mathbf{0,2598 \mu m = 0,2598 \cdot 10^{-3} mm}$$

- Nejistota pro soustavu měrek o velikosti **23,502 [mm]**:

$$u_{Bkm} = \frac{Z_{MAX}}{\chi} = \frac{0,6 + 2 \cdot 0,45}{\sqrt{3}} = \mathbf{0,8660 \mu m = 0,8660 \cdot 10^{-3} mm}$$

- Nejistota pro soustavu měrek o velikosti **58,466 [mm]**:

$$u_{Bkm} = \frac{Z_{MAX}}{\chi} = \frac{0,8 + 3 \cdot 0,45}{\sqrt{3}} = \mathbf{1,2413 \mu m = 1,2413 \cdot 10^{-3} mm}$$

- Nejistota pro soustavu měrek o velikosti **86,509 [mm]**:

$$u_{Bkm} = \frac{Z_{MAX}}{\chi} = \frac{1,2 + 2 \cdot 0,45}{\sqrt{3}} = \mathbf{1,2124 \mu m = 1,2124 \cdot 10^{-3} mm}$$

Pro nastavný kroužek je dle DIN 2250 C v mezích vnitřního průměru od 18 [mm] do 30 [mm] maximální úchytky ± 3 [μm].

- Nejistota pro nastavný kroužek o velikosti **19,9987 [mm]**:

$$u_{Bkm} = \frac{Z_{MAX}}{\chi} = \frac{3}{\sqrt{3}} = \mathbf{1,7321 \mu m = 1,7321 \cdot 10^{-3} mm}$$

Posledním zdrojem je změna teploty prostředí. Neboť není prakticky nikdy možné zajistit absolutní stálost teploty, počítá se s rozptylem kolem teploty v laboratoři 20 ± 1 °C. Pro výpočet nejistoty je použit vztah (10). Do něj je nutné dosadit velikost koeficientu rozložení teploty a velikost teplotní délkové roztažnosti. Opět se předpokládá, že každá teplota ze zmíněného rozsahu má stejnou pravděpodobnost výskytu. Je tedy použito rovnoměrné rozdělení - $\chi = \sqrt{3}$ (Tabulka 2.2-2 v kapitole 2.2.3.2). Hodnota součinitele délkové teplotní roztažnosti α pro oceli je přibližně $12 \cdot 10^{-6}$ [K^{-1}].

- Nejistota pro koncovou měрку o velikosti **2,500 [mm]**:

$$u_{Bzt} = \frac{Z_{MAX}}{\chi} = \frac{1 \cdot \alpha \cdot L}{\sqrt{3}} = \frac{1 \cdot 12 \cdot 10^{-6} \cdot 2,5}{\sqrt{3}} = 0,1732 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$$

- Nejistota pro soustavu měrek o velikosti **23,502 [mm]**:

$$u_{Bzt} = \frac{Z_{MAX}}{\chi} = \frac{1 \cdot \alpha \cdot L}{\sqrt{3}} = \frac{1 \cdot 12 \cdot 10^{-6} \cdot 23,502}{\sqrt{3}} = 1,6283 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$$

- Nejistota pro soustavu měrek o velikosti **58,466 [mm]**:

$$u_{Bzt} = \frac{Z_{MAX}}{\chi} = \frac{1 \cdot \alpha \cdot L}{\sqrt{3}} = \frac{1 \cdot 12 \cdot 10^{-6} \cdot 58,466}{\sqrt{3}} = 4,0506 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$$

- Nejistota pro soustavu měrek o velikosti **86,509 [mm]**:

$$u_{Bzt} = \frac{Z_{MAX}}{\chi} = \frac{1 \cdot \alpha \cdot L}{\sqrt{3}} = \frac{1 \cdot 12 \cdot 10^{-6} \cdot 86,509}{\sqrt{3}} = 5,9935 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$$

- Nejistota pro nastavný kroužek o průměru **19,9987 [mm]**:

$$u_{Bzt} = \frac{Z_{MAX}}{\chi} = \frac{1 \cdot \alpha \cdot L}{\sqrt{3}} = \frac{1 \cdot 12 \cdot 10^{-6} \cdot 19,9987}{\sqrt{3}} = 1,3856 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$$

Vypočítané nejistoty typu B od různých zdrojů lze pozorovat v tabulce 3.3-5.

Tabulka 3.3-5 - Vypočítané hodnoty nejistot měření typu B od různých zdrojů

Vypočítané hodnoty pro různé zdroje nejistot typu B					
Zdroje	Soustavy měrek				Kroužek Ø19,9987 [mm]
	2,5 [mm]	23,502 [mm]	58,466 [mm]	86,509 [mm]	
u_{Bnp} [mm]	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$
u_{Bkm} [mm]	$0,2598 \cdot 10^{-3}$	$0,8660 \cdot 10^{-3}$	$1,2413 \cdot 10^{-3}$	$1,2124 \cdot 10^{-3}$	$1,7321 \cdot 10^{-3}$
u_{Bzt} [mm]	$0,1732 \cdot 10^{-4}$	$1,6283 \cdot 10^{-4}$	$4,0506 \cdot 10^{-4}$	$5,9935 \cdot 10^{-4}$	$1,3856 \cdot 10^{-4}$

Nyní lze spočítat celkovou nejistotu typu B. Ta se počítá dle vztahu (11) jako geometrický součet všech nejistot od jednotlivých zdrojů.

- Celková nejistota typu B pro koncovou měрку o velikosti **2,500 [mm]**:

$$u_B = \sqrt{u_{Bnp}^2 + u_{Bkm}^2 + u_{Bzt}^2} = \sqrt{(2,5 \cdot 10^{-3})^2 + (0,2598 \cdot 10^{-3})^2 + (0,1732 \cdot 10^{-4})^2}$$

$$u_B = 2,514 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

- Celková nejistota typu B pro soustavu měrek o velikosti **23,502 [mm]**:

$$u_B = \sqrt{u_{Bnp}^2 + u_{Bkm}^2 + u_{Bzt}^2} = \sqrt{(2,5 \cdot 10^{-3})^2 + (0,8660 \cdot 10^{-3})^2 + (1,6283 \cdot 10^{-4})^2}$$

$$u_B = 2,651 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

- Celková nejistota typu B pro soustavu měrek o velikosti **58,466 [mm]**:

$$u_B = \sqrt{u_{Bnp}^2 + u_{Bkm}^2 + u_{Bzt}^2} = \sqrt{(2,5 \cdot 10^{-3})^2 + (1,2413 \cdot 10^{-3})^2 + (4,0506 \cdot 10^{-4})^2}$$

$$u_B = 2,820 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

- Celková nejistota typu B pro soustavu měrek o velikosti **86,509 [mm]**:

$$u_B = \sqrt{u_{Bnp}^2 + u_{Bkm}^2 + u_{Bzt}^2} = \sqrt{(2,5 \cdot 10^{-3})^2 + (1,2124 \cdot 10^{-3})^2 + (5,9935 \cdot 10^{-4})^2}$$

$$u_B = 2,842 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

- Celková nejistota typu B pro nastavný kroužek o velikosti **19,9987 [mm]**:

$$u_B = \sqrt{u_{Bnp}^2 + u_{Bkm}^2 + u_{Bzt}^2} = \sqrt{(2,5 \cdot 10^{-3})^2 + (1,7321 \cdot 10^{-3})^2 + (1,3856 \cdot 10^{-4})^2}$$

$$u_B = 3,045 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

Veškeré vypočtené celkové nejistoty typu B lze pozorovat v následující tabulce 3.3-6.

Tabulka 3.3-6 – Vypočítané hodnoty celkových nejistot typu B

Vypočítané hodnoty celkových nejistot měření typu B [mm]		
Soustavy měrek	2,500 [mm]	$2,514 \cdot 10^{-3}$
	23,502 [mm]	$2,651 \cdot 10^{-3}$
	58,466 [mm]	$2,820 \cdot 10^{-3}$
	86,509 [mm]	$2,842 \cdot 10^{-3}$
Kroužek Ø19,9987 [mm]		$3,045 \cdot 10^{-3}$

3.3.3 Výpočet standartní kombinované nejistoty u_C

Nyní lze vypočítat kombinovanou nejistotu. Ta se vypočítá dle vztahu (12).

- Kombinovaná standartní nejistota pro koncovou měрку o velikosti **2,500 [mm]**:

a) *Ve směru X*

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{(0,000553775)^2 + (2,514 \cdot 10^{-3})^2} = 2,574 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

b) *Ve směru Y*

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{(0,000100000)^2 + (2,514 \cdot 10^{-3})^2} = 2,516 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

c) *V diagonálním směru 1*

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{(0,000166667)^2 + (2,514 \cdot 10^{-3})^2} = 2,519 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

d) *V diagonálním směru 2*

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{(0,000298142)^2 + (2,514 \cdot 10^{-3})^2} = 2,531 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

e) *Sečtení všech směrů*

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{(0,000178311)^2 + (2,514 \cdot 10^{-3})^2} = 2,520 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

- Kombinovaná standartní nejistota pro soustavu měrek o velikosti **23,502 [mm]**:

a) *Ve směru X*

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{(0,000100000)^2 + (2,651 \cdot 10^{-3})^2} = 2,653 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

b) *Ve směru Y*

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{(0,000100000)^2 + (2,651 \cdot 10^{-3})^2} = 2,653 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

c) *V diagonálním směru 1*

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{(0)^2 + (2,651 \cdot 10^{-3})^2} = 2,651 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

d) *V diagonálním směru 2*

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{(0,000472582)^2 + (2,651 \cdot 10^{-3})^2} = 2,693 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

e) *Sečtení všech směrů*

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{(0,000190100)^2 + (2,651 \cdot 10^{-3})^2} = 2,658 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

- Kombinovaná standartní nejistota pro soustavu měrek o velikosti **58,466 [mm]**:

a) *Ve směru X*

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{(0,000371184)^2 + (2,820 \cdot 10^{-3})^2} = 2,845 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

b) *Ve směru Y*

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{(0,000213437)^2 + (2,820 \cdot 10^{-3})^2} = 2,829 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

c) *V diagonálním směru 1*

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{(0,000152753)^2 + (2,820 \cdot 10^{-3})^2} = 2,825 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

d) *V diagonálním směru 2*

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{(0,000371184)^2 + (2,820 \cdot 10^{-3})^2} = 2,845 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

e) *Sečtení všech směrů*

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{(0,000255077)^2 + (2,820 \cdot 10^{-3})^2} = 2,832 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

- Kombinovaná standardní nejistota pro soustavu měrek o velikosti **86,509 [mm]**:

a) *Ve směru X*

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{(0,000416333)^2 + (2,842 \cdot 10^{-3})^2} = 2,873 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

b) *Ve směru Y*

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{(0,000133333)^2 + (2,842 \cdot 10^{-3})^2} = 2,846 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

c) *V diagonálním směru 1*

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{(0,000152753)^2 + (2,842 \cdot 10^{-3})^2} = 2,847 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

d) *V diagonálním směru 2*

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{(0,000152753)^2 + (2,842 \cdot 10^{-3})^2} = 2,846 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

e) *Sečtení všech směrů*

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{(0,000147631)^2 + (2,842 \cdot 10^{-3})^2} = 2,846 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

- Kombinovaná standardní nejistota pro nastavný kroužek o průměru **19,9987 [mm]**:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{(0,000258199)^2 + (3,045 \cdot 10^{-3})^2} = 3,055 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

Vypočítané hodnoty lze pozorovat v následující tabulce 3.3-7.

Tabulka 3.3-7 - Vypočítané hodnoty standardní kombinované nejistoty

Vypočítané hodnoty standardní kombinované nejistoty [mm]			
Soustavy měrek	2,500 [mm]	Ve směru X:	$2,574 \cdot 10^{-3}$
		Ve směru Y:	$2,516 \cdot 10^{-3}$
		V diagonálním směru 1:	$2,519 \cdot 10^{-3}$
		V diagonálním směru 2:	$2,531 \cdot 10^{-3}$
		Sečtení všech směrů:	$2,520 \cdot 10^{-3}$
	23,502 [mm]	Ve směru X:	$2,653 \cdot 10^{-3}$
		Ve směru Y:	$2,653 \cdot 10^{-3}$
		V diagonálním směru 1:	$2,651 \cdot 10^{-3}$
		V diagonálním směru 2:	$2,693 \cdot 10^{-3}$
		Sečtení všech směrů:	$2,658 \cdot 10^{-3}$
	58,466 [mm]	Ve směru X:	$2,845 \cdot 10^{-3}$
		Ve směru Y:	$2,829 \cdot 10^{-3}$
		V diagonálním směru 1:	$2,825 \cdot 10^{-3}$
		V diagonálním směru 2:	$2,845 \cdot 10^{-3}$
		Sečtení všech směrů:	$2,832 \cdot 10^{-3}$
	86,509 [mm]	Ve směru X:	$2,873 \cdot 10^{-3}$
		Ve směru Y:	$2,846 \cdot 10^{-3}$
		V diagonálním směru 1:	$2,847 \cdot 10^{-3}$
		V diagonálním směru 2:	$2,846 \cdot 10^{-3}$
		Sečtení všech směrů:	$2,846 \cdot 10^{-3}$
Kroužek Ø19,9987 [mm]	Průměr:	$3,055 \cdot 10^{-3}$	

3.3.4 Výpočet standartní rozšířené nejistoty U

Finálním výpočtem je výpočet standartní rozšířené nejistoty dle vztahu (13). Koeficient rozšíření k_U má hodnotu 2. To znamená, že skutečná hodnota bude ležet ve vypočítaném rozmezí s pravděpodobností 95,45 [%].

- Standartní rozšířená nejistota pro koncovou měрку o velikosti **2,500 [mm]**:
 - a) *Ve směru X*
$$U = k_U \cdot u_C = 2 \cdot 2,574 \cdot 10^{-3} = \mathbf{5,148 \cdot 10^{-3} [mm]} \approx \mathbf{0,005 mm}$$
 - b) *Ve směru Y*
$$U = k_U \cdot u_C = 2 \cdot 2,516 \cdot 10^{-3} = \mathbf{5,032 \cdot 10^{-3} [mm]} \approx \mathbf{0,005 mm}$$
 - c) *V diagonálním směru 1*
$$U = k_U \cdot u_C = 2 \cdot 2,519 \cdot 10^{-3} = \mathbf{5,038 \cdot 10^{-3} [mm]} \approx \mathbf{0,005 mm}$$
 - d) *V diagonálním směru 2*
$$U = k_U \cdot u_C = 2 \cdot 2,531 \cdot 10^{-3} = \mathbf{5,062 \cdot 10^{-3} [mm]} \approx \mathbf{0,005 mm}$$
 - e) *Sečtení všech směrů*
$$U = k_U \cdot u_C = 2 \cdot 2,520 \cdot 10^{-3} = \mathbf{5,040 \cdot 10^{-3} [mm]} \approx \mathbf{0,005 mm}$$
- Standartní rozšířená nejistota pro soustavu měrek o velikosti **23,502 [mm]**:
 - a) *Ve směru X*
$$U = k_U \cdot u_C = 2 \cdot 2,653 \cdot 10^{-3} = \mathbf{5,306 \cdot 10^{-3} [mm]} \approx \mathbf{0,005 mm}$$
 - b) *Ve směru Y*
$$U = k_U \cdot u_C = 2 \cdot 2,653 \cdot 10^{-3} = \mathbf{5,306 \cdot 10^{-3} [mm]} \approx \mathbf{0,005 mm}$$
 - c) *V diagonálním směru 1*
$$U = k_U \cdot u_C = 2 \cdot 2,651 \cdot 10^{-3} = \mathbf{5,302 \cdot 10^{-3} [mm]} \approx \mathbf{0,005 mm}$$
 - d) *V diagonálním směru 2*
$$U = k_U \cdot u_C = 2 \cdot 2,693 \cdot 10^{-3} = \mathbf{5,386 \cdot 10^{-3} [mm]} \approx \mathbf{0,005 mm}$$
 - e) *Sečtení všech směrů*
$$U = k_U \cdot u_C = 2 \cdot 2,658 \cdot 10^{-3} = \mathbf{5,316 \cdot 10^{-3} [mm]} \approx \mathbf{0,005 mm}$$
- Standartní rozšířená nejistota pro soustavu měrek o velikosti **58,466 [mm]**:
 - a) *Ve směru X*
$$U = k_U \cdot u_C = 2 \cdot 2,845 \cdot 10^{-3} = \mathbf{5,690 \cdot 10^{-3} [mm]} \approx \mathbf{0,006 mm}$$
 - b) *Ve směru Y*
$$U = k_U \cdot u_C = 2 \cdot 2,829 \cdot 10^{-3} = \mathbf{5,658 \cdot 10^{-3} [mm]} \approx \mathbf{0,006 mm}$$
 - c) *V diagonálním směru 1*
$$U = k_U \cdot u_C = 2 \cdot 2,825 \cdot 10^{-3} = \mathbf{5,650 \cdot 10^{-3} [mm]} \approx \mathbf{0,006 mm}$$
 - d) *V diagonálním směru 2*
$$U = k_U \cdot u_C = 2 \cdot 2,845 \cdot 10^{-3} = \mathbf{5,690 \cdot 10^{-3} [mm]} \approx \mathbf{0,006 mm}$$

e) Sečtení všech směrů

$$U = k_U \cdot u_C = 2 \cdot 2,832 \cdot 10^{-3} = 5,664 \cdot 10^{-3} \text{ [mm]} \approx 0,006 \text{ mm}$$

- Standartní rozšířená nejistota pro soustavu měrek o velikosti **86,509 [mm]**:

a) Ve směru X

$$U = k_U \cdot u_C = 2 \cdot 2,873 \cdot 10^{-3} = 5,746 \cdot 10^{-3} \text{ [mm]} \approx 0,006 \text{ mm}$$

b) Ve směru Y

$$U = k_U \cdot u_C = 2 \cdot 2,846 \cdot 10^{-3} = 5,692 \cdot 10^{-3} \text{ [mm]} \approx 0,006 \text{ mm}$$

c) V diagonálním směru 1

$$U = k_U \cdot u_C = 2 \cdot 2,847 \cdot 10^{-3} = 5,694 \cdot 10^{-3} \text{ [mm]} \approx 0,006 \text{ mm}$$

d) V diagonálním směru 2

$$U = k_U \cdot u_C = 2 \cdot 2,846 \cdot 10^{-3} = 5,692 \cdot 10^{-3} \text{ [mm]} \approx 0,006 \text{ mm}$$

e) Sečtení všech směrů

$$U = k_U \cdot u_C = 2 \cdot 2,846 \cdot 10^{-3} = 5,692 \cdot 10^{-3} \text{ [mm]} \approx 0,006 \text{ mm}$$

- Standartní rozšířená nejistota pro nastavný kroužek o velikosti **19,9987 [mm]**:

$$U = k_U \cdot u_C = 2 \cdot 3,055 \cdot 10^{-3} = 6,112 \cdot 10^{-3} \text{ mm} \approx 0,006 \text{ mm}$$

Tímto je výpočet nejistot měření kompletní. Následující tabulka 3.3-8 zobrazuje veškeré vypočítané rozšířené nejistoty měření.

Tabulka 3.3-8 - Vypočítané hodnoty rozšířené nejistoty

Vypočítané hodnoty rozšířené nejistoty [mm]			
Soustavy měrek	2,500 [mm]	Ve směru X:	0,005
		Ve směru Y:	0,005
		V diagonálním směru 1:	0,005
		V diagonálním směru 2:	0,005
		Sečtení všech směrů:	0,005
	23,502 [mm]	Ve směru X:	0,005
		Ve směru Y:	0,005
		V diagonálním směru 1:	0,005
		V diagonálním směru 2:	0,005
		Sečtení všech směrů:	0,005
	58,466 [mm]	Ve směru X:	0,006
		Ve směru Y:	0,006
		V diagonálním směru 1:	0,006
		V diagonálním směru 2:	0,006
		Sečtení všech směrů:	0,006
	86,509 [mm]	Ve směru X:	0,006
		Ve směru Y:	0,006
		V diagonálním směru 1:	0,006
		V diagonálním směru 2:	0,006
		Sečtení všech směrů:	0,006
Kroužek Ø19,9987 [mm]		Průměr:	0,006

4 Závěr

Cílem této práce byl výpočet nejistoty měření na optickém zařízení Keyence IM řady 7000, který je součástí laboratoře Praktik experimentálních metod v obrábění Katedry technologie obrábění na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni. Toto vyčíslení bude následně využito pro rozšíření zmíněné laboratoře dle normy ČSN EN ISO/IEC 17025:2018.

Teoretická část práce se zabývala definicí a konstrukcí optických měřicích přístrojů, a také představovala hlavní zástupce těchto zařízení. Další kapitola se zabývala nejistotami měření. Zde byly detailně popsány standardní nejistota typu A, standardní nejistota typu B, kombinovaná standardní nejistota a rozšířená nejistota. Také se v této části práce nachází popis vyjádření výsledků měření a potřebné informace ohledně normy ČSN EN ISO/IEC 17025:2018.

Praktická část práce se nejprve zaměřila na použitý přístroj Keyence. V této kapitole byly zmíněny jeho vlastnosti a výhody oproti ostatním konvenčním přístrojům. Následovala kapitola zobrazující postup vytvoření potřebných programů (včetně účelu jednotlivých kroků) a také postup měření. Finální část experimentu se již zabývala tím nejdůležitějším z celé práce – výpočtem nejistot.

Samotný experiment se udál bez zásadních komplikací. Vytvoření programů a měření objektů bylo na přístroji Keyence IM 7000 intuitivní a bezproblémové. Bylo navrženo tak, aby minimalizovalo možné chyby a zajišťovalo konzistentní výsledky. Pro pokrytí potřebné části inspekční plochy přístroje probíhalo měření za použití více rozměrů koncových měrek a ve více směrech. Průměr byl měřen pomocí nastavného kroužku. Provést celé měření trvalo několik hodin.

Při výpočtu nejistot byl využit tabulkový procesor Microsoft Excel. Nejistoty typu A byly vypočítány z deseti hodnot v každém z jednotlivých směrů a také průměru. Do výsledné nejistoty typu B zasahovaly tři různé zdroje. Prvním zdrojem byla nedokonalost samotného přístroje Keyence. Druhým byla nepřesnost využitých koncových měrek a nastavného kroužku. Třetím zdrojem poté byla změna teploty laboratoře.

Získané hodnoty nejistot měření jsou klíčovým prvkem pro zvyšování spolehlivosti a přesnosti výsledků měření v rámci laboratoře. Jejich správné využití umožní laboratoři splnit požadavky normy ČSN EN ISO/IEC 17025:2018 a rozšířit tím v budoucnu potřebnou akreditaci pro daný přístroj. Celkově lze konstatovat, že provedený experiment úspěšně naplnil cíle této práce a poskytl užitečné poznatky pro další rozvoj laboratoře.

Pokračováním této práce na přístroji Keyence IM-7000 vzhledem k nejistotám by mohlo být měření ve vysoce přesném režimu a také na celé inspekční ploše. Díky tomuto měření by byly vypočítány všechny potřebné hodnoty pro získání akreditace laboratoře pro daný přístroj.

Seznam použitých zdrojů

- [1] *Bezkontaktní měření rozměrů*. Online. Visimatic. 2024. Dostupné z: <https://visimatic.cz/bezdotykove-mereni-rozmeru/>. [cit. 2024-02-15].
- [2] ZELINKA, Ondřej. *Bezkontaktní měření rozměrů – optické mikrometry*. Online. AUTOMA. 2016. Dostupné z: https://www.automa.cz/cz/casopis-clanky/bezkontaktni-mereni-rozmeru-opticke-mikrometry-2009_04_38860_5757/. [cit. 2024-02-18].
- [3] PONEC, Jan. *Optické přístroje 1*. Online. Olomouc, 2011. Dostupné z: https://optics.upol.cz/userfiles/file/Opticke_pristroje_1.pdf. [cit. 2024-02-19].
- [4] TAYLOR, Stuart A. *CCD and CMOS Imaging Array Technologies: Technology Review*. Online. Microsoft. 1998. Dostupné z: <https://www.microsoft.com/en-us/research/wp-content/uploads/2016/02/CCD.pdf>. [cit. 2024-02-16].
- [5] *Optical Comparators*. Online. Keyence. C2024. Dostupné z: <https://www.keyence.ca/ss/products/measure-sys/measurement-selection/type/projector.jsp>. [cit. 2024-03-03].
- [6] *What Is an Optical Comparator (Profile Projector) & How To Use It*. Online. Vision Gauge. C2023. Dostupné z: <https://www.visionxinc.com/what-is-an-optical-comparator#definition>. [cit. 2024-03-03].
- [7] *Optical Comparators*. Online. IQS Directory. 2020. Dostupné z: <https://www.iqsdirectory.com/articles/machine-vision-system/optical-comparators.html>. [cit. 2024-03-03].
- [8] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie*. [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013. Dostupné z: <http://books.fs.vsb.cz/StrojMetro/strojirenska-metrologie.pdf>. [cit. 2024-01-17].
- [9] *Performing Optical Measurements with Profile Projector*. Online. In: ALAT UJI. C2024. Dostupné z: <https://alatuji.co.id/melakukan-pengukuran-optik-dengan-profile-projector/>. [cit. 2024-03-04].
- [10] *Measuring Microscopes (Toolmakers Microscopes)*. Online. Keyence. C2024. Dostupné z: <https://www.keyence.ca/ss/products/measure-sys/measurement-selection/type/microscope.jsp>. [cit. 2024-03-12].
- [11] *Optický měřicí mikroskop*. Online. In: Grainger. C2000–2024. Dostupné z: <https://www.grainger.com.mx/producto/MITUTOYO-Microscopio-Medici%C3%B3n-p-Fab-Herramientas/p/54GF77>. [cit. 2024-03-11].
- [12] *Co je digitální mikroskop?* Online. EVIDENT. C2024. Dostupné z: <https://www.olympus-ims.com/cs/insight/what-is-a-digital-microscope/>. [cit. 2024-03-06].
- [13] *KEYENCE MIKROSKOP pro měření a kontrolu kvality*. Online. Keyence. C2024. Dostupné z: https://www.keyence.eu/landing/microscope/select_micro_cz_02.jsp?aw=gagooglekbczc zbrandmicvh002&gad_source=1&gclid=EAIAIQobChMIsafJ9NvfHAMVTZmDBx2nDAz6EAAAYASAAEgJUCfD_BwE. [cit. 2024-03-06].

- [14] *The optical solution with the right touch*. Online. In: Zeiss. C2024. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology/products/systems/optical-measurement/o-inspect.html>. [cit. 2024-04-24].
- [15] *Optical CMMs (VMMs)*. Online. Keyence. C2024. Dostupné z: <https://www.keyence.ca/ss/products/measure-sys/measurement-selection/type/image.jsp>. [cit. 2024-05-06].
- [16] PETŘKOVSKÁ, Lenka a ČEPOVÁ, Lenka. *Metrologie a řízení kvality: učební text*. Online. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2771-1. Dostupné z: https://projekty.fs.vsb.cz/459/ucebniopory/Metrologie_a_rizeni_kvality.pdf. [cit. 2024-03-10].
- [17] PETŘKOVSKÁ, Lenka. *TECHNICKÁ MĚŘENÍ A METROLOGIE TEORETICKÝ ZÁKLAD*. [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3035-3. Dostupné z: https://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_025/Technick%C3%A1%20m%C4%9B%C5%99en%C3%AD%20a%20metrologie%20-%20Teoretick%C3%BD%20z%C3%A1klad/02%20Text%20pro%20e-learning/Technick%C3%A1%20m%C4%9B%C5%99en%C3%AD%20a%20metrologie%20-%20Teoretick%C3%BD%20z%C3%A1klad_13.pdf. [cit. 2024-03-06].
- [18] SUCHÁNEK, Miloslav a SKOPAL, Jaroslav, VIDIMOVÁ, Klára a MILLEROVÁ, Jarmila (ed.). *Pokyn pro vyjadřování nejistoty měření (GUM)*. Online. Praha: Bořivoj Kleník, PhDr. – Q-art, 2012. Dostupné z: <https://www.unmz.cz/files/Sborn%C3%ADky%20TH/GUM%20-%20celek%20-DEF.pdf>. [cit. 2024-01-30].
- [19] *Mračna bodů velkou rychlostí: ZEISS LineScan*. Online. In: Zeiss. C2024. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/senzory/on-cmm/optical-sensors-cmm/zeiss-linescan.html>. [cit. 2024-03-12].
- [20] *Zaostřeno na 2D rozměry: ZEISS ViScan*. Online. In: Zeiss. C2024. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/senzory/on-cmm/optical-sensors-cmm/viscan.html>. [cit. 2024-03-12].
- [21] TŮMOVÁ, Olga. *Metrologie a hodnocení procesů*. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-249-7.
- [22] NĚMEČEK, Pavel. *Nejistoty měření*. Kvalita, quality, Qualität. Praha: Česká společnost pro jakost, 2008. ISBN 978-80-02-02089-9.
- [23] JCGM 100:2008. *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement*. Online. JCGM, 2008. Dostupné z: https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf/cb0ef43f-baa5-11cf-3f85-4dcd86f77bd6. [cit. 2024-02-05].
- [24] PETŘKOVSKÁ, Lenka a ČEPOVÁ, Lenka. *Strojírenská metrologie: studijní opora "Strojírenská metrologie"*. Online. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2723-0. [cit. 2024-05-20].

- [25] *Nejistoty měření a současná legislativa*. Online. Automa. C2016. Dostupné z: https://www.automa.cz/cz/casopis-clanky/nejistoty-mereni-a-soucasna-legislativa-2005_07_30601_3006/. [cit. 2024-03-12].
- [26] *IM - 7000 Series image Dimension Measurement Systema Catalogue*. [online]. Keyence, 2019. Dostupné z: <https://www.keyence.eu/mykeyence/?ptn=001>. [cit. 2024-03-12].
- [27] ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. ČSN EN ISO 3650, *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Etalony délek - Koncové měrky*. 2000.
- [28] *Stačí umístit a stisknout*. Online. In: Keyence. C2024. Dostupné z: https://www.keyence.eu/cscz/ss/products/measure-sys/instant_measurement/. [cit. 2024-03-04].
- [29] *Digitální mikroskop: Řada VHX-7000*. Online. In: Keyence. C2024. Dostupné z: <https://www.keyence.eu/cscz/products/microscope/digital-microscope/vhx-7000/>. [cit. 2024-03-11].