

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2020

**MICHAL
PRECLÍK**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Preclík** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **475006**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající 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:

Analýza systému měření v laboratoři ústavu

Název bakalářské práce anglicky:

Measurement system analysis in the laboratory of the department

Pokyny pro vypracování:

1. Rozbor metodiky MSA. 2. Měření přímosti - metody a měřidla. 3. Opakovatelnost a reprodukovatelnost měření. 4. Návrh experimentu.

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: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

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

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

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
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 bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. BcA. Jana Podaného, Ph.D. a s užitím literatury uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze dne

.....

Michal Preclík

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu práce, panu Ing. BcA. Janu Podanému, Ph.D., za odborný dohled, příjemný přístup, konzultace a čas, který mi věnoval při psaní této bakalářské práce. Také bych chtěl poděkovat své rodině, za jejich plnou podporu během mého studia na vysoké škole, a to jak finanční, tak psychickou.

Abstrakt

Hlavní náplní této bakalářské práce je charakteristika analýzy systému měření (MSA) a její aplikace v praxi. Proto v první části práce tuto metodu rozebírám, vysvětluji její účel a následně ukazuji možné postupy jejího numerického vyhodnocení pro opakovatelnost a reprodukovatelnost měřidla.

Analýzu systému měření jsem také zasadil do aktuálního technologického světa značícího se rychlým vývojem a spoustou změn. Proto jsem ji dal do souvislosti s Průmyslem 4.0 a snažil se ukázat možnosti a výhody této kombinace.

Dále jsem také rozebíral přímost, jednu z geometrických tolerancí, a uvedl jsem používaná měřidla pro její měření a také několik konkrétních metod.

Z těchto zpracovaných témat jsem následně stanovil experiment pro určení způsobilosti měřicího systému v laboratoři ústavu. Základem experimentu mělo být měření přímosti, konkrétně měření krokovou metodou s elektronickou libelou a měření úchytkoměrem od průměrného pravítka, na něhož měl dále navázat výpočet ukazatelů opakovatelnosti a reprodukovatelnosti, konkrétně metodou průměru a rozpětí.

Bohužel z důvodu koronavirové epidemie a následného nařízení vlády a rektora školy nebylo možné provést měření a výsledky experimentu nejsou známy.

Klíčová slova

Analýza systému měření, opakovatelnost a reprodukovatelnost měřidla, Průmysl 4.0, přímost, proces měření

Abstract

The main content of this bachelor thesis is the characteristics of the measurement system analysis (MSA) and its application in practice. Therefore, in the first part of the thesis I analyze this method, explain its purpose and then show the possible methods of its numerical evaluation for the gage repeatability and reproducibility.

I also put the measurement system analysis into the current technological world marked by rapid development and a lot of changes. That's why I put it in the context of Industry 4.0 and tried to show the possibilities and benefits of this combination.

I also discussed straightness, one of the geometric tolerances, and listed the gauges used to measure it, as well as several specific methods.

From these topics mentioned above, I subsequently determined an experiment to determine the suitability of the measuring system in the laboratory of the department. The foundation of the experiment was to measure straightness, namely the measurement by the step method with an electronic spirit level and the measurement of the pin crossing profile form deviation measurement with a dial indicator, which was followed by the calculation of repeatability and reproducibility indicators, specifically by using the average and range method.

Unfortunately, due to the coronavirus epidemic and the subsequent order of the government and the rector of the university, it was not possible to perform measurements and the results of the experiment are not known.

Keywords

Measurement system analysis, gage repeatability and reproducibility, Industry 4.0, straightness, measurement process

Obsah

Úvod	8
1 Rozbor metodiky MSA.....	9
1.1 Základní složky přesnosti měření	10
1.1.1 Variabilita polohy	10
1.1.2 Variabilita šíře	11
1.1.3 Variabilita systému	13
1.2 Variabilita procesu a měření	14
2 Průmysl 4.0.....	15
2.1 Propojení metodiky MSA a Průmyslu 4.0	16
3 Výpočet ukazatelů opakovatelnosti a reprodukovatelnosti	18
3.1 Metoda rozpětí	18
3.2 Metoda průměru a rozpětí.....	19
3.3 Metoda ANOVA.....	23
3.4 Vyhodnocování výsledků ukazatelů opakovatelnosti a reprodukovatelnosti	25
4 Měření přímosti – metody a měřidla	27
4.1 Geometrické tolerance	27
4.2 Přímost.....	29
4.3 Odchylka přímosti.....	30
4.4 Metody měření.....	31
4.5 Měřidla.....	33
5 Návrh experimentu	36
Závěr.....	39
Seznam použité literatury	40

Úvod

Nacházíme se v době velmi rychlého technologického postupu. Výrobní metody, které byly stěžejní před několika lety, jsou již dnes nahrazeny modernějšími. Dbá se hodně na automatizaci a robotizaci, všude se mluví o Průmyslu 4.0. To všechno proto, abychom byli jako lidstvo efektivnější. Abychom vyráběli více výrobků větší kvality, efektivněji a s nižšími náklady časovými i finančními.

Dnes disponujeme stroji a přístroji, o kterých se našim předkům mohlo jenom zdát. Postupně je naše činnost ve strojírenství nahrazována stroji, které jsou chytřejší, mají více funkcí, jsou rychlejší a přesnější. I tak ale není zdaleka vše dokonalé. Stále neumíme vyrobit perpetuum mobile a stejně jako nelze vyrobit např. spotřebič, který se nikdy nerozbije, nebo žárovku, která nikdy nepřestane svítit, tak nelze ani mít stroj, který bez zásahu z vnějšku bude disponovat stále stejnou kvalitou výroby a přesností vyráběných dílů. Proto je nutné, pro udržení kvality výrobků se zabývat i způsobilostí procesu a jeho případným napravením a zlepšením.

Velmi důležitou roli určující kvalitu produktů zastává kvalita procesů, kterými se tyto produkty vyrábějí. Tím nejvhodnějším kritériem pro hodnocení kvality procesů je jejich způsobilost. To lze označit jako schopnost procesu trvale poskytovat výrobky splňující požadavky kvality. Jednou z metod pro prokázání způsobilosti procesu je analýza systému měření (anglicky Measurement System Analysis – zkratka MSA).

Cílem této práce je rozebrat tuto metodiku teoreticky, podívat se podrobněji na všechny její součásti a postupy a připravit si tak postupy pro vypracování praktické části této bakalářské práce. Dále chci také zpracovat základní přehled geometrických tolerancí, podrobně rozebrat přímost, metody jejího měření a vhodná měřidla a následně tyto znalosti zužitkovat v praxi, kdy budu analýzu systému měření aplikovat na měřicích zařízeních v laboratoři ústavu. Nakonec všechna nashromážděná data vyhodnotím a stanovím aktuální způsobilost systému měření na základě vyhodnocení numerickou metodou z naměřených hodnot.

1 Rozbor metodiky MSA

MSA (Measurement system analysis) neboli analýza měřicího systému je soubor postupů pro vyhodnocení daného systému měření. Je to analytická technika, která je součástí nějakého systému řízení kvality – buď podle určité normy nebo dle celostní metody řízení kvality.

Jelikož v této práci bude hojně použito několik pojmů týkajících se měření, měřidel a měřicích systémů, uvedu hned na úvod jejich definici pro lepší porozumění.

Měření = Proces přiřazování čísel (nebo hodnot) k hmotným věcem pro vyjádření vztahů mezi nimi vzhledem k určitým vlastnostem.

Měřidlo = Jakékoli zařízení používané k získání měření.

Měřicí systém = Soubor nástrojů nebo měřidel, standardů, operací, metod, příslušenství, softwaru, personálu, prostředí a předpokladů použitých ke kvantifikaci měřené jednotky nebo stanovení ohodnocení měřené charakteristické vlastnosti; kompletní proces používaný k získání měření. [1]

Etalon = Realizace definice dané veličiny, se stanovenou hodnotou veličiny a přidruženou nejistotou měření, používaná jako reference.

Nejistota měření = Nezáporný parametr charakterizující rozptýlení hodnot veličiny přiřazených k měřené veličině na základě použité informace.

Kalibrace = Činnost, která za specifikovaných podmínek v prvním kroku stanoví vztah mezi hodnotami veličiny s nejistotami měření poskytnutými etalony a odpovídajícími indikacemi s přidruženými nejistotami měření a ve druhém kroku použije tyto informace ke stanovení vztahu pro získání výsledku měření z indikace. [8]

Svůj původ má metoda MSA v automobilovém průmyslu, ale díky své univerzálnosti a praktičnosti se dnes již používá také v dalších odvětvích. Může se použít pro hodnocení samotného měřidla, ale i na posouzení celého měřicího systému. Jejím základním předpokladem je fakt, že pro měření nestačí mít pouze přesné měřidlo, ale na výsledek mohou mít nemalý vliv i jiné faktory během celého procesu měření. Bere v potaz například to, že i sám

operátor měření může být zdrojem nejistoty, a tím může nechtěně ovlivňovat výsledky měření. Metoda MSA proto využívá i další statistické techniky a jiné metody. Hlavní důraz klade na opakovatelnost a reprodukovatelnost měření. V odborných publikacích se často setkáme s anglickou zkratkou R&R – Repeatability and Reproducibility. Hlavním cílem metody je zlepšení přesnosti celého systému měření. [3]

Zde jsou konkrétní kroky v rámci metody MSA:

- určit způsobilost systému měření,
- určit zdroje variability systému měření,
- popsat zdroje variability statistickými a metrologickými veličinami,
- přinést potřebné informace o systému měření.

1.1 Základní složky přesnosti měření

Způsobilost systému se posuzuje na základě několika statistických vlastností. Mezi základní složky přesnosti měření patří shodnost a strannost. Zde je jejich kompletní seznam se stručnou charakteristikou [2]:

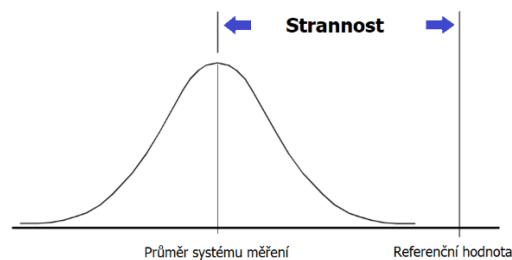
1.1.1 Variabilita polohy

Přesnost

Blízkost měření ke skutečné hodnotě nebo k přijaté referenční hodnotě. Je zde zahrnut vliv lokalizačních a šířkových chyb.

Strannost

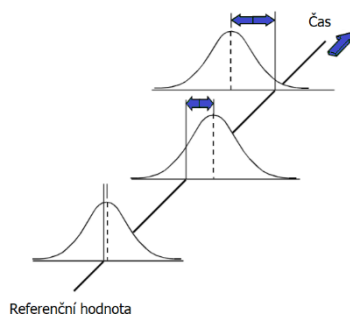
Strannost měření je mírou jeho správnosti a rovná se rozdílu mezi aritmetickým průměrem výsledků opakovaného měření stejného znaku kvality a přijatou referenční hodnotou. Strannost měření tedy představuje celkovou systematickou chybu měření.



Obrázek 1 - Strannost měření [1]

Stabilita

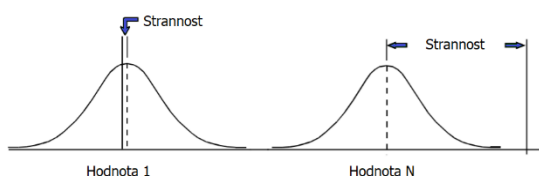
Tak je charakterizována celková variabilita výsledků měření stejného znaku kvality v delším časovém úseku. Vyhodnocuje se na základě změn strannosti měření v závislosti na čase. Odchytky u stability společně s linearitou jsou často způsobeny během (nezdařilé) kalibrace měřidla.



Obrázek 2 - Stabilita měření [1]

Linearita

Ta se dá vyjádřit jako rozdíl mezi hodnotami strannosti v předpokládaném pracovním rozsahu měření v závislosti na čase. Jinými slovy jde o konzistenci v rozsahu měření. [2]



Obrázek 3 - Linearita měření [1]

1.1.2 Variabilita šíře

Shodnost

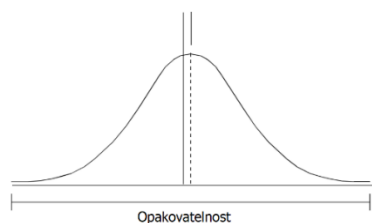
Shodnost měření charakterizuje variabilitu výsledků opakovaného měření stejného znaku kvality. Mírou shodnosti je jeho neshodnost, která je vyjadřována pomocí směrodatné odchytky výsledků měření. Shodnost měření představuje působení náhodných chyb měření.

Opakovatelnost

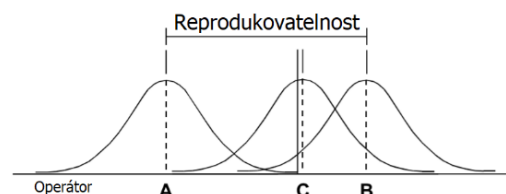
Opakovatelnost měření charakterizuje shodnost měření v podmínkách, které jsou opakovatelné. To jsou podmínky, kdy nezávislé výsledky získává stejný operátor, stejným měřidlem, stejnou metodou, ve stejném místě měření a v co nejkratším časovém rozmezí. Ideálem opakovatelnosti je dosažení preciznosti. Pro zlepšení opakovatelnosti je často zapotřebí lepší měřidlo.

Reprodukovatelnost

Ta představuje variabilitu středových hodnot opakovaných měření stejného znaku kvality provedených za různých podmínek. To může být např. různí operátoři provádějící měření, nebo jeden operátor, ale různá měřidla, nebo také různá měřicí stanoviště. Pro zlepšení reprodukovatelnosti je často zapotřebí proškolení operátorů nebo lepší pracovní instrukce.



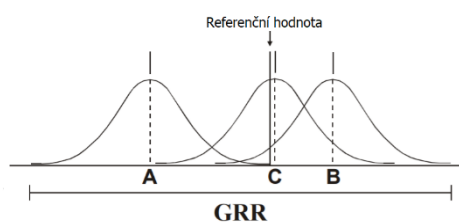
Obrázek 4 - Opakovatelnost měření [1]



Obrázek 5 - Reprodukovatelnost měření [1]

Opakovatelnost a reprodukovatelnost měření

Kombinovaný odhad opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měřicího systému. Často označováno jako GRR nebo Gage R&R. Jde v podstatě o rozptyl, rovnající se součtu rozptylů uvnitř systémů a mezi systémy. V závislosti na použité metodě mohou a nemusí zahrnovat účinky času.



Obrázek 6 - Opakovatelnost a reprodukovatelnost měření [1]

Způsobnost systému měření

Krátkodobý odhad variability měřicího systému (např. GRR včetně grafiky).

Výkon systému měření

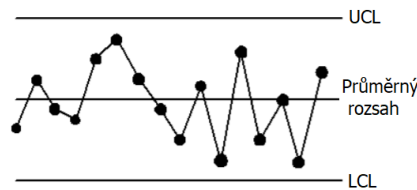
Dlouhodobý odhad variability měřicího systému (např. Metoda dlouhodobé kontroly).

Citlivost

Nejmenší vstup, jehož výsledkem je detekovatelný výstupní signál, nebo také citlivost měřicího systému na změny měřené funkce. Je určena konstrukcí měřidla, vlastní kvalitou, údržbou v provozu a provozním stavem přístroje a standardem. Vždy je uváděna jako měrná jednotka.

Důslednost

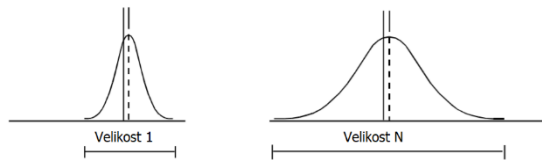
Stupeň změny opakovatelnosti v čase. Důsledný proces měření je ve statistické kontrole s ohledem na šířku (variabilitu).



Obrázek 7 - Důslednost měření [1]

Jednotnost

Změna opakovatelnosti v normálním provozním rozsahu nebo také homogenita opakovatelnosti. [2]



Obrázek 8 - Jednotnost měření [1]

1.1.3 Variabilita systému

Způsobilost

Variabilita odečtů odebraných během krátké doby. Odhad způsobilosti je vyjádřením očekávané chyby pro definované podmínky, rozsah a použitelnost systému měření.

Funkčnost

Variabilita odečtů odebraných po dlouhou dobu, založená na celkové variabilitě.

Nejistota

Odhadované rozmezí hodnot o měřené hodnotě, u které se předpokládá, že je obsažena skutečná hodnota. [2]

Ze všech složek přesnosti měření jsou v praxi nejčastější studie opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření. V nich se vychází z výsledků opakovaných měření výrobků pokrývajících výrobní rozpětí, které jsou získávány za různých podmínek. Nejčastěji jde o měření, které provádějí různí operátoři měřidel. Ze získaných dat je možné vyhodnocovat celkovou variabilitu systému měření (opakovatelnost a reprodukovatelnost), ale také tyto dvě složky samostatně. Získané informace jsou velmi důležité pro identifikaci příčin variability

údajů a návrh vhodných opatření pro zlepšení. Také můžeme zjistit, která z nich se podílí větší měrou a co to tedy pro systém měření znamená – zda je problémová opakovatelnost, a tedy jde o nedostatky systému měření, nebo zda má větší podíl na variabilitě výsledků reprodukovatelnost, což znamená, že příčiny budeme hledat v rozdílných přístupech jednotlivých operátorů. Rozhodujícím kritériem pro vyhodnocení přijatelnosti systému měření je procentuální podíl opakovatelnosti a reprodukovatelnosti z celkové variability. [2]

1.2 Variabilita procesu a měření

Ve většině situací je hlavním cílem měřit variabilitu procesů. Ve skutečnosti ale měříme kombinovaný součet variabilit procesů a měření. V analýze systému měření používáme statistické metody k odhadování, kolik z celkové variability je způsobeno měřicím systémem. Ideální systém měření by neměl mít žádnou variabilitu, ale to je nemožné a musíme být spokojeni se systémem, který má odchylku menší než 10% celkové variability procesu. Se zvětšující částí variací v důsledku měřicího systému se jeho hodnota snižuje. Pokud je tento poměr více než 30 %, měřicí systém je nepřijatelný.

Vždy musíme brát v potaz, k jakému účelu je měřidlo používáno a co je na něm měřeno. Když kupujeme v obchodě šunku, může nám být rozdíl 10 g úplně jedno. Pokud ale jde např. o složení určité chemické látky, zde hrají velkou roli i desetiny gramů.

Následující tabulka shrnuje kritéria podle Manuálu MSA publikovaného Automotive Industry Action Group:

Tabulka 1 - Kritéria variability měření [1]

Variabilita měření jako % z celkové variability	Pokyny pro rozhodování
Méně než 10 %	Přijatelný systém měření
Mezi 10 % a 30 %	Částečně přijatelné, záleží na dané aplikaci
Více než 30 %	Nepřijatelný systém měření

2 Průmysl 4.0

V historii lidstva jsme zaznamenaly čtyři průmyslové revoluce. První ovlivnila hlavně výrobní sektor mechanickými zařízeními poháněnými parou. Druhá byla způsobena hromadnou výrobou průmyslových výrobků. Třetí průmyslová revoluce změnila svět použitím elektroniky a informačních technologií ve výrobě.

V současnosti jsme v éře čtvrté průmyslové revoluce, nazývané jako Průmysl 4.0. To označuje nadcházející inovace a proměny výrobních procesů. Díky internetu a digitalizaci je umožněno kompletní propojení a automatizace veškerých výrobních procesů a služeb s nimi spojených. [5]

Společně s Průmyslem 4.0 se mluví také o tzv. „chytrých továrnách“. A pro takovou chytrou automatizovanou továrnu, připravenou zvládat rozličné digitální vstupy, bude zapotřebí mít precizně nastavené předvýrobní procesy a jejich digitalizaci.

Prvním takovým digitálním vstupem je již samotný požadavek zákazníka na výrobek. Tyto požadavky je nutné brát v potaz během celého procesu vývoje i výroby. Právě efektivní řízení procesů spolu se změnovým řízením zaručí požadovanou kvalitu výrobku a uspokojení potřeb zákazníka.

Aby společnost mohla využít 4. průmyslovou revoluci pro svůj prospěch, musí být schopna zvládat rozdílné digitální vstupy a připravena čelit sériové customizaci. To zajistí především tím, že dojde k přesunu množství a kvality funkcí od těch, které tvoří pouze nepotřebný balast, k těm, které jsou cílené na zákazníka. Cílem customizace je to, aby měli majitel, zaměstnanci i zákazníci v softwaru dostupné funkce, které zajistí využití na maximum, a také ideálně žádné funkce, které budou pro fungování podniku zbytečné. [5][25]

Mezi současné trendy ve výrobě patří následující:

- Internet of Things – umožňuje komunikovat veškerým senzorům, kamerám, vysílačům, strojům a čtečkám kódů mezi sebou a do jisté míry samostatně řídit výrobu.
- Umělá inteligence (AI) – samoučící se algoritmy pro eliminaci chybovosti a automatizaci výrobních procesů.

- Cloud – vzdálené úložiště, které vyniká svou flexibilitou a také úsporám na fyzických instalacích.
- Big data – jde o velké množství dat získaných během celého procesu výroby a jejich zpětné využití a efektivní recyklace znalostí.
- Reverzní inženýrství – možnost 3D skenování výrobku a jeho převod z reálné podoby do 3D modelu.
- Aditivní výroba – výroba prototypů i finálních dílů díky 3D tisku.

A právě Průmysl 4.0 na tyto trendy reaguje následujícími způsoby:

- Design – dnes je možné navrhnout finální produkt s dokonalou precizností a bezchybností za co nejnížší dobu. To urychluje přivedení výrobku na trh.
- Systémové inženýrství – spravování komplexních systémů a sestav již v návrhové verzi a zajištění snížení chybovosti, funkčnosti výrobku a také eliminace nadměrné výroby prototypů.
- Řízení procesů – zjednodušení komunikace mezi týmy účastnicími se výrobního procesu.
- Životní cyklus produktu – kontrola stavu výrobku za celý jeho životní cyklus a recyklace know-how získaného zpětnou vazbou od zákazníků pro získání budoucí přidané hodnoty.
- Simulace – eliminace potřeby tvořit prototypy a možnost testování výrobků již ve fázi návrhu a za pomoci získaných dat dosažení vyšší kvality a také rychlejší uvedení výrobku do finální fáze.
- Výroba – zdokonalování výrobních procesů a dosažení co nejefektivnějších procesů.
- Analýza – práce s datovými vstupy a výstupy, jejich zpracování a vyhodnocení. [4]

2.1 Propojení metodiky MSA a Průmyslu 4.0

Čtvrtá průmyslová revoluce je také o datech. Chronometry, měřicí pásy, tlakoměry, teploměry, vysokofrekvenční identifikace (RFID), čítač malých součástek, čítače provozu jsou mimo jiné přístroje schopné extrahovat požadovaná data z procesů. Průmyslová bezdrátová síť je dobrým příkladem. Cloudové sítě a internet poskytují data v reálném čase.

Cílem analýzy dat je transformace prvotních dat na informace, které poskytují informace o možném zlepšení procesu nebo signály o chování procesu pro jeho správu. Nezpracovaná

data pocházejí z měření. Je však nutné je přezkoumat pomocí nástrojů a statistik. Toto zkoumání odhaluje informace, které určují akce, které mají být provedeny. Tyto akce řídí proces nebo zavádějí vylepšení pro zlepšení výkonu.

Proto je velmi důležité ověřit správnost shromážděných údajů. A právě nástroj Analýza systému měření (MSA) ověřuje postup sběru dat a vypočítává nejistotu zařízení a systémů. [7]

Každá průmyslová společnost musí určit množství variací, které existují v jejím procesu měření, zaručit spolehlivost svých dat, studovat výkonnost svého systému měření, pokud jde o linearitu, strannost, stabilitu, opakovatelnost a reprodukovatelnost. Tento problém je kritický pro dodavatele v automobilovém průmyslu, kteří musí být certifikováni podle normy IATF 16949:2016 Mezinárodní pracovní skupiny pro automobilový průmysl, definující požadavky systému řízení kvality pro společnosti v automobilovém průmyslu. Analýza systému měření je jedním z povinných nástrojů. Měřicí systém ve společnostech není často připojen k zařízení a nezahrnuje metody navržené Akční skupinou pro automobilový průmysl (AIAG). Pro řešení těchto omezení probíhá projekt výzkumu a vývoje, jehož cílem je vyvinout webový a cloudový nástroj MSA. Tento nástroj MSA obsahuje koncepty Průmyslu 4.0, například protokoly Internet of Things (IoT), které zajišťují spojení s měřicím zařízením, cloud computingem, umělou inteligencí, statistickými nástroji a pokročilými matematickými algoritmy. Webový a cloudový nástroj MSA je inovativní, protože implementuje všechny statistické testy navržené v referenční příručce MSA-4 od AIAG, jakož i další vznikající metody a techniky. Protože je integrován s měřicími zařízeními, snižuje ruční zadávání dat a tím i chyby. Nástroj zajišťuje sledovatelnost všech provedených zkoušek a lze jej použít v kvalitních laboratořích a ve výrobních linkách. Kromě toho monitoruje MSA v průběhu času, což umožňuje jak analýzu odchylek od kolísání prováděných měření, tak správu měřicích zařízení a kalibrací. Navrhovaný nástroj MSA přidává hodnotu současnému stavu, protože zajišťuje účinnou reakci na nové výzvy měřicích systémů, které jsou ve výrobních procesech stále důležitější. Ačkoli vývoj tohoto inovativního nástroje MSA spustil automobilový průmysl, těžila by z něj také další průmyslová odvětví. V současné době ji již validují společnosti chemického a potravinářského průmyslu. [6]

3 Výpočet ukazatelů opakovatelnosti a reprodukovatelnosti

Studii variabilního měření lze provést pomocí řady různých technik. Mezi tři hlavní metody patří:

- metoda rozpětí,
- metoda průměru a rozpětí,
- metoda ANOVA.

S výjimkou metody rozpětí je návrh dat studie velmi podobný pro každou z těchto metod. Všechny tyto metody ve svých analýzách ignorují variace uvnitř součástí (jako je kruhovitost, rovinnost atd.).

Systém celkového měření však zahrnuje nejen samotné měřidlo a jeho související strannost, opakovatelnost atd., ale může zahrnovat i variabilitu kontrolovaných částí. Všechny techniky v této části podléhají předpokladům statistické stability. [1][9]

3.1 Metoda rozpětí

Metoda rozpětí je modifikovaná studie měřidla spojitých proměnných, která poskytne rychlou aproximaci variability měření. Tato metoda poskytne pouze celkový obraz o systému měření. Nerozkládá variabilitu na opakovatelnost a reprodukovatelnost. Obvykle se používá jako rychlá kontrola k ověření, že se GRR nezměnila.

Tento přístup má potenciál detekovat nepřijatelný měřicí systém v 80 % případech s velikostí vzorku 5 a v 90 % případech s velikostí vzorku 10.

Metoda rozpětí pro studii obvykle používá dva operátory a pět vzorků. V této studii oba operátoři měří každý vzorek jednou. Z naměřených hodnot se vypočte rozpětí R_i hodnot naměřených operátory na konkrétním vzorku. Toto rozpětí se vypočítá pro každý měřený vzorek zvlášť.

$$R_i = |\max(x_{ik}) - \min(x_{ik})|, \quad (3.1)$$

kde: x_{ik} je hodnota naměřená k-tým operátorem na i-tém vzorku.

Následně se z vypočítaných hodnot R_i vypočte průměrné rozpětí \bar{R} ze vztahu:

$$\bar{R} = \frac{1}{g} \sum_{i=1}^g R_i, \quad (3.2)$$

kde: g je množství vzorků.

Celková variabilita měření se získá ze vztahu:

$$GRR = \frac{\bar{R}}{d_2^*} [-], \quad (3.3)$$

kde: d_2^* je hodnota vycházející z tabulky pro m (počet operátorů) a g (počet dílů).

Procentuální podíl směrodatné odchylky procesu σ připadající na variabilitu měření GRR se stanoví dle vztahu:

$$\%GRR = 100 \cdot \left(\frac{GRR}{\sigma} \right) [\%], \quad (3.4)$$

kde: σ je směrodatná odchylka měřicího procesu je vyjádřena vztahem:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (3.5)$$

kde: N je počet hodnot,

x_i jsou jednotlivé naměřené hodnoty,

\bar{x} je aritmetický průměr všech naměřených hodnot. [1][9]

3.2 Metoda průměru a rozpětí

Metoda průměr a rozsah (\bar{X} & R) je přístup, který poskytne odhad opakovatelnosti a reprodukovatelnosti pro měřicí systém. Na rozdíl od metody rozpětí umožní tento přístup rozložit variabilitu měřicího systému na dvě samostatné složky, opakovatelnost a reprodukovatelnost. Avšak variabilita v důsledku interakce mezi operátorem a vzorkem nebo měřidlem se v analýze nebere v úvahu.

Vyhodnocení této metody se provádí grafickou metodou, kde mezi výstupy patří:

- diagram pro rozpětí,
- diagram pro průměr,
- diagram pro iterace,

- bodový diagram,
- diagram s „vousy“,
- diagramy chyb,
- histogram normovaných hodnot.

Numerická metoda vyhodnocuje:

- opakovatelnost – variabilitu zařízení **EV**
- reprodukovatelnost – variabilitu operátora **AV** / σ_A
- variabilitu systému měření – opakovatelnost / reprodukovatelnost **GRR** / σ_M
- variabilitu mezi díly **PV** / σ_P
- celkovou variabilitu **TV** / σ_T
- stanovení počtu kategorií – citlivost měřicího systému – **ndc** [9]

Při této metodě se jako první vypočítá rozpětí R_{ik} všech naměřených hodnot pro všechny vzorky. U každého z nich se vyhledá maximální naměřená hodnota, od které se odečte hodnota minimální:

$$R_{ik} = |\max(x_{ijk}) - \min(x_{ijk})|, \quad (3.6)$$

kde: x_{ijk} je hodnota naměřená na i-tém vzorku při j-tém měření k-tým operátorem.

Dále se vypočte průměrné rozpětí pro každého operátora \bar{R}_k tím, že se veškerá vypočtená rozpětí R_{ik} vydělí počtem naměřených vzorků g :

$$\bar{R}_k = \frac{1}{g} \sum_{i=1}^g R_{ik}. \quad (3.7)$$

Po sečtení všech průměrných rozpětí a následném vydělení počtem operátorů n se získá průměr všech rozpětí $\bar{\bar{R}}_k$:

$$\bar{\bar{R}}_k = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \bar{R}_k. \quad (3.8)$$

Nyní lze vypočítat horní a dolní regulační mez UCL_R a LCL_R následovně:

$$UCL_R = \bar{\bar{R}}_k \cdot D_4, \quad (3.9)$$

$$LCL_R = \bar{\bar{R}}_k \cdot D_3, \quad (3.10)$$

kde: D_3, D_4 jsou konstanty závislé na množství opakování měření m .

Je potřeba zkontrolovat, zda vypočítané rozpětí \overline{R}_k některého z operátorů není vyšší než horní regulační mez nebo nižší než dolní regulační mez. Pokud by tomu tak bylo, musel by příslušný operátor své měření daných vzorků zopakovat.

Jako další se vypočítá aritmetický průměr \overline{x}_{ik} všech naměřených hodnot vzorků i jednotlivými operátory k :

$$\overline{x}_{ik} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{ijk}. \quad (3.11)$$

Aritmetický průměr jednotlivých operátorů \overline{x}_k se získá sečtením všech naměřených hodnot a jejich vydělení počtem měřených vzorků g :

$$\overline{x}_k = \frac{1}{g} \sum_{i=1}^g x_{ik}. \quad (3.12)$$

Aritmetický průměr jednotlivých měřených vzorků \overline{x}_i se vypočítá jako součet hodnot průměrů od všech operátorů pro stejný vzorek vydělený počtem opakování měření m a počtem všech operátorů n :

$$\overline{x}_i = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n x_{ijk}. \quad (3.13)$$

Z těchto jednotlivých hodnot průměru \overline{x}_i se určí celkový aritmetický průměr \overline{x} :

$$\overline{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \overline{x}_k = \frac{1}{g} \sum_{i=1}^g \overline{x}_i. \quad (3.14)$$

Následuje stanovení rozpětí, nejprve rozpětí mezi jednotlivými operátory R_k . To je určeno jako rozdíl minimální a maximální hodnoty z vypočítaného průměru \overline{x}_k jednotlivých operátorů:

$$R_k = \max(x_k) - \min(x_k). \quad (3.15)$$

Druhým rozpětím je rozpětí průměru R_i , což je rozdíl minimální a maximální hodnoty z naměřených hodnot daného vzorku:

$$R_i = \max(x_i) - \min(x_i). \quad (3.16)$$

Nyní se již může přejít k numerické analýze výsledků, kde se vypočítají jednotlivé variability.

Opakovatelnost neboli variabilita zařízení:

$$EV = \overline{R} \cdot K_1 [-], \quad (3.17)$$

kde: K_1 je konstanta závisající na počtu měření použitých při studii měřidla a je rovna převrácené hodnotě d_2^* .

Tabulka 2 - Hodnota konstanty K_1 dle počtu měření [1]

Počet měření	K_1 [-]
2	0,8862
3	0,5908

Reprodukovatelnost neboli variabilita operátora:

$$AV = \sqrt{(R_k \cdot K_2)^2 - \frac{EV^2}{gm}} \quad [-], \quad (3.18)$$

kde: K_2 je konstanta závisající na počtu operátorů podílejících se na studii měřidla a je rovna převrácené hodnotě d_2^* .

Tabulka 3 - Hodnota konstanty K_2 dle počtu operátorů [1]

Počet operátorů	K_2 [-]
2	0,7071
3	0,5231

Variabilita systému měření:

$$GRR = \sqrt{(EV)^2 + (AV)^2} \quad [-]. \quad (3.19)$$

Variabilita mezi díly:

$$PV = R_i \cdot K_3 \quad [-], \quad (3.20)$$

kde: K_3 je konstanta závisající na počtu dílů použitých při studii měřidla a je převrácenou hodnotou d_2^* .

Tabulka 4 - Hodnota konstanty K_3 dle počtu dílů [1]

Počet dílů	2	3	4	5	6	7	8	9	10
K_3 [-]	0,7071	0,5231	0,4467	0,4030	0,3742	0,3534	0,3375	0,3249	0,3146

Nyní lze z výše vypočtených ukazatelů variability vypočítat celkovou variabilitu TV jako odmocninu ze součtu druhých mocnin variability zařízení EV, variability operátora AV a variability mezi díly PV:

$$TV = \sqrt{(EV)^2 + (AV)^2 + (PV)^2} [-], \quad (3.21)$$

Je možné vyjádřit jednotlivé variability jako procentuální podíl z celkové variability TV:

$$\%EV = 100 \cdot \left(\frac{EV}{TV}\right) [\%], \quad (3.22)$$

$$\%AV = 100 \cdot \left(\frac{AV}{TV}\right) [\%], \quad (3.23)$$

$$\%PV = 100 \cdot \left(\frac{PV}{TV}\right) [\%], \quad (3.24)$$

$$\%GRR = 100 \cdot \left(\frac{GRR}{TV}\right) [\%]. \quad (3.25)$$

Závěrečným krokem v rámci numerické analýzy je určení počtu různých kategorií, které lze spolehlivě rozlišit systémem měření. Je to počet nepřekrývajících se 97 % konfidenčních intervalů, které pokrývají rozpětí očekávané variability produktu. Určí se následovně:

$$ndc = 1,41 \cdot \left(\frac{PV}{GRR}\right) [-]. \quad (3.26)$$

Číslo *ndc* se vyjadřuje celým číslem a mělo by být rovno alespoň 5. [1][9]

3.3 Metoda ANOVA

Tato metoda, také zvaná jako analýza rozptylu (Analysis of variance), je standardní statistická technika a může být použita k analýze chyby měření a dalších zdrojů proměnlivosti dat ve studii měřicích systémů. V analýze rozptylu může být rozptyl rozložen do čtyř kategorií: vzorky, operátoři, interakce mezi vzorky a operátory a chyba replikace způsobená měřidlem. Tato metoda vychází hlavně ze směrodatných odchylek a poskytuje ze stejného množství naměřených dat nejvíce údajů v porovnání s předešlými metodami. Metoda ANOVA je také nejpřesnější pro odhad rozptylu.

Výhody metody ANOVA ve srovnání s metodou průměru a rozpětí jsou:

- schopnost zvládnout jakékoli experimentální nastavení,
- zajištění mnohem přesnějších odhadů rozptylů,

- umožnění získat více informací z experimentálních dat (např. interakce mezi vzorky a operátory).

Nevýhody této metody jsou:

- mnohem větší složitost numerických výpočtů,
- potřeba určitého stupně znalostí statistiky uživatelů pro schopnost interpretovat výsledky.

Vyhodnocení numerickou metodou probíhá dle následující tabulky:

Tabulka 5 - Tabulka pro vyhodnocení numerickou metodou [1]

Zdroj variability	Stupeň volnosti (DF)	Součet čtverců (SS)	Kvadratický průměr (MS)	Poměr (F)
Operátor	$o - 1$	SS_O	$MS_O = \frac{SS_O}{(o - 1)}$	$F_O = \frac{MS_O}{MS_e}$
Měřené díly	$n - 1$	SS_N	$MS_N = \frac{SS_N}{(n - 1)}$	$F_N = \frac{MS_N}{MS_e}$
Operátor X díl	$(n - 1)(o - 1)$	SS_{NO}	$MS_{NO} = \frac{SS_{NO}}{(n - 1)(o - 1)}$	$F_{NO} = \frac{MS_{NO}}{MS_e}$
Zařízení	$no(r - 1)$	SS_e	$MS_e = \frac{SS_e}{no(r - 1)}$	
Celkem	$nor - 1$	TSS		

kde: o je počet operátorů,
 n je počet měřených dílů,
 r je počet opakování měření. [1]

Dále je zapotřebí vypočítat všechny potřebné charakteristiky pro analýzu systému měření. Mezi tyto charakteristiky patří stejně jako u předchozí metody průměru a rozpětí opakovatelnost EV, reprodukovatelnost AV, opakovatelnost a reprodukovatelnost GRR, variabilita měřených dílů PV, celková variabilita TV, a navíc také interakce mezi díly a operátory I_{AP}. Tyto charakteristiky jsou počítány dle následujících vzorců:

Tabulka 6 - Charakteristiky potřebné pro analýzu systému měření [1]

Odhad rozptylu	6σ
$\tau^2 = MS_e$	$EV = 6\sqrt{MS_e}$
$\omega^2 = \frac{MS_O - MS_{NO}}{nr}$	$AV = 6\sqrt{\frac{MS_O - MS_{NO}}{nr}}$
$\sigma^2 = \frac{MS_N - MS_{NO}}{kr}$	$PV = 6\sqrt{\frac{MS_N - MS_{NO}}{kr}}$
$\gamma^2 = \frac{MS_{NO} - MS_e}{r}$	$I_{AP} = 6\sqrt{\frac{MS_{NO} - MS_e}{r}}$
$GRR = \tau^2 + \omega^2 + \sigma^2$	$GRR = \sqrt{EV^2 + AV^2 + I_{AP}^2}$
Celková variabilita	$TV = \sqrt{GRR^2 + PV^2}$

I přes určité výhody metody ANOVA se jí, vzhledem k její složitosti, nebudu zabývat v této bakalářské práci a využiji metodu předcházející. [1]

3.4 Vyhodnocování výsledků ukazatelů opakovatelnosti a reprodukovatelnosti

Po veškerých měřeních a výpočtech je nutné určit přijatelnost variability systému měření. To lze učinit dvěma metodami:

- Nejdůležitějším parametrem z procentuálních podílů TV – procentuálním podílem opakovatelnosti a reprodukovatelnosti %GRR. Tato hodnota se porovná s tabulkovou hodnotou, viditelnou zde:

Tabulka 7 - Pokyny pro rozhodování podle %GRR [1]

Podmínka	Pokyny pro rozhodování
%GRR méně než 10 %	Přijatelný systém měření
%GRR mezi 10 % a 30 %	Částečně přijatelné, záleží na dané aplikaci
%GRR více než 30 %	Nepřijatelný systém měření

- Druhou možnou charakteristikou, pomocí které lze získat vyhodnocení analýzy je počet odlišných kategorií ndc . Je to počet nepřekrývajících se 97 % konfidenčních intervalů, které pokrývají rozpětí očekávané variability produktu. Určí se následovně:

$$ndc = 1,41 \cdot \left(\frac{PV}{GRR} \right) [-]. \quad (3.27)$$

Číslo ndc se vyjadřuje celým číslem a abychom mohli měřicí systém označit za přijatelný, počet odlišných kategorií by měl být větší než 5.

Jak metoda průměru a rozpětí, tak i metoda ANOVA dokáže poskytnout informace o příčinách variabilit měřicího systému nebo kolísání měřidla.

Pokud je například opakovatelnost ve srovnání s reprodukovatelností velká, mohou to být tyto důvody:

- Přístroj potřebuje údržbu.
- Měřidlo může být potřeba přepracovat, aby bylo pevnější a tužší.
- Je potřeba zlepšit upnutí nebo umístění pro měření.
- Je přítomno příliš mnoho dílčích odchylek.

Pokud je naopak velká reprodukovatelnost ve srovnání s opakovatelností, pak jsou možné příčiny tyto:

- Operátor potřebuje být lépe vyškolen, jak zacházet s měřidlem a provádět měření.
- Kalibrace na číselníku nejsou zřetelné.

Může být také zapotřebí určitý druh příslušenství, aby pomohlo operátorovi konzistentněji pracovat s měřidlem. [1][9]

4 Měření přímosti – metody a měřidla

V této kapitole bakalářské práce je mým cílem analyzovat problematiku měření přímosti a zmínit metody a měřidla, kterými se dá přímost měřit, a na základě těchto informací stanovit experiment pro praktickou část této práce, kde budu zjišťovat opakovatelnost a reprodukovatelnost měření těmito měřidly.

4.1 Geometrické tolerance

Tématika geometrických tolerancí by sama o sobě mohla být předmětem celé jedné bakalářské práce, proto zde nebudu rozebírat veškeré podrobnosti. Stručně zmíním, co je vlastně cílem geometrických tolerancí, proč se jimi zabývat a jaké všechny druhy geometrických tolerancí jsou.

Geometrické tolerance jsou nedílnou součástí technických výkresů a při správném použití zajišťují, že komunikace mezi výkresovou kanceláří a dílnou bude probíhat bez jakýchkoli nedorozumění, nehladě na používané jazyky jednotlivých pracovníků.

Geometrické tolerance se uplatňují nad rámec normálních rozměrových tolerancí, je-li nutné přesněji kontrolovat formu nebo tvar některého znaku vyráběné součásti, a to z důvodu zvláštní povinnosti, kterou musí díl provádět. V minulosti by bylo dosaženo požadovaných vlastností přidáním výrazů jako „povrchy k sobě navzájem pravdivé“, „plochy k sobě navzájem hranaté“, „plochy rovné a rovnoběžné“ atd., a ponechat na tradici dílny, aby poskytla uspokojivý výklad a splnění požadavků.

Geometrické tolerance se používají pro stručné a přesné vyjádření úplných geometrických požadavků na technické výkresy. Měly by být vždy brány v úvahu pro povrchy, které přicházejí do styku s jinými částmi, zejména pokud jsou na tyto prvky aplikovány úzké tolerance.

Neexistuje žádná jazyková bariéra, protože použité symboly jsou v souladu s publikovanými doporučeními Mezinárodní organizace pro normalizaci (ISO) a byly mezinárodně dohodnuty. Tyto symboly zahrnuje i výkresový standard BS 8888.

Je také třeba zdůraznit, že geometrické tolerance by měly být použity pouze tehdy, pokud dojde ke skutečným výhodám, když jsou běžné metody kótování považovány za nedostatečné k zajištění zachování funkce návrhu, zejména tam, kde musí být zaručena opakovatelnost. Nadměrné použití geometrických tolerancí by mohlo zvýšit náklady na výrobu a kontrolu. Tolerance by měly být co nejširší, jak to jen umožňuje konstrukční funkce. [10]

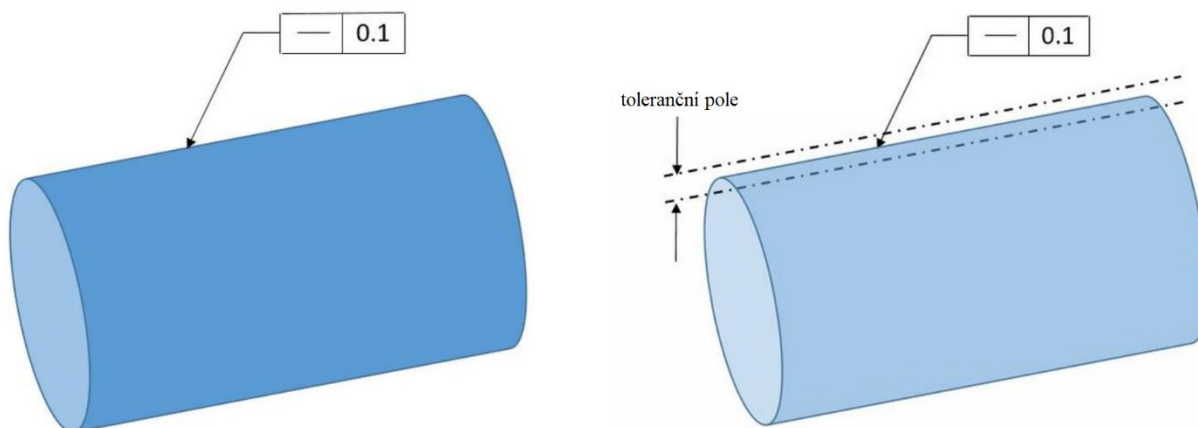
Tabulka 8 Přehled a značení geometrických tolerancí [11]

Tolerance	Charakteristika	Značka	Potřebnost základny
tvaru	přímost	—	ne
	rovinnost		ne
	kruhovitost		ne
	válcovitost		ne
	(obrysová) čára profilu		ne
	povrch (plocha) profilu		ne
směru	rovnoběžnost	//	ano
	kolmost		ano
	sklon		ano
	(obrysová) čára profilu		ano
	povrch (plocha) profilu		ano
umístění	poloha		ano nebo ne
	soustřednost		ano
	souosost		ano
	souměrnost		ano
	(obrysová) čára profilu		ano
	povrch (plocha) profilu		ano
házení	kruhové házení		ano
	celkové házení		ano

4.2 Přímost

Pokud se chceme zabývat tolerancí přímosti, je nutné rozdělovat přímost vztaženou na povrch a přímost aplikovanou na osu. Jak je ale od sebe rozlišit? To poznáme podle toho, kam ukazuje odkazová čára tolerance.

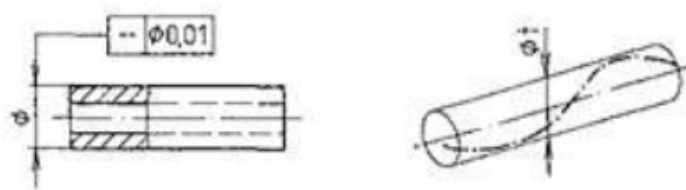
Pokud přímo na povrch tělesa, jedná se o přímost povrchu, viz obrázek č. 9. Vpravo je názorně ukázána oblast tolerance pro tento případ.



Obrázek 9 - Přímost povrchu tělesa a schéma tolerančního pole [13]

Když je na přímost aplikována na povrch, toleranční pole tvoří vždy dvě rovnoběžné čáry. Okraj válce musí být mezi dvěma rovnoběžkami od sebe vzdálenými 0,1 mm.

Přímost, která je aplikována na osu součásti poznáme tak, že odkazová čára tolerance navazuje přímo na kótu, viz obrázek č. 10. Forma přímosti, která řídí středovou osu součásti, se někdy označuje jako axiální přímost. Tento popis tolerance určuje, jak přímá je osa součásti (obvykle válce). Podle definice je přímost osy ve skutečnosti 3D tolerancí, která omezuje středovou osu součásti, která jí brání v přílišném ohýbání nebo kroucení. [12]



Obrázek 10 - Přímost osy a schéma tolerančního pole [14]

Pokud je před značkou tolerance předepsána značka průměru, jde o toleranční pole omezené válcem, jehož průměr se rovná toleranci přímosti. Skutečná osa vnějšího válce na obrázku výše musí ležet uvnitř válcového tolerančního pole o průměru 0,01 mm. [14]

Za zmínku také stojí nepředepsané všeobecné geometrické tolerance, které platí u všech ploch technické součásti zobrazené na výkresu, u kterých není předepsaná konkrétní geometrická tolerance. Tyto tolerance se řídí dle normy ČSN ISO 2768-2 a rozdělují se na tři třídy přesnosti:

- H – nejpresnější stupeň,
- K – střední stupeň,
- L – nejméně přesný stupeň.

Pro jeden výkres se zpravidla volí jedna třída přesnosti nepředepsaných geometrických tolerancí. Zápis třídy přesnosti se provádí písmenem označující třídu přesnosti společně s předpisem všeobecné tolerance délkových a úhlových rozměrů.

Zápis třídy přesnosti je v tomto formátu: *ISO 2768 – mH*, kde *m* představuje písmenný symbol střední třídy přesnosti délkových rozměrů podle ISO 2768-1 a *H* představuje písmenný symbol nejpresnějšího stupně geometrické tolerance podle ISO 2768-2. Tento zápis je součástí popisového pole na technickém výkresu. [15]

Konkrétní hodnoty všeobecných tolerancí přímosti a rovinnosti jsou uvedené v tabulce níže.

Tabulka 9 - Všeobecné tolerance přímosti a rovinnosti [15]

Třída přesnosti	Tolerance přímosti a rovinnosti pro rozsah jmenovitých délek					
	do 10	přes 10 do 30	přes 30 do 100	přes 100 do 300	přes 300 do 1 000	přes 1 000 do 3 000
H	0,02	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4
K	0,05	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8
L	0,1	0,2	0,4	0,8	1,2	1,6

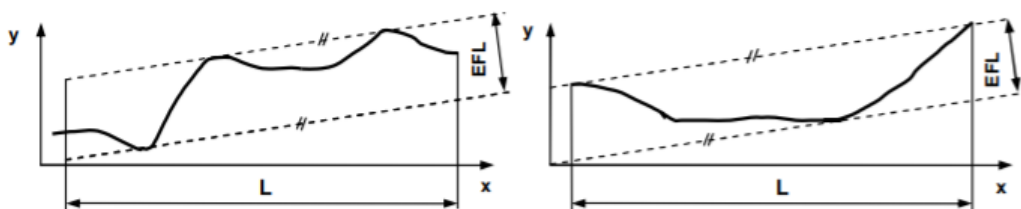
4.3 Odchylka přímosti

Odchylku přímosti (označovanou jako EFL) můžeme měřit různými způsoby podle našich požadavků na přesnost a podle měřidel, které máme k dispozici. Tuto odchylku zjišťujeme obvykle na dlouhých úzkých plochách (např. na vedení obráběcích strojů) nebo jako součást měření odchylek válcovitosti nebo kuželovitosti na povrchových přímkách součástí.

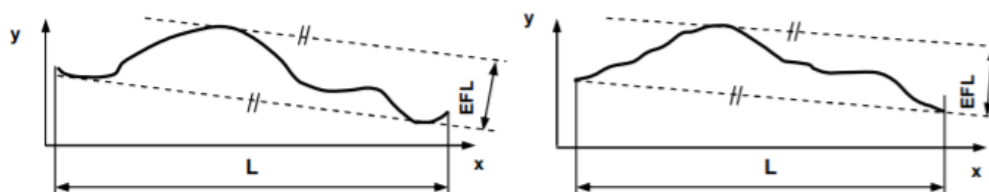
Odchylka přímosti je největší naměřená vzdálenost skutečné přímky od obalové přímky rozsahu vztažného úseku.

Pro stanovení odchylky přímosti je výchozím podkladem zjištěný profil. Z tohoto profilu je důležité při vyhodnocování odchylky přímosti jednoznačně určit jeho obálkovou přímku, od které se vyhodnotí minimální odchylka přímosti. Této podmínce vyhovuje pouze jeden z následujících dvou případů:

- Obalová přímka se dotýká zjištěného profilu v jeho dvou nejvyšších bodech – profil označujeme jako vydutý (konkávní) (viz obrázek č. 11).
- Obalová přímka se dotýká zjištěného profilu pouze v jednom nejvyšším bodě a je zároveň rovnoběžná se spojnicí dvou nejnižších bodů profilu – profil označujeme jako vypouklý (konvexní) (viz obrázek č. 12).



Obrázek 11 - Konkávní profil – obalová přímka ve dvou nejvyšších bodech [16]



Obrázek 12 - Konvexní profil – obalová přímka v jednom nejvyšším bodě [16]

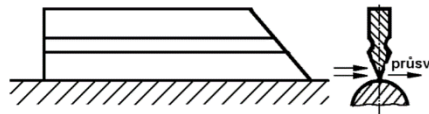
Pokud není jednoznačně zřejmé, kterému z těchto případů jednoznačně vyhovuje obalová přímka, pak se určí odchylka přímosti dle obou případů a definici poté odpovídá ta poloha obalové přímky, u které je odchylka přímosti nejmenší. [16]

4.4 Metody měření

Kontrola přímosti vlasovým pravítkem

Jedním z nejjednodušších přístrojů určených pro měření přímosti rovinných ploch, obzvláště v dílenských podmínkách, je vlasové pravítko. Tato metoda ale dokáže přímost pouze

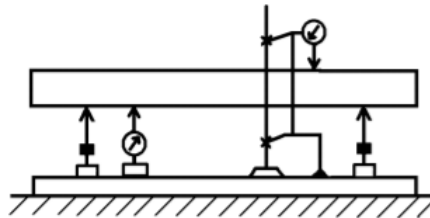
kontrolovat, nikoli měřit. Při kontrole přímosti se pravítko přikládá k měřené ploše a následným nastavením proti světlu pod hranou pravítka prosvítají paprsky, které značí nerovnosti.



Obrázek 13 - Kontrola přímosti vlasovým pravítkem [16]

Měření přímosti úchylkoměrem od průměrného pravítka

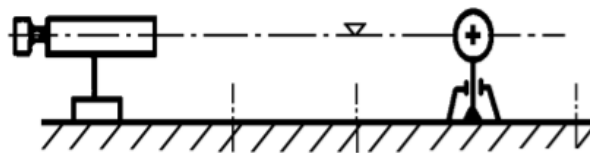
U této metody je průměrné pravítko (nebo deska) podložena na měřené ploše stejně vysokými podložkami. Následně číselníkovým úchylkoměrem při posouvání podél měřené plochy zjišťujeme odchylku přímosti jako rozdíl největší vzdálenosti měřené plochy od základny a výšky podložek. Tato metoda je vhodná pouze pro krátké délky.



Obrázek 14 - Měření přímosti úchylkoměrem od průměrného pravítka [16]

Měření přímosti zaměřovacím dalekohledem a záměrným terčem

Zde je záměrný dalekohled nebo laser upnut na tuhém stojanu a nastaven tak, aby jeho optická osa byla zhruba rovnoběžná s měřeným povrchem. Poté se záměrným terčem pohybuje po měřené ploše a výškové rozdíly od optické osy se odečtou v dalekohledu.

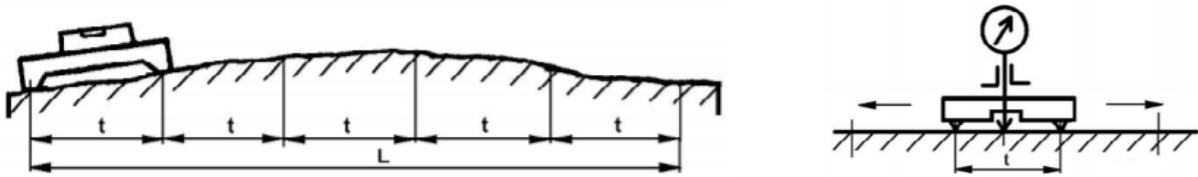


Obrázek 15 - Měření přímosti zaměřovacím dalekohledem a záměrným terčem [16]

Měření přímosti krokovou (sečnou) metodou

Při měření touto metodou se zjišťují relativní změny sklonu dílčích úseků profilu. Pro měření se používá nejčastěji libela, úchylkoměr nebo zrcátko autokolimátoru, které se upevňují na měřicí můstky. Tyto můstky na měřenou plochu dosedají ve dvou relativně malých

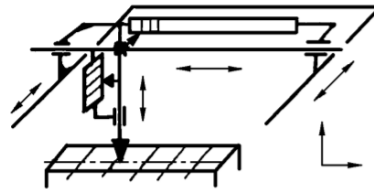
opěrných plochách o rozteči t , přičemž tato délka t závisí na délce kontrolované plochy. Celková odchylka přímosti se vyhodnocuje graficky v pravoúhlém souřadném systému.



Obrázek 16 - Měření přímosti krokovou (sečnou) metodou [16]

Měření přímosti na souřadnicovém měřicím stroji

Tato metoda umožňuje měření výškových souřadnic od obalového prvku. Využívá se zde trajektorie přímočarého pohybu jako relativní základny. Dnes je již možné pomocí vhodného softwaru vyhodnotit odchylku přímosti ihned po sejmutí potřebných bodů.

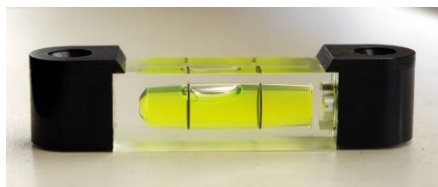


Obrázek 17 - Měření přímosti na souřadnicovém měřicím stroji [16]

4.5 Měřidla

Libela

Libela nebo také vodováha, je jednoduchý přístroj sloužící k určení vodorovného směru. Nejznámějším typem je bublinková vodováha, jejímž základem je prohnutá trubička s kapalinou, ve které je bublina. Ta má snahu vyplavat na nejvyšší místo trubičky. Tato poloha, kdy je hranol ve vodorovné pozici, je vyznačena ryskami. Pro měření přímosti se nejčastěji používá libela u měření krokovou metodou. V dnešní době jsou pro větší přesnost používány elektronické libely, viz obrázek. [17]



Obrázek 18 - Bublinková vodováha [24]



Obrázek 19 - Elektronická libela [18]

Úchylkoměr

Dalším základním měřidlem pro měření přímosti je úchylkoměr. Může být jak analogový – ručkový, tak digitální. Úchylkoměr se pevně upne do držáku a nastaví se tak, aby ukazoval nulu

pro předepsaný rozměr. Následným posouváním nebo otáčením součásti ručička úchylkoměru ukazuje rozdíl mezi nastavenou předepsanou hodnotou a naměřenou hodnotou v daném místě.



Obrázek 20 - Číselníkový úchylkoměr [19]

Nožová pravítka

Nožová nebo vlasová pravítka slouží pouze ke kontrole přímosti. Pravítko se přiloží k měřené ploše a následným nastavením proti světlu pod hranou pravítka prosvítají paprsky, které značí nerovnosti.



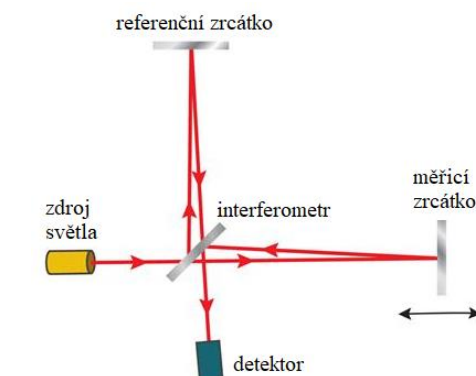
Obrázek 21 - Nožové pravítka [19]

Laserinterferometr

Interferometr je přístroj zajišťující velmi přesná měření. Všechny možnosti měření jsou založeny na interferometrickém principu (viz obrázek č. 23), který zajišťuje vysokou přesnost sejmutých dat.



Obrázek 22 - Měření laserinterferometrem [20]

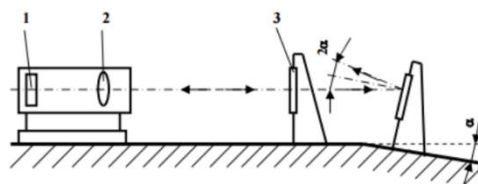
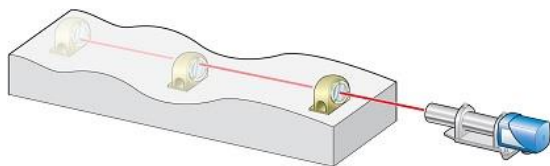


Obrázek 23 - Princip laserového interferometru [20]

Autokolimátor

V autokolimačním dalekohledu je v ohniskové rovině objektivu umístěna skleněná destička s úhlovými stupnicemi. Stojí-li odrazové zrcátko kolmo k optické ose dalekohledu, splývá odražený obraz záměrného kříže s vlastní značkou v dalekohledu. Vychýlení zrcátka o úhel α

způsobí posunutí obrazu záměrného kříže o dvojnásobnou hodnotu, tzn. úhel mezi paprskem dopadajícím a odraženým je 2α . [21]



Obrázek 24 - Měření přímosti autokolimátorem [22] Obrázek 25 - Princip měření sklonu autokolimátorem [21]
 1 – skleněná destička se stupnicí, 2 – objektiv, 3 – odrazové zrcadlo

Příslušenství pro měření přímosti

Příměrné desky zajišťují vysokou přesnost a spolehlivou tvarovou a rozměrovou stabilitu za standardních teplotních podmínek. Díky těmto vlastnostem se využívají jako základny pro měření. Nejčastěji se vyrábějí z granitu.



Obrázek 26 - Granitová příměrná deska [19]

Hrotové přístroje a prizmatické podložky slouží k upnutí měřené součásti.



Obrázek 27 - Prizmatické podložky [19]



Obrázek 28 - Hrotový přístroj k upnutí součásti [23]

Magnetický stojánek pro uchycení úchylkoměru.



Obrázek 29 - Magnetický stojánek pro uchycení úchylkoměru [19]

5 Návrh experimentu

Bohužel z důvodu koronavirové pandemie, nařízení vlády o povinné karanténě a následných preventivních opatření, včetně nařízení děkana FS ČVUT v Praze o zákazu vstupu do budovy fakulty, nebylo možné vypracovat experiment v laboratoři ústavu, jak bylo původně zamýšleno. Proto je obsahem praktické části pouze návrh experimentu, jehož výsledky nám jsou neznámy.

Do měření zakomponuji nejdůležitější součásti mé teoretické části bakalářské práce, a to měření přímosti, konkrétně měření krokovou metodou s elektronickou libelou a měření úchylkoměrem od průměrného pravítka, a výpočet ukazatelů opakovatelnosti a reprodukovatelnosti, konkrétně metodou průměru a rozpětí.

K provedení experimentu tedy budu potřebovat přístroje pro měření přímosti – elektronickou libelu a digitální úchylkoměr a pomocné příslušenství pro uchycení nástrojů a zajištění vhodných podmínek pro měření – stojan, průměrná deska atd.

Měření budu aplikovat na 10 stejných součástí z laboratoře ústavu. Jedná se o jednoduché hřídele o nominální délce 1 000 mm. Měření budou provádět celkem tři operátoři. Každý operátor provede 3 měření u každého dílu a data zanesou do formulářů uvedených na následujících stránkách (viz tabulka 10 a 11). Následně provedu numerickou analýzu a porovnáím výsledky s kritickými hodnotami a stanovím, zda je měřicí systém způsobilý, či nikoliv.

Budu tedy vyhodnocovat způsobilost dvou systémů měření, pro každou metodu měření přímosti zvlášť. Jelikož se ale do formuláře naměřených hodnot zaznamenává vždy jen jedna hodnota pro každé měření, zvolím jako tuto hodnotu tu, která je pro měření nejvíce vypovídající. Pro měření úchylkoměrem je to zřejmé – zde se bude zaznamenávat maximální odchylka, tedy největší vzdálenost měřené plochy od základny. Pro měření krokovou metodou s elektronickou libelou bude zvolena hodnota uprostřed součásti, tedy při měření se vzdáleností sousedních bodů na měřicím můstku 100 mm, půjde o hodnotu na pátém dílku měření. Tímto tedy každý operátor provede tři měření pro každý z deseti vzorků, což je dostačující pro numerickou analýzu.

Tabulka 10 - Formulář pro naměřené hodnoty [1]

Formulář pro naměřené hodnoty R & R studie											
Operátor /Měření #	Díl										Průměr
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
A 1											
2											
3											
Průměr											$\bar{X}_a =$
Rozpětí											$\bar{R}_a =$
B 1											
2											
3											
Průměr											$\bar{X}_b =$
Rozpětí											$\bar{R}_b =$
C 1											
2											
3											
Průměr											$\bar{X}_c =$
Rozpětí											$\bar{R}_c =$
Průměr dílu											$\bar{\bar{X}} =$ $R_p =$
$([\bar{R}_a =] + [\bar{R}_b =] + [\bar{R}_c =]) / [\text{počet operátorů} =] =$											$\bar{\bar{R}} =$
$\bar{X}_{DIFF} = [\text{Max } \bar{X} =] - [\text{Min } \bar{X} =] =$											$\bar{X}_{DIFF} =$
$* UCL_R = [\bar{\bar{R}} =] \cdot [D_4 =] =$											
<p>*$D_4 = 3.27$ pro 2 měření a 2.58 pro 3 měření. UCL_R představuje horní limit pro jednotlivá rozpětí. Zakroužkujte ta, která llimit překračují. Zjistěte proč a upravte. Zopakujte tato měření se stejným operátorem a dílem, který byl původně použit.</p> <p>Nebo vyřaďte tyto hodnoty a znovu zprůměrujte rozpětí a limitující hodnotu ze zbývajících pozorování.</p>											
Poznámky: _____											

Tabulka 11 - Formulář pro výpočet hodnot [1]

Protokol o opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měřidla															
Číslo a název dílu: Charakteristika: Specifikace:	Měřidlo: Číslo měřidla: Typ měřidla:	Datum: Provedl:													
Z předchozí tabulky: $\bar{R} =$		$\bar{X}_{DIFF} =$	$R_p =$												
Analýza měřicí jednotky		% celkové variability (TV)													
Opakovatelnost – Variabilita zařízení (EV) $EV = \bar{R} \cdot K_1$ $= \underline{\hspace{2cm}} \cdot \underline{\hspace{2cm}}$ $= \underline{\hspace{2cm}}$		<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>Měření</th> <th>K_1</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">0,8862</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3</td> <td style="text-align: center;">0,5908</td> </tr> </tbody> </table>	Měření	K_1	2	0,8862	3	0,5908	$\%EV = 100 \cdot [EV/TV]$ $= 100 \cdot [\underline{\hspace{2cm}} / \underline{\hspace{2cm}}]$ $= \underline{\hspace{2cm}} \%$						
Měření	K_1														
2	0,8862														
3	0,5908														
Reprodukovatelnost – Variabilita operátora (AV) $AV = \sqrt{(\bar{X}_{DIFF} \cdot K_2)^2 - \left(\frac{EV^2}{n \cdot r}\right)}$ $= \sqrt{(\underline{\hspace{2cm}} \cdot \underline{\hspace{2cm}})^2 - \left(\frac{\underline{\hspace{2cm}}^2}{\underline{\hspace{2cm}} \cdot \underline{\hspace{2cm}}}\right)}$ $= \underline{\hspace{2cm}}$		<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>Operátoři</th> <th>2</th> <th>3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">K_2</td> <td style="text-align: center;">0,7071</td> <td style="text-align: center;">0,5231</td> </tr> </tbody> </table>	Operátoři	2	3	K_2	0,7071	0,5231	$\%AV = 100 \cdot [AV/TV]$ $= 100 \cdot [\underline{\hspace{2cm}} / \underline{\hspace{2cm}}]$ $= \underline{\hspace{2cm}} \%$						
Operátoři	2	3													
K_2	0,7071	0,5231													
Opakovatelnost & Reprodukovatelnost (GRR) $GRR = \sqrt{EV^2 + AV^2}$ $= \sqrt{\underline{\hspace{2cm}}^2 + \underline{\hspace{2cm}}^2}$ $= \underline{\hspace{2cm}}$		<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>Díly</th> <th>K_3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">0,7071</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3</td> <td style="text-align: center;">0,5231</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">4</td> <td style="text-align: center;">0,4467</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">5</td> <td style="text-align: center;">0,4030</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">6</td> <td style="text-align: center;">0,3742</td> </tr> </tbody> </table>	Díly	K_3	2	0,7071	3	0,5231	4	0,4467	5	0,4030	6	0,3742	$\%GRR = 100 \cdot [GRR/TV]$ $= 100 \cdot [\underline{\hspace{2cm}} / \underline{\hspace{2cm}}]$ $= \underline{\hspace{2cm}} \%$
Díly	K_3														
2	0,7071														
3	0,5231														
4	0,4467														
5	0,4030														
6	0,3742														
Variabilita dílu (PV) $PV = R_p \cdot K_3$ $= \underline{\hspace{2cm}} \cdot \underline{\hspace{2cm}}$ $= \underline{\hspace{2cm}}$		<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">7</td> <td style="text-align: center;">0,3534</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">8</td> <td style="text-align: center;">0,3375</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">9</td> <td style="text-align: center;">0,3249</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">10</td> <td style="text-align: center;">0,3146</td> </tr> </tbody> </table>	7	0,3534	8	0,3375	9	0,3249	10	0,3146	$\%PV = 100 \cdot [PV/TV]$ $= 100 \cdot [\underline{\hspace{2cm}} / \underline{\hspace{2cm}}]$ $= \underline{\hspace{2cm}} \%$				
7	0,3534														
8	0,3375														
9	0,3249														
10	0,3146														
Celková variabilita (TV) $TV = \sqrt{GRR^2 + PV^2}$ $= \sqrt{\underline{\hspace{2cm}}^2 + \underline{\hspace{2cm}}^2}$ $= \underline{\hspace{2cm}}$		$ndc = 1,41 \cdot [PV/GRR]$ $= 1,41 \cdot (\underline{\hspace{2cm}} / \underline{\hspace{2cm}})$ $= \underline{\hspace{2cm}}$													
Pro více informací ohledně teorie a konstant použitých ve formuláři nahlédněte do <i>MSA Reference Manual</i> , Fourth edition.															

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo teoreticky rozebrat metodiku MSA, zpracovat podklady pro vyhodnocení studie opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření a také připravit teoretický podklad pro měření přímosti včetně možných metod měření a používaných měřidel. Následně měl být stanoven návrh experimentu včetně jeho vyhodnocení.

V první kapitole jsem se zabýval metodikou MSA obecně, uvedl základní složky přesnosti měření a zmínil jednotlivé variability polohy, šíře a systému.

Dále jsem se snažil pohlédnout na metodiku MSA z pohledu technologií dnešního světa, konkrétně Průmyslu 4.0. Tomuto oboru bych se rád věnoval i v budoucnu, proto mě právě zajímalo propojení analýzy systému měření s moderními technologiemi.

Následně jsem se zaměřil již na konkrétní výpočet ukazatelů opakovatelnosti a reprodukovatelnosti. Postupně jsem rozebral metodu rozpětí, metodu průměru a rozpětí a také metodu ANOVA.

Mým dalším tématem byl zástupce měření geometrických tolerancí, konkrétně měření přímosti. Shrnul jsem celkově geometrické tolerance, dopodrobna se zaměřil na přímost a její odchylku a následně uvedl různé metody měření přímosti a měřidla vhodná k užití pro toto měření.

Všechny tyto teoreticky zpracované kapitoly měly vyústit v praktickou část, kde měl probíhat experiment v laboratoři ústavu, kdy měla být zkoumána způsobilost systému měření metodou průměru a rozpětí skrz opakovatelnost a reprodukovatelnost při měření přímosti metodou měření úchylkoměrem od průměrného pravítka a měření krokovou metodou s elektronickou libelou. Bohužel však kvůli nastalé situaci ohledně koronavirové pandemie a následných nařízení vlády a rektora školy nebylo možné měření provést a výsledky experimentu tedy nejsou k dispozici.

Seznam použité literatury

- [1] *Measurement Systems Analysis: Reference Manual*. 4th ed. Detroit, Mich.: General Motors, 2010. ISBN 978-1-60-534211-5.
- [2] NENADÁL, Jaroslav. *Moderní management jakosti: principy, postupy, metody*. Praha: Management Press, 2008. ISBN 978-80-7261-186-7.
- [3] *MSA (Measurement System Analysis) Analýza systému měření*. In: ManagementMania.com [online]. Wilmington (DE) 2011-2020, 30.08.2016 [cit. 02.07.2020]. Dostupné z: <https://managementmania.com/cs/measurement-system-analysis>
- [4] Průmysl 4.0. *TECHNODAT* [online]. Zlín, 2018 [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: <https://www.prumysl-4.cz/>
- [5] ATIK, Hayriye a Fatma ÜNLÜ. *The Measurement of Industry 4.0 Performance through Industry 4.0 Index: An Empirical Investigation for Turkey and European Countries*, *Procedia Computer Science*. ScienceDirect, 2019, 852-860. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.123>.
- [6] BARROS, Cristina a Ana BARROSO. *A Web and Cloud-Based Measurement System Analysis Tool for the Automotive Industry*. 2018. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/326552266_A_Web_and_Cloud-Based_Measurement_System_Analysis_Tool_for_the_Automotive_Industry
- [7] MARTINEZ, Felipe a Richard BRUNET-THORNTON. *Analyzing the Impacts of Industry 4.0 in Modern Business Environments*. Hershey, PA: IGI Global, Disseminator of Knowledge, [2018]. ISBN 9781522534686.
- [8] LUDVÍK, Vladimír a Miroslav POSPÍŠIL. *Terminologie z oblasti metrologie*. 2. vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. Sborníky technické harmonizace. Dostupné také z: https://www.unmz.cz/files/Sborniky_TH/Terminologie_v_oblasti_metrologie_DEF.pdf
- [9] PALÁN, Jaromír. *MSA Analýza systému měření: Implementační směrnice* [online]. Vrchlabí, 2005 [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2604_PALAN_1.pdf
- [10] SIMMONS, Collin H., Neil PHELPS a Dennis E. MAGUIRE. *Manual of Engineering Drawing*. 4th Edition. 2012. ISBN 9780080966526.
- [11] ČSN EN ISO 1101. *Geometrické specifikace výrobků (GPS) - Geometrické tolerování – Tolerance tvaru, orientace, umístění a házení*. Praha: Český normalizační institut, 2012.

- [12] Straightness. *GD&T Basics* [online]. [cit. 2020-06-29]. Dostupné z: <https://www.gdandtbasics.com/straightness>
- [13] Straightness. *Dimensional Consulting* [online]. [cit. 2020-06-29]. Dostupné z: <https://www.dimensionalconsulting.com/straightness.html>
- [14] NĚMEC, Oldřich. Kontrola a měření. *Orbis pictus 21. století: Měření úchylek a tvaru polohy* [online]. [cit. 2020-06-29]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2511076/>
- [15] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: učebnice pro školy technického zaměření*. Šesté vydání. Úvaly: Albra, 2017. ISBN 978-807-3611-118.
- [16] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0671-1.
- [17] *Ottův slovník naučný: ilustrovaná encyklopaedie obecných vědomostí*. Praha: Paseka, 2003. ISBN 80-7203-196-1.
- [18] NT11 MINILEVEL. *Prominent spol s. r. o.* [online]. [cit. 2020-07-01]. Dostupné z: http://www.prominent-km.cz/?page_id=300
- [19] *SOMET: ...všechno má svou míru.* [online]. [cit. 2020-07-01]. Dostupné z: <https://somet.cz/cz/>
- [20] Jak funguje interferometrický systém? *RENISHAW* [online]. [cit. 2020-07-01]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/jak-funguje-interferometricky-system--38612>
- [21] PERNIKÁŘ, Jiří a Miroslav TYKAL. *Strojírenská metrologie II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-3338-8.
- [22] *Spectrum metrology: Autocollimator proves the ideal tool for high accuracy slideway straightness* [online]. [cit. 2020-07-01]. Dostupné z: <https://www.spectrum-metrology.co.uk/news/high-accuracy-straightness.php>
- [23] *UNIMETRA: Hrotové přístroje* [online]. [cit. 2020-07-01]. Dostupné z: http://www.unimetra.cz/soubory_materialy/93_1.pdf
- [24] *LIBELY: HFO 40* [online]. [cit. 2020-07-01]. Dostupné z: <http://www.libely.cz/hf-55-636/>
- [25] JANŮ, Tomáš a Michaela OPLETALOVÁ. Současnost podnikových systémů je v customizaci. *Vlastní cesta* [online]. 15.5.2016 [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.vlastnicesta.cz/clanky/soucasnost-podnikovych-systemu-je-v-customizaci/>