

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

**ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ,
PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE**



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

MĚŘENÍ NA PROFILPROJEKTORU

DAVID KOZÁK

PRAHA 2024

Zadání



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kozák** Jméno: **David** Osobní číslo: **503328**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávatel katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Měření na profilprojektoru

Název bakalářské práce anglicky:

Profile projector measurement

Pokyny pro vypracování:

1. Úvod do měření.
2. Nejistoty měření.
3. Princip měření na profilprojektoru.
4. Návrh měření na profilprojektoru a jeho realizace.
5. Vyhodnocení naměřených dat.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. BcA. Jan Podaný, Ph.D. ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **03.04.2024** Termín odevzdání bakalářské práce: **05.08.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. BcA. Jan Podaný, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

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

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce Ing. BcA. Jan Podaný, Ph.D. Všechna odborná literatura a další zdroje jsou uvedeny v seznamu.

V Praze dne 21.7.2024

David Kozák

Poděkování

Děkuji panu Ing. BcA. Janu Podanému, Ph.D. za mnoho cenných rad, připomínky a také ochotu a vstřícnost při vypracování této bakalářské práce.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je provést rešerši v problematice měření na profilprojektoru. V první části se zabývám teoretickou rovinou problematiky měřicích zařízení, možným výskytem chyb měření a teorií zpracování výsledků. Dále také způsoby měření ve dvou souřadnicích. V druhé části jsou popsány použítá měřicí zařízení a metody provedení měření. Dále je určena způsobilost výrobního procesu.

Klíčová slova

Strojírenská metrologie, optické měřicí přístroje, měření na profilprojektoru, ověření přesnosti, index způsobilosti, analýza výsledků měření

Abstract

The aim of this bachelor's thesis is to conduct a literature review on the issue of measurement using a profile projector. The first part deals with the theoretical aspects of measuring devices, the potential occurrence of measurement errors, and the theory of data processing. It also covers methods of measurement in two coordinates. The second part describes the measuring devices and methods used. Furthermore, the capability of the production process is determined.

Key words

Engineering metrology, optical measuring instruments, profile projector measurement, verification of accuracy, index of process capability, analysis of measurement results

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Zákony v metrologii	9
2.1	Národní metrologický systém České republiky	10
2.2	Etalon	11
2.2.1	Primární etalon.....	11
2.2.2	Státní etalon.....	11
2.2.3	Referenční a pracovní etalon	11
2.2.4	Schéma návaznosti.....	11
2.3	Měřidla.....	12
2.3.1	Stanovená měřidla	12
2.3.2	Nestanovená měřidla	12
2.3.3	Schéma postupu od koupě měřidla po jeho vyřazení	13
3	Nejistota měření	13
3.1	Nejistota typu A.....	14
3.2	Nejistota typu B.....	14
3.3	Nejistota typu C.....	14
3.4	Rozšířená nejistota	15
4	Chyby měření	15
4.1	Systematické chyby měření	15
4.1.1	Nezahrnutí faktoru.....	15
4.1.2	Řádná kalibrace přístrojů	16
4.1.3	Chyba paralaxy	16
4.2	Náhodné chyby	16
4.2.1	Přesnost měřicích nástrojů.....	17
4.2.2	Náhodné fyzikální jevy	17
4.3	Hrubé chyby.....	17
5	Analýza výsledků měření.....	17
5.1	Hodnocení způsobilosti	18
5.1.1	Index způsobilosti C_p (process capability)	18
5.1.2	Index způsobilosti C_{pk} (current process capability)	18
5.2	Regulační diagramy	19
6	Měření optickými přístroji.....	21
6.1	Měření v rovině	22
6.2	Měřicí mikroskopy	23
6.2.1	Měřicí metody	23
6.2.2	Stavba mikroskopu.....	24
6.2.3	Digitální mikroskopy	24

6.3	Parametry	25
6.3.1	Numerická aparatura.....	25
6.3.2	Rozlišovací schopnost.....	26
6.3.3	Parfokální vzdálenost.....	26
6.3.4	Ohnisková vzdálenost.....	27
7	Profilprojektory	27
7.1	Princip profilprojektoru	28
7.1.1	Optický systém.....	29
7.1.2	Telemetrická optika	29
7.1.3	Diaprojekce	30
7.1.4	Epiprojekce	31
7.2	Parametry	31
7.2.1	Přesnost zvětšení.....	31
7.2.2	Průměr zorného pole.....	32
7.3	Vybavení.....	32
7.3.1	Fixační pomůcky	32
7.3.2	Šablony	33
7.3.3	Závora.....	33
7.3.4	Objektivy	34
7.3.5	Měřicí jednotka.....	34
7.4	Popis měření.....	35
7.4.1	Měření pomocí šablony	35
7.4.2	Měření posuvným stolem	35
7.5	Chyby měření	35
8	Digitální profilprojektor.....	36
8.1	Princip digitálního profilprojektoru	37
8.2	Funkce.....	37
8.2.1	Zpracování obrazu	37
8.2.2	Odstíny šedi	38
8.2.3	Měření větších součástí	38
9	Praktická část.....	39
9.1	Postup měření.....	39
9.1.1	Příprava měření	39
9.1.2	Nastavení zvětšení.....	39
9.1.3	Ověření přesnosti měření.....	39
9.1.4	Popis měření.....	39
9.2	Měřicí aparatura.....	40
9.2.1	Zdigitalizovaný profilprojektor MP320.....	40
9.2.2	Profilprojektor 320.....	42

9.2.3	Koncové měrky Mitutoyo	44
9.3	Ověření přesnosti profilprojektorů	45
9.3.1	Ověření přesnosti profilprojektoru MP320	46
9.3.2	Ověření přesnosti profilprojektoru 320.....	46
9.4	Hodnocení stability procesu	47
10	Závěr	52
11	Zdroje	53

1 Úvod

Označení metrologie pochází z řeckých slov metron, značící měřidlo, a logos, které znamená slovo. Z obecné definice je to věda, zabývající se měřením a také všemi činnostmi a poznatky s ním souvisejícími. Jedná se o základ přesného měření, které má velký význam v mnoha odvětvích. Hlavní využití spočívá v přesnosti výroby a s tím související jakostí, směně zboží nebo i ve vědeckých výzkumech, jelikož je v těchto odvětvích nutné dodržet velmi přesné hodnoty měření. Pro zaručení přesných výsledků a jejich replikovatelnost je nutné mít zavedený jednotný systém, to postupem času vedlo až k zavedení soustavy jednotek SI. [1], [2], [3]

Obecně můžeme metrologii rozdělit do čtyř základních kategorií. Fundamentální metrologie je základem pro metrologický systém a zabývá se metodami měření, způsobem realizace etalonů a má vědecko-výzkumný charakter. Průmyslová metrologie zajišťuje správnost měření a jeho jednotnost ve výrobních kontrolách, k čemuž využívá kalibrace měřicích nástrojů pomocí přesných etalonů. Legální metrologie má za úkol především ochranu osob v souvislosti s chybným měřením a jeho vlivu na úřední a obchodní transakce, bezpečnost nebo zdraví. To zajišťuje určením zákonných měřicích jednotek, měřidel a požadavků, které musí splňovat, a přesně definovanými měřicími postupy. Poslední kategorií je vědecká metrologie, která se zabývá především vývojem, a to zejména ve způsobu uchování etalonů a jejich vývojem, který prošel poslední zásadní změnou koncem roku 2018, kdy se Konference pro míry a váhy shodla na redefinování základních jednotek soustavy SI. [2],[4]

V této práci se budu také zabývat měřením na profilprojektoru. Jedná se o optické měřicí zařízení, které promítne profil zkoumané součásti na plochu se zvětšením, které se obvykle pohybuje v rozmezí 10 - 100x, ale ve specifických případech může být i větší. Častější metodou bývá diaprojekce, což označuje metodu procházejícím světlem. Během měření dopadají paprsky ze zdroje na měřenou součást položenou na skleněné desce, proto je tato metoda vhodná zejména pro ploché objekty, a dále projdou přes řadu optických součástí, nakonec vrhají stín na promítací plochu, kde je možné provést měření. Na promítnutém obraze je možno měřit přímo nebo využít metodu srovnání s šablonami, které mají svůj jmenovitý rozměr. Chyba zvětšení je obvykle menší než 1,5 %. Proto je tato metoda velmi výhodná pro rychlou kontrolu malých, popřípadě tvarově složitých, součástí. [2], [3], [5]

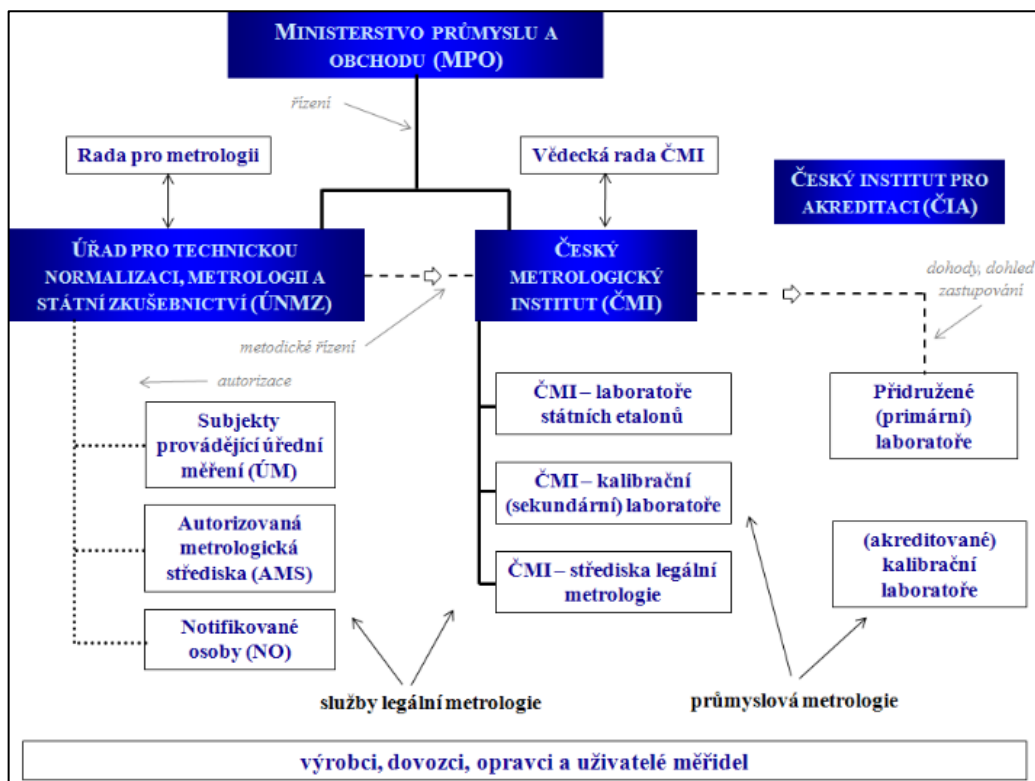
2 Zákony v metrologii

V České republice je základním předpisem pro metrologii zákon č. 505/1990 Sb., o metrologii, a také několik jeho novel, které ho dále upravují. Velkou část a mnoho detailů ustanovuje jeho průřezová prováděcí vyhláška č. 262/2000 Sb., která má za cíl zajistit jednotnost a správnou měření. K těmto zákonům, pro jejich správnou funkci a aplikovatelnost existují také prováděcí vyhlášky, jako definování výkonu státní správy v oblasti normalizace a metrologie nebo ověření shody výrobků, které byly uvedeny na trh. Tyto zákony a nařízení vlády mají nejen zaručit stejné podmínky pro všechny strany v průběhu obchodu, ale také stanovují požadavky

technického charakteru na výrobky v oblasti zdravotnictví, kde se parametry zařízení dále upravují pomocí příslušných norem. [6]

2.1 Národní metrologický systém České republiky

Pro zajištění jednotnosti a správnosti měření slouží v našem státě Národní metrologický systém (dále jen zkráceně NMS), jehož nejvyšším prvkem je Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (dale jen ÚNMZ), který se podřizuje Ministerstvu průmyslu a obchodu a stanovuje ho zákon č. 20/1993 Sb., o zabezpečení výkonu státní správy v oblasti technické normalizace, metrologie a státního zkušebnictví. Stát proto hraje významnou roli v tvorbě metrologické legislativy a její dodržování, rozvoji a také v mezinárodní spolupráci. ÚNMZ jako hlavních mechanismů využívá technické předpisy a práva, která platí pro všechny orgány, právnické i fyzické osoby. Další klíčový prvek NMS je Český metrologický institut (dále jen ČMI). Jeden z hlavních úkolů ČMI je prostřednictvím českého národního akreditačního systému certifikovat způsobilost kalibračních laboratoří, zkušebních laboratoří a inspekčních orgánů. Ty potom mohou fungovat jako akreditované subjekty, jelikož byla prokazatelně prověřena jejich odborná způsobilost. Mezi další působnosti ČMI patří provádění výzkumu a správa státních etalonů a následný přenos jejich hodnot měřicích jednotek pro kalibraci stanovených měřidel. [7], [8]



Obrázek 1: Schéma vztahů NMS [8]

Na obrázku výše můžeme vidět schématickou strukturu pravomocí a postavení jednotlivých subjektů NMS v ČR, jak byl popsán v předchozím odstavci. [8]

2.2 Etalon

Etalon určité měřicí jednotky má za účel uchování a realizaci dané jednotky nebo stupnice a také její přenos na měřidla, která mají nižší přesnost. Slouží jako vzor, nebo-li reference k zabezpečení jednotnosti měřidel a tím i jejich přesnému měření a s tím související opakovatelností. [6], [9]

2.2.1 Primární etalon

Jedná se o nejpresnější druh etalonu s nejvyšší kvalitou. Jeho hodnota je obecně přijímána a nenavazuje se na žádný jiný etalon. Do této oblasti spadají etalony, které vychází přímo z definice dané jednotky. Na tento typ etalonu se dále navazují další, které ale mají z pravidla menší přesnost. [3], [6]

2.2.2 Státní etalon

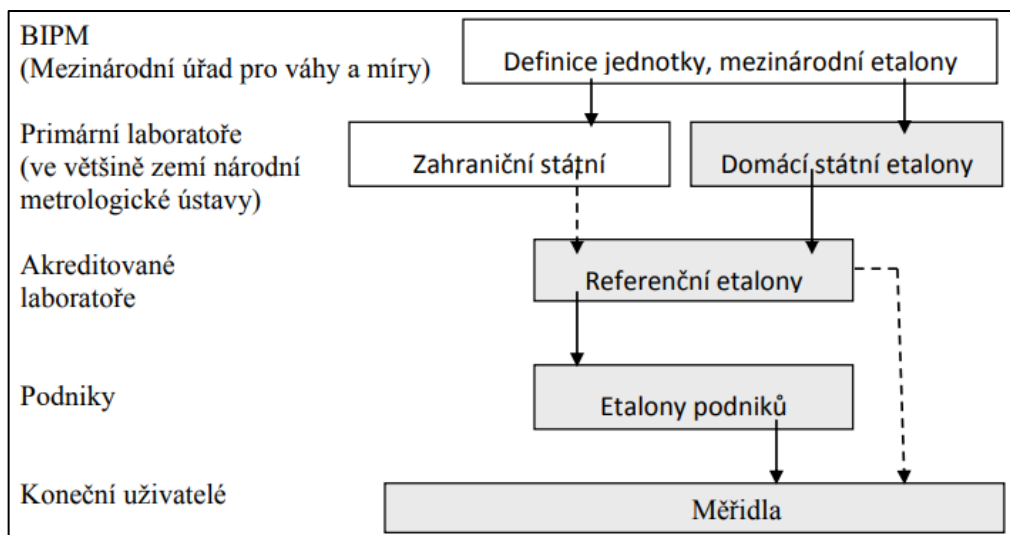
Tento druh etalonu se po oficiálním rozhodnutí, které vydává ÚNMZ a stanovuje způsob jejich výroby a uchování, stává základem pro určování dalších etalonů ve státě. Tento druh musí mít zaručenou návaznost na mezinárodní etalony a musí vyhovovat Dohodě o vzájemném uznávání státních etalonů. Uchování má v kompetenci ČMI a případně i další instituce, které jsou k tomu prostřednictvím ÚNMZ pověřeny. Koncepte těchto etalonů musí odpovídat potřebám státu v oblasti průmyslu a rozvoje. Soustava státních etalonů se modernizuje a doplňuje, dle možností a potřeb ČMI, aby vyhovovala potřebám České republiky a koncepce rozvoje se schvaluje obvykle na období pěti let. [3], [6], [10]

2.2.3 Referenční a pracovní etalon

Další stupně kvality a přesnosti etalonů, které jsou postupně navázány na státní. Jejich využití je především v laboratořích a podnicích, kde se jimi kalibrují nebo kontrolují měřidla, popřípadě měřicí aparatury, které se dále používají zaručení přesnosti a spolehlivosti měření výrobků nebo služeb, které jsou v souvislosti s tím poskytovány. [3], [6]

2.2.4 Schéma návaznosti

Návaznost etalonů je jasně daná a musí se přesně dodržovat, pro zabezpečení přesnosti měření. [3]



Obrázek 2: Schéma návaznosti [3]

2.3 Měřidla

Jedná se o zařízení pro určování hodnot nebo vlastností objektů a hlavním účelem je poskytovat kvantitativní informace. Dělí se do několika podskupin podle jejich přesnosti a akreditace.

2.3.1 Stanovená měřidla

Jedná se o druh měřidel, která Ministerstvo průmyslu a obchodu určí jako povinná pro ověření, s ohledem na význam. Jde například o prodeje, stanovení sankcí nebo požadavky bezpečnostního charakteru. Seznam měřidel, která jsou ze zákona stanovená, se dá nelézt ve vyhlášce. [6], [11], [12]

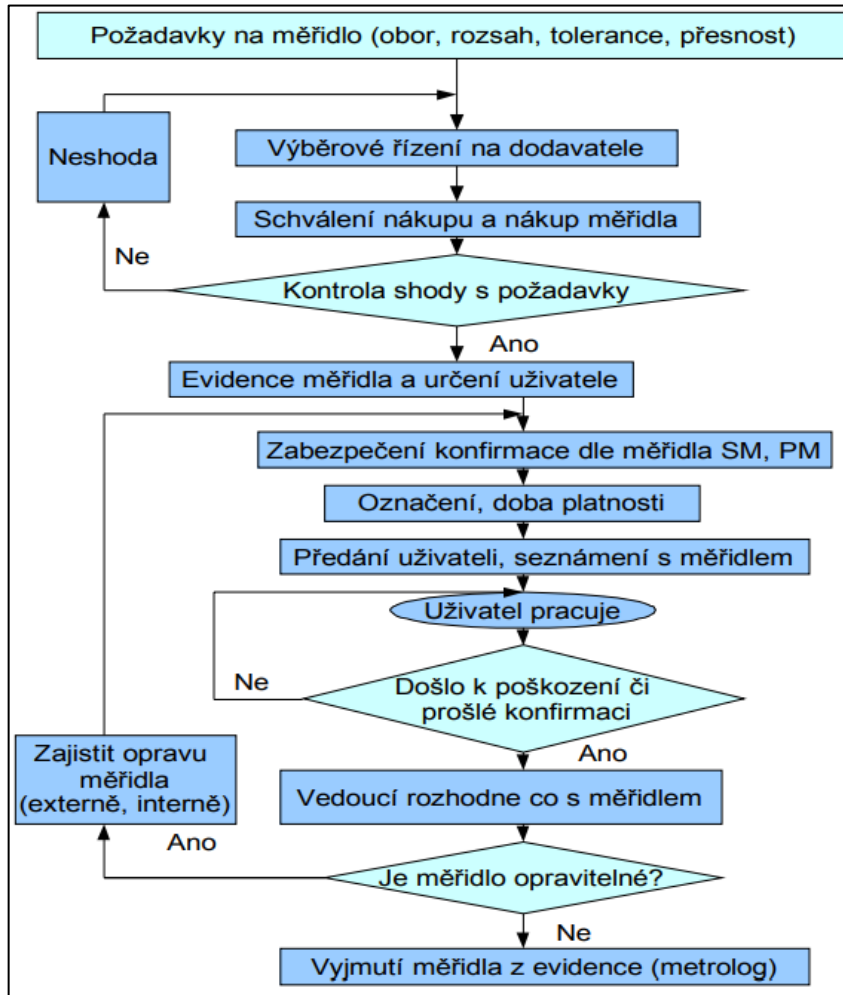
Schvalování tohoto typu prování ČMI, který posuzuje, jestli je dané měřidlo schopno plnit danou funkci a řídí se vyhláškou. Pokud je výsledek posuzování pozitivní, vydá ČMI certifikát potvrzující danou skutečnost a výrobce poté umístí značku na každý vyrobený kus. Platnost tohoto certifikátu pro výrobce je na dobu deseti let, ale může být prodloužena nebo v opačném případě pozastavena nebo zrušena a to v případech, kde se ukáže, že dané měřidlo má vadu, která mu znemožňuje plnit funkci, pro kterou bylo určeno. Dále probíhá také ověřování, které má za úkol ČMI nebo jiná akreditovaná metrologická střediska. [6], [11], [13]

2.3.2 Nestanovená měřidla

Těž označovaná jako pracovní měřidla, nespádají do sekce etalonů ani stanovených měřidel a slouží především pro kontroly výroby. Prošla prvotní kalibrací u výrobce a další kalibrování a jeho případné intervaly obvykle záleží na majiteli a posuzují se podle požadavků na přesnost měření. [6], [11], [12]

2.3.3 Schéma postupu od koupě měřidla po jeho vyřazení

Všechna zařízení musí být dle norem ve shodě s požadavky, k jeho určenému použití. Obecně se jedná o úkony jako kalibrace, ověřování a případné seřizování či opravy a následného znovuuvedení do provozu. [11]



Obrázek 3: Schéma postupu od koupě měřidla po jeho vyřazení [11]

3 Nejistota měření

Proces měření je získávání hodnot zjišťované veličiny, které se však liší v jednotlivých měřeních, jelikož jsou všechna měření zatížena určitou nejistotou, protože metrologie není, pro příklad na rozdíl od matematiky, exaktní vědou. Proto je nutné uvažovat tento fakt a provést analýzu výsledků a s tím související nejistoty, abychom získali kvalitní a vypovídající výsledek a správnou hodnotu nejistot, tím i rozsah, kde se nachází skutečná hodnota. Velikost nejistot často přímo souvisí s kvalitou samotného měření a umožňuje porovnání výsledků s jinými experimenty a také s teoretickými hodnotami, což je proces, který by bez řádné analýzy nejistot nebyl možný, respektive by neměl žádnou vypovídající hodnotu. Přirozeně se snažíme získat co nejlepší výsledky, což znamená eliminovat co největší množství chyb, které mohou během měření vzniknout, mít dostatečně velký počet měření a také mít záznam o průběhu, aby bylo možné měření

replikovat, popřípadě zpětně analyzovat proces. Pomocí těchto měření se pak snažíme získat co nejpřesnější odhad skutečné hodnoty. [11], [14], [15]

3.1 Nejistota typu A

Pro získání tohoto typu nejistoty používáme statistickou analýzu pro sérii opakovaných měření stejné veličiny. Tato nejistota je z největší části ovlivněna s náhodnými chybami měření.

$$u_A = s(\bar{y}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n \cdot (n - 1)}}$$

Ze vzorce je patrné, že velikost nejistoty se výrazně snižuje s počtem naměřených hodnot, což odpovídá teorii vlivu náhodných chyb na výsledky měření. Pro kvalifikovaný odhad je nutné mít alespoň deset hodnot, které využijeme pro výpočty. Pokud je počet měření menší než deset, použijeme vzorec pro korigovanou nejistotu v podobě

$$u_{Ak} = k \cdot s(\bar{y})$$

Kde k ... koeficient, který závisí na počtu měření dané veličiny

Hodnoty koeficientu k jsou v závislosti na počtu měření n zapsány v následující tabulce. [3],[11]

Tabulka 1: Hodnoty koeficientu k [11]

n	9	8	7	6	5	4	3	2
k	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,7	2,3	7,0

3.2 Nejistota typu B

Pro získání hodnoty této nejistoty je nutné provést expertní odhad, pro který nám poslouží všechny dostupné informace o měření a také zkušenosti. Není pevně daný univerzální postup, proto se musíme řídit obecnými pravidly. Obvykle se pro určení používají hodnoty, které jsou poskytnuty výrobcem měřicích zařízení, které mají dle svých parametrů danou přesnost. Dále do výpočtu zavedeme nepřesnost etalonů, které byly použity pro kalibraci. Zahrneme také chybu měřidla a maximální rozlišovací schopnost. Z předešlých zkušeností také známe a bylo možné vypořádat chování přístroje za určitých podmínek, které mohou negativně ovlivňovat výsledky a je nutné i s těmito faktory kalkulovat. [3],[11]

3.3 Nejistota typu C

Též označovaná jako kombinovaná nejistota, kterou vypočítáme pomocí hodnot obou předchozích nejistot. Vzorec pro výpočet [3],[11]

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

3.4 Rozšířená nejistota

V případě, že je požadované velké pokrytí, obvykle z důvodu, že je požadováno, aby naměřené hodnoty byly v intervalu vymezeném touto nejistotou, použijeme rozšířenou nejistotu. Ta se vypočítá vynásobením kombinované nejistoty koeficientem k , který má nejčastěji hodnotu $k = 2$. To zapříčiní, že interval touto nejistotou vymezený, bude pokrývat zhruba 95 % všech naměřených výsledků. [9], [11]

4 Chyby měření

Každé měření je zatíženo chybou a vyjadřuje rozdíl mezi naměřenou hodnotou a skutečnou hodnotou. Lze vyjádřit jako absolutní hodnotu ve formě

$$\varepsilon = y - x_0$$

Kde ε ... absolutní hodnota chyby

y ... naměřená hodnota

x_0 ... skutečná hodnota/konvenčně pravá

Dále můžeme pro lepší názornost určit relativní chybu měření ze vztahu

$$\delta = \frac{\varepsilon}{x_0}$$

popřípadě můžeme vzorec upravit do následující formy pro získání relativní chyby v procentech

$$\delta = \frac{\varepsilon}{x_0} * 100 [\%]$$

[2]

4.1 Systematické chyby měření

Systematické chyby probíhají opakovaně z důvodu vlivu faktoru, který nebyl uvažován nebo se ho nepodařilo eliminovat. To ovlivňuje experiment stejným způsobem po určitou dobu. Tento druh chyby je velmi obtížné odhalit, jelikož není možné ho identifikovat pomocí statistické analýzy, protože dochází k pravidelnému zkreslení výsledků. Pokud se podaří systematickou chybu odhalit, je v některých případech možné provést korekci výsledků na základě výpočtu velikosti zkreslení daným jevem. [14], [16]

Systematické chyby mohou mít mnoho různých původů. A ovlivňují především správnost měření. [14], [16]

4.1.1 Nezahrnutí faktoru

Během navrhování experimentu je důležité eliminovat všechny faktory, který by mohly nastat a ve výsledku tím ovlivnit měřenou veličinu. Z toho důvodu je nutné během navrhování

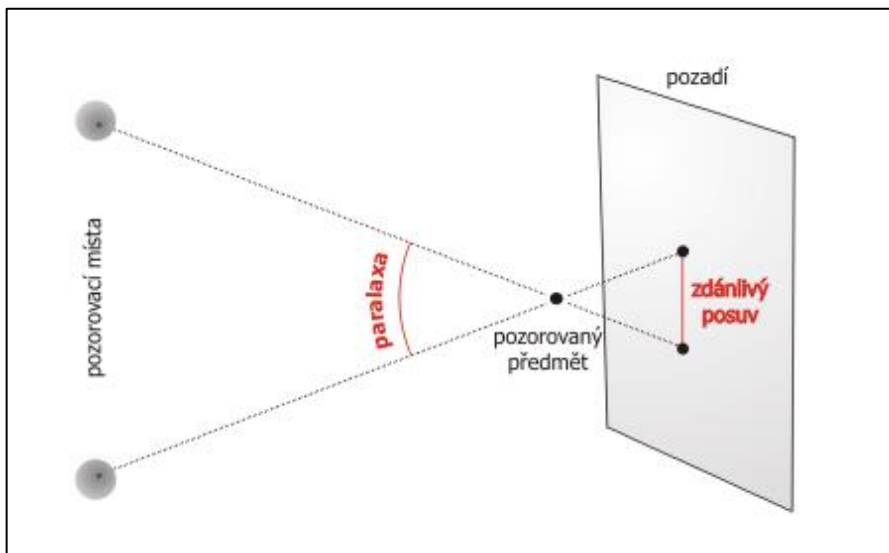
dbát zvýšené opatrnosti a pokusit se navrhnout co nejlepší postup, který by dokázal izolovat všechny vnější vlivy. V některých případech možné objevit chybu i zpětně a provést zmiňovanou korekci. [14], [17]

4.1.2 Řádná kalibrace přístrojů

Před každým měřením by měla proběhnout kontrola kalibrace přístrojů, pro zamezení opakujícím se chybám a tím potenciálnímu znehodnocení výsledků. Je možné, že chyba bude odhalena příliš pozdě a nebude možné zjistit jaká byla odchylka, tudíž nebude možné provést korekci měření. [14], [16], [17]

4.1.3 Chyba paralaxy

Může se jednat o systematickou i náhodnou chybu. U měřících zařízení nemusí být přesně daný úhel, pod kterým se člověk dívá na stupnici, proto je možné odečítat hodnoty nepřesně. Je nutné dbát na pečlivé odečtení hodnot, popřípadě použít měřící přístroje, které optickou soustavou dokáží tento typ chyby eliminovat. [14]

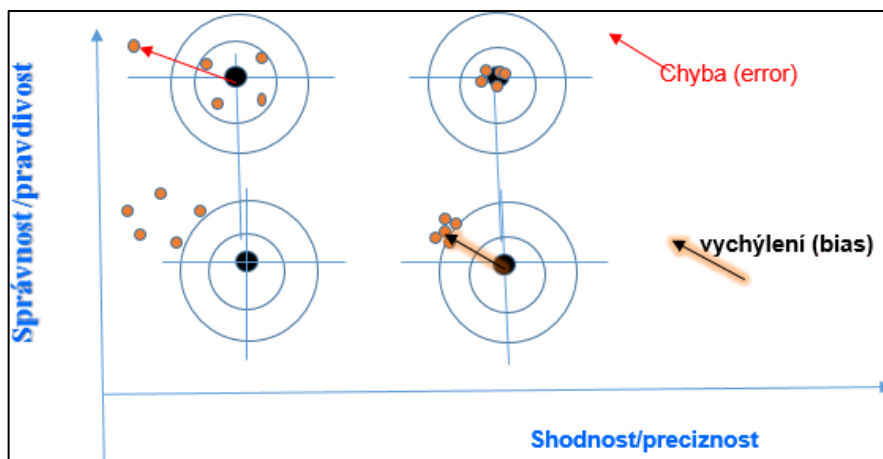


Obrázek 4: Chyba paralaxy [18]

4.2 Náhodné chyby

Náhodné chyby se statisticky vyskytují z hlediska výsledků do všech směrů. Kolísá jejich velikost i znaménko. Náhodné chyby mají obvykle Gaussovo rozdělení. Jejich popis je proto možný pouze ze statistického hlediska, jelikož není možné konkrétní hodnoty těchto chyb předpovědět. Pro teoreticky nekonečný počet měření bude z hlediska statistiky vliv náhodných chyb nulový, proto je velmi výhodné provést větší počet opakování, aby došlo k maximálnímu možnému snížení vlivu tohoto druhu chyby. [14], [19]

Náhodné chyby mohou být ovlivněny více faktory a mají vliv především na přesnost měření. [14], [19]



Obrázek 5: Zobrazení správnosti a preciznosti měření [20]

4.2.1 Přesnost měřicích nástrojů

Všechny měřicí nástroje mají limitovanou přesnost jejich výrobou a použitím. Není možné měřit přesně, pokud na to dané zařízení není zkonstruováno, protože při tak velké úrovni přesnosti budou výsledky silně zatíženy náhodnými chybami. [14]

4.2.2 Náhodné fyzikální jevy

Během měření může docházet k náhodným fyzikálním jevům, které ovlivní jednotlivé výsledky. Pro příklad se může jednat o sílu stisku čelistí u měření délkovými měřidly. Tato chyba se dá do určité míry eliminovat siloměry, ale pro toto přesné měření bychom potřebovali absolutně přesně měření síly. [14]

4.3 Hrubé chyby

Též označované jako odlehlé hodnoty a jsou způsobeny výjimečnou příčinou. Často se jedná o chyby obsluhy, která svou neodborností ovlivňuje výsledky. Určité omezení tohoto druhu chyb je možné řádně proškoleným a pečlivým personálem, který bude mít zkušenosti v oblasti metrologie. Příčinou mohlo být například špatné zapsání výsledků, ale mohlo dojít i selhání měřicí aparatury nebo špatným provedením měření. Tyto hodnoty se velmi odlišují o většiny ostatních a je nutné provést analýzu a jestli se opravdu jedná o hrubou chybu, tak hodnotu vyloučit, aby nedošlo ke zkreslování výsledků. [3], [14], [17]

5 Analýza výsledků měření

Analýza výsledků je ve výrobních procesech prostřednictvím řízením jakosti, které umožňuje řešení několika zásadních problémů. V první řadě značně zvyšuje možnost kontroly procesu, jako je způsobilost a stabilita procesu. Pro kontrolu výrobních procesů se používají přesně definované měřicí aparatury, podmínky i postupy provedení jednotlivých měření, aby se dalo je považovat za směrodatné. [21]

Během měření mohlo dojít k chybám, které mohou znehodnotit celé měření. Pro eliminaci odlehlých hodnot, nejčastěji způsobenými hrubou chybou, slouží Grubbsův test. Tato metoda má za cíl rozeznat rozdíl mezi hrubými chybami měření a extrémy, které se mohou od očekávaných hodnot odlišovat, ale spadají validních hodnot a nevylučujeme je. [22]

5.1 Hodnocení způsobilosti

Vyhodnocení způsobilosti procesů má velký význam v oblasti jakosti. Hlavní cíl je zajistit, aby výrobky měly stanovenou kvalitu. Výhodou je, že lze tohoto postupu využít už v oblasti plánování, kdy můžeme dopředu odhadnout, zda se jedná o vhodný výrobní proces a případně množství neshodných výrobků. Důležitost není pouze pro výrobce, kteří tento druh analýzy využívají zaručení kvality výroby, ale i pro zákazníky, kteří díky tomu získávají informace o splnění jejich požadavků. Pro hodnocení způsobilosti se využívají indexy způsobilosti. Ty využíváme pro porovnání variability skutečných hodnot výrobků s variabilitou požadovanou, která je určena pomocí tolerančních pásem. [23], [24]

5.1.1 Index způsobilosti C_p (process capability)

Tento index způsobilosti vyjadřuje potenciál dané výroby, jelikož porovnává rozptyl naměřených hodnot relativně s velikostí tolerance, která je zadaná. Relativní porovnání umožňuje pohled na situaci, kdy byla střední hodnota přesně vycentrována, respektive by se nacházela přesně na středu tolerančního pole, a za předpokladu, že naměřená data odpovídají normálnímu rozdělení. Jestli jsou hodnoty v mezích tolerance, nemá na daný výpočet žádný vliv. Obecně index C_p určuje, kolikrát je toleranční pole větší v porovnání s odchylkou 6σ . [23], [24]

Vzorec pro výpočet C_p

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

kde USL ... horní mez tolerance

LSL ... dolní mez tolerance

σ ... směrodatná odchylka

Pro hodnotu $C_p > 1$ ze vzorce vychází, že přesnost je větší než odchylka 6σ , která pokrývá pro normální rozdělení 99,7 % hodnot, proto bude počet těch nevyhovujících menší než 0,3 %. Obvykle se však za doporučenou hodnotu považuje hodnota $C_p > 1,33$. [23], [24]

Směrodatnou odchylku vypočítáme z následujícího vztahu

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

5.1.2 Index způsobilosti C_{pk} (current process capability)

Tento index také určuje variabilitu, způsobilost zkoumaných hodnot a jestli získané hodnoty splňují požadavky, které jsou na ně kladeny. Index vyjadřuje rozptyl, ale na rozdíl od C_p počítá i se střední hodnotou. Proto se v tomto případě jedná o skutečné srovnání, a nikoliv ideální podmínky, kdy se počítá s pouze s rozptylem u přesně vycentrovaných hodnot.

$$C_{pk} = \min\left(\frac{USL - \bar{x}}{3\sigma}; \frac{\bar{x} - LSL}{3\sigma}\right)$$

Optimální výsledek je $C_{pk} > 1$, což značí schopnost procesu podávat požadovaný výstup, který byl skutečně dosažen. V případě, že vyjde $C_{pk} < 0$, není vypočítaná střední hodnota v zadaných tolerancích.

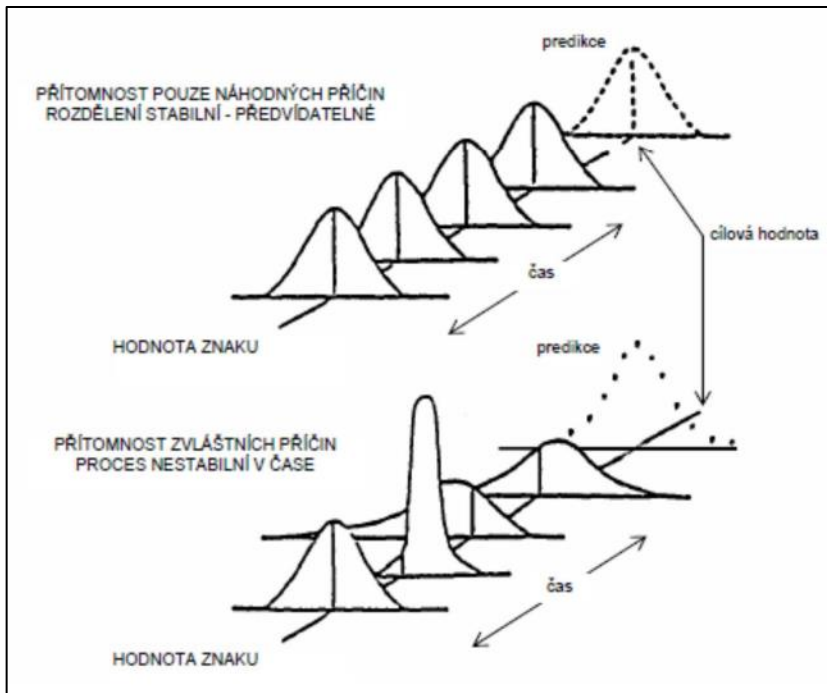
Ze vzorců je patrné, že pokud se zjištěná střední hodnota nenachází přes uprostřed tolerančního pole, tak platí $C_p > C_{pk}$ s rostoucí odchylkou se rozdíl indexů zvětšuje, jelikož C_p není ovlivněno požadovanou polohou střední hodnoty. [23], [24]

5.2 Regulační diagramy

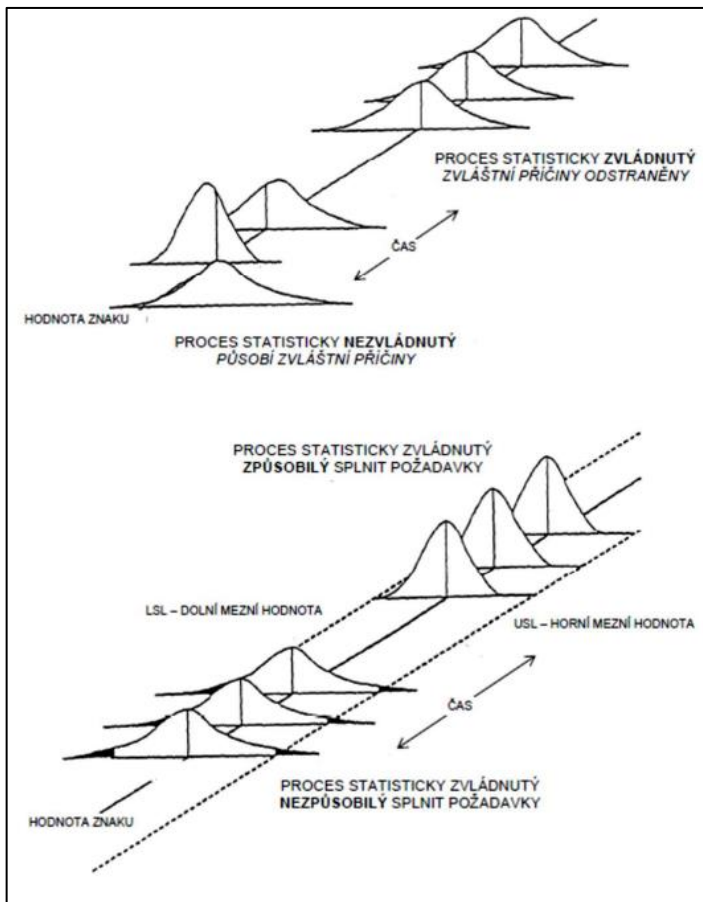
Regulační diagramy slouží k řízení odchylek u procesů a zároveň odlišuje odchylky způsobené poruchami přístrojů, které je třeba eliminovat, a náhodné vzniklé jevy, které lze jen obtížně ovlivnit a eliminovat. Pomocí těchto diagramů můžeme odhalit nedostatky a tím i zvýšit kvalitu výroby. V případě náhodných jevů je řešení obvykle náročnější, a to změna výrobní metody na jinou, která bude přesnější a bude náhodným chybám podléhat méně. U odchylek způsobenými poruchami přístrojů je nutná jejich oprava v případě poškození nebo pravidelná údržba z důvodu časového opotřebení. [21], [23]

Pro využití této metody je nutné mít hodnoty, které odpovídají normálnímu rozdělení a je tedy možné vypočítat aritmetický průměr. Zároveň se jedná o metodu iterační, což znamená, že po získání dat dochází k vynesení do regulačních diagramů a jejich vyhodnocení. Na základě výsledků diagramů je možné provádět korekce procesů, po kterých je opět nutné nasbírat potřebná data pro další analýzu. [21], [23]

Diagramy se obvykle využívají v páru, a to v prvním diagramu sledujeme měnlivost střední hodnoty dané veličiny a v druhém průběh variability hodnot. Jako střední hodnotu nejčastěji využíváme výběrový průměr \bar{x} a míru měnlivosti sledujeme pomocí výběrové směrodatné odchylky nebo variačního koeficientu. [21], [23]



Obrázek 6: Vliv náhodných a zvláštních veličin na stabilitu [21]



Obrázek 7: Znázornění statisticky zvládnutých a způsobilých procesů

Výpočet hodnot nutných pro vytvoření regulačních diagramů (x,R)

Střední hodnota

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

Střední hodnota rozptylu

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n}$$

Diagram pro střední hodnotu \bar{x}

Střední přímka $CL_{\bar{x}}$ (central line)

$$CL_{\bar{x}} = \bar{\bar{X}}$$

Horní regulační mez $UCL_{\bar{x}}$ (upper control limit)

$$UCL_{\bar{x}} = \bar{\bar{X}} + A_2 \cdot \bar{R}$$

Dolní regulační mez $LCL_{\bar{x}}$ (lower control limit)

$$LCL_{\bar{x}} = \bar{\bar{X}} - A_2 \cdot \bar{R}$$

Diagram pro měnlivost \bar{R}

Střední přímka CL_R (central line)

$$CL_R = \bar{R}$$

Horní regulační mez UCL_R (upper control limit)

$$UCL_R = D_4 \cdot \bar{R}$$

Dolní regulační mez LCL_R (lower control limit)

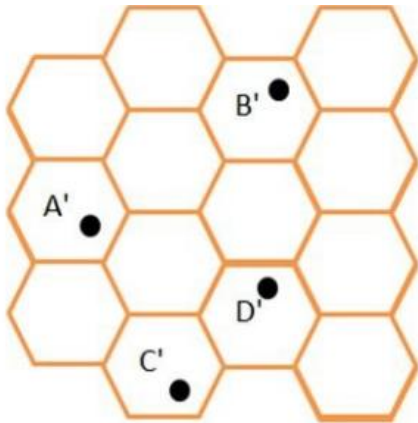
$$LCL_R = D_3 \cdot \bar{R}$$

Hodnoty A_2 , D_3 , D_4 jsou konstanty určené dle počtu výběrů.

6 Měření optickými přístroji

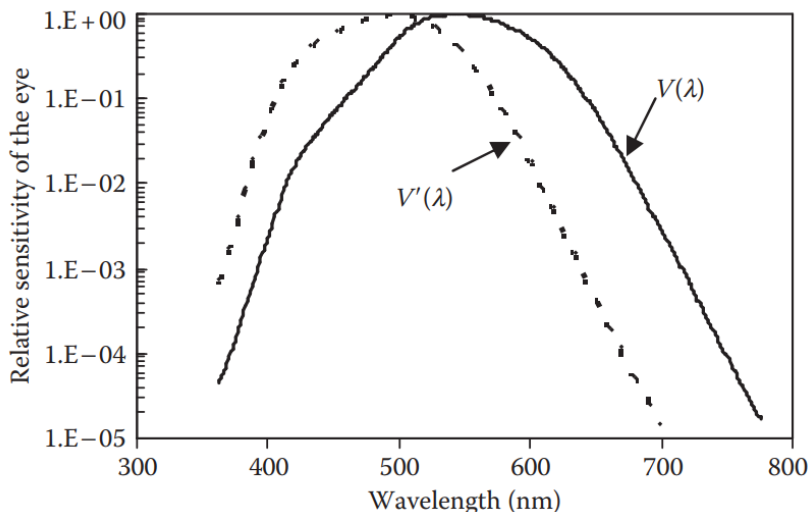
Optické měřicí přístroje se začaly používat pro přesná měření malých objektů z důvodu, že u menších rozměrů začne být člověk velmi rychle limitován vlastnostmi oka. To má určitou rozlišovací mez, která se definuje jako schopnost od sebe rozlišit dva vedle sebe ležící body. Obraz, na který se člověk dívá, se promítá na sítnici oka a schopnost rozlišit dva body od sebe závisí na tom, jestli bude na sítnici mezi obrazy dvou daných bodů, alespoň jeden neosvětlený

čípek. Pokud k tomu nedojde, není člověk schopný dva body rozlišit a ty poté splynou v jeden. [25]



Obrázek 8: Promítnutí bodů na schématický náčrt sítnice [25]

Z obrázku 8 je patrné, že mezi obrazy bodů A', B' a skupinou C', D' jsou volné čípky, což zapříčiní rozlišení daných bodů. Mezi body C' a D' není žádná mezera, a proto budou zdánlivě působit jako jeden. Rozlišovací schopnost se zvyšuje v případě, že místo bodů použijeme úsečky. Pokud se ty promítnou na různé čípky, budou rozlišeny díky jejich přesahu. Udává se, že při dostatečném osvětlení, které má velký vliv na zrak, je zdravé oko schopno rozlišit dva body vzdálené od sebe 0,2 mm na vzdálenost 25 cm a pro pozorování menších objektů je nutné použít přístroje s možností zvětšení obrazu. Během pozorování není důležitá pouze intenzita osvětlení, ale také vlnová délka světla. Z výzkumů vyplývá, že lidské oko má největší citlivost na za vlnové délky odpovídající zeleno-žlutému světlu. [25], [26], [27]



Obrázek 9: Závislost sensitivity lidského oka na vlnové délce světla [27]

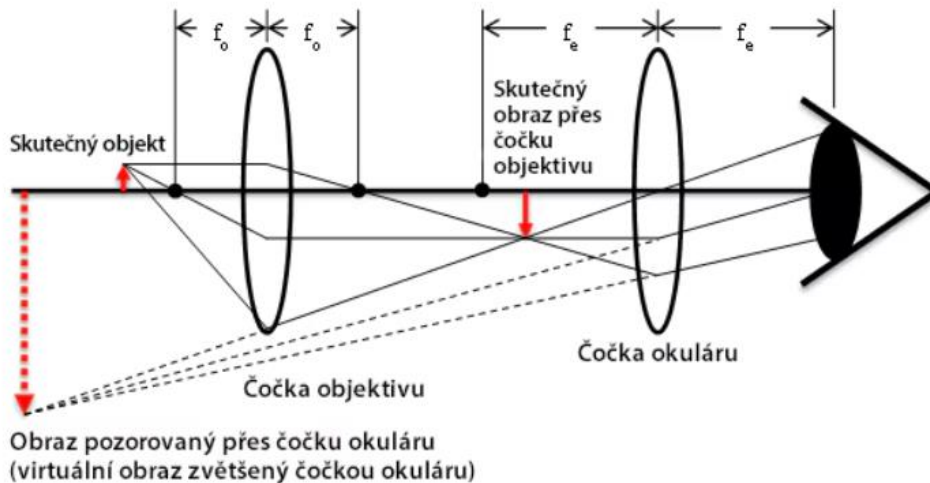
6.1 Měření v rovině

Pro měření plochých objektů využíváme dvousouřadnicové měřicí stroje, které používají dvě na sebe kolmé osy. Mezi základní druhy patří měřicí mikroskopy a profilprojektory. V obou případech využíváme stejného principu měření a to pozorování zvětšeného obrazu, který vznikl

průchodem přímého nebo odraženého světla. Obraz pozorujeme pomocí okulárů mikroskopu nebo promítnutý na matrici profilprojektoru v případech, kdy se nejedná o digitální měřicí nástroje, které mají výstup v počítačích. Oba tyto přístroje mají své limity přesnosti a v možnostech měření, nicméně jsou velmi výhodné pro rychlé kontrolování rozměrů a také jsou ve srovnání s modernější měřicí aparaturou, jako jsou souřadnicové stroje, levnější a menší. [28], [29]

6.2 Měřicí mikroskopy

Mikroskopy se využívají pro měření délky, úhlů nebo jiných tvarových součástí, jako jsou např. závity. Výhodou je, že měření probíhá bezdotykově, čímž se omezuje vliv deformace měřicího objektu nebo přístroje. Základním principem zvětšení mikroskopu je soustava dvou spojných čoček, které spojují světelné paprsky tak, že se všechny setkají v jednom bodě a to způsobí, že pozorovatel vidí zvětšený, převrácený a zdánlivý obraz. [2], [28]

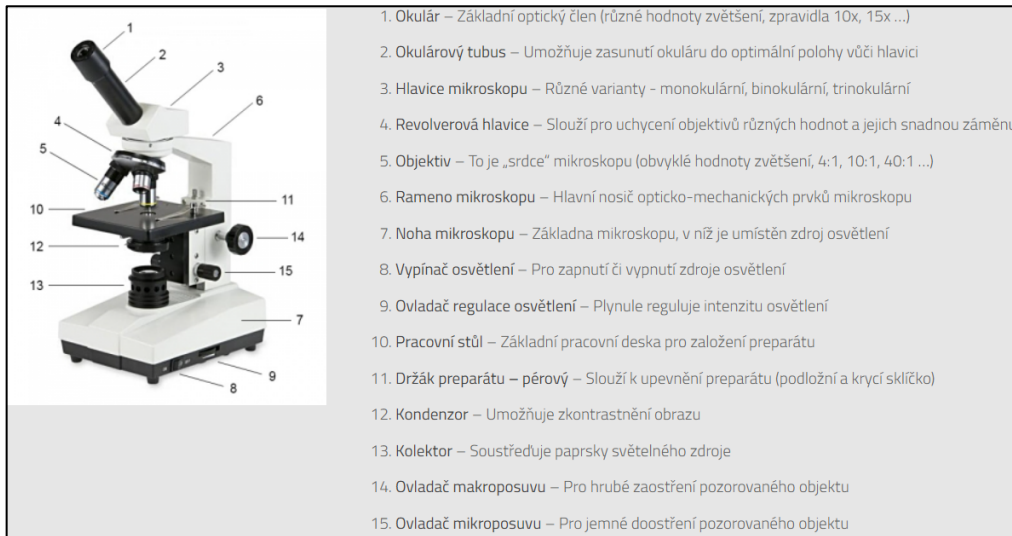


Obrázek 10: Princip zvětšení mikroskopu [30]

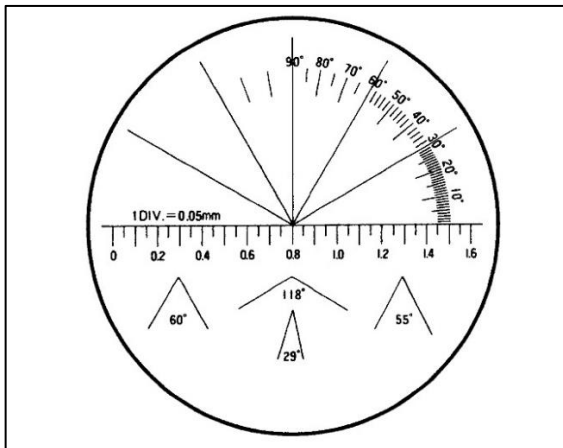
6.2.1 Měřicí metody

U měřicích mikroskopů se používají dvě hlavní metody. První z nich je měření stínovým obrazem, kdy je součást osvětlena svazkem paralelních paprsků, který zamezí paralaxní chybě, a poté můžeme pozorovat stín, který bude mít na základě parametrů a nastavení mikroskopu předem určené charakteristiky, jako je zvětšení. Druhou, přesnější metodou je měření v osovému řezu. U přímkových profilů se zaměřujeme na rysky nožníků, díky kterým získáme přesnější hodnoty než u první zmiňované metody. [28]

6.2.2 Stavba mikroskopu



Obrázek 11: Stavba obecného mikroskopu s popisem částí [31]



Obrázek 12: Měřicí škála pro měřicí mikroskop [32]

6.2.3 Digitální mikroskopy

V současné době se pořád častěji využívají počítačové systémy ve všech oblastech a metrologie není výjimkou. Proto se velmi často využívají také digitální mikroskopy. U nich se pozorovatel nedívá do mikroskopu, ale obraz je přenesen na obrazovku, kde je možné ho dále zpracovávat a také ho uchovávat pomocí fotoaparátů, které bývají často přímo součástí mikroskopu. [33]



Obrázek 13: Digitální měřicí mikroskop [34]

6.3 Parametry

6.3.1 Numerická aparatura

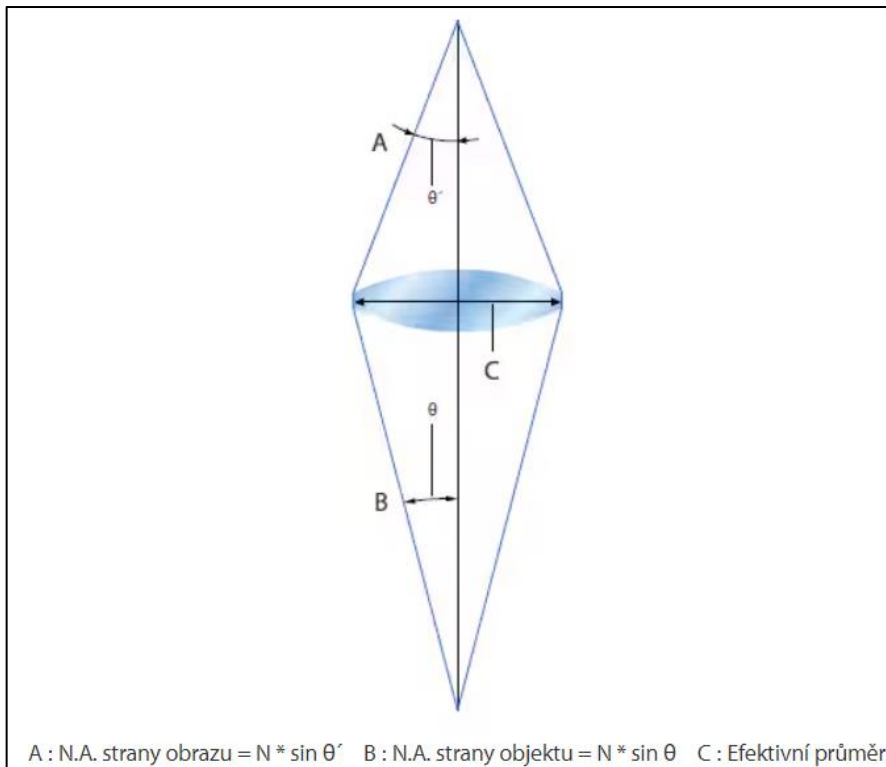
Údaj numerická aparatura (dále jen NA) vyjadřuje hodnotu rozlišovací schopnosti čoček objektivu. Pro měření je lepší mít větší hodnoty NA, jelikož to umožní pozorovat menší detaily. Zároveň objektivy s vyšším NA propustí více světla a tím poskytují i jasnější obraz. Výpočet dle vzorce [29], [39]

$$NA = n \sin \theta$$

kde n ... index lomu prostředí mezi objektivem a vzorkem

θ ... polovina úhlu maximálního kužele světla schopného projít objektivem (viz. obrázek 22)

Ani objektiv s velmi dobrým rozlišením však nedokáže plně zaostřit na jeden bod, protože na to má vliv difrakce světla. Z toho důvodu bude mít bod podobu disku a ten nejmenší, který je možno rozlišit je známý jako Airyho disk. [39]



Obrázek 22: Definice numerické aparatury [39]

6.3.2 Rozlišovací schopnost

Tento parametr úzce souvisí s NA a obrázkem 22. Je to minimální vzdálenost mezi dvěma body a vyjadřuje tak mez rozlišení přístroje. [29]

$$R = \frac{\lambda}{2 \cdot NA}$$

kde λ ... vlnová délka světla; jako referenční hodnota se používá $0,55 \mu\text{m}$

NA ... numerická aparatura

Ve vzorci je použit koeficient $\frac{1}{2}$ dle [29], nicméně v různých zdrojích se používají i jiné koeficienty.

6.3.3 Parfokální vzdálenost

Tato vzdálenost se definuje od povrchu měřeného objektu po polohu upevnění objektivu, při které dochází k nejlepší zaostření obrazu. Pro všechny objektivy na jednom mikroskopu by tato vzdálenost měla být stejná, což umožní změnu objektivu na karuselovém nosiči bez nutnosti nového zaostřování.

6.3.4 Ohnisková vzdálenost

Vzdálenost mezi hlavním bodem a ohniskem objektivu. Pomocí ohniskových vzdáleností jednotlivých čoček mikroskopu také můžeme snad spočítat jeho celkové zvětšení, které je definováno poměrem těchto vzdáleností. [29]

$$\text{Zvětšení} = \frac{f_2}{f_1}$$

kde f_2 ... ohnisková vzdálenost tubusové čočky

f_1 ... ohnisková vzdálenost objektivu

7 Profilprojektory

Též označován jako optický komparátor, jelikož jedním ze způsobů měření je porovnání s šablonami, je jeden z optických měřicích přístrojů. Jeho základní princip se shoduje s měřením pomocí mikroskopů. Zkoumaný objekt je vložen do měřicího prostoru a dále se pomocí zdroje světla prosvítí a jeho obraz se promítne na promítací plochu nebo matnici. Obvyklé zvětšení se pohybuje v rozsahu 10 – 100x, ale v některých speciálních případech je možné dosáhnout zvětšení až 1000x a je nepřímo úměrné velikosti zorného pole. Chyba zvětšení bývá obvykle menší než 1,5 %. Profilprojektor slouží na měření malých objektů nebo kontrolu tvarově složitých součástí. [3], [5], [35]

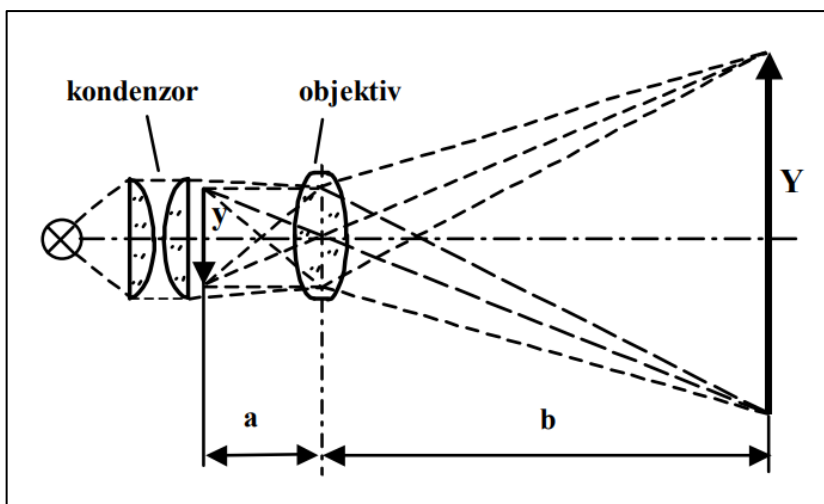
I u tohoto způsobu optického měření je nezpochybnitelnou výhodou bezdotykové měření. To umožňuje zkoumat součásti z měkkých materiálů, jelikož nedochází ke kontaktu a s tím spojenou deformací, která by mohla silně ovlivnit měření především délky. Je také možné zkoumat citlivé součásti, u kterých by vlivem dotyku mohlo dojít k jejich poškození nebo úplnému znehodnocení. Další výhodou je fakt, že není nutné provádět pozorování v okuláru, proto je možné, aby se na procesu měření podílelo více lidí zároveň. Samotné měření nebo kontrola pomocí profilprojektoru může být velmi rychlá, a i přesto, že existuje mnoho přesnějších metod, ve srovnání s jinými měřicími stroji, u kterých je často nutno před zahájením provést časově náročnější přípravu a jsou cenově výrazně náročnější. [3], [5], [35]



Obrázek 14: Profilprojektor [36]

7.1 Princip profilprojektoru

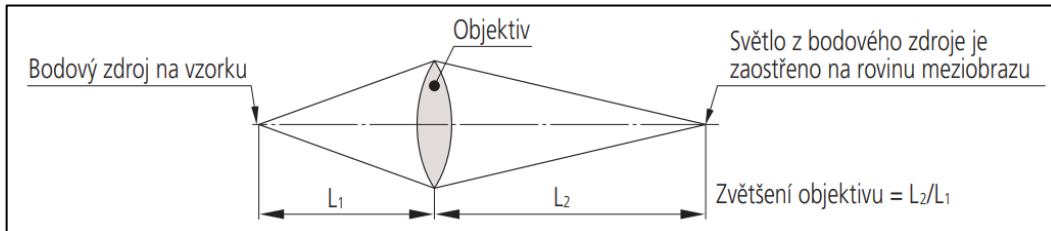
Pro správnou funkci je nutné zajistit osvětlení, které vychází ze zdroje světla. Z důvodu přesného měření a eliminace chyb úhlu je dalším prvkem kondenzor. Tato část je spojná čočka, která z bodového zdroje světla dokáže vytvořit rovnoměrný a rovnoběžný svazek. Světlo dále prochází přes desku, které bývají nejčastěji skleněné, jelikož být musí nejen průhledné, ale také musí mít velkou propustnost světla. Na tuto desku se poté umísťuje měřený předmět. V této fázi vytvoří daný předmět stín, což poté umožní měření. Světelný paprsek dále putuje do další čočky, kterou je objektiv, kde dochází ke změně směru paprsků, které se nakonec promítnou na matnici. [3], [5], [29], [35]



Obrázek 15: Princip profilprojektoru [3]

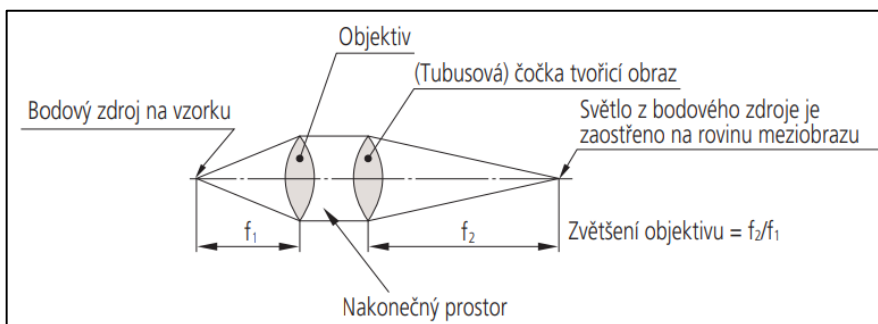
7.1.1 Optický systém

Konečný optický systém vytváří meziobraz v konečné poloze. Světlo ze součásti prochází objektivem ve směru roviny meziobrazu, který se nachází v ohniskové vzdálenosti, a v ní konverguje. [29]



Obrázek 16: Schéma konečného optického systému [29]

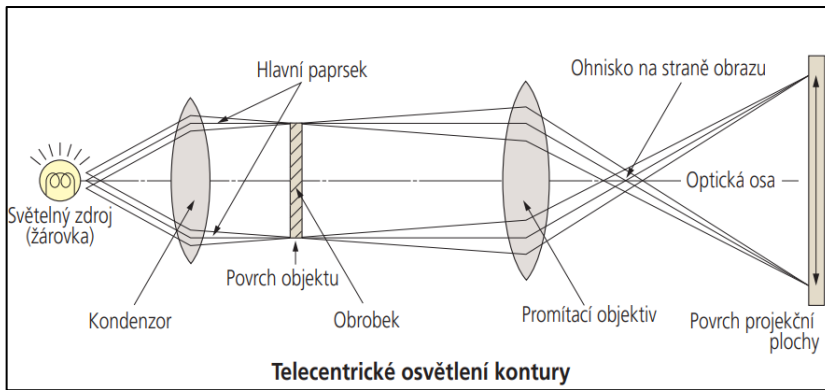
Objektiv v nekonečném optickém systému, na rozdíl od konečného, tvoří obraz v nekonečnu. Pro vytvoření obrazu je nutné použít druhou čočku tvořící obraz, označovanou jako tubusovou. Významný je především fakt, že v oblasti mezi čočkami, které říkáme nekonečný prostor, prochází světlo rovnoběžně, což má velké využití u měřicích přístrojů. Do této oblasti také můžeme vložit pomůcky, které však nebudou mít velký vliv na ostření. [29]



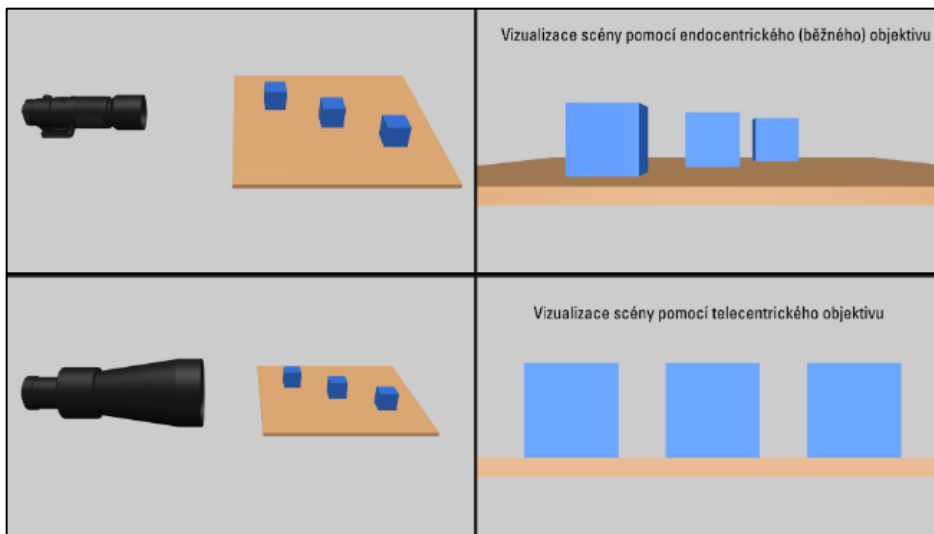
Obrázek 17: Schéma nekonečného optického systému [29]

7.1.2 Telemetrická optika

Tento způsob zaručuje vždy stejnou velikost obrazu bez závislosti na poloze v pracovním prostoru. Vstupní čočka je v tomto případě nastavena na nekonečno, jak bylo popsáno v nekonečném optickém systému. Tímto způsobem se vytváří pravouhlý obraz, též označovaný jako ortogonální, jelikož paprsky prochází rovnoběžně s optickou osou. Další výhodou tohoto optického systému je malá deformace obrazu ve směru ze středu k vnějším okrajům měřeného předmětu. Nevýhodou však je, že v čočce dochází k velkému úbytkům světelnosti, proto je nutné použít dostatečně silný zdroj světla. [5], [29], [37], [38]



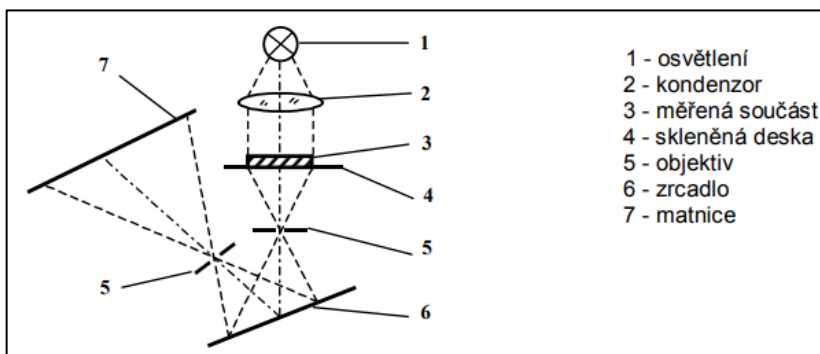
Obrázek 18: Telecentrická optická soustava [29]



Obrázek 19: Porovnání endocentrického a telecentrického objektivu [37]

7.1.3 Diaprojekce

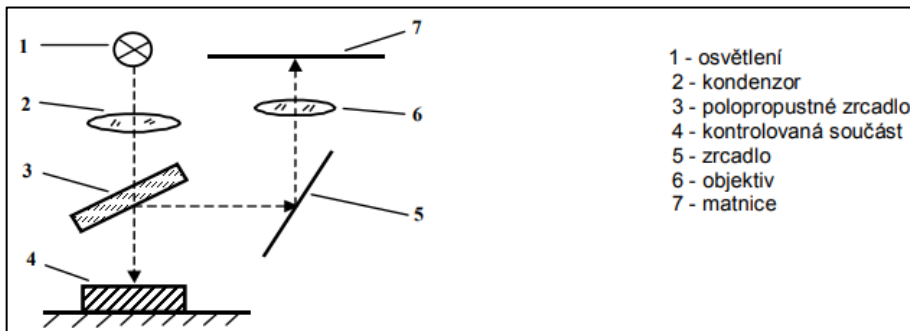
Je to častější ze způsobů promítání u profilprojektorů a jedná se o pozorování s průchozím světlem. V této metodě vychází světelné paprsky ze zdroje do kondenzoru, dále na měřený objekt, poté do objektivu a po jeho průchodu se odrazí od zrcadla a dále se promítnou na matnici. Na ní můžeme pozorovat zvětšený obrys součásti ve formě stínového obrazu. Tato metoda je vhodná primárně pro ploché součásti. Při této metodě je chyba zvětšení obvykle menší než 1 %. [2], [3], [28]



Obrázek 20: Diaprojekce [2]

7.1.4 Epiprojekce

Tohoto typu projekce se využívá méně často ve srovnání s diaprojekcí. V tomto případě je silný zdroj světla na straně objektivu a osvětluje součást. Je nutné, aby zkoumaná plocha dobře odrazela světlo, tudíž by neměla být matná ani tmavá, a zároveň byla kolmo k optické ose. Při využití této metody prochází světelné paprsky nejdříve kondenzorem, poté skrz polopropustné zrcadlo a následně na měřenou součást. Na té se odrazí opačným směrem a díky polopropustnému zrcadlu jsou odkloněny, doputují do objektivu a následně na matnici, kde můžeme provést pozorování. Na rozdíl od stínového obrazu u předešlé metody zde vzniká obraz světlý, kde můžeme vidět povrch. Zde je obvyklá chyba měření menší než 1,5 %. [2], [3], [28]



Obrázek 21: Epiprojekce [2]

Je také možné použít pozorování v kombinovaném světle a v takovém případě uvidíme kvalitně povrch součásti i jeho obrys. [2]

7.2 Parametry

Profilprojektorů existuje celá řada a liší se svou konstrukcí, principem měření nebo také specifikací. Proto je nutné vybrat správný typ pro zamýšlené použití, popřípadě přesnost měření. [29]

7.2.1 Přesnost zvětšení

Zjištění přesnosti zvětšení probíhá formou kalibrace. Pro její zjištění umístíme referenční objekt známé velikosti na desku profilprojektoru. Tímto objektem bývá často skleněné pravítko, které má jemnou stupnici. Po promítnutí obrazu na matnici změříme jeho velikost, respektive vzdálenost jednotlivých rysek stupnice. Tyto experimentálně zjištěné hodnoty porovnáme s teoretickými, jelikož známe charakteristiky stupnice měřeného pravítka a udávané zvětšení. Výpočet provedeme pomocí následujícího vzorce, který vyjadřuje přesnost zvětšení jako procento jmenovitého zvětšení. [29]

$$\Delta M = \frac{L - lM}{lM} \cdot 100 [\%]$$

kde L ... délka promítaného obrazu na matnici

l ... skutečná délka objektu

M ... udávané zvětšení

7.2.2 Průměr zorného pole

Tento parametr je velmi významný z důvodu, že udává maximální velikost zkoumaných objektů v závislosti na zvětšení a průměru matnice. Jedná se tedy o limit, který nejsme schopni překonat, jelikož hodnoty jsou fixní dle specifikací zařízení. [29]

$$\text{průměr zorného pole} = \frac{\text{průměr matnice}}{\text{zvětšení}}$$

7.3 Vybavení

Pro měření na profilprojektoru, je často nutné využít různého vybavení. To nám umožní měřit přesněji, než by tomu bylo bez něho. [5]

7.3.1 Fixační pomůcky

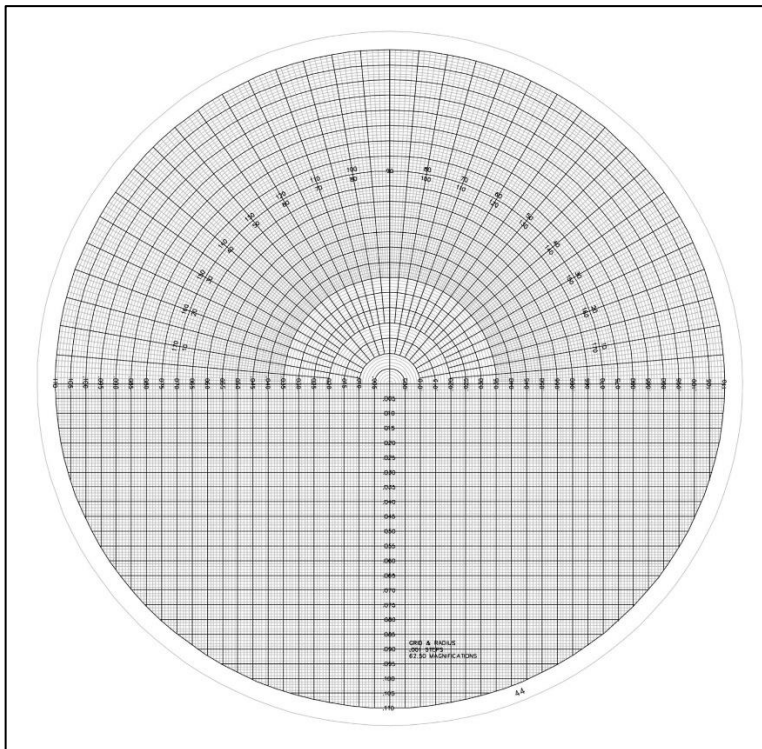
Slouží k upevnění měřené součást v pozici a orientaci, která je pro měření požadovaná. Obvykle se těchto pomůcek využívá pro kulaté součásti, které nejsou stabilní. Dále existuje využití u předmětů, které nemají dokonale rovnou spodní stranu a jejich měření by proto bylo náročné a mohlo by docházet k nepřesnostem, které jsou snadno odstranitelné. [5], [40]



Obrázek 22: Upínací pomůcky [40]

7.3.2 Šablony

Šablony se využívají pro měření pomocí přiložení na promítací plochu porovnávání s velikostí obrazu. Šablona může být přesně navržena pro určité zvětšení a je na ní stupnice reprezentující skutečnou velikost měřené součásti, respektive stupnice na šabloně je zvětšena ve stejném měřítku. Jsou také obecné šablony, kde je nutné jednotky přepočítat v poměru zvětšení. Nejčastěji se využívají šablony s mřížkou nebo soustředným měřítkem, ale existuje i mnoho dalších typů. [5], [41]



Obrázek 22: Šablona [41]

7.3.3 Závora

Využívá se pro zlepšení měření, jelikož brání vniknutí okolního světla na promítací plochu. To zapříčiní, že obraz více vynikne a bude pro obsluhu snazší provést měření nebo pozorování povrchu součásti. [5], [42]



Obrázek 23: Profilprojektor se závorou [42]

7.3.4 Objektivy

Pro různá zvětšení se používají různé objektivy, které mohou být pro snadnější manipulaci přimontovány na jeden karusel. Tento systém je možné vidět i na obrázku 23. [43]

7.3.5 Měřicí jednotka

Tyto přístroje mohou mít řadu funkcí, které vedou k dalšímu usnadnění a zpřesnění. Jejich základní funkce je přesné určení posuvu desky, pomocí které se realizuje měření. Tato data může dále zpracovat a určit tak pozici bodů včetně jejich vzdálenosti, určení úhlu svíraného dvěma úsečkami, popřípadě pomocí série bodů vytvořit aproximaci útvarů jako je například kružnice. Výpočty jsou pro nejlepší přesnost prováděny metodou nejmenších čtverců. Mezi další možnosti využití může patřit výstup naměřených dat do softwarů typu Excel. [28], [44]



Obrázek 24: Měřicí jednotka [44]

7.4 Popis měření

Pro měření požadovaných hodnot existuje několik různých způsobů, které se často liší v mnoha faktorech. První část je však pro všechny metody identická. Před měřením by mělo dojít k analýze součásti a navržení správného postupu pro dosažení požadovaných výsledků. Profilprojektory mají různé charakteristiky, způsoby měření a na některých je možné i zvolit způsob osvětlení nebo zvětšení. Po zvolení vhodného přístroje nastává kontrola a případná kalibrace, kterou se pokusíme eliminovat nepřesnosti. Poté je třeba vložit předmět do pracovního prostoru a provést zaostření. [29], [45]

7.4.1 Měření pomocí šablony

Jeden ze starších způsobů měření je pomocí šablony, která se příkládá na matnici. Častěji se používají šablony s nominálními hodnotami na stupnici, které přímo ukazují skutečné údaje o velikosti součásti. Je proto nezbytné použít správnou šablonu, jelikož každá z nich je navržena pro konkrétní zvětšení. Použití chybné šablony by samozřejmě přineslo chybné výsledky, které by se klasifikovaly jako systematická chyba, na kterou by však bylo možné vytvořit korekci. Tímto způsobem se dají měřit údaje jako délka nebo úhly pomocí různých typů šablon, které jsou navrženy na měření konkrétní veličiny. [5], [41]

7.4.2 Měření posuvným stolem

Jedná se o modernější a přesnější metodu měření, zejména při využití připojené měřicí jednotky. Základním principem je posun stolu, který je měřen a z těchto údajů jsou následně vypočteny hodnoty. V případě měření vzdálenosti využijeme nitkového kříže, který nejdříve umístíme do počátku měřené délky, následně provedeme posuv do druhého konce a odečteme hodnoty. V případě využití měřicí jednotky, která je v dnešní době velmi častá, je měření jednodušší, jelikož po zadefinování počátku a provedení posunu získáme na obrazovce přímo hledané hodnoty. Obdobně funguje hledání i jiných hodnot, jako mohou být úhly. Tentokrát je výhodné použít rysku nitkového kříže, kterou umístíme na jednu z hran a následně provedeme otočení, po kterém získáme hodnotu úhlu. Jak již bylo zmíněno v 7.3.5, lze pomocí měřicí jednotky snadno a přesně získat i rozměry kruhových součástí. To je provedeno pomocí definice několika bodů na obvodu, které jsou následně metodou nejmenších čtverců aproximovány kružnicí. [5], [28], [45]

7.5 Chyby měření

Nejvýznamnějšími faktory ovlivňující přesnost měření jsou chyby vzniklé při měření a chyba zvětšení. Samotné měření provádí člověk, který musí přesně provádět posuv, popřípadě odečítat z šablony, a nastavovat střed nitkového kříže nebo jeho rysky do pozice, ze které má být provedeno měření. To znamená, že přesnost tohoto měření je přímo závislá na obsluze, která úkon provádí. Tuto nepřesnost je možné částečně redukovat použitím hranového senzoru, který obvykle schopen najít hranu s větší přesností než obsluha. Také může dojít ke zkreslení způsobenému nepřesným umístěním, a to zejména u zaoblených součástí, které nebudou mít rovinu přesně paralelně s rovinou profilprojektoru. Kvůli tomuto úhlu poté vzniká i délková chyba. V neposlední řadě vznikají odchylky způsobené zařízením samotným. Čočky jsou

vyrobeny určitou nepřesností, proto dochází k různému zvětšení ve středu obrazu a na jeho okraji. [29], [35], [46]

Tabulka 2: Chyby měření profilprojektoru dle standardu JIS B 7184:1999 [46]

Characteristic	Metric (μm)
Length accuracy (X & Y axis)	$\pm (6 + 0.04L) \mu\text{m}$
Magnification accuracy (transmitted/contour illumination)	$\pm 0.15\%$ or $\pm 1.5L \mu\text{m}$
Magnification accuracy (reflected/surface illumination)	$\pm 0.25\%$ or $\pm 2.5L \mu\text{m}$
Squareness accuracy (X-Y axes)	$\pm (4.5 + 0.06L) \mu\text{m}$

Kde L značí měřenou délku.

8 Digitální profilprojektor

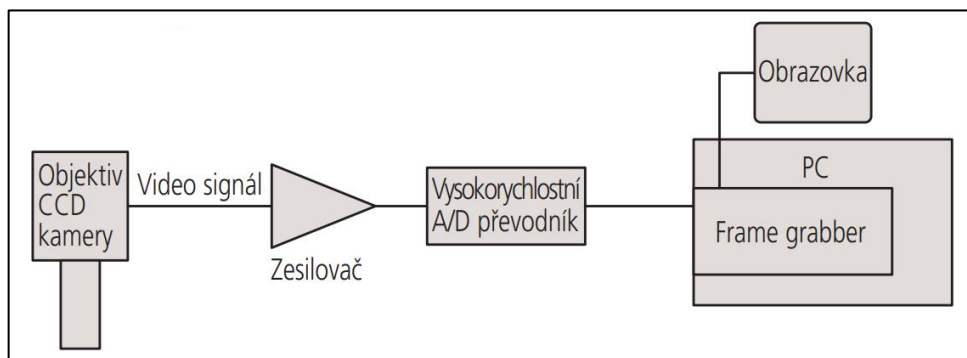
Modernější verze jsou digitální profilprojektory. Jejich primární účel je stejný, a to zobrazit měřený předmět se zvětšením a následně na něm provést měření, nicméně fungování je diametrálně odlišné. U digitálních verzí se nepoužívá optická soustava, kterou by se obraz promítal. Místo toho se využívá kamery a následného převedení do digitálních dat, která se pomocí softwarů dále zpracovávají v počítači, což otevírá velké množství nových možností, jelikož existuje velké množství způsobů zpracování digitálních dat. [33], [47]



Obrázek 25: Digitální profilprojektor Zeiss [48]

8.1 Princip digitálního profilprojektoru

Základním prvkem je CCD (z anglických slov charge-coupled device) senzor, který snímá obraz pomocí přeměny fotonů na elektory, tudíž každý pixel je snímán ve formě elektrického náboje, jehož velikost přímo souvisí s intenzitou světla. I metoda snímání se však postupem času modernizuje a v dnešní době se používají i jiné metody, jako jsou CMOS senzory. Signál dále putuje do zesilovače a převodníku, který vytvoří data pro počítač, ve kterém se dále zpracovávají. [47], [49]



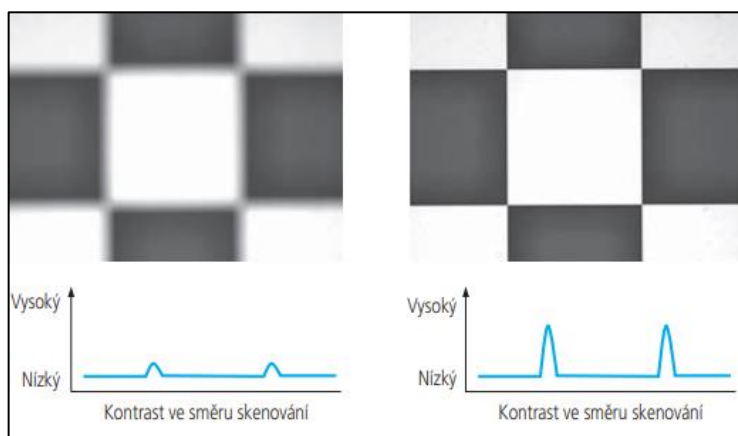
Obrázek 25: Schéma digitálního profilprojektoru [29]

8.2 Funkce

Digitální verze má oproti té tradiční několik dalších funkcí a možností pro podporu měření. Mezi ně patří například automatizace procesu, kdy software je sám schopný rozpoznat části zkoumaného objektu a pracovat s nimi, jako je porovnání s výkresem. Dále možnost pomocí adaptivního osvětlení pracovat s 3D objektem nebo redukovat lidské chyby a tím zpřesnit měření. [47]

8.2.1 Zpracování obrazu

Software po zpracování sám umí zaostřit obraz. To se provádí pomocí analýzy kontrastu, která se mění v čase s pohybující se kamerou v ose z. Výstup tohoto grafu jasně určuje rozostřená místa, kde je nízký kontrast, a ta zaostřená, kde je kontrast na své maximální hodnotě. Tohoto principu se dá také využít pro měření v ose z a tím i zjištění výšky vzorku. [29]

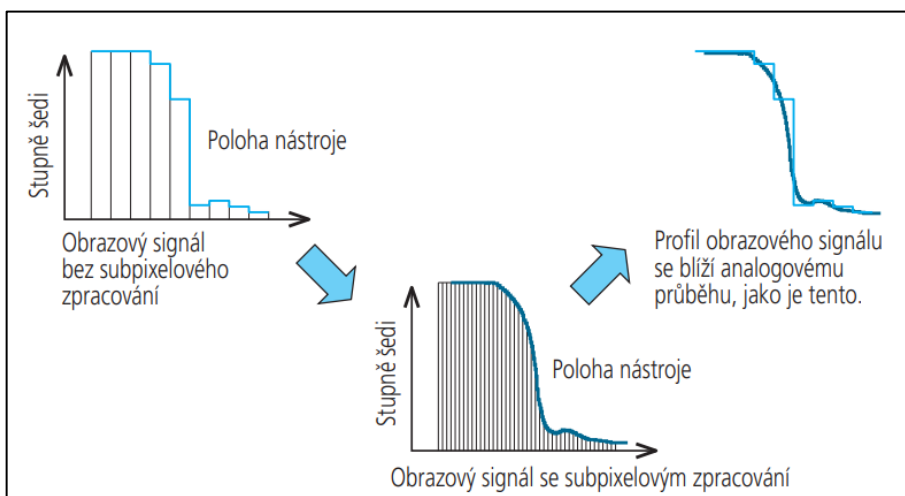


Obrázek 26: Princip automatické ostření [29]

V případě správně zaostřeného obrazu, je dále možné použít program pro automatickou detekci hran. Metoda obecně funguje na principu hledání přechodu mezi světle a stínem, která se určuje pomocí intenzity světla v jednotlivých pixelech. Pomocí změn hodnot je poté možné detekovat přesnou polohu hran v mnohem větší přesnosti, než kterou by byl schopný udělat člověk. Posléze je možné díky hranám rozpoznat a označit celé vzory. [29]

8.2.2 Odstíny šedi

Každý obraz se počítači ukládá ve formě pixelů, kterým je přiřazena určitá hodnota podle stupně šedi. Víceúrovňové stupnice pak znamenají vyšší kvalitu obrazu, kterou lze využít pro lepší vykreslení a detekci hran, což umožňuje měřit s větší přesností, než jsou samotné pixely. Samotné vykreslení pak probíhá pomocí interpolace grafu závislosti stupně šedi na pozici křivkou, která má plynulejší přechod a jedná se tak o subpixelové zpracování obrazu. [29], [51]



Obrázek 27: Subpixelové zpracování [29]

8.2.3 Měření větších součástí

Některé součásti jsou větší než zorné pole, proto je nutné provést jejich snímání postupně, které se realizuje posunutím stolu a přesně definovanými referenčními body. Díky detekci hrany v referenčních bodech je touto metodou možné měřit geometrické tvary, které se nevejdou do zorného pole celé. [29]

9 Praktická část

9.1 Postup měření

9.1.1 Příprava měření

Nejdříve provedeme kontrolu profilprojektoru a před zahájením měření se ujistíme, že jsou všechny optické plochy čisté. Nečistoty, prach nebo otisky prstů, které by mohly ovlivnit kvalitu měření. Dále zapneme zařízení a provedeme potřebné úkony dle instrukcí výrobce.

9.1.2 Nastavení zvětšení

Pro měření zvolíme správné zvětšení, které bude největší možné, pro následující měření tak, aby byla promítnutí součásti co největší, ale zároveň je nutné dbát omezení promítací plochy.

9.1.3 Ověření přesnosti měření

Jako první část praktické části bude ověření přesnosti profilprojektorů, kterou provedeme pomocí koncových měrek, které musí být před použitím očištěny, jelikož prach na jejich povrchu může způsobit méně přesné odečítání hodnot.

9.1.4 Popis měření

Měření díl vložíme na stůl a jeho výšku nastavíme tak, aby byla výsledná projekce co nejlépe zaostřena, což umožní odečítání hodnot. Dále pomocí ovládání posuvu stolu posunujeme v osách X a Y tak, aby byl měřený objekt promítnut do ideální polohy (obvykle střed matnice).

Porovnání přesnosti měření

Pro měření využijeme měřících senzorů. Využijeme hranový senzor. Měřený objekt vložíme tak, aby bylo pro měření délky posunovat pouze v jedné z os, jelikož to usnadní měření, což statisticky vede ke snížení chybovosti. Pomocí ovládání polohy stolu najedeme na jeden z konců měřené délky, kde nastavíme počátek souřadného systému. V případě, že toto není možné je nutné si zapsat aktuální souřadnice polohy a vzdálenost vypočítat jako rozdíl obou souřadnic. Dále použijeme posuv v jedné ose a najedeme na druhý konec měřené délky. Zde odečteme hodnoty délky.

Jako druhou metodu využijeme profilprojektor bez digitálních součástí, na kterém je třeba objekt nejdříve zaostřit, dále pomocí promítnutí na matnici zjistit souřadnice dvou bodů a pro jejich vzdálenost je nutné udělat rozdíl poloh, jelikož není možnost nulování.

Určení stability procesu

V poslední části je cílem určit stabilitu procesu, pro kterou využijeme zdigitalizovaný profilprojektor, jelikož má vyšší přesnost a pro měření daných součástí by měl být dostatečný. Dále určíme indexy způsobnosti a diagramy stability, na základě kterých můžeme určit zda je nebo není nutné provést úpravy před zahájením výroby.

9.2 Měřicí aparatura

9.2.1 Zdigitalizovaný profilprojektor MP320

Tento profilprojektor má souřadnice zobrazené v digitální podobě s možností jejich nulování a proto není nutné pro získání délky počítat rozdíl dvou souřadnic.

Základní údaje:

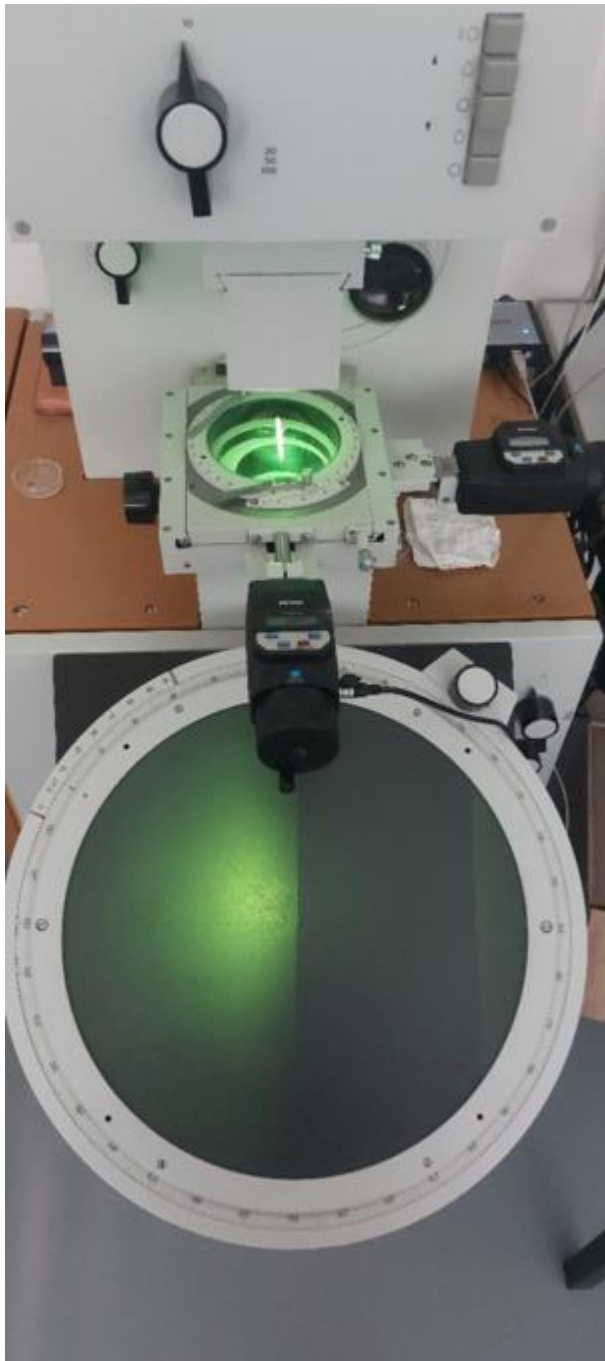
Zvětšení	10x, 20x, 50x, 100x
Průměr projekční plochy	320mm
Rozsah měření otočné matné desky	0 ...360°
Stupnicová hodnota stupňové stupnice	1°
Rozsah vertikálního seřízení stolu objektu	60mm
Kluzný stůl-průměr	160mm
Stolní skleněná deska –průměr	80mm

Rozměry přístroje:

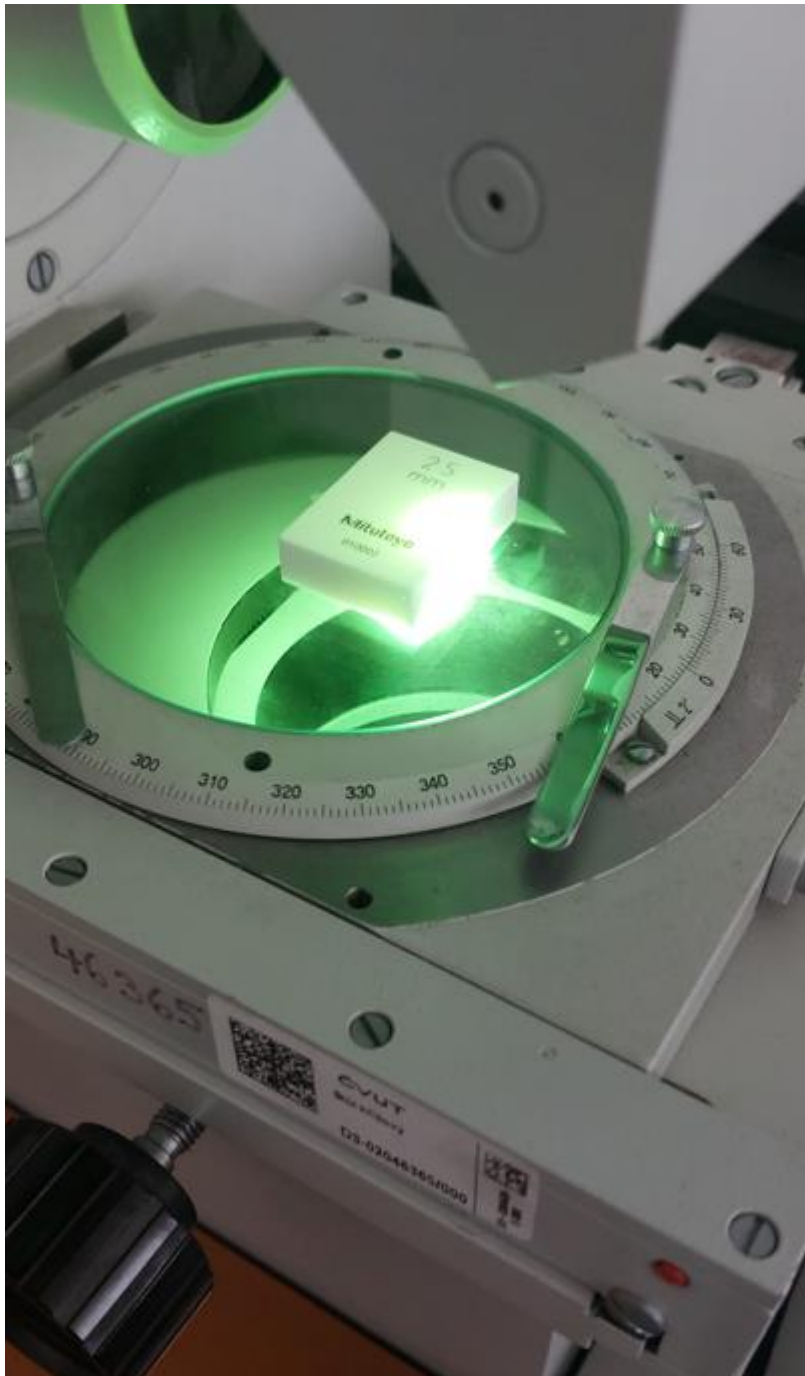
Šířka	900mm
Hloubka	1100mm
Výška	1500mm
Hmotnost	cca 250 kg

Výrobce: CARL Zeiss, Německo

Obrázek 28: Specifikace profilprojektoru MP320



Obrázek 29: Profilprojektor MP320



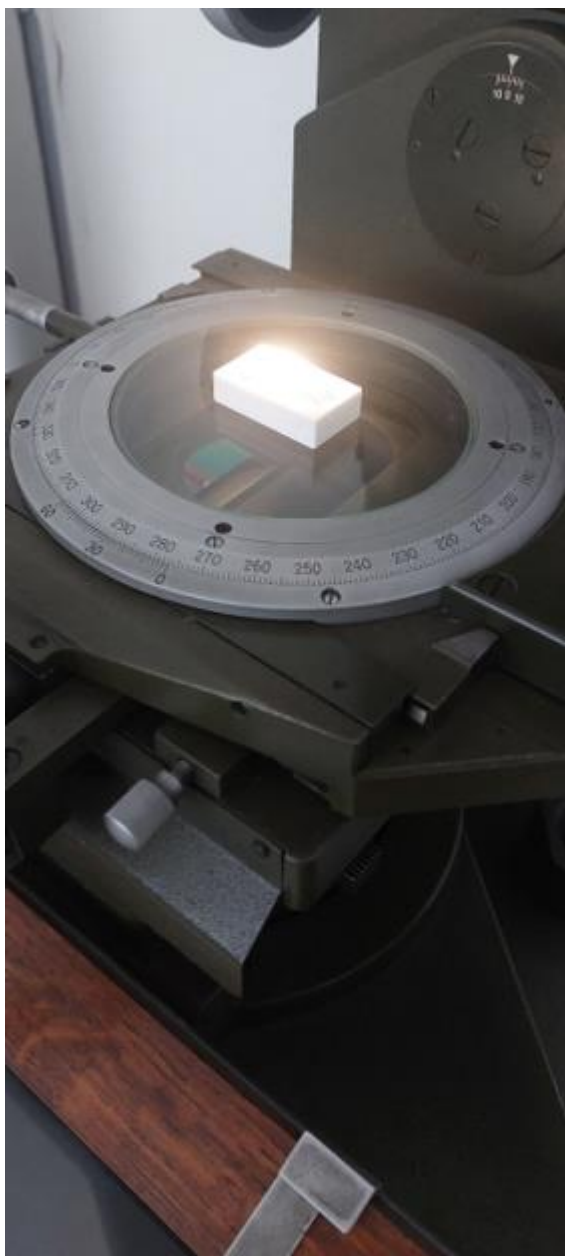
Obrázek 30: Profilprojektor MP320 s koncovou měrkou

9.2.2 Profilprojektor 320

Jedná se o měření pomocí analogového měřítka. Výsledný rozměr je získán pomocí odečtu dvou hodnot na mikrometrickém šroubu a jejich rozdílu.



Obrázek 30: Profilprojektor 320



Obrázek 30: Profilprojektor 320 s koncovou měrkou

9.2.3 Koncové měrky Mitutoyo

K měření jsem využil keramické koncové měrky Mitutoyo určené k měření mikrometrických šroubů. Tento typ měrek má vysokou teplotní stabilitu, proto dochází k minimalizování nepřesností vlivem teplotní roztažnosti.



Obrázek 31: Typ koncových měrek



Obrázek 32: Koncové měrky

9.3 Ověření přesnosti profilprojektorů

Pro ověření přesnosti byly použity koncové měrky. Každá z nich byla změřena 12x. Polovina měření v ose x a druhá polovina v ose y z důvodu, že dochází k posunu pomocí dvou šroubů a je nutné ověřit přesnost obou.

9.3.1 Ověření přesnosti profilprojektoru MP320

Pro ověření přesnosti měření bylo využito 10 různých koncových měrek, kde každá z nich byla změřena 6x pro obě osy. U tohoto typu přístroje je velkou výhodou digitální zobrazení souřadnic, které je také možno vynulovat, proto není nutné každou hodnotu dopočítávat, což zároveň umožňuje okamžitou kontrolu hodnoty a tím případně i identifikaci hrubé chyby. Jako optimální se ukázalo nastavení zvětšení 50x.

Pro správné měření změřeno bylo nutné hranou senzoru najet přesně k okraji koncové měrky a zároveň využít otočného stolu, aby se obě části překrývaly a nedošlo k chybě. Dále bylo nutné otřít prach z měřicího stolu i koncových měrek. V případě většího množství prachu nebyla vidět ostrá hran, a proto nebylo možné přesně odečíst hodnoty.

Tabulka 3: Hodnoty pro ověření přesnosti profilprojektoru MP320

Číslo měření	2,5	5,1	7,7	10,3	12,9	15	17,6	20,2	22,8	25
Měření v ose x číslo 1	2,505	5,105	7,708	10,304	12,899	15,002	17,606	20,199	22,805	25,020
Měření v ose x číslo 2	2,506	5,105	7,700	10,302	12,887	15,000	17,601	20,202	22,806	25,016
Měření v ose x číslo 3	2,500	5,103	7,707	10,299	12,902	14,996	17,603	20,204	22,801	25,013
Měření v ose x číslo 4	2,502	5,098	7,709	10,301	12,903	15,004	17,598	20,202	22,796	25,006
Měření v ose x číslo 5	2,499	5,102	7,696	10,302	12,901	14,996	17,596	20,197	22,799	25,010
Měření v ose x číslo 6	2,499	5,103	7,701	10,298	12,900	14,999	17,601	20,201	22,802	25,009
Měření v ose y 1	2,497	5,098	7,701	10,305	12,901	15,004	17,605	20,197	22,802	24,999
Měření v ose y 2	2,498	5,100	7,699	10,297	12,899	15,001	17,596	20,199	22,797	25,001
Měření v ose y 3	2,501	5,101	7,703	10,301	12,905	15,005	17,600	20,203	22,804	25,005
Měření v ose y 4	2,497	5,102	7,699	10,296	12,904	14,997	17,604	20,203	22,803	25,003
Měření v ose y 5	2,503	5,098	7,702	10,299	12,897	15,003	17,597	20,198	22,799	24,996
Měření v ose y 6	2,500	5,097	7,697	10,304	12,899	14,998	17,602	20,196	22,802	24,998
Střední hodnota x [mm]	2,5018	5,1027	7,7035	10,3010	12,8987	14,9995	17,6008	20,2008	22,8015	25,0123
Směrodatná odchylka x [mm]	0,0028	0,0024	0,0048	0,0020	0,0054	0,0029	0,0032	0,0023	0,0034	0,0046
Střední hodnota y [mm]	2,4993	5,0993	7,7002	10,3003	12,9008	15,0013	17,6007	20,1993	22,8012	25,0003
Směrodatná odchylka y [mm]	0,0022	0,0018	0,0020	0,0033	0,0029	0,0030	0,0033	0,0027	0,0024	0,0030
Celková střední hodnota x [mm]	2,5006	5,1010	7,7018	10,3007	12,8998	15,0004	17,6008	20,2001	22,8013	25,0063
Celková střední hodnota y [mm]	0,0028	0,0027	0,0040	0,0028	0,0044	0,0031	0,0033	0,0026	0,0030	0,0072

V tabulce 3 byly dále dopočítány střední hodnoty a směrodatné odchylky pro obě osy a také celková střední hodnota a směrodatná odchylka pro všechny naměřené hodnoty. Z vypočítaných hodnot jasně vyplývá, že pro všechna provedená měření je skutečná hodnota v rozmezí naměřených hodnot a jejich směrodatných odchylek. Zároveň se osa zdá být přesnější, jelikož střední hodnoty jsou blíže k hodnotě měrky a zároveň jsou směrodatné odchylky menší než u osy y než u osy x.

9.3.2 Ověření přesnosti profilprojektoru 320

V tomto případě byla zvolena stejná metodika a to měření 10 různých koncových měrek 6x pro každou osu, aby bylo možné určit přesnost jednotlivých posuvů. Použité zvětšení na tomto zařízení bylo 20x. I zde bylo před měřením nutno pečlivě zbavit všechny části nečistot pro zlepšení odečtu hodnot. Posuvné šrouby na tomto zařízení nebylo možné vynulovat, proto bylo nutné odečíst hodnoty souřadnic po obou koncích a vypočítat jejich rozdíl. Zároveň šrouby měly přesnost pouze v řádu setin milimetru, proto jsou hodnoty tisícín milimetru pouze odhad, který není možné udělat přesně.

Tabulka 4: Hodnoty pro ověření přesnosti profilprojektoru 320

Číslo měření	2,5	5,1	7,7	10,3	12,9	15	17,6	20,2	22,8	25
Měření v ose x číslo 1	2,490	5,104	7,680	10,304	12,900	15,015	17,608	20,175	22,814	25,010
Měření v ose x číslo 2	2,509	5,110	7,677	10,312	12,883	15,002	17,593	20,205	22,826	24,991
Měření v ose x číslo 3	2,510	5,092	7,685	10,305	12,880	14,991	17,578	20,215	22,797	25,140
Měření v ose x číslo 4	2,490	5,095	7,705	10,308	12,895	15,021	17,616	20,198	22,781	25,090
Měření v ose x číslo 5	2,487	5,110	7,712	10,295	12,908	15,016	17,587	20,186	22,812	24,986
Měření v ose x číslo 6	2,500	5,115	7,719	10,310	12,915	14,993	17,595	20,227	22,805	25,016
Měření v ose y 1	2,502	5,092	7,708	10,290	12,910	15,011	17,610	20,210	22,841	24,976
Měření v ose y 2	2,493	5,105	7,714	10,385	12,894	14,990	17,588	20,197	22,815	25,031
Měření v ose y 3	2,492	5,094	7,710	10,310	12,892	14,996	17,602	20,210	22,777	25,005
Měření v ose y 4	2,493	5,102	7,688	10,290	12,908	15,004	17,613	20,217	22,768	25,014
Měření v ose y 5	2,580	5,116	7,705	10,315	12,915	15,016	17,579	20,196	22,823	25,023
Měření v ose y 6	2,505	5,105	7,695	10,290	12,910	14,997	17,612	20,184	22,796	24,977
Střední hodnota x [mm]	2,4977	5,1043	7,6963	10,3057	12,8968	15,0063	17,5962	20,2010	22,8058	25,0388
Směrodatná odchylka x [mm]	0,0093	0,0083	0,0163	0,0055	0,0125	0,0117	0,0126	0,0173	0,0142	0,0567
Střední hodnota y [mm]	2,5108	5,1023	7,7033	10,3133	12,9048	15,0023	17,6007	20,2023	22,8033	25,0043
Směrodatná odchylka y [mm]	0,0313	0,0079	0,0090	0,0336	0,0086	0,0090	0,0129	0,0111	0,0256	0,0212
Celková střední hodnota x [mm]	2,5043	5,1033	7,6998	10,3095	12,9008	15,0043	17,5984	20,2017	22,8046	25,0216
Celková střední hodnota y [mm]	0,0240	0,0082	0,0137	0,0244	0,0115	0,0106	0,0130	0,0146	0,0207	0,0462

Z hodnot v tabulce 4 je na prvního pohled patrné, že přesnost měření je nižší než v předchozím případě, jelikož jsou směrodatné odchylky (až na výjimky) v řádu setin mm, na rozdíl od řádu tisícín mm. Pro hodnotu měřky 10,3 mm byla naměřena hodnoty $10,3057 \pm 0,0055$, což neodpovídá skutečné hodnotě.

Během měření bylo možné si povšimnout několika důvodů, proč by toto zařízení mohlo být méně přesné než první zmíněný model. A to zejména vůle posuvových šroubů, která způsobovala odchylky měření. Neefektivnější metodou eliminace této chyby je provádět posun pomalu a také provádět posun pouze v jednom směru. Další nevýhodou byla samotná velikost risky, která byla mnohem větší, a proto bylo mnohem obtížnější ji přesně nastavit na hranu měřky, což společně s faktem, že šroub měl jednotky pouze v setinách a tisíciny bylo nutné odhadovat, způsobovalo nepřesnosti.

9.4 Hodnocení stability procesu

Pro praktickou aplikaci ve výrobě bude měření na profilprojektorech využito k určení stability procesu, které má významnou úlohu pro přesnou a kvalitní výrobu. Pro určení indexů způsobilosti a regulačních diagramů byly naměřeny hodnoty v tabulce 5. Jednalo se o válečky, na kterých byl měřen průměr a pro zvýšení přesnosti byla měřena hodnota v ose x a následně i v ose y a z nich střední hodnota. Pro lepší přesnost byl využit profilprojektor MP320, jelikož bylo také nutné vzhledem k toleranci rozměru měřit s vysokou přesností v řádu tisícín mm.

Tolerance součásti:

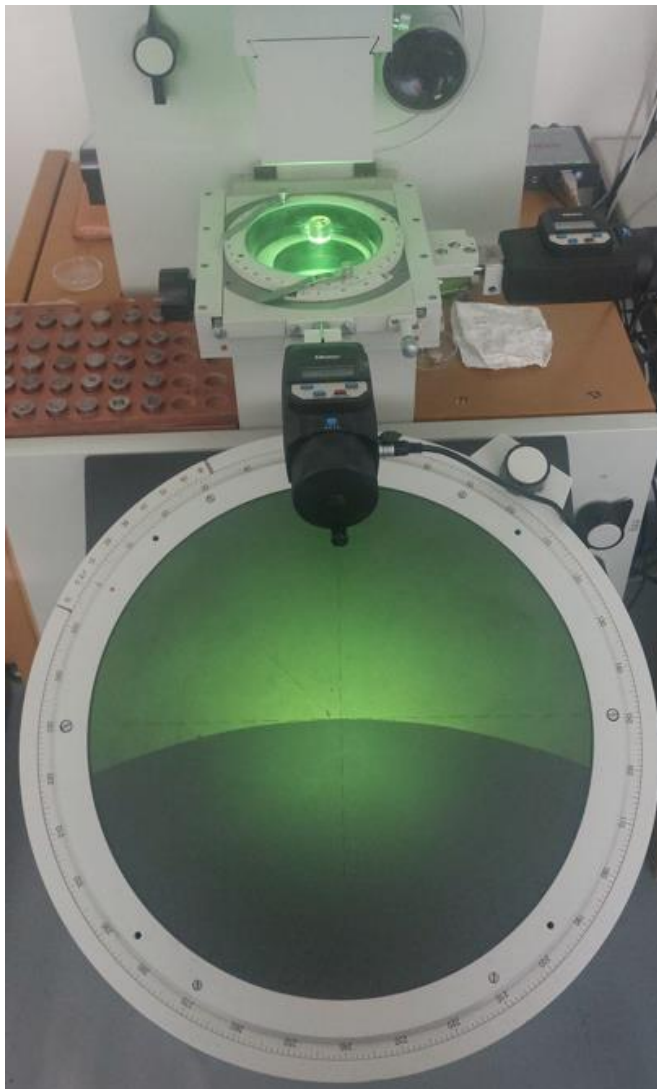
Ø16 k9

což odpovídá $\text{Ø}16_{-0,0}^{+0,043}$

Tabulka 5: Hodnoty pro určení stability procesu

Měření/výběr		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	x	15,929	16,018	16,001	16,000	16,005	16,024	16,029	16,018	16,021	16,027
	y	15,924	16,012	16,005	16,011	16,001	16,019	16,021	16,017	16,019	16,027
	střední hodnota	15,927	16,015	16,003	16,006	16,003	16,022	16,025	16,018	16,020	16,027
2	x	16,028	15,925	15,999	16,022	16,015	16,027	16,001	16,015	16,009	16,015
	y	16,012	15,912	15,996	16,011	16,019	16,018	16,005	16,009	16,011	16,022
	střední hodnota	16,020	15,919	15,998	16,017	16,017	16,023	16,003	16,012	16,010	16,019
3	x	16,011	16,021	16,018	16,009	16,026	16,042	16,025	16,005	16,023	16,009
	y	16,013	16,034	16,011	16,001	16,023	16,034	16,180	16,009	16,018	16,014
	střední hodnota	16,012	16,028	16,015	16,005	16,025	16,038	16,103	16,007	16,021	16,012
4	x	16,025	16,032	15,975	16,022	16,018	16,015	16,009	16,012	16,028	16,007
	y	16,007	16,025	15,981	16,016	16,019	16,021	16,007	16,020	16,031	16,011
	střední hodnota	16,016	16,029	15,978	16,019	16,019	16,018	16,008	16,016	16,030	16,009
5	x	16,018	16,021	16,007	16,013	16,006	16,011	16,010	16,031	16,004	16,023
	y	16,008	16,030	16,004	16,017	16,014	16,016	16,014	16,034	16,009	16,012
	střední hodnota	16,013	16,026	16,006	16,015	16,010	16,014	16,012	16,033	16,007	16,018
Střední hodnota měření		15,9975	16,0030	15,9997	16,0122	16,0146	16,0227	16,0301	16,0170	16,0173	16,0167
Rozpětí		0,093	0,110	0,036	0,014	0,021	0,024	0,099	0,026	0,023	0,018
Směrodatná odchylka		0,0356	0,0425	0,0122	0,0058	0,0074	0,0083	0,0369	0,0086	0,0082	0,0063

Rozpětí R bylo v tabulce vypočteno jako rozdíl nejvyšší a nejnižší hodnoty.



Obrázek 33: Měření válečku

V tabulce jsou červeně vyznačeny hodnoty, které nesplňují hodnotu zadané tolerance $\varnothing 16_{-0,0}^{+0,043}$. Nejbližší hodnoty k $\varnothing 16_{-0,0}^{+0,043}$ jsou z předchozí části ověření přesnosti 15 mm 17,6 mm, které vyšla $15,0004 \pm 0,0031$ mm a $17,6009 \pm 0,0033$ mm. Z toho vyplývá, že 1 z hodnot ($\varnothing 15,998$), která vyšla mimo zadané tolerance, nesplňuje zadanou toleranci z výroby o menší hodnotu, než je směrodatná odchylka měření, tudíž by při použití přesnějšího měřidla mohla vyhovovat. Zbylé tři hodnoty nesplňují toleranci ani po přičtení směrodatné odchylky, proto můžeme prohlásit, že zadané tolerance nesplňují.

Potřebné hodnoty pro další výpočty

$$\text{Průměrná hodnota rozpětí } R = \frac{\sum_{i=1}^n Ri}{n} = 0,047 \text{ mm}$$

$$\text{Průměrná hodnota velikosti } \varnothing D = \frac{\sum_{i=1}^n \varnothing Di}{n} = 16,013 \text{ mm}$$

$$USL = 16,043 \text{ mm}$$

$$LSL = 16,000 \text{ mm}$$

$$A_2 = 0,577$$

$$D_3 = 0$$

$$D_4 = 2,114$$

Diagram pro střední hodnotu \bar{x}

Střední přímka $CL_{\bar{x}}$ (central line)

$$CL_{\bar{x}} = \bar{\bar{X}} = 16,013$$

Horní regulační mez $UCL_{\bar{x}}$ (upper control limit)

$$UCL_{\bar{x}} = \bar{\bar{X}} + A_2 \cdot \bar{R} = 16,013 + 0,577 \cdot 0,047 = 16,040$$

Dolní regulační mez $LCL_{\bar{x}}$ (lower control limit)

$$LCL_{\bar{x}} = \bar{\bar{X}} - A_2 \cdot \bar{R} = 15,986$$

Diagram pro měnlivost \bar{R}

Střední přímka CL_R (central line)

$$CL_R = \bar{R} = 0,047$$

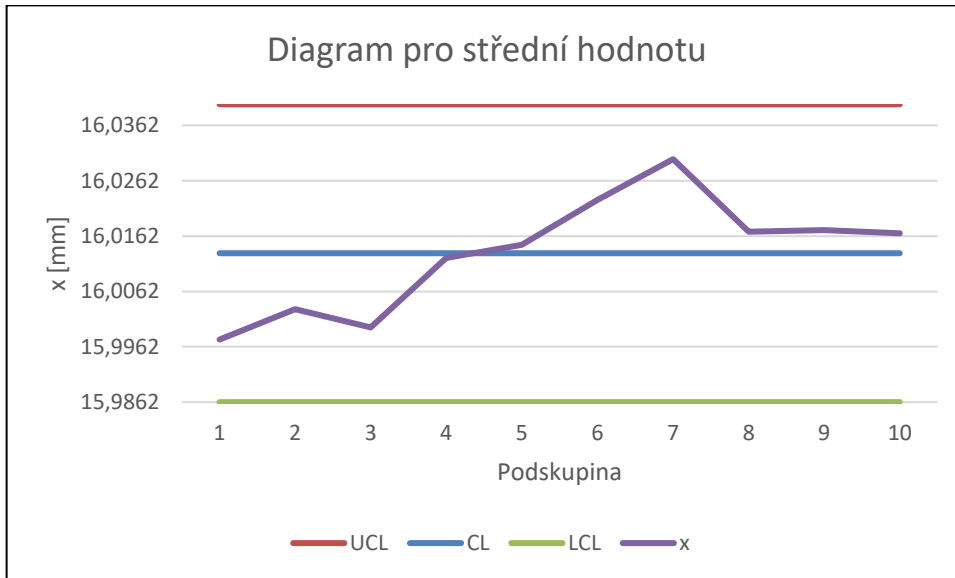
Horní regulační mez UCL_R (upper control limit)

$$UCL_R = D_4 \cdot \bar{R} = 2,114 \cdot 0,047 = 0,098$$

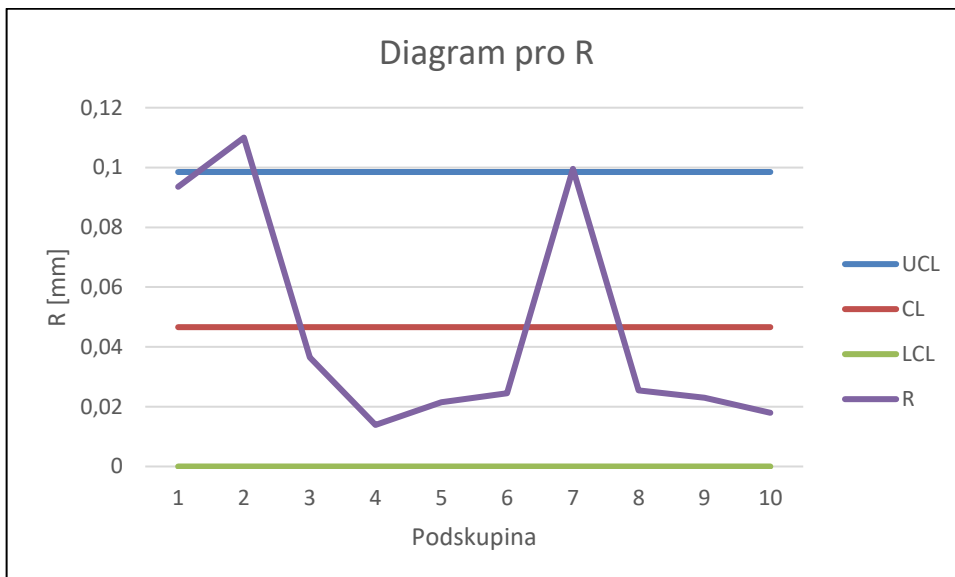
Dolní regulační mez LCL_R (lower control limit)

$$LCL_R = D_3 \cdot \bar{R} = 0 \cdot 0,047 = 0$$

Graf 1: Diagram pro střední hodnotu x



Graf 2: Diagram pro R



Výpočet C_p

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} = \frac{16,043 - 16,000}{6 \cdot 0,0172} = 0,417$$

Hodnota C_p vyšla $C_p=0,417$, což nesplňuje podmínku $C_p > 1,33$.

Výpočet C_{pk}

$$C_{pk} = \min\left(\frac{USL - \bar{x}}{3\sigma}; \frac{\bar{x} - LSL}{3\sigma}\right) = \min\left(\frac{16,043 - 16,013}{3 \cdot 0,0172}; \frac{16,013 - 16,000}{3 \cdot 0,0172}\right) = \min(0,582; 0,252) = 0,252$$

Hodnota C_{pk} vyšla $C_{pk} = 0,252$, což nesplňuje podmínku $C_{pk} > 1$.

Ani jeden z indexů nesplnil požadované podmínky. Zároveň 4 měřené součásti nesplňují požadované tolerance. Z toho plyne, že proces není způsobilý a je nutné provést úpravy před zahájením výroby.

10 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo provést rešerši v oblasti profilprojektorů a s tím související zpracování výsledků. Seznámil jsem se s mnoha zákony v metrologii a poznal různé zdroje chyb měření, které jsem poté mohl využít zejména u druhého profilprojektoru, a také limity měřicích zařízení a obsluhy. Dále jsem provedl důkladnou rešerši v oblasti 2D měřicích zařízení, jejich různých provedení a principy měření, s tím související jejich různé přesnosti a náročnosti na obsluhu, což úzce souvisí s možnostmi optimální aplikace pro jejich praktické využití. V teoretické části jsem se dále zabýval metodikou zpracování naměřených dat, kterou jsem využil při ověření přesnosti jednotlivých zařízení. Pro spojení tématu profilprojektorů s praxí jsem se rozhodl naměřit data výrobků, u kterých dále určuji indexy způsobilosti a diagramy stability, na základě kterých je možno určit, zda je nutné před zahájením další výroby provést úpravy procesu či nikoliv.

V praktické části bylo cílem určit přesnost dvou různých profilprojektorů. U zdigitalizovaného vyšla dle očekávání vyšší přesnost se směrodatnou odchylkou v řádu tisícín mm. Zároveň průměrná směrodatná odchylka vyšla vyšší u měření v x ose. Tato odchylka je v kontextu měření poměrně zanedbatelná a mohla by být způsobena i chybou obsluhy. Druhé měření bylo zajímavé především v oblasti odhalování různých druhů chyb a pokusu o jejich minimalizování, o které se vždy snažíme i při běžném použití. Mezi hlavní nedostatky a zdroje chyb patřila vůle v posuvovém šroubu, kterou jsem se pokusil minimalizovat tím, že jsem posuv prováděl pouze v jednom směru v ose x. Dalším zdrojem chyb byla vůle samotného měřicího stolu, která byla dokonce v řádu mm a i tu jsem se pokusil eliminovat stejným způsobem. Dále šířka risky na promítací ploše byla mnohem větší, než u prvního zmíněného profilprojektoru, což snižovalo možnost přesně nastavit souřadnice na okraj měřeného objektu. V neposlední řadě byly limitem měření samotné jednotky, jelikož nejnižší hodnotou byla setina mm a další desetinné místo byl pouze odhad, který není přesný.

V druhé části praktické oblasti bylo cílem spojit téma měření na profilprojektoru s úlohou, která má využití v běžné praxi. Ukázalo se, že čtyři z daných součástek nesplňují rozměrové tolerance. U jednoho z nich je možné, že by při použití přesnějšího měřidla vyhovělo, jelikož jeho odchylka od požadované hodnoty je menší než směrodatná odchylka, ale zbylé tři jsou nevyhovující. Dále jsem určil indexy způsobilosti C_p a C_{pk} , které mají být pro stabilní výrobu $C_p > 1,33$ a $C_{pk} > 1$. V obou případech vyšly hodnoty nižší než požadované a zároveň diagramy stability překročily limitní hodnoty. Z těchto důvodů je před další výrobou nutné provést korekci výroby.

11 Zdroje

- [1] POSPÍŠIL, Miroslav a Vladimír LUDVÍK, VIDIMOVÁ, Klára, ed. *Terminologie z oblasti metrologie* [online]. 2. vydání. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010 [cit. 2024-03-24]. ISBN 80-248-0671-1. Dostupné z: https://www.unmz.cz/files/Sborníky%20TH/Terminologie%20v%20oblasti%20metrologie_DEF.pdf
- [2] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie*. 2004. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0672-X.
- [3] PETŘKOVSKÁ, Lenka a Lenka ČEPOVÁ. *Strojírenská metrologie: studijní opora "Strojírenská metrologie"*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2723-0.
- [4] STOCK, Michael, Richard DAVIS, Estefanía DE MIRANDÉS a Martin J T MILTON. The revision of the SI—the result of three decades of progress in metrology. *Metrologia* [online]. 2019, 2019-04-01, 56(2), 1-3 [cit. 2024-03-19]. ISSN 0026-1394. Dostupné z: [doi:10.1088/1681-7575/ab0013](https://doi.org/10.1088/1681-7575/ab0013)
- [5] *Keyence* [online]. 2024 [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: <https://www.keyence.co.in/ss/products/measure-sys/measurement-selection/type/projector.jsp>
- [6] Český metrologický institut. *Český metrologický institut* [online]. 2024 [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: <https://www.cmi.cz/komentovany%20zakon%20o%20metrologii>
- [7] Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky. *Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky* [online]. 2024 [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz>
- [8] Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. *Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví* [online]. 2024 [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: <https://www.unmz.cz>
- [9] METRIE. *Metrice* [online]. 2024 [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: <https://www.metrie.cz>
- [10] Český metrologický institut. *Český metrologický institut* [online]. 2024 [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: <https://www.cmi.cz/vyhlasene%20statni%20etalony%20CR>
- [11] CÉZOVÁ, Eliška. *Metrologie v praxi*. Praha, 2016. FS ČVUT.

- [12] Průmyslové spektrum. *Průmyslové spektrum* [online]. 2024 [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/pracovni-meridla-nepodlehajici-periodicke-kalibraci>
- [13] Český metrologický institut. *Český metrologický institut* [online]. 2024 [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: <https://www.cmi.cz/schvalovani%20typu%20meridel>
- [14] College physics labs - The University of North Carolina Press. *Webassign* [online]. 2011 [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: https://www.webassign.net/question_assets/unccolphysmech1/measurements/manual.html
- [15] GRÉGIS, Fabien. On the meaning of measurement uncertainty. *Elsevier*. 2019, (Volume 133), 41-46.
- [16] Squara, P., Scheeren, T.W.L., Aya, H.D. *et al.* Metrology part 1: definition of quality criteria. *J Clin Monit Comput* 35, 17-25 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10877-020-00494-y>
- [17] SUBKOMISE SC 3 PODPŮRNÉ TECHNOLOGIE. *Systémy managementu měření - Požadavky na procesy měření a měřicí vybavení*. 11/2003. 2003.
- [18] Paralaxa. In: *Wikipedia* [online]. 2021 [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Paralaxa#/media/Soubor:Paralaxa.png>
- [19] Random vs Systematic Error. In: *University of Maryland* [online]. [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: <https://www.physics.umd.edu/courses/Phys276/Hill/Information/Notes/ErrorAnalysis.html>
- [20] DVOŘÁK, Otto. Nejistota výsledků měření při zkouškách. In: *Tzbinfo* [online]. 2019 [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: <https://m.tzb-info.cz/izolace-strechy-fasady/19912-nejistota-vysledku-mereni-pri-zkouskach>
- [21] Statistická měření. *Zengrovka* [online]. 2020 [cit. 2024-03-21]. Dostupné z: <https://www.spszengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/KOM3.13-statisticka-mehreni.pdf>
- [22] ADIKARAM, K. K. L. B. Data Transformation Technique to Improve the Outlier Detection Power of Grubbs' Test for Data Expected to Follow Linear Relation. *Journal of Applied Mathematics* [online]. 2015, 2015(Volume 2015), 1-9 [cit. 2024-03-21]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1155/2015/708948](https://doi.org/10.1155/2015/708948)
- [23] PLURA, Jiří. Plánování a neustálé zlepšování jakosti. Praha: Computer Press, 2001. Business books (Computer Press). ISBN 80-7226-543-1

- [24] Process Capability Index. *ScienceDirect* [online]. 2024 [cit. 2024-03-21]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/process-capability-index>
- [25] *Rozlišovací schopnost lidského oka* [online]. Praha, 2024 [cit. 2024-03-21]. Dostupné z: <https://webservices3.lf1.cuni.cz/printbook-render/data/NfH8QJLdBY4WyZpoO61KCwqvEbxR092czG37jlkX/Article.pdf>. Článek. Univerzita Karlova.
- [26] NEBESÁŘOVÁ, Jana. AKADEMIE VĚD. Rozlišovací schopnost a vlnová délka. *Lembook* [online]. 2001 [cit. 2024-03-26]. Dostupné z: <http://lembook.paru.cas.cz/Podkap/2.1.html>
- [27] YOSHIZAWA, Toru. *Handbook of OPTICAL METROLOGY - Principles and Applications*. Taylor & Francis Group, 2008. ISBN 978-0-8493-3760-4.
- [28] *Metrologická příručka*. Praha, 2016. Příručka. Fakulta strojní ČVUT v Praze.
- [29] *Metrologická příručka* [online]. Mitutoyo Česko [cit. 2024-03-21]. Dostupné z: <http://mitoro.cz/ke-stazeni/metrologicka-prirucka.pdf>
- [30] Základní konstrukce a princip mikroskopů. In: *KEYENCE* [online]. 2024 [cit. 2024-03-21]. Dostupné z: https://www.keyence.eu/cscz/ss/products/microscope/microscope_glossary/basic/basic_structure_and_principle_of_microscopes.jsp
- [31] Popis mikroskopu. In: *INTRACO MICRO* [online]. 2024 [cit. 2024-03-21]. Dostupné z: <https://www.intracomicro.cz/teorie/popis-mikroskopu/>
- [32] Měřicí škála / pro mikroskop se zvětšením 50×. In: *WHP TECHNIK* [online]. 2024 [cit. 2024-03-21]. Dostupné z: <https://www.topmeridla.cz/mikroskopy/merici-skala-pro-mikroskop-se-zvetsenim-50-2/>
- [33] TORO, Federico Grasso. Brief overview of the future of metrology. *Measurement: Sensors* [online]. 2021, **18**(22) [cit. 2024-03-26]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.measen.2021.100306>
- [34] Digitální mikroskop Levenhuk D95L LCD. In: *Levenhuk* [online]. 2024 [cit. 2024-03-21]. Dostupné z: https://cz.levenhuk.com/catalogue/mikroskopy/digitalni-mikroskop-levenhuk-d95l-lcd/?oid=7204&gad_source=1&gclid=CjwKCAjw5ImwBhBtEiwAFHDZx5NttZE3kZPXR9jsdKj963EDMCRBNQ52dq0z7_I6NgkP63hF7HCrQxoCKgQQAvD_BwE
- [35] Profile Projector Manufacturers in 2024. *Metoree* [online]. 2024 [cit. 2024-03-21]. Dostupné z: <https://us.metoree.com/categories/profile-projector/>

- [36] Vertical profile projector ALPA PROFIL. In: *Link* [online]. 2024 [cit. 2024-03-21]. Dostupné z: <https://www.linkindustrialtools.com/en/vertical-profile-projector-alpa-profil.html>
- [37] Telecelentrický objektiv - přednosti a charakteristiky. *Kinali* [online]. 2024 [cit. 2024-03-21]. Dostupné z: <https://www.prumysloveobjektivy.cz/pages/view/telecelentricky-objektiv-prednosti-a-charakteristiky>
- [38] Jaké objektivy vybrat pro strojové vidění a proč. *Průmyslové spektrum* [online]. 2024 [cit. 2024-03-21]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/jake-objektivy-vybrat-pro-strojove-videni-a-proc>
- [39] Numerická apertura (N.A.). *KEYENCE* [online]. 2024 [cit. 2024-03-21]. Dostupné z: https://www.keyence.eu/cscz/ss/products/microscope/microscope_glossary/terminology/numerical_aperture.jsp
- [40] Optical Profile Projector CMM Fixture Kits With Fixtures Rotating Table OEM. In: *Unimetro* [online]. 2024 [cit. 2024-03-21]. Dostupné z: <https://www.visionmeasurementmachine.com/sale-8455966-optical-profile-projector-cmm-fixture-kits-with-fixtures-rotating-table-oem.html>
- [41] 40-14-MO Mylar Overlay Optical Comparator Mylar Overlay VIP 40-14-MO MYLAR OVERLAY. In: *GREATGAGES* [online]. 2024 [cit. 2024-03-21]. Dostupné z: <https://www.greatgages.com/products/40-14-mo-mylar-overlay>
- [42] Horizontální profilprojektor R600-GMR, Baty. In: *TM TECHNIK* [online]. 2024 [cit. 2024-03-21]. Dostupné z: <https://www.tm-technik.cz/cs/produkty/profilprojektory/horizontalni-profilprojektor-r600-gmr-baty~p163>
- [43] PROFILE PROJECTORS V-20B / V-12B. In: *JD DVOŘÁK, S.R.O.* [online]. 2024 [cit. 2024-03-21]. Dostupné z: <https://www.testsysteme.cz/sites/default/files/obsah/produkt/146/soubory/profile-projectors.pdf>
- [44] Profilprojektor INSIZE ISP-A1000E. In: *MB Calibr* [online]. 2024 [cit. 2024-03-21]. Dostupné z: <https://eshop.mbcaltibr.cz/na-poptavku/profilprojektor-insize-isp-a1000e/>
- [45] Měřicí systémy obrazů. In: *KEYENCE* [online]. 2024 [cit. 2024-03-21]. Dostupné z: <https://www.keyence.eu/cscz/products/measure-sys/image-measure/>

- [46] Accuracy of Profile Projectors. In: *Mitutoyo* [online]. 2017 [cit. 2024-03-21]. Dostupné z: <https://www.mitutoyo.com/webfoo/wp-content/uploads/EDU-15002A.pdf>
- [47] What Is an Optical Comparator (Profile Projector) & How To Use It. *VisionGauge* [online]. 2024 [cit. 2024-03-21]. Dostupné z: <https://www.visionxinc.com/what-is-an-optical-comparator>
- [48] ZEISS O-DETECT. In: *Zeiss* [online]. 2024 [cit. 2024-03-28]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology/products/systems/optical-measurement/o-detect.html>
- [49] Charge-coupled device. *TechTarget* [online]. 2021 [cit. 2024-03-21]. Dostupné z: <https://www.techtarget.com/searchstorage/definition/charge-coupled-device>
- [50] UNDERSTANDING CAMERA AUTOFOCUS. *Cambridge in Colour* [online]. 2020 [cit. 2024-03-21]. Dostupné z: <https://www.cambridgeincolour.com/tutorials/camera-autofocus.htm>
- [51] Transformace digitálního obrazu. *MUNI* [online]. [cit. 2024-03-21]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1431/jaro2005/Z8101/um/FTOTOGRAM_10.pdf
- [52] Obzor. In: *Obzor* [online]. 2024 [cit. 2024-07-21]. Dostupné z: https://www.obzor.cz/files/fotky/vyprodej/merici_pristroj_MP320/merici_projektor.pdf