

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A
METROLOGIE



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

SLEDOVÁNÍ STABILITY MĚŘIDEL V KALIBRAČNÍ LABORATOŘI
MONITORING OF GAUGES STABILITY IN CALIBRATION LABORATORY

AUTOR: Dennis Rottenborn

STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. BcA. Jan Podaný, Ph.D.

KONZULTANT PRÁCE: Ing. Matej Harčarik

PRAHA 2020



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Rottenborn** Jméno: **Dennis** Osobní číslo: **473494**
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:
Sledování stability měřidel v kalibrační laboratoři

Název bakalářské práce anglicky:
Monitoring of gauges stability in calibration laboratory

Pokyny pro vypracování:
1. Metrologická terminologie.
2. Vliv okolního prostředí na měření.
3. Nejistoty měření.
4. Způsobilost měřicích procesů.
5. Stanovení postupu sledování stability měřidel.
6. Praktické ověření stanoveného postupu.
7. Zhodnocení získaných výsledků.

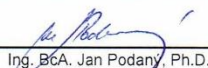
Seznam doporučené literatury:


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.

23.6.2020
Datum převzetí zadání

Rottenborn
Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....

Podpis

Anotace

Bakalářská práce se zaměřuje na stanovení postupu pro sledování stability měřidel v kalibrační laboratoři výrobního podniku. Tento postup je následně aplikován na vybraná měřidla – mikrometr, výškoměr a multimetr. Práce je založená na jednotné terminologii vycházející z mezinárodního metrologického slovníku. Dále jsou zde popsány vlivy ovlivňující měření, metody vyhodnocování nejistot měření a způsobilost měřících procesů.

Klíčová slova

Dlouhodobá stabilita, kalibrace, metrologie, index způsobilosti procesu, automotive, MSA, opakovatelnost, reprodukovatelnost, nejistota měření

Annotation

This bachelor thesis focuses on setting a procedure of monitoring gauges stability in calibration laboratory. This procedure is applied on selected gauges – micrometer, height gauge and multimeter. The thesis is based on official terminology of the International Vocabulary of Metrology. Furthermore, it describes ambient impacts on measurements, measurement uncertainty and capability of measuring.

Keywords

Long-term stability, calibration, metrology, process capability index, automotive, MSA, repeatability, reproducibility, measurement uncertainty

Poděkování

Děkuji panu Ing. BcA. Janu Podanému, Ph.D. za pomoc při vedení bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Mateji Harčaríkovi a ostatním pracovním kolegům za cenné rady a informace.

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Terminologie.....	11
2.1	Základní pojmy a definice	11
3	Vliv okolního prostředí na měření	15
3.1	Teplota	17
3.2	Vlhkost vzduchu	19
4	Nejistoty měření	20
4.1	Stanovení standardní nejistoty typu A.....	22
4.1.1	Příklad výpočtu standardní nejistoty typu A.....	23
4.2	Stanovení standardní nejistoty typu B.....	24
4.2.1	Příklad výpočtu standardní nejistoty typu B.....	25
4.3	Kombinovaná nejistota	26
4.4	Rozšířená nejistota	26
5	Způsobilost měřicích procesů	27
5.1	Ukazatel způsobilosti c_g	28
5.2	Ukazatel způsobilosti c_{gk}	28
6	Stanovení postupu sledování stability měřidel.....	29
6.1	Měřidlo	30
6.2	Reference	30
6.3	Temperace měřidla	31
6.4	Kalibrační list	32
6.5	Interval sledování stability	34
6.6	Regulační diagramy	35
6.7	Výpočty.....	36
6.8	Vyhodnocení regulačních diagramů.....	38

6.9	Výsledný postup sledování stability	38
7	Praktické ověření stanoveného postupu pro vybraná měřidla	39
7.1	Mikrometr	40
7.2	Výškoměr	42
7.3	Multimetr	45
8	Zhodnocení výsledků	47
9	Závěr	50
	Zdroje	51

Seznam použitých symbolů a zkratek

- ČSN – česká technická norma, dříve československá státní norma
MSA – Measurement Systems Analysis (Analýza systémů měření)
GUM – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (Pokyn pro vyjadřování nejistoty měření)
VIM – International Vocabulary of Metrology (Mezinárodní slovník základních a všeobecných termínů v metrologii)
 c_g – index možné způsobilosti měřidla
 c_{gk} – index kritické způsobilosti měřidla
DMT (*DMT**) – dolní toleranční mez (s přirozenou hranicí)
DMZ – dolní mez zásahu
DMZ_s – dolní mez zásahu výběrové směrodatné odchytky
HMT (*HMT**) – horní toleranční mez (s přirozenou hranicí)
HMZ – horní mez zásahu
HMZ_s – horní mez zásahu výběrové směrodatné odchytky
 k – koeficient rozšíření
 Δl – velikost délkové změny
 l_0 – původní délka
 n – počet naměřených hodnot
 P – pravděpodobnost
 s – výběrová směrodatná odchytky
 Δt – velikost změny teploty
 T (T^*) – tolerance (s přirozenou hranicí)
 u_A (u_{Ak}) – standardní nejistota typu A (s korigujícími koeficienty)
 u_B – standardní nejistota typu B
 u_{Bzj} – standardní nejistota typu B j-tého zdroje
 u_C – kombinovaná nejistota
 U – rozšířená nejistota
 \bar{x} – aritmetický průměr
 x_i – naměřená hodnota
 x_m – referenční hodnota
 Z_{jmax} – maximální možná odchytky j-tého zdroje
 α_l – součinitel teplotní roztažnosti
 α_r – teplotní součinitel elektrického odporu

1 Úvod

Cílem této bakalářské práce je stanovení postupu pro sledování dlouhodobé stability měřidel prováděné v kalibrační laboratoři výrobního podniku dodávajícího kompletní služby pro automobilový průmysl. Stabilitu měřidla můžeme definovat jako index, který nám poskytuje informaci o tom, že měřicí systém dokáže měřit určitý ukazatel kvality s dostatečně malou chybou a odchylkou měření vzhledem k toleranci měřené veličiny. Výsledný postup jsem ověřil na třech vybraných měřidlech kalibrační laboratoře – mikrometru, výškoměru a multimetru.

Práce používá jednotnou terminologii vycházející z mezinárodního metrologického slovníku *International Vocabulary of Metrology (VIM)*. Tato práce dále klade důraz na seznámení čtenáře s problematikou měření a okolních vlivů, které dané měřicí procesy významnou měrou ovlivňují. S tím úzce souvisí stanovení nejistot měření. Práce popisuje vyhodnocování standardní nejistoty typu A, typu B, kombinované nejistoty i rozšířené nejistoty měření.

V práci jsou uvedeny metody, postupy a přístrojové vybavení použité pro vypracování dané úlohy. Tato práce je důležitá pro pochopení významu zavedení těchto kroků v podnicích, ať v kalibračních laboratořích, nebo při přímém zavedení sledování stability na výrobních linkách těchto podniků.

2 Terminologie

Metrologie má velký význam v rámci rozvoje lidské společnosti. Každý den nakupujeme potraviny na váhu, měříme odběr vody a energie nebo užíváme léky, které obsahují určité množství účinných látek. Jenom náklady na měření v Evropě se pohybují na hranici 6 % hrubého národního produktu. Metrologie udává základ porovnatelnosti výsledků zkoušek pomocí návaznosti měření s patřičnou nejistotou měření nebo definováním jednotlivých veličin a jednotek měření. Metrologie je tak nepostradatelným oborem pro ostatní vědní disciplíny (geologie, astronomie či jaderná fyzika), výzkum, výrobu a uplatnění produktů na trhu. U velké části moderního průmyslu náklady na měření činí 10 až 15 % z celkových výrobních nákladů podniků. Metrologie mimo jiné slouží k zavedení spravedlnosti a práva v oblasti závazkových vztahů a veřejného zájmu. Z hlediska metrologie je tedy užívání přesných pojmů a správné terminologie zcela zásadní. [1] [2]

2.1 Základní pojmy a definice

Následující pojmy jsou převzaty z veřejně dostupného dokumentu *Terminologie z oblasti metrologie (2. vydání)* umístěného na webových stránkách Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. Jedná se o oficiální překlad 3. vydání mezinárodního metrologického slovníku, v originále *International Vocabulary of Metrology (VIM)* vydaný organizací *BIPM (Bureau International des Poids et Mesures)*. Originál tohoto dokumentu je dostupný pouze v anglickém a francouzském jazyce. V případě jakéhokoliv sporu je rozhodující text v originálním znění. [1]

Dále existuje slovník *International Vocabulary of Legal Metrology (VIML)*, vydaný organizací *OIML (Organisation Internationale de Métrologie Légale)*. Jedná se o mezinárodní slovník pojmů a definic používaných v oblasti legální metrologie. Originál slovníku je vydaný také pouze v anglickém a francouzském jazyce. Z tohoto slovníku nečerpám, jelikož legální metrologie není obsahem této bakalářské práce. U obou slovníků existuje mnoho oficiálních překladů na základě povolení od těchto organizací. [1]

Na úvod definujeme pojem **veličina**, který vyjadřuje vlastnost jevu, tělesa nebo látky, která má velikost, jež může být vyjádřena jako číslo a reference. **Referencí** může být měřicí jednotka, postup měření, referenční materiál nebo jejich kombinace. [1] V této bakalářské práci se budeme zabývat veličinou délky a elektrického odporu. Délka patří mezi základní fyzikální veličiny a vyjadřuje vzájemnou polohu bodů v prostoru. Elektrický odpor je definován jako schopnost materiálu bránit průchodu elektrického proudu.

Číslo a reference společně vyjadřující velikost veličiny popisuje **hodnotu veličiny**. [1] **Pravá hodnota veličiny** je taková hodnota veličiny, která je ve shodě s definicí veličiny. Vzhledem k inherentně nedokonalým definicím veličin není pravá hodnota jedinečná, nýbrž existuje interval pravých hodnot odpovídajících definici každé dané veličiny. Tento interval je z principu nepoznatelný. [1]

Měření je proces experimentálního získávání jedné nebo více hodnot veličiny, které mohou být důvodně přiřazeny veličině. [1] **Naměřená hodnota veličiny** vyjadřuje číslo a reprezentuje **výsledek měření**, který je dle oficiálního překladu slovníku *VIM* definován jako soubor hodnot veličiny přiřazený měřené veličině společně s jakoukoliv další dostupnou relevantní informací. [1]

Dále je potřeba vysvětlit pojem **přesnost měření**. Přesnost měření značí těsnost shody mezi naměřenou hodnotou veličiny a pravou hodnotou veličiny měřené veličiny. [1] Protože pravá hodnota je z principu nepoznatelná, přesnost měření nelze kvantifikovat. Z tohoto důvodu zavádí *VIM* pojmy pravdivost a preciznost měření. [1]

Pravdivost měření lze vyjádřit jako těsnost shody mezi aritmetickým průměrem nekonečného počtu opakovaných naměřených hodnot veličiny a referenční hodnotou veličiny. [1] Dalším často používaným pojmem v metrologii je **preciznost měření**, tedy těsnost shody mezi indikacemi nebo naměřenými hodnotami veličiny získanými opakovanými měřeními na stejném objektu nebo na podobných objektech za specifikovaných podmínek. [1]

S přesností měření úzce souvisí **opakovatelnost měření**, tedy preciznost měření za souboru podmínek opakovatelnosti měření. [1] **Podmínka opakovatelnosti měření** zahrnuje stejný postup měření, stejný obslužný personál, stejný měřicí systém, stejné pracovní podmínky a stejné místo, a opakování měření na stejném objektu nebo podobných objektech v krátkém časovém úseku. [1] Naopak **reprodukovatelnost měření** definujeme jako preciznost měření za podmínek reprodukovatelnosti měření. [1] **Podmínka reprodukovatelnosti měření** zahrnuje různá místa, obslužný personál, měřicí systémy a opakování měření na stejném objektu nebo podobných objektech. [1] Reprodukovatelnost tak vyjadřuje shodu mezi jednotlivými laboratořemi, například porovnatelnost výsledků zkoušek.

Vzhledem k tomu, že v praxi měření není nikdy dokonalé, musí být definován pojem **chyba měření**, který je vyjádřen jako rozdíl naměřené hodnoty veličiny a pravé hodnoty veličiny. [1] Každé měření je zatíženou chybou a k pravé hodnotě měření se tak pouze přibližujeme. Avšak vzhledem k nepoznatelnosti pravé hodnoty nelze chybu měření nikdy přesně stanovit. Dnes je proto mezinárodním standardem uvádět výsledek měření s deklarovanou **nejistotou měření**, kterou lze popsat jako nezáporný parametr charakterizující rozptýlení hodnot veličiny přiřazených k měřené veličině na základě použité informace. [1]

S přesností měření a referencí souvisí pojem **kalibrace**. Kalibrace je 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. [1] Zjednodušeně lze říci, že se jedná o vzájemné porovnání dvou měřidel s dokumentací na základě **metrologické návaznosti**. Metrologická návaznost je vlastnost výsledku měření, pomocí níž může být výsledek vztažen ke stanovené referenci přes dokumentovaný nepřerušovaný řetězec kalibrací, z nichž každá se podílí svým příspěvkem na stanovené nejistotě měření. [1]

Měřidlo charakterizujeme jako zařízení používané k měření buď samotné, nebo ve spojení s jedním nebo více přídatnými zařízeními. [1] Oproti tomu **měřicí systém** je soustava jednoho nebo více měřidel a často dalších zařízení, včetně jakýchkoliv činidel a zdrojů, sestavená a přizpůsobená k poskytování informace používané ke generování naměřených hodnot veličiny ve specifikovaných intervalech pro veličiny specifikovaných druhů. [1]

Etalon je realizací definice dané veličiny, se stanovenou hodnotou veličiny a přidruženou nejistotou měření, používaná jako reference. [1] V této práci využívám např. etalonu délky v podobě koncových měrek. Materiál, dostatečně homogenní a stabilní, s referencí ke specifikovaným vlastnostem, které byly stanoveny tak, že se hodí pro jejich zamýšlené použití při měření nebo při zkoumání jmenovitých vlastností, nazýváme **referenčním materiálem**. [1]

3 Vliv okolního prostředí na měření

Během měření je měřicí systém ovlivňován celou řadou různých vlivů (měřicí stroj, měřená součást, obsluha stroje, strategie měření, okolní prostředí), které mají přímý dopad na nejistoty měření. Podnik by měl zvolit vhodné umístění a vybavení laboratoře pro eliminování okolních vlivů. Norma *ČSN EN ISO/IEC 17025 Posuzování shody – Všeobecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří* udává dobrou praxi pro provádění zkoušek a kalibrací. [10]

V kapitole 5 normy *ČSN EN ISO/IEC 17025:2005 – Technické požadavky* se uvádí, že na správnost a spolehlivost zkoušek a kalibrací má vliv:

- lidský faktor,
- podmínky prostorů a prostředí,
- zkušební a kalibrační metody a jejich validace,
- zařízení,
- návaznost měření,
- vzorkování,
- zacházení se zkušebními a kalibračními položkami. [10]

Klíčový je výběr vhodného stroje či zařízení pro provádění testů a kalibrací. Nevhodný stroj může zcela zásadně ovlivnit výslednou nejistotu měření. Z tohoto důvodu je potřeba být při výběru stroje selektivní. Nově zakoupené stroje laboratoře často testují, aby kvantifikovaly jednotlivé zdroje nejistot měření. [26] Všechna použitá měřidla musí být v době použití platně kalibrována (vyplývá z návaznosti měření) a identifikována. Samotná měření musí probíhat v souladu s návodkami, postupy a specifikacemi, které musí být vždy k dispozici. [10]

Stroje a zařízení smí obsluhovat pouze k tomu oprávněné a proškolené osoby. Operátor, který provádí zkoušky a kalibrace má zásadní vliv na výslednou nejistotu měření. Odborné vzdělání, zkušenosti s danou disciplínou nebo odborná příprava zde hrají zcela zásadní roli. [26]

Laboratoř musí mít řádně zpracované postupy pro provádění kalibrací včetně vzorkování, manipulace se vzorky, přepravy, skladování, samotné kalibrace a odhadu nejistoty. Dále je nezbytná jejich aktualizace, aby nebyly v rozporu s dobrou praxí. Kalibrační laboratoř výrobního podniku se snaží držet krok s aktuálním vývojem kvality. Odchytky od těchto postupů a specifikací lze schválit pouze po přijetí zákazníkem, ale vždy je požadováno jejich řádné zdokumentování. [10]

Prostory laboratoře a její vybavení včetně zdrojů energie a osvětlení musí být takové, aby nedocházelo k nesprávnému provádění zkoušek a kalibrací. Výsledky nesmí pozbýt platnosti a prostředí nesmí mít negativní dopad na výslednou kvalitu měřicího procesu. Laboratoř je dále povinna sledovat podmínky v souladu s danými postupy a specifikacemi v případě, že by tyto faktory (teplota, vlhkost vzduchu, tlak vzduchu, vibrace a otřesy atd.) mohly ovlivnit výsledek měření. [10]

V této bakalářské práci se zabývám teplotou a vlhkostí vzduchu. V rámci kalibrační laboratoře spolupracujícího výrobního podniku se jedná o jediné předepsané podmínky kalibrací, a tedy i mnou sledovaného postupu sledování stability měřidel. Pro monitorování těchto dvou vlivů je k dispozici indikátor vlhkosti vzduchu a tři snímače teploty v různých výškách laboratoře. Monitoring dalších okolních vlivů není potřeba, jelikož se zásadní měrou nepodílí na výsledné nejistotě měření (viz kapitola 4).

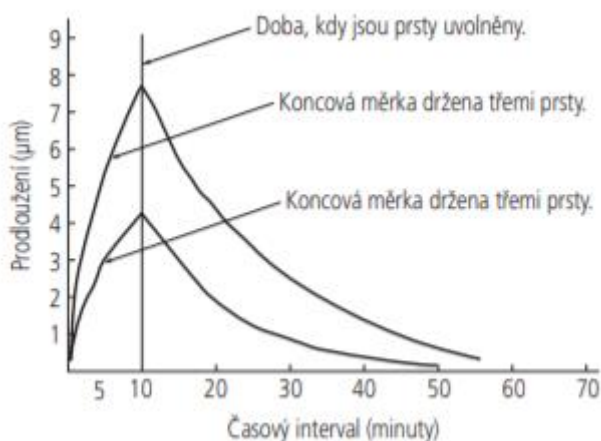
3.1 Teplota

Kolísající teplota v laboratoři je jedním z největších vlivů ovlivňující nejistotu délkového měření a měření elektrických veličin. Měřicí proces délkového měření je ovlivněn teplotní roztažností materiálů, které vlivem měnící se teploty zvětšují, respektive zmenšují svůj objem. Velikost této změny popisuje součinitel teplotní roztažnosti, který závisí na krystalické mřížce a chování daného materiálu. Vzhledem k této skutečnosti jsou etalony jako koncové měrky vyráběny z materiálů teplotně stabilních, tedy materiálů, které odolávají přenosu tepla. Změna rozměru vůči původní délce tělesa se vypočítá dle následujícího vzorce č. 1:

$$\Delta l = \alpha_l \cdot l_0 \cdot \Delta t \quad (1)$$

kde Δl značí velikost délkové změny vůči počáteční hodnotě l_0 , součinitel teplotní roztažnosti označujeme α_l a Δt vyjadřuje velikost změny teploty.

Obrázek č. 1 popisuje manipulaci s ocelovými koncovými měrkami holýma rukama, při které dochází k jejich ohřívání, čímž je následně zapříčiněna jejich teplotní roztažnost. [11]



Obrázek 1: Teplotní stabilizace v čase koncové měrky o velikosti 100 mm [11]

Naopak u měření odporu je nutné znát teplotní součinitel elektrického odporu, který vyjadřuje závislost odporu na teplotě – viz vzorec č. 2.

$$\Delta R = \alpha_r \cdot R_0 \cdot \Delta t \quad (2)$$

kde ΔR značí velikost změny odporu vůči počáteční hodnotě R_0 , teplotní součinitel elektrického odporu označujeme α_r a Δt vyjadřuje velikost změny teploty.

Kalibrační laboratoř výrobního podniku je vybavena třemi snímači teploty v různých výškách laboratoře. Do výstupního protokolu měření se zaznamenávají průměrné hodnoty, obvykle teplota na začátku měření a teplota na jeho konci. Pokud teplota v laboratoři přesáhne předepsanou mez, v takovém případě nelze v měření pokračovat.

3.2 Vlhkost vzduchu

U pojmu vlhkost musíme rozlišovat zejména mezi vlhkostí relativní a absolutní. Absolutní vlhkost můžeme definovat jako hmotnost vodní páry obsažené v 1 m³ vzduchu. Relativní vlhkost můžeme vyjádřit jako poměr skutečné hmotnosti vodních par na jednotku objemu při dané teplotě a hmotnosti vodních par potřebné k plnému nasycení tohoto objemu za stejné teploty. Relativní vlhkost vždy souvisí s teplotou a udáváme ji v procentech. [28]

Optimální hodnota relativní vlhkosti by se měla pohybovat mezi 40 – 60 %. Při nevhodné hodnotě relativní vlhkosti může docházet k negativním vlivům. Při vysoké relativní vlhkosti (> 70 %) může docházet ke korozi měřidel, což může zapříčinit nepřesné měření. Mnoho měřidel obsahuje plastové díly, které jsou náchylné na navlhavost. Navlhnutí plastů vede k poklesu mechanických vlastností, zhoršení elektrických izolačních vlastností nebo zvětšení rozměru. Naopak při nízké hodnotě relativní vlhkosti (< 30 %) může docházet k degradaci a změnám chování konstrukčních materiálů a dalším negativním dopadům. [28] [29]

Hodnotu relativní vlhkosti mohou ovlivňovat vnitřní i vnější faktory. Za vnitřní faktory můžeme považovat pracovníky a klimatizační jednotku, kdy dochází k výměně a cirkulaci vzduchu. Za vnější faktor můžeme považovat zejména počasí. Z výše uvedených důvodů je v laboratořích nezbytné sledovat hodnoty relativní vlhkosti. [28]

V kalibrační laboratoři výrobního podniku je k dispozici snímač relativní vlhkosti. Při nadměrné hodnotě, například v období častých dešťových srážek lze využít odvlhčovače vzduchu. Nemělo by tak docházet ke kritickým hodnotám relativní vlhkosti, které by mohly zapříčinit poškození měřidel uvnitř laboratoře nebo negativně ovlivnit samotné měření. [28]

4 Nejistoty měření

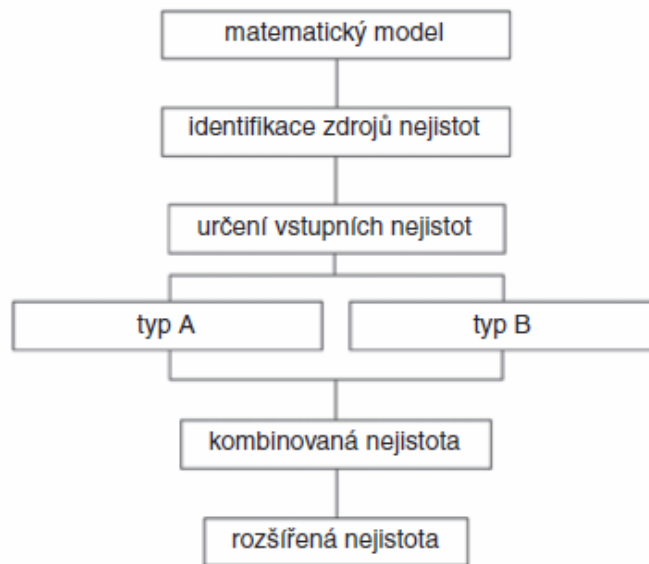
Nejistota měření je dle slovníku *VIM* definována jako nezáporný parametr, který charakterizuje rozptyl hodnot, kde pravděpodobně leží pravá hodnota měřené veličiny. Snahou metrologa je snížit daný interval na minimum. Je ovšem nemožné dosáhnout nulové odchylky měření, neboť zcela ideálních podmínek pro měření nelze nikdy dosáhnout. Výsledná nejistota měření tak zahrnuje všechny nedokonalosti a chyby vzniklé při měření. [22]

Chyby ovlivňující měřicí systém můžeme definovat jako hrubé, systematické a náhodné. Hrubé chyby vznikají například špatným zapsáním výsledku vlivem nepozornosti, náhlým selháním měřicího přístroje nebo nastavením špatných podmínek pro měření – např. špatný rozsah měřidla. Tyto hodnoty se obvykle značně liší od ostatních hodnot a je potřeba je odstranit, aby nedošlo ke zkreslování výsledku měření. [9]

Systematické chyby jsou dány přesností měřicího přístroje, měřicí metody a okolních vlivů. Příkladem může být vliv měřicí síly nebo vliv referenční teploty. Při opakovaných měřeních za podmínek opakovatelnosti mají systematické chyby stejnou hodnotu nebo se jejich hodnota mění v závislosti na změně podmínek měření. [31] Nicméně lze zavést určitou korekci výsledku pomocí nestatistických metod (výpočet, odhad, údaje od výrobce) nebo je odstranit vhodnějším výběrem měřicí metody. [9]

Náhodné chyby nelze předpovídat a často bývají součtem několika rušivých vlivů, které ovlivňují výslednou hodnotu měření. Náhodnou chybu nelze zcela odstranit ani jinak korigovat. Volbou vhodných technických opatření však lze zmenšit její velikost. [9] [31]

Výsledek měření doplněný o nejistotu měření je normalizovaný tvar výsledku dle dokumentu GUM. Takto udávaný výsledek je mezinárodně uznávaný a zajišťuje jednotnou interpretaci výsledku. Dále umožňuje porovnání s výsledky ostatních laboratoří a s hodnotami uvedenými ve specifikacích. [22] Mezinárodní výbor pro míry a váhy (Comité International des Poids et Mesures) zveřejnil v roce 1993 dokument *GUM*, který je dnes mezinárodním standardem v oblasti provádění odhadů, stanovení a vyjadřování nejistot měření. Tento dokument se zabývá stanovením standardní nejistoty typu A, typu B a rozšířené nejistoty, která je součinem kombinované nejistoty a koeficientu rozšíření – viz následující kapitoly 4.1 až 4.4. [3]



Obrázek 2: Stanovení nejistot měření dle GUM analýzy [16]

Standardní nejistoty typu A a typu B se spolu s kombinovanou nejistotou vyjadřují ve formě směrodatné odchylky rozdělení pravděpodobnosti měřené veličiny. Rozšířená nejistota měření odpovídá intervalu zahrnujícímu pravou hodnotu měření s určitou definovanou pravděpodobností. [31]

4.1 Stanovení standardní nejistoty typu A

Standardní nejistota typu A se stanoví na základě statistické analýzy z n opakovaných a na sobě nezávislých měření za podmínek opakovatelnosti měření. Tato nejistota je ovlivněna malými náhodnými vlivy. Nejistotu typu A označujeme u_A a rovná se výběrové směrodatné odchylce průměrů – viz vzorec č. 3. Pro výpočet potřebujeme znát počet naměřených hodnot n , hodnotu aritmetického průměru \bar{x} , který vypočítáme ze vzorce č. 4, a x_i značí i -tou naměřenou hodnotu. [8] [9]

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

kde výpočet aritmetického průměru \bar{x} :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4)$$

Tento výpočet nicméně platí pro počet naměřených hodnot větší než 10. Při nižším počtu měření se hodnota standardní nejistoty typu A u_{Ak} násobí odpovídajícími koeficienty k příslušnému počtu naměřených hodnot uvedených v tabulce č. 1. S klesajícím počtem naměřených hodnot klesá věrohodnost výsledku měření. Ke korekci tohoto jevu lze použít koeficienty k , které vyplývají z předpokladu normálního rozdělení veličiny. [9]

$$u_{Ak} = k \cdot s(\bar{x}) \quad (5)$$

Tabulka 1: Koeficienty pro počet naměřených hodnot $n < 10$

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

4.1.1 Příklad výpočtu standardní nejistoty typu A

Pro náš příklad jsem posuvným měřidlem naměřil 10 hodnot délky (i) na koncové měrce délky 3,50 mm. Naměřené hodnoty v milimetrech (x_i) jsou uvedené v tabulce níže.

Tabulka 2: Naměřené hodnoty posuvným měřtkem

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x_i [mm]	3,53	3,51	3,48	3,51	3,49	3,48	3,50	3,52	3,49	3,50

Výpočet aritmetického průměru dle vzorce č. 3:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} (3,53 + 3,51 + \dots + 3,50) = 3,501 \text{ mm}$$

Výpočet standardní nejistoty měření typu A dle vzorce č. 3:

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} =$$
$$= \sqrt{\frac{1}{10(10-1)} \sum_{i=1}^{10} [(3,53 - 3,501)^2 + (3,51 - 3,501)^2 + \dots + (3,50 - 3,501)^2]} \doteq$$
$$\doteq 0,00526$$

Výsledek ve tvaru $\bar{x} \pm u_A$:

$$x = 3,50 \pm 0,01 \text{ mm}$$

4.2 Stanovení standardní nejistoty typu B

Standardní nejistota typu B se nezjišťuje statisticky, ale analyticky nebo na základě expertního odhadu, který vychází z dostupných údajů od výrobce měřidla, kalibračních listů a certifikátů, nejistoty referencí nebo ze zkušenosti s chováním a vlastnostmi použitých materiálů. Hodnota standardní nejistoty typu B je dána geometrickým součtem jednotlivých zdrojů nejistot u_{Bzj} . [8] [9]

Hodnoty jednotlivých zdrojů nejistot nezávisí na počtu opakovaných měření, ale základem je určení maximální možné odchylky j-tého zdroje z_{jmax} a výběr rozdělení pravděpodobnosti nejlépe vystihující výskyt hodnot v tomto intervalu. [8] Mezi čtyři nejpoužívanější typy rozdělení patří:

- normální rozdělení
- rovnoměrné rozdělení
- trojúhelníkové rozdělení
- rozdělení tvaru U. [16]

Normální rozdělení je nejčastěji spojeno se standardní nejistotou typu A. Také bývá přiřazováno například nejistotě z kalibračních listů. Dokument *GUM* doporučuje využít rovnoměrného rozdělení, pokud nemáme k dispozici informace o přesném rozdělení pravděpodobnosti. Trojúhelníkového rozdělení se využívá v případech, kdy je známa počáteční, koncová a nejčastější hodnota. Rozdělení tvaru U je při grafickém znázornění hodnot vzhledově podobné písmenu U. Nejpravděpodobnější výskyt hodnot je na hranicích intervalu náhodné veličiny. [16]

Pro uvedená rozdělení lze definovat konstanty k , které vyjadřují poměr maximální hodnoty z_{jmax} vůči směrodatné odchylce normálního rozdělení. Konstanty pro jednotlivé typy rozdělení z dokumentu *GUM* jsou uvedeny v tabulce č. 3. [8] [16]

Tabulka 3: Konstanty pro různá rozdělení [16]

Rozdělení	Konstanta k
Rovnoměrné	$\sqrt{3}$
Trojúhelníkové	$\sqrt{6}$
Tvaru U	$\sqrt{2}$

Přepočet dílčích zdrojů nejistot se vypočítá pomocí zjednodušeného vzorce pro nejběžnější typy rozdělení pravděpodobnosti:

$$u_{Bzj} = \frac{z_{jmax}}{k} \quad (6)$$

Výsledný výpočet nejistoty typu B se určí jako geometrický součet dílčích nejistot:

$$u_B = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_{Bzj}^2} \quad (7)$$

4.2.1 Příklad výpočtu standardní nejistoty typu B

Nejistota typu B se vypočítá geometrickým součtem známých a dostupných dílčích nejistot. Jednotlivé nejistoty je potřeba přepočítat na základě dostupných informací o jejich typu rozdělení. Následně můžeme provést geometrický součet dílčích nejistot.

Tabulka 4: Ilustrativní hodnoty pro příklad výpočtu standardní nejistoty typu B posuvného měřidla

Zdroj	Velikost z_{jmax}	Rozdělení	Konstanta	Koeficient citlivosti	Příspěvek k nejistotě
Rozlišovací schopnost	0,01 mm	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	1	0,0058 mm
Rozdíl teplot	1 °C	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	$L \cdot \alpha_l$	0,000021 mm
Rozšířená kalibrační nejistota (k=2)	0,012 mm	Normální	2	1	0,006 mm

$$u_B = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_{Bzj}^2} = \sqrt{0,0058^2 + 0,000021^2 + 0,006^2} \doteq 0,008$$

4.3 Kombinovaná nejistota

Kombinovaná nejistota je kombinací nejistot typu A a typu B. Její hodnota se určí geometrickým součtem těchto nejistot – viz vzorec č. 8. [3]

Jednotlivé nejistoty nelze sčítat přímo, jelikož jsou vyjádřeny jako směrodatné odchylky. Kombinovaná nejistota se tak vypočítá přes rozptyly, které definujeme jako druhé mocniny výběrových směrodatných odchylek.

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (8)$$

Pravděpodobnost, že skutečná hodnota veličiny bude ležet v intervalu $\pm u_C$ je 68 % za předpokladu normálního rozdělení. [12] Tento předpoklad vychází z centrální limitní věty, která říká, že v případě nekonečného součtu na sobě nezávislých náhodných veličin se zpravidla přibližujeme průběhu normálního rozdělení. [30]

4.4 Rozšířená nejistota

Rozšířená nejistota U se vypočítá jako součin kombinované nejistoty u_C a koeficientu rozšíření k . V praxi se nejvíce využívá koeficientu $k = 2$, který při normálním rozdělení zajistí pravděpodobnostní pokrytí 95,45 %. Lze použít jiné koeficienty, kde koeficient $k = 1$ odpovídá intervalu pokrytí 68,27 %; $k = 2,58$ znamená, že 99 % naměřených hodnot spadne do tohoto intervalu. Největším běžně používaným koeficientem je $k = 3$, pod který spadá 99,73 % všech hodnot. [8]

$$U = k \cdot u_C \quad (9)$$

Tabulka 5: Používané koeficienty u rozšířené nejistoty [8]

Koeficient rozšíření k	Pravděpodobnost P
1	68,27 % pro $\pm 1s$
2	95,45 % pro $\pm 2s$
2,58	99 %
3	99,73 % pro $\pm 3s$

5 Způsobilost měřicích procesů

Způsobilost měřicího procesu hodnotí přesnost měřidel z hlediska strannosti a opakovatelnosti měření. Postup ověření způsobilosti měřicího procesu požaduje oboustranné omezení specifikace měřené veličiny (tj. spodní a horní mezní hodnotu), díky kterým můžeme definovat toleranci znaku ($T = HMT - DMT$). Pro hodnocení měřidel uvažujeme pouze 20 % této tolerance. Tato šířka tolerance zajišťuje, že variabilita měřidla bude podstatně menší než variabilita procesu. Pro jednostranně omezené specifikace s existující přirozenou hranicí (HMT^* nebo DMT^*) se tolerance vypočítá ze vzorce $T^* = HMT - DMT^*$ nebo $T^* = HMT^* - DMT$. Přirozenou hranici definujeme jako hodnotu, pod kterou nebo přes kterou se v zásadě nelze dostat z fyzikálních důvodů. V případě, že existuje jen jedna omezující hodnota znaku a žádná přirozená hranice, potom nelze spočítat toleranci T nebo T^* , tudíž nelze vyjádřit ukazatele způsobilosti c_g a c_{gk} – viz kapitoly 5.1 a 5.2. [25] [12]

Norma VDA5 uvádí metodiku vyhodnocování způsobilosti na základě počtu 25 až 50 naměřených hodnot referenčního kusu. Pokud je to možné, tak by referenční hodnota x_m měla ležet uprostřed tolerance měřeného znaku, který má být měřen. Z naměřených hodnot se počítá odchylka měření od referenční hodnoty $\bar{x} - x_m$ a výběrová směrodatná odchylka. Tyto hodnoty jsou dále použity pro výpočet ukazatelů způsobilosti. Měření musí probíhat za podmínek opakovatelnosti měření. [25]

K zaručení způsobilosti měřicího procesu je potřeba dosáhnout určitých minimálních hodnot ukazatelů pro schválení či zamítnutí měřidla – viz tabulka č. 6. Hodnoty ukazatelů $c_g = 1$ a $c_{gk} = 1$ určují, zda výsledek měření leží s 99,73 % pravděpodobností ($\pm 3s$ za předpokladu normálního rozdělení) ve zvoleném pásmu tolerance, která je stanovena jako 20 % šířky tolerance měřeného rozměru. [12] [13]

Tabulka 6: Mezní hodnoty pro schválení či zamítnutí měřidla [12]

Tolerance [mm]	Mezní hodnoty [-]	Vyhovuje
$T > 0,05$	$c_g, c_{gk} \geq 1,33 (\pm 4s)$	Ano
$T \leq 0,05$	$c_g, c_{gk} \geq 1$	Ano
$T \leq 0,05$	$c_g, c_{gk} < 1$	Ne

5.1 Ukazatel způsobilosti c_g

Ukazatel způsobilosti c_g zahrnuje opakovatelnost měření a vyjadřuje poměr uvažované 20 % výseče pole specifikace a intervalu daného hodnotou 6 směrodatných odchylek. Požadovaná hodnota c_g je stanovena na hodnotu 1,33 a více ($\pm 4s$) a určuje, zda rozptyl hodnot měření nepřesahuje uvedenou 20 % šíři tolerance měřeného rozměru. Hodnota ukazatele se vypočítá ze vzorce č. 10. Způsobilost c_g můžeme zjednodušeně definovat jako ukazatel preciznosti měření. [12] [15]

$$c_g = \frac{0,2 \cdot T}{6 \cdot s} \quad (10)$$

5.2 Ukazatel způsobilosti c_{gk}

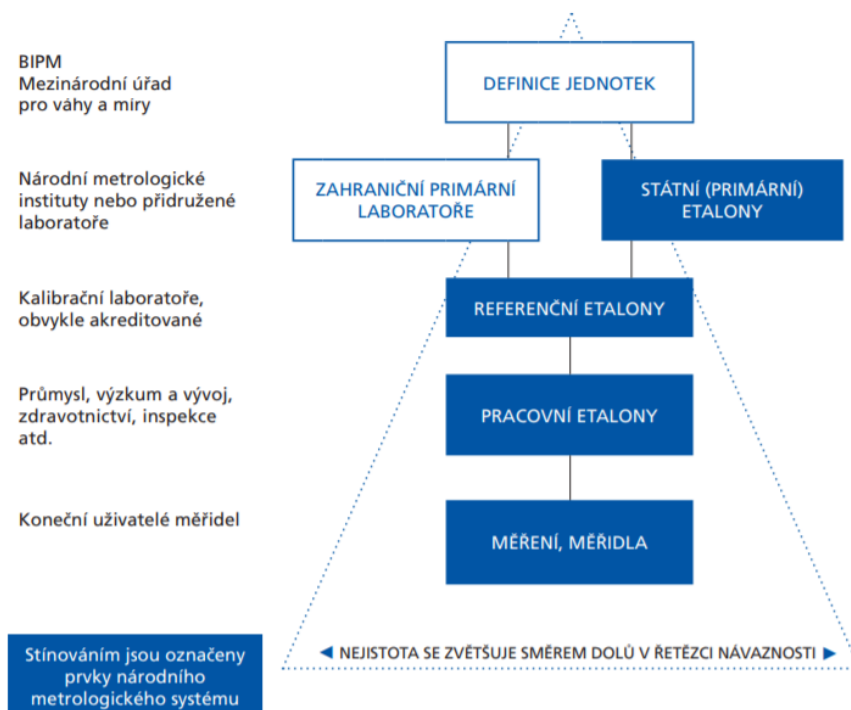
Ukazatel způsobilosti c_{gk} bere v úvahu strannost měření, tedy posunutí aritmetického průměru \bar{x} z uvedených 25 až 50-ti naměřených hodnot vůči referenční hodnotě x_m . Požadovaná minimální hodnota tohoto ukazatele je stanovena na 1,33 a více ($\pm 4s$) a vypočítá se ze vzorce č. 11. Oproti koeficientu c_g výsledná hodnota navíc vyjadřuje odchýlení vůči referenční hodnotě x_m . Způsobilost c_{gk} tak můžeme definovat nejen jako ukazatel preciznosti měření, ale i jako ukazatel správnosti měření. [12] [15]

$$c_{gk} = \frac{0,1 \cdot T - |\bar{x} - x_m|}{3 \cdot s} \quad (11)$$

6 Stanovení postupu sledování stability měřidel

Sledování stability měřidel provádíme za účelem pozorování změn měřicího procesu v průběhu času. [27] Udávání chybných výsledků měření laboratoří může v konečném důsledku znamenat špatný náběh výroby nebo reklamaci výrobků (například přenesením nepřesností na výrobní linky podniku dle návaznosti měření – viz obrázek č. 3). Sledování stability měřidel je tak jedním z obranných prvků podniku, kdy laboratoř dokáže rozčlenit časové období mezi kalibracemi na několik menších časových úseků, v nichž mohlo dojít k udávání nesprávných výsledků měření.

Většina měřidel používaných v rámci spolupracujícího výrobního podniku se kalibruje podle podnikových etalonů, které jsou uloženy v kalibrační laboratoři. Pokud negarantujeme stálost etalonů, tak se chyba měření může přenést až k samotným výrobkům a zákazníkovi, což může mít za následek negativní ekonomické dopady. K vytvoření postupu pro sledování stability měřidel tak musíme aplikovat znalosti z předešlých kapitol, znalosti kalibračních listů a technických norem.



Obrázek 3: Řetězec metrologické návaznosti [2]

6.1 Měřidlo

Základním předpokladem pro sledování stability je znalost ověřovaných měřidel a také dovednost a zkušenost metrologa, který svým přístupem významně ovlivňuje celý měřicí proces (podmínka opakovatelnosti měření). V rámci mé bakalářské práce se zabývám stabilitou třech měřidel: mikrometru, výškoměru a multimetru. Mikrometr a výškoměr jsou délková měřidla. Multimetr slouží k měření elektrických veličin, např. elektrického odporu, napětí a proudu. Ke každému měřidlu volím individuální přístup vycházející z praxe, měřeného znaku a daných kalibračních postupů příslušného měřidla.

6.2 Reference

Referenčním dílem při sledování stability by měl být díl se známou referenční hodnotou x_m . Jako tento díl můžeme použít sériový díl, kde referenční hodnota je následně vypočtena jako aritmetický průměr \bar{x} z minimálně 10-ti opakovaných měření. Lze využít také etalon s příslušným kalibračním listem z akreditované laboratoře. [7]

U sledování stability na mikrometru a výškoměru jsem použil sadu koncových měrek jako etalony vyšší přesnosti. Měřeným znakem je délka koncové měrky. Její velikost volíme v půlce používaného rozsahu měřidla. Lze zvolit konkrétní hodnotu, pokud je dané měřidlo nejvíce využíváno v rozmezí dané hodnoty. Nemělo by se však používat 0 – 10 % a 90 – 100 % rozsahu měřidla. U multimetru jsem použil etalonové odpory s příslušnými kalibračními listy.

6.3 Teperace měřidla

Teperace znamená udržování teploty na určité hodnotě, respektive v určitém rozsahu okolo této hodnoty. Ustálená teplota je velmi důležitá, neboť má zásadní vliv na konečnou podobu výsledku měření, a tím i na celý výsledek kalibrace. Finální rozdíl mezi etalonem a měřidlem by neměl přesahovat hodnotu $\pm 0,5$ °C dle platných kalibračních postupů spolupracujícího výrobního podniku. Teperace měřidla podléhá legislativě akreditovaných kalibračních a zkušebních laboratoří, v souladu s ČSN EN ISO/IEC 17025 *Posuzování shody – Všeobecné požadavky na kompetenci zkušebních a kalibračních laboratoří*. [5] [6]

Nejčastěji používaná teplota prostředí v kalibračních laboratořích je 20 °C. Jedná se o konvenční hodnotu a tato hodnota je uvedena jako mezinárodní standard v normě *ISO 1*. Jednou z výhod této hodnoty je celočíselné vyjádření jak v Celsiově, tak Fahrenheitově stupnici. [14]

Měřidla a etalony jsem nechal temperovat – přizpůsobit laboratorní teplotě s cílem eliminovat vliv teploty na měření dle typu měřidla v souladu s již zpracovanými kalibračními postupy podniku. Podnikové etalony i měřidla jsou umístěny v prostředí laboratoře 24 hodin denně v průběhu celého roku s výjimkou etalonových odporů. Tyto odpory slouží pro kalibrace prováděné na výrobních linkách podniku a v rámci kalibrační laboratoře jsem je využil pouze pro sledování stability multimetru. Před zahájením měření jsem vždy přenesl etalonový odpor do prostředí kalibrační laboratoře, kde jsem jej ponechal minimálně dvě hodiny temperovat na požadovanou hodnotu 20 °C. [5] [6]

6.4 Kalibrační list

Kalibrační list je výstupním dokumentem o kalibraci měřidla a zpravidla by měl obsahovat specifické požadavky dle normy ČSN EN ISO/IEC 17025. Kalibrační list podobně jako každá jiná výsledková zpráva musí obsahovat titul (v našem případě „Kalibrační list“), název a adresu laboratoře včetně míst provádění všech činností, kde daná kalibrace probíhala. Dále uvedení jednoznačné identifikace, datum přijetí a odběru vzorku, pokud je to nezbytné pro platnost měření. Neměl by chybět datum vydání zprávy, datum provedení činnosti a podpis metrologa. Samostatnými speciálními požadavky na kalibrační listy jsou výsledná nejistota měření vyjádřená ve stejné jednotce jako měřená veličina, podmínky měření (teplota, vlhkost, ...), metrologická návaznost, prohlášení o shodě a interpretace. [10]

V případě sledování stability je znalost kalibračních listů nezbytná pro předvyplnění základních údajů do karty stálosti měření – viz obrázek č. 4. V rámci jednoznačnosti je nutné vyplnit hlavičku karty stálosti měření, tedy údaje o oddělení podniku, metrologovi, který daný protokol zpracoval, datum vypracování a název výstupního protokolu.

Dále je potřeba uvést, o jaký typ měřidla se jedná (např. mikrometr) spolu s podnikovým označením měřidla včetně použité reference. Referenční hodnotu volíme na základě používaných rozsahů měřidel. Požadovaná hodnota je nejčastěji referenční hodnota zaokrouhlená vzhledem k danému rozlišení měřidla. Kalibrační listy by tuto informaci měly obsahovat, podobně jako informaci o rozlišení reference. Měla by zde být uvedena tolerance a nejistota měření, nejčastěji uváděná jako rozšířená nejistota měření $U_{k=2}$.

Rozsah výběrového zkoušení znamená počet naměřených hodnot v jednom intervalu sledování stability měřidla. Obecně platí, že větší počet naměřených hodnot umožní detekci malých posunů v procesu. Ideálním případem by bylo sledovat velké množství naměřených hodnot v krátkém časovém intervalu. [23] Při volbě optimálního počtu měření tak musíme zvážit časové vytížení pracovníků laboratoře a ekonomické hledisko. Interval volíme na základě několika faktorů popsanych v následující kapitole 6.5. Dále je potřeba označit sledovaný znak a fyzikální jednotku veličiny s ním spojenou (např. délka koncové měřky, jednotka mm). Meze zásahu vypočítáme ze vzorců uvedených v kapitole 6.6 této bakalářské práce.

Oddělení:	
Zpracoval:	
Datum:	
Název protokolu:	
Popis měřidla:	
Označení měřidla:	
Rozsah měřidla:	
Označení reference:	
Rozlišení reference:	
Refer. hodn. x_m :	
Fyzikální jednotka:	
Nejistota $U_{k=2}$:	
Rozs. výběr. zk.:	
Zkušeb. interval:	
Označ. sled. znaku:	
Požad. hodnota:	
HMT	
DMT	
Tolerance T	
Meze zásahu:	
HMZ	
Střed= x_m	
DMZ	
HMZs	
DMZs	

Obrázek 4: Karta stálosti měření – nevyplněná

6.5 Interval sledování stability

Interval sledování stability nelze pevně stanovit pro všechny typy měřidel a zpravidla vychází ze zkušeností metrologa, který bere v úvahu několik významných faktorů. Jedním z hlavních faktorů je typ měřidla, jeho přesnost a náchylnost na opotřebování. Velmi přesné měřidlo v rukou operátora, který s jeho zacházením nemá žádné zkušenosti, nejspíše povede k rychlejšímu opotřebování.

Dále pro správné stanovení intervalu sledování stability vycházíme z doporučení výrobce měřidla a z předchozích záznamů o jeho kalibraci (viz kapitola 6.4). V laboratoři se nacházejí měřidla a etalony, která během svého cyklu užívání prošla velkým počtem kalibrací. Na základě těchto volně dostupných dat lze předpokládat budoucí chování měřidla a stanovit vyhovující interval sledování stability, který lze libovolně upravit dle potřeb laboratoře.

Ekonomické dopady z nesprávně naměřené hodnoty, tj. reklamace, podmínky okolního prostředí (viz kapitola 3 této práce), legislativa nebo frekvence využívání měřidla jsou dalšími faktory ovlivňující volený interval. Některá měřidla jsou kalibrována dle námi sledovaných podnikových etalonů. Špatné udávání výsledků by v konečném důsledku mohlo znamenat přenesení nepřesnosti na výrobní linky podniku a v krajním případě i výrobu neshodných dílů.

Samotný referenční díl se měří alespoň třikrát ($n \geq 3$) ve zvolených časových intervalech. Tento počet souvisí s vyjadřováním směrodatných odchylek. Pro jednu naměřenou hodnotu nelze stanovit výběrovou směrodatnou odchylku měření a pro dvě hodnoty je výsledná hodnota výběrové směrodatné odchylky statisticky mimořádně nepřesná. I přesto může být počet naměřených hodnot snížen z ekonomických nebo technických důvodů na méně než tři ($n < 3$). V takovém případě je nutné použít regulační diagram samotných hodnot a tato výjimka musí být patřičně popsána. Pro výpočet kontrolních mezí poté platí vzorce č. 16 a č. 17 – viz kapitola 6.7.

[4] [7]

6.6 Regulační diagramy

Regulační diagram je graf hodnot, který znázorňuje změny určitého procesu v čase. Pomocí těchto diagramů můžeme určit a zkontrolovat, zda je námi sledovaný proces sledování stability dlouhodobě stabilní. To znamená, že v praxi předpokládáme určité statistické vlastnosti procesu a regulační diagram slouží jako nástroj kontroly, že se tyto vlastnosti v časovém období nemění. Nejčastěji mezi tyto vlastnosti patří střední hodnota, rozptyl (výběrová směrodatná odchylka), tvar rozdělení dat nebo například nezávislost měřených hodnot. Pomocí diagramu lze hlídat, zda nedochází k situacím, které jsou velice nepravděpodobné. Takový výskyt signalizuje, že naše předpoklady byly porušeny. V tom případě musí dojít ke kompletní analýze procesu a zjištění příčiny této změny, případně je nutné zajistit nápravu nebo kompenzaci. [17]

Regulační diagramy patří mezi 7 základních nástrojů managementu kvality. Diagramy vždy obsahují střední hodnotu, horní a dolní regulační mez zásahu (HMZ a DMZ), a někdy i horní a dolní toleranční mez (HMT a DMT). Hodnoty mezí zásahu jsou v mém případě vypočteny ze vzorců uvedených v předchozí kapitole. Existuje několik typů regulačních diagramů, kde mezi nejpoužívanější patří \bar{x} a s (výběrová směrodatná odchylka), \bar{x} a R (rozpětí), $x - individual$ pro spojité znaky jakosti a diagramy np , p , u a c . [17]

V případě sledování stability jsem využil diagramu \bar{x} a s , kde sledujeme chování procesu na základě aritmetického průměru naměřených hodnot a výběrové směrodatné odchylky.

6.7 Výpočty

Se znalostmi kalibračních listů je metrolog schopen zjistit potřebné hodnoty pro následující výpočty sledování stability měřidel. Kalibrační list by měl obsahovat pravou hodnotu veličiny s příslušnou nejistotou měření, nejčastěji uváděnou jako rozšířená nejistota $U_{k=2}$.

Meze zásahu jsou dle standardních Shewhartových diagramů definovány jako trojnásobek směrodatné odchylky. Za předpokladu normálního rozdělení je pravděpodobnost překročení horní meze zásahu 0,00135 % a pravděpodobnost poklesu pod dolní mez zásahu je 0,00135 %. Jejich součet je 0,0027 ($\alpha = 0,27$ %). Pravděpodobnost, že se hodnota umístí uvnitř těchto mezí, je ve výsledku 99,73 %.

Tradiční $\pm 3s$ limity mají i nevýhody. Jednou z nich je necitlivost $\pm 3s$ limitů na pokles směrodatné odchylky procesu. [33] To znamená, že případné zlepšení kvality může být detekováno až po delší době. Alternativou je definování regulačních mezí formou pravděpodobnostních limitů, které jsou založené na specifikovaném rozdělení spíše než na předpokladu normálního rozdělení. [32]

\bar{x} -graf (průměrné hodnoty):

$$DMZ = x_m - u_p \cdot \frac{\bar{s}}{\sqrt{n}} \quad (12) \qquad HMZ = x_m + u_p \cdot \frac{\bar{s}}{\sqrt{n}} \quad (13)$$

s-graf (směrodatné odchylky):

$$DMZ_s = B'_{Eun} \cdot \bar{s} \quad (14) \qquad HMZ_s = B'_{Eob} \cdot \bar{s} \quad (15)$$

Graf samostatných hodnot pro $n < 3$:

$$DMZ = x_m - E'_E \cdot \bar{s} \quad (16) \qquad HMZ = x_m + E'_E \cdot \bar{s} \quad (17)$$

Pro hodnoty x_m lze kromě referenční hodnoty referenčního dílu použít průměrnou hodnotu dílu z minimálně 10-ti měření dle normy MSA4. [33]

Za podmínky $n < 3$ lze pro hodnoty \bar{s} použít:

- 2,5 % tolerance měřeného znaku $T (= T/40)$,
- výb. směrodatnou odchylku z předchozí zkoušky dle normy MSA4,
- výb. směrodatnou odchylku z krátkodobé analýzy (nedoporučuje se). [33]

Pro pravděpodobnostní pokrytí 99,73 % koeficienty odpovídají níže uvedené tabulce č. 6. Koeficienty u_p se vypočítají jako kvantily standardizovaného normálního rozdělení a závisí na hladině spolehlivosti a druhu omezení veličiny (jednostranné či oboustranné). [33]

Koeficienty B'_{Eun} , B'_{Eob} a E'_E navíc závisí na velikosti hodnoty n odpovídající počtu měření referenčního dílu. Vypočítají se z kvantilů rozdělení χ^2 standardizovaného normálního rozdělení. Poměr $\frac{\bar{s}}{\sqrt{n}}$ vyjadřuje standardní nejistotu typu A. Jednotlivé koeficienty pro oboustranné omezení specifikace (jednostranné v této bakalářské práci nevyužívám) vypočítáme z následujících vzorců (výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 7): [33]

$$B'_{Eun} = \sqrt{\frac{\chi^2_{n-1; \alpha/2}}{n-1}} \quad (18)$$

$$B'_{Eob} = \sqrt{\frac{\chi^2_{n-1; 1-(\alpha/2)}}{n-1}} \quad (19)$$

$$E'_E = u_n \sqrt{1-(\alpha/2)} \quad (20)$$

Tabulka 7: Koeficienty kontrolních mezí pro pokrytí 99,73 % [33]

n	u_p	B'_{Eun}	B'_{Eob}	E'_E
3	3,000	0,037	2,571	3,320
4	3,000	0,100	2,283	3,399
5	3,000	0,163	2,110	3,460

6.8 Vyhodnocení regulačních diagramů

Vyhodnocení jsem provedl po každém měření v návaznosti na zvolený interval sledování stability. Nestabilní měřicí proces znamená, že průměrné hodnoty vykazují velký a nesystematický rozptyl v čase a některé hodnoty mohou ležet dokonce mimo toleranci rozměru. K varování nám slouží meze zásahu, kdybychom měli učinit patřičné nápravné opatření a zjistit příčinu vzniku. K rozpoznání nestabilního procesu nám mohou pomoci testy vymezených příčin, mezi které patří: [23]

- jedna nebo více hodnot leží mimo meze zásahu,
- dvě ze tří po sobě jdoucích hodnot leží mimo oblast $\pm 2 s$, ale stále uvnitř mezí zásahu,
- 8 posledních hodnot leží nad nebo pod stanovenou referenční hodnotou x_m ,
- 6 posledních hodnot vytváří plynulý rostoucí či klesající trend hodnot,
- 14 posledních hodnot se pravidelně střídá nahoru a dolů
- jakýkoliv další neobvyklý nebo nenáhodný vzorec dat. [23]

Další pravidla vyhodnocování regulačních diagramů lze nalézt v knize *Introduction to Statistical Quality Control* [23] nebo v normě ČSN ISO 8258. V případě nestability procesu musí dojít k zjištění příčiny a jejímu zamezení, případně její kompenzaci.

6.9 Výsledný postup sledování stability

Měřidlo včetně reference by před samotným měřením mělo být důkladně očištěno (kontakty mikrometru, hroty multimetru, dotek výškoměru, ...) a měl bych provést následnou vizuální kontrolu opotřebení. Pokud mám splněnou podmínku teploty měřidla, tak mohu provést první měření a dále pokračovat za podmínky opakovatelnosti měření. Naměřené hodnoty zaznamenávám do předem vypracovaného excel souboru, ve kterém sleduji závislost průměru naměřených hodnot v závislosti na vypočtených hodnotách ze vzorců uvedených v kapitole 6.7. Na základě dlouhodobého sledování stability jednotlivých měřidel lze navrhnout případná opatření, např. rozhodnutí o zrušení sledování daného měřidla, jelikož měřidlo je v čase stabilní. V případě, kdy měřidlo je naopak nestabilní, je nutné ověřit jeho přesnost etalonem vyššího stupně, v krajním případě nahradit jiným měřidlem. [7]

7 Praktické ověření stanoveného postupu pro vybraná měřidla

Pro ověření stanoveného postupu jsem si vybral tři etalonová měřidla uložená v kalibrační laboratoři výrobního podniku dodávajícího komponenty pro automobilový průmysl. Konkrétně mikrometr, výškoměr a multimetr. Všechna tato měřidla jsou využívána u kalibrací měřidel nižší přesnosti. Jednou z potřebných vlastností etalonového měřidla je stálost výsledků v čase, kterou zkontrolujeme pomocí mnou stanoveného postupu v kapitole 6.

Před zahájením vlastního měření s využitím vybraných etalonových měřidel a získaných znalostí jsem si připravil v počítači excelové soubory pro zápis naměřených hodnot. Dále jsem vytvořil regulační diagramy, které reagují na jednotlivé aktualizace naměřených hodnot, které po každém měření ihned vyhodnotím.

V excelových souborech jsem použil varování v podobě barevného zobrazování. Pokud výsledný aritmetický průměr či výběrová směrodatná odchylka leží uvnitř varovných mezí, hodnota se zobrazí zeleně. Pokud se objeví žlutá barva, došlo k naměření identických hodnot, což je statisticky nepravděpodobné. Červená barva značí, že výsledná hodnota leží vně vypočtených varovných mezí.

7.1 Mikrometr

První měřidlo, na které aplikuji postup sledování stability je mikrometr s rozsahem do 25 mm od výrobce Mitutoyo. Měřidlo má rozlišení 0,1 μm a v podniku se využívá převážně pro kalibraci trnů, kalibrů a spároměrek.



Obrázek 5: Ilustrativní High Accuracy Digital Micrometer 0-25 mm, Absolute Digimatic 2 [18]

Tabulka 8: Technické specifikace použitého mikrometru [18]

Rozsah měřidla	0 - 25 mm
Číslicový krok	0,1 μm - 0,5 μm
Rovinnost	0,3 μm
Rovnoběžnost	0,6 μm
Hmotnost	400 g
Měřicí plochy	\varnothing 3,2 mm, osazené tvrdokovem, jemně lapované
Vřeteno	\varnothing 6,35 mm, stoupání vřetene 0,5 mm, s aretací
Měřicí systém	Elektromagnetické indukční provedení ABS rotačního snímače
Měřicí síla	7 - 9 N

Do předem připraveného excel souboru jsem předvyplnil vypočtené hodnoty měřidla z kalibračního listu od akreditované kalibrační laboratoře a naše reference, kterou jsou koncové měřky stejnojmenného výrobce. Pro vlastní měření jsem si vybral měřku s velikostí 3,5 mm, jelikož na mikrometru v praxi nejčastěji využíváme rozsahu měřidla do 5 mm. Interval sledování stability jsem zvolil jedenkrát měsíčně z důvodů zmíněných v kapitole 6.5.

Měřený znak: délka koncové měřky		SLEDOVÁNÍ STABILITY MIKROMETRU													Oddělení:				
Zk. podmínky: 20±1 °C, max 60 % r.v.															Zpracoval:	Dennis Rottenborn (praktikant)			
															Datum:	09.07.2019			
															Název protokolu:	Mikrometr Mítotoyo _1			
x_1	3,5001	3,5001	3,5001	3,5000	3,5001	3,5002	3,5000	3,5000	3,5000	3,5000	3,5000	3,5000	3,5000	3,5000	3,5000	3,5000	3,5000	Popis měřidla:	Mikrometr Mítotoyo_ rozsah 25 mm
x_2	3,5002	3,5001	3,5002	3,5001	3,5001	3,5001	3,5001	3,5001	3,5001	3,5000	3,5001	3,5001	3,5000	3,5001	3,5000	3,5001	3,5001	Označení měřidla:	
x_3	3,5002	3,5002	3,5001	3,5001	3,5000	3,5001	3,5001	3,5001	3,5000	3,5001	3,4999	3,5001	3,5001	3,5000	3,5001	3,5001	3,5001	Rozsah měřidla:	0 - 25 mm
x_4																			
x_5																			
\bar{x}	3,50017	3,50013	3,50013	3,50007	3,50007	3,50013	3,50007	3,50003	3,50007	3,49997	3,50007	3,50003	3,50000	3,50007				Označení reference	
s	0,000058	0,000058	0,000058	0,000058	0,000058	0,000058	0,000058	0,000058	0,000058	0,000058	0,000058	0,000058	0,000058	0,000058	0,000000	0,000058		Rozlišení reference	0,00001
zásah																		Refer.hodn. x_{ref} :	3,50008
																		Fyzikální jednotka:	mm
																		Nejistota $U_{k=2}$:	0,00009mm
																		Rozs.vyběr.zk.:	3
																		Zkušeb.intervál:	1x / měsíc
																		Označ.sled.znaku:	Délka koncové měřky 3,5 mm
																		Požad.hodnota:	3,5001
																		HMT	3,5006
																		DMT	3,4996
																		Tolerance T	0,0010
																		Meze zásahu:	
																		HMZ	3,500173
																		Střed= x_m	3,5001
																		DMZ	3,499987
																		HMZs	0,000137834
																		DMZs	0,000001984
Datum:	26.7	5.8	2.9	1.10	1.11	26.11	6.12	16.1	17.2	9.3	25.3	29.4	9.6	7.7				Vyhodnotil:	Dennis Rottenborn (dr)
Čas:	9:20	10:11	10:34	8:37	9:10	8:56	10:33	10:25	9:06	11:22	12:55	12:38	9:56	9:27				Zkontroloval:	Matej Harčarik
Jméno:	dr	dr	dr	dr	dr	dr	dr	dr	dr	dr	dr	dr	dr	dr					

Obrázek 6: Karta stálosti měření – mikrometr

7.2 Výškoměr

Druhým sledovaným měřidlem je výškoměr Mitutoyo s rozsahem 0-600 mm. Referenční hodnotou je koncová měrka velikosti 300 mm ze sady Mitutoyo. Při měření jsem dále využil měrku velikosti 25 mm pro stanovení nuly výškoměru. Měrky jsem po znulování napasoval a provedl samotné měření. Interval sledování stability jsem nastavil na dvakrát měsíčně, jelikož se jedná oproti mikrometru o v praxi častěji využívané měřidlo. Výškoměr se používá pro kalibraci nastavovacích dílů, funkčních rozměrů a mnoho dalšího.



Obrázek 7: Ilustrativní digitální výškoměr Mitutoyo LH-600 [19]

Tabulka 9: Technické specifikace použitého výškoměru [24]

Rozsah měření (pohybující)		0 - 972 mm (600 mm)
Rozlišení		0,0001/0,001/0,1 mm
Přesnost při 20 °C	Přesnost měření	$(1,1+0,6L/600) \mu\text{m}$, L = měřená délka (mm)
	Přesnost opakování (2σ)	Rovný povrch 0,4 μm ; zvlněný: 0,9 μm
	Kolmost	5 μm
	Přímost	4 μm
Způsob činnosti		Manual/servo (5 - 40 mm, v 7 krocích)
Měřicí síla		1 N
Metoda vyrovnávání		Protiváha

Při sledování stability výškoměru jsem musel udělat výjimku v rámci výpočtu varovných mezí zásahu HMZ a DMZ. Po dosažení jednotlivých hodnot a koeficientů do vzorců č. 12 a č. 13 byly výsledné hodnoty zcela nedosažitelné – viz níže. Hodnota HMZ vyšla 300,000015 mm a hodnota DMZ byla 299,999785 mm.

Před zahájením ověřování postupu sledování stability jsem byl zkušenějšími kolegy upozorněn na problém délkové roztažnosti popsané v kapitole 2.1 – obrázek č. 1. Při delší práci s koncovou měrkou vyššího rozměru, by se měrka vlivem teploty mohla roztáhnout o hodnotu, díky které bychom překročili varovné meze zásahu. V laboratoři je předepsaná teplota 20 ± 1 °C, ale na následujícím příkladu si můžeme ukázat vliv odchylky jednoho stupně Celsia teploty na měření.

Tabulka 10: Vlastnosti použité koncové měrky

Délka koncové měrky	300 mm
Součinitel teplotní roztažnosti α [21]	$10,5 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ [21]

Ze vzorce č. 1 uvedeného v kapitole 2.1. mohu vypočítat změnu délky koncové měrky při změně teploty ± 1 °C.

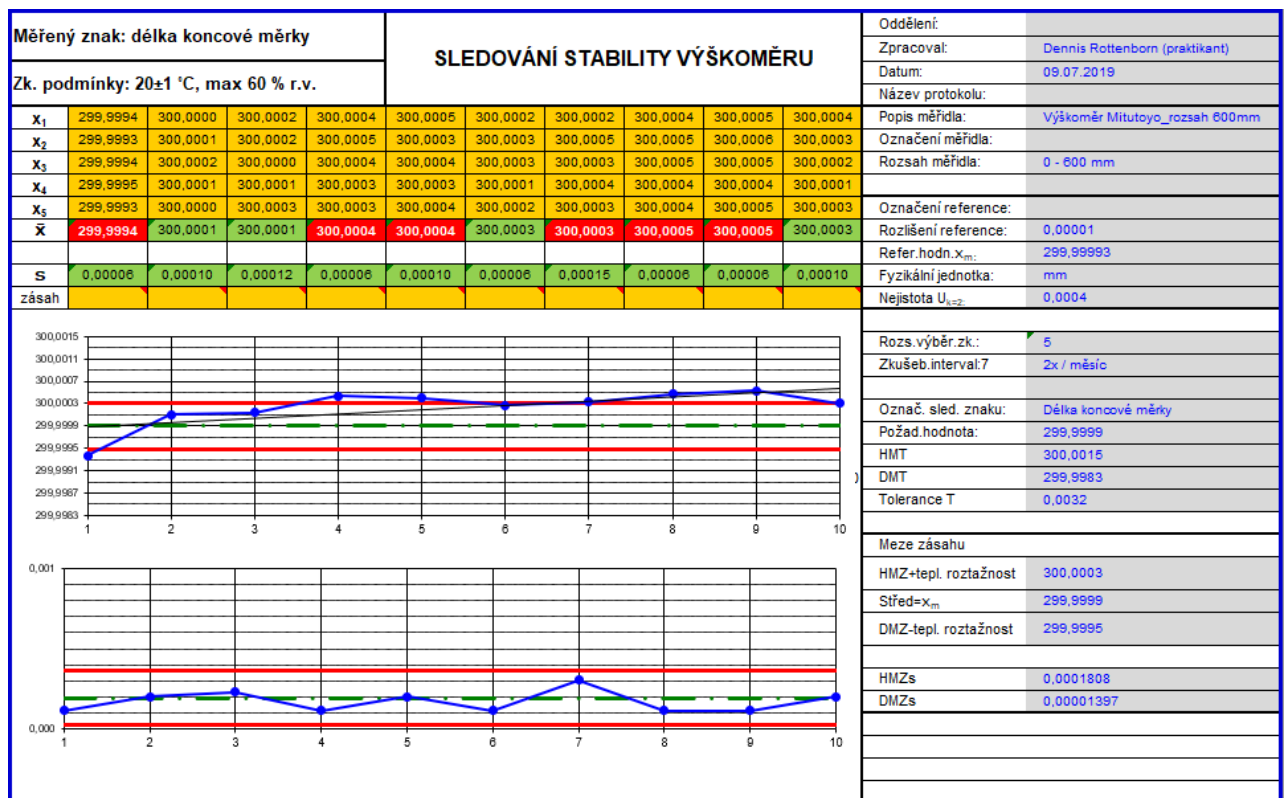
$$\Delta l = \alpha \cdot l_1 \cdot \Delta t$$

$$\Delta l = 10,5 \cdot 10^{-6} \cdot 300 \cdot 1 = \pm 0,0003 \text{ mm}$$

Na tomto příkladu je zcela zřejmé, že pouze teplotní roztažnost znemožní umístění naměřených hodnot uvnitř stanovených mezí. Varovné meze zásahu (HMZ a DMZ) jsem se rozhodl umístit po dohodě s kolegy na hodnotu vypočítaných mezí \pm hodnota teplotní roztažnosti koncové měrky. Tuto úpravu uvedených vzorců v kapitole 6.7 beru v potaz při následném vyhodnocování stability měřidel.

Eliminování nepříznivého vlivu teplotní roztažnosti jsem vyřešil použitím bavlněných rukavic, které snížily přenos tepla z lidských rukou na měřidlo. Dále jsem měřky po jejich napasování nechal určitý čas znovu temperovat na stanovených 20 ± 1 °C, aby nedocházelo k většímu rozdílu teplot měřidla a reference než $\pm 0,5$ °C dle zpracovaných kalibračních postupů podniku.

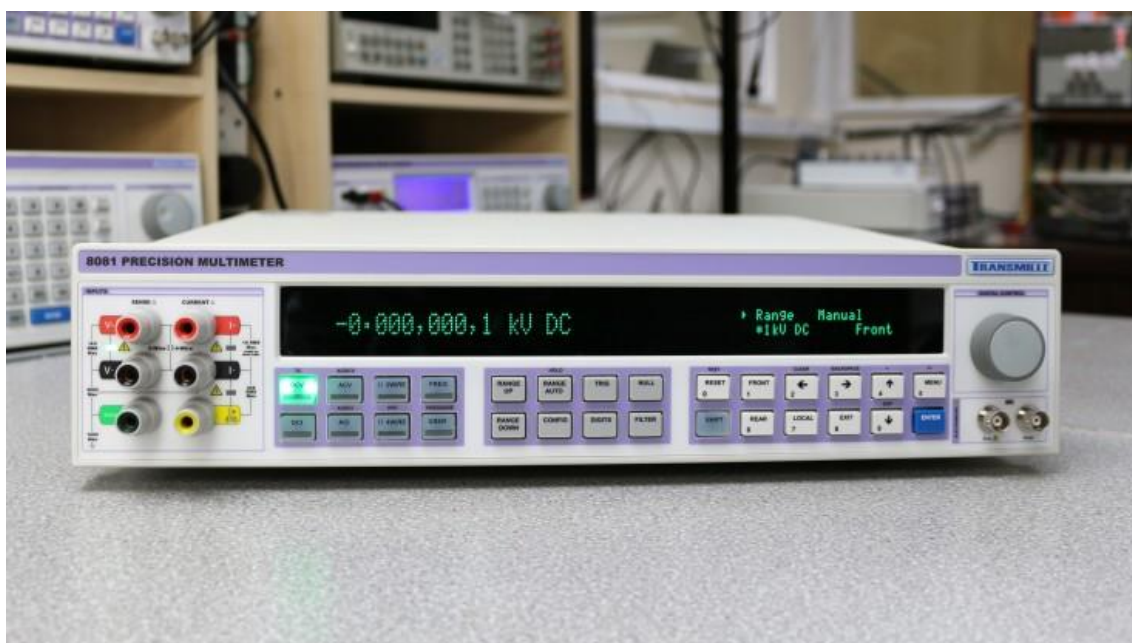
V případě, že bychom se stále pohybovali na hraně mezí zásahu, lze zpřísnit zkušební podmínky. Jedním z příkladů je snížení tolerance předepsané teploty na polovinu, za které lze samotné měření provádět. Nově stanovená teplota $20 \pm 0,5$ °C by znamenala eliminování vlivu teplotní roztažnosti na polovinu za použití stejné 300 mm koncové měřky (nově $\pm 0,0015$ mm).



Obrázek 8: Karta stálosti měření – výškoměr

7.3 Multimetr

Třetím kontrolovaným měřidlem je multimetr 8080 Precision od výrobce Transmille. Multimetr Transmille umí měřit několik elektrických veličin, např. elektrický proud, elektrické napětí, odpor; ale výhodou je, že si sám umí vypočítat nejistoty měření. Toto měřidlo se využívá převážně pro kalibraci odporů, ať zkratových nebo s náběhovým proudem. Námi sledovaným znakem v rámci stability měření je 4svorkové měření etalonového odporu. Při volbě intervalu sledování stability vycházím z informací uvedených v kapitole 6.5. Jelikož se jedná o frekventovaně využívané měřidlo, proto i v tomto případě jako u výškoměru volím interval sledování dvakrát za měsíc. Pro sledování stability multimetru jsem musel použít jediný dostupný etalonový odpor, který má nižší přesnost než sledovaný multimetr. Ale zároveň svou přesností odpovídá úlohám, pro které se tento multimetr využívá.

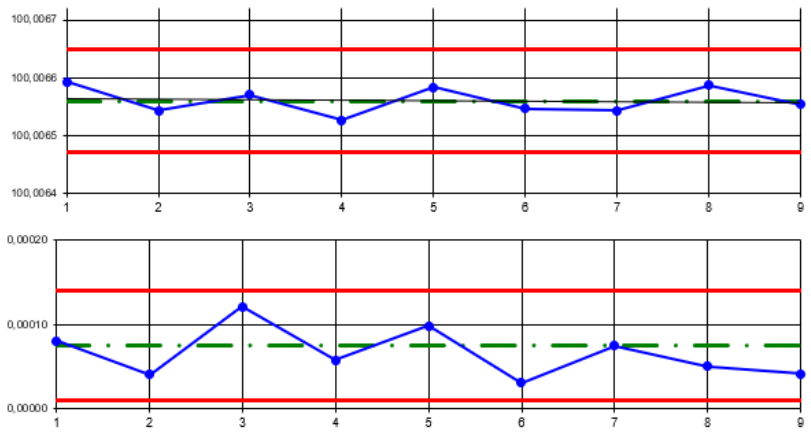


Obrázek 9: Ilustrativní Transmille 8081 Precision Multimeter [20]

Tabulka 11: Technické specifikace použitého multimetru [20]

DC Voltage	0 ± 1000 V (±4ppm)
AC Voltage	±1uV - ±1050V, 10Hz - 1MHz (±0.02%)
DC Current	±100uA - 30A (±7pp)
AC Current	±100uA - 30A (±0.03%)
Resistance	0-10 MΩ (±8ppm)

Měřený znak: 4-svorkové měření odporu etalonu				SLEDOVÁNÍ STABILITY MULTIMETRU					Oddělení:	
Zk. podmínky: 20 ± 1 °C, max 60 % r.v.									Zpracoval: Dennis Rottenborn (praktikant)	
				Datum: 09.07.2019		Název protokolu: Digitální _1		Popis měřidla: Digitální multimetr Transmille		
x_1	100,00656	100,00662	100,00668	100,00668	100,00668	100,00654	100,00662	100,00658	Označení měřidla: Digitální multimetr Transmille	
x_2	100,00672	100,00659	100,00668	100,00665	100,00651	100,00658	100,00667	100,00658	100,00664	
x_3	100,00662	100,00654	100,00647	100,00666	100,00668	100,00662	100,00654	100,00668	100,00656	
x_4	100,00658	100,00658	100,00658	100,00666	100,00656	100,00658	100,00661	100,00651	100,00664	
x_5	100,00651	100,00656	100,00651	100,00667	100,00662	100,00662	100,00673	100,00662	100,00672	
\bar{x}	100,00663	100,00658	100,00661	100,00657	100,00662	100,00659	100,00658	100,00663	100,00659	
s	0,000081	0,000040	0,000121	0,000058	0,000098	0,000031	0,000075	0,000050	0,000042	
zásah										
				Refer.hodn. x_m : 100,0066		Fyzik.jednotka: Ω		Nejistota $U_{k=2}$: 0,0023		
				Rozs.vyběr.zk.: 6		Zkušeb.interval: 2x / měsíc		Označ. sled. znaku: 4 svorkové měření odporu etalonu		
				Požad.hodn.: 100,0066		HMT: 100,00676		DMT: 100,00644		
				Tolerance T: 0,00032		Meze zásahu:		HMZ: 100,006888		
						Střed= x_m : 100,0066		DMZ: 100,0065112		
						HMZs: 0,000139716		DMZs: 0,000010793		
Datum:	25.10	15.11	29.11	13.12	15.1	31.1	17.2	24.2	9.3	
Čas:	10:27	12:57	10:49	10:23	13:24	10:07	10:07	9:14	13:24	
Jméno:	dr	dr	dr	dr	dr	dr	dr	dr	dr	
				Vyhodnotil: Dennis Rottenborn (dr)		Zkontroloval: Matej Harčarik				



Obrázek 10: Karta stálosti měření – multimetr

8 Zhodnocení výsledků

Pomocí stanoveného postupu sledování stability jsem pozoroval chování etalonů v průběhu 5 až 12 měsíců (doba sledování stability: mikrometr – 12 měsíců, výškoměr a multimetr – 5 měsíců) dle stanoveného intervalu sledování stability. Na jednotlivá měřidla jsem aplikoval individuální přístup vyhodnocování na základě získaných znalostí.

Mikrometr vykazoval v celém procesu sledování stability stabilní chování. Hodnoty výběrových směrodatných odchylek během sledování stability ani jednu nepřesáhly meze zásahu. V jediném případě překročila hodnota aritmetického průměru dolní varovnou mez. Tento fakt přisuzuji tomu, že se jedná o ruční měřidlo, které je zásadně ovlivněné lidským faktorem a použitou měřicí silou.

Naměřené hodnoty nevykazují žádný nežádoucí trend hodnot a v regulačním diagramu tak můžeme pozorovat náhodné rozdělení aritmetických průměrů nad či pod přímkou x_m . Mikrometr vykazoval během celých 12 měsíců stabilní chování s výjimkou jediné hodnoty aritmetického průměru mimo stanovené meze. Zvolený interval měřidla vyhodnocuji jako dostačující a doporučuji pokračovat v dosavadním sledování stability.

U vyhodnocování stability výškoměru jsem v kapitole 7.2 popsal nedostatek varovných mezí zásahu HMZ a DMZ vypočtených ze vzorců č. 12 a č. 13, kterých nebylo možné dosáhnout kvůli vlivu teplotní roztažnosti. Nicméně z hodnot směrodatných odchylek je názorně vidět, že výškoměr udává stabilní výsledky v čase. Naopak hodnoty aritmetických průměrů \bar{x} leží mimo stanovené meze zásahu a nacházejí se především nad přímkou x_m . Zde lze uplatnit testy vymezených příčin (viz kapitola 6.8), konkrétně že 8 po sobě jdoucích hodnot leží nad či pod přímkou x_m , a že jedna či více hodnot leží mimo stanovené meze. V tomto případě je nezbytné provést zásah a upozornit na tuto skutečnost zkušené kolegy.

Shodou okolností v době pozitivního testu vymezené příčiny vypršela platnost kalibrační známky měřidla. Nová kalibrace přístroje nebyla v době odevzdání práce dokončena. I z tohoto důvodu mám k dispozici pouze malý vzorek dat pro vyhodnocení stability.

V případě, kdy by kalibrace měřidla ukázala, že výškoměr proměřoval a udával nepřesné hodnoty, tak na dalším příkladu si lze ukázat, že by tento fakt neměl mít žádné negativní dopady na již provedené kalibrace. Většina dílů a měřidel, která jsou kalibrována výškoměrem, se měří s dovolenou odchylkou 0,01 mm. Vzhledem k tomu, že výškoměr je o dva řády přesnější měřidlo, než je dovolená odchylka, tak i drobné nepřesnosti nemají žádný dopad na uvedené výsledky kalibrací. V kapitole 5 této práce je detailněji popsána způsobilost měřících procesů. Pokud dosadím hodnoty z mého měření do vzorce č. 11, tak výsledná hodnota ukazatele způsobilosti c_{gk} , který jsem definoval jako ukazatel preciznosti a správnosti měření, je 2,71. Podmínka pro schválení měřidla je hodnota 1,33 a více.

Do budoucna bych na základě získaných znalostí doporučil pokračovat ve sledování stability, v rámci které bych zvýšil interval sledování na jedenkrát za týden. Kromě toho bych uvažoval nad vhodnější volbou referenční hodnoty, neboť z kalibračního listu sady koncových měrek Mitutoyo lze vyčíst, že nejnižší maximální úchylku rozpětí délky má měrka velikosti 175 mm, na rozdíl od mnou použité měrky 300 mm (viz obrázek č. 11). Hodnoty se vzájemně liší přibližně až 7x. Dále bych eliminoval vliv napasování měrek a výškoměr bych vynuloval o přesně vybroušenou průměrnou desku a poté bych změřil koncovou měrku dané velikosti.

Jmenovitá délka měrky l_n (mm)	Výr. číslo měrky	Odhylka jmenovité délky a (μm)	Max. úchylka rozpětí délky v (μm)	Odpovídá dle ČSN EN ISO 3650 třídy přesnosti	Měřené parametry vyhovují ČSN EN ISO 3650 a normám souvisejícím
125	██████	+0,07	0,05	0	ano
150	██████	-0,04	0,06	0	ano
175	██████	+0,43	0,02	1	ano
200	██████	+0,10	0,03	0	ano
250	██████	0	0,15	0	ano
300	██████	-0,07	0,16	0	ano
400	██████	+0,12	0,20	0	ano
500	██████	+0,21	0,13	0	ano

Obrázek 11: Kalibrační list sady koncových měrek Mitutoyo

Multimetr, na kterém jsem aplikoval proces sledování stability, je daleko přesnější než etalony odporu použité jako reference. Etalonový odpor použitý jako reference byl pro vyhodnocování stability dostačující a samotné měření sebou neneslo žádná negativa. Z regulačních diagramů lze vyčíst, že průměrné hodnoty i výběrové směrodatné odchylky leží uvnitř mezí zásahu a nevykazují žádný nežádoucí trend hodnot. Multimetr vykazoval po celou dobu sledování stabilní chování. Do budoucna bych pokračoval ve zvoleném intervalu sledování stability.

9 Závěr

V teoretické části této práce jsem zpracoval téma okolních vlivů na měření, zejména teploty a vlhkosti vzduchu. Tyto dva vlivy byly také jediné předepsané zkušební podmínky pro sledování stability měřidel. K tomuto tématu se úzce pojí nejistoty měření, které jsem zpracoval na základě dokumentu *GUM*. Tento dokument je považován za mezinárodní standard v oblasti stanovení a následném vyhodnocování nejistot měření. Dále jsem se zaměřil na oblast způsobilosti měřících procesů, které jsou spolu se stabilitou měřidel velmi důležitými ukazateli oboru metrologie. Psaní bakalářské práce jsem zakládal na jednotné terminologii dle oficiálního překladu mezinárodního metrologického slovníku *VIM*.

V praktické části této bakalářské práci jsem stanovil postup pro sledování stability měřidel v kalibrační laboratoři výrobního podniku. Tento postup jsem následně aplikoval na vybraná měřidla – mikrometr, výškoměr a multimetr. Jednotlivá měřidla jsem na základě získaných znalostí vyhodnotil a doporučil další postup zacházení s měřidlem. Ke každému měřidlu bylo potřeba přistupovat individuálně. Problém nastal pouze při vyhodnocování stability výškoměru. Výsledných hodnot ze vzorců nebylo možné dosáhnout, tudíž jsem po konzultaci s pracovními kolegy upravil varovné meze zásahu o hodnotu teplotní roztažnosti použité měřky.

V této bakalářské práci jsem ověřoval stabilitu měřidel dle zvoleného intervalu jednou či dvakrát měsíčně. Pro přesnější vyhodnocení stability měřidel kalibrační laboratoře je však potřeba ve sledování stability i nadále pokračovat, případně do budoucna zvolený interval zvýšit a vyhodnotit na základě obsáhlejšího vzorku dat. Tato práce může sloužit jako návod pro ostatní pracovní kolegy, jak vytvořit a vyhodnocovat regulační diagramy sledování stability. Dále bych uvažoval o zavedení sledování stability na všechny podnikové etalony výrobního podniku, případně bych implementoval tento postup na výrobní linky.

Zdroje

1. POSPÍŠIL, Miroslav a Vladimír LUDVÍK, VIDIMOVÁ, Klára, ed. *Sborníky technické harmonizace 2010: Terminologie z oblasti metrologie (2. vydání)* [online]. Ústav pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. Praha: Bořivoj Kleník, PhDr. - Q-art, Praha, 2010 [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: https://www.unmz.cz/files/Sborníky%20TH/Terminologie%20v%20oblasti%20metrologie_DEF.pdf
2. JELÍNEK, František a spol. *Sborníky technické harmonizace 2009: Metrologie v kostce – třetí upravené a doplněné vydání* [online]. Ústav pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. Praha: Bořivoj Kleník, PhDr. - Q-art, Praha, 2009 [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: <https://www.unmz.cz/files/Sborn%3ADky%20TH/MvK-7-DEF.pdf>
3. HOLEČEK, Milan. *Pokyn pro vyjadřování nejistoty měření (GUM). Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví: Sborníky technické harmonizace 2012* [online]. 2012 [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: <https://www.unmz.cz/files/Sborn%3ADky%20TH/GUM%20-%20celek%20-DEF.pdf>
4. *Metodika: Metrologický řád KE*. Interní podklady. 2019.
5. *Kalibrační postup: Posuvný výškoměr*. Česká metrologická společnost. Praha, 2010.
6. *Kalibrační postup: Třmenový mikrometr*. Česká metrologická společnost. Praha, 2010.
7. *MSA4 - Analýza systému měření: 4. vydání*. AIAG - Automotive Industry Action Group. Česká společnost pro jakost, 2010.
8. POLÁK, Martin. *Vliv sjednocení pravidel pro řízení metrologie v DP hl. m. Prahy*. Pardubice, 2012. Dostupné také z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/46031/PolákM_MetrologieDMHMP_PJ_2012.pdf?sequence=3&isAllowed=y. Diplomová práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Ing. Petr Jilek, DiS.

9. SCHOVÁNEK, Petr a Vítězslav HAVRÁNEK. Chyby a nejistoty měření: (doplňující text k laboratornímu cvičení). *Portál moderní fyziky* [online]. [cit. 2020-01-18].
Dostupné z:
<https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/pext2-nejistoty.pdf>
10. ČSN EN ISO/IEC 17025:2005: *Posuzování shody – Všeobecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří*. 2005, 48 s.
11. Metrologická příručka: Mitutoyo. In: *Mitotoyo* [online]. [cit. 2020-11-06].
Dostupné z: <http://mitotoyo.cz/ke-stazeni/metrologicka-prirucka.pdf>
12. HRDLIČKA, Martin. *Hodnocení přesnosti a způsobilosti souřadnicového stroje Pioneer DEA* [online]. Brno, 2015 [cit. 2020-02-04]. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=1030
32. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Pernikář, CSc.
13. *Řízení kvality v koncernu*. Interní podklady. České Budějovice, 2012.
14. *ISO 1:2016: Geometrical product specifications (GPS) — Standard reference temperature for the specification of geometrical and dimensional properties* [online]. [cit. 2020-07-04].
15. JIROUŠEK, Pavel. *Způsobilost systému měření ve výrobě převodovek Škoda Auto a.s.* [online]. [cit. 2020-07-06]. Diplomová práce. Škoda Auto a.s. Vysoká škola. Vedoucí práce Doc. Ing. Eva Jarošová, CSc.
16. HORSKÝ, Jiří a Pavel HORSKÝ. Jak pochopit vyjadřování nejistoty měření spojené s metrologií elektrických veličin. *FCC public* [online]. 2011, 17 s. [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/43508.pdf>
17. Shewartovy regulační diagramy. *TriloByte: Statistical Software* [online]. [cit. 2020-03-28]. Dostupné z:
<https://www.trilobyte.cz/downloadfree/qcemanual/shewhart.pdf>
18. High Accuracy Digital Micrometer 0-25mm, Absolute Digimatic 2. *Mitutoyo: shop* [online]. [cit. 2020-03-29]. Dostupné z:
[https://shop.mitutoyo.cz/web/mitutoyo/cs_CZ/mitutoyo/High%20Accuracy/High%20Accuracy%20Digital%20Micrometer/\\$catalogue/mitutoyoData/PR/293-100-10/index.xhtml](https://shop.mitutoyo.cz/web/mitutoyo/cs_CZ/mitutoyo/High%20Accuracy/High%20Accuracy%20Digital%20Micrometer/$catalogue/mitutoyoData/PR/293-100-10/index.xhtml)

19. Lineární výškoměr Linear Height LH-600E Mitutoyo. *MAVA lisovna s.r.o.* [online]. 2018 [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <http://www.mava.cz/lh-600-mitutoyo>
20. 8000 series: Precision multimeters. *Transmille* [online]. [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <https://www.transmille.com/8000-series-legacy>
21. Koncové měřky. *Unimetra spol. s.r.o.* [online]. [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: http://www.unimetra.cz/soubory_materialy/84_1.pdf
22. TROJAN, Martin. *Standardní nejistoty měření* [online]. Brno, 2008 [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: <https://adoc.tips/standardni-nejistoty-meni.html>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Marie Havlíková.
23. MONTGOMERY, Douglas C. *Introduction to Statistical Quality Control: Sixth Edition* [online]. Arizona State University [cit. 2020-07-12].
24. 1D/2D měřící lineární výškoměr. *Tauricon* [online]. Púchov [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <http://www.tauricon.sk/prospekty-mitutoyo-pdf/01-prc1286.pdf>
25. *VDA5 - Vhodnost kontrolních procesů: 2. vydání*. Česká společnost pro jakost. Praha, 2011, 172 s.
26. HOGAN, Richard. 6 Influences on Uncertainty in Measurement Results. *Isobudgets* [online]. 2013 [cit. 2020-07-06]. Dostupné z: <https://www.isobudgets.com/6-influences-on-uncertainty-in-measurement-results/>
27. What is measurement stability? *Minitab* [online]. 2019 [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/measurement-system-analysis/supporting-topics/other-gage-studies-and-measures/what-is-measurement-stability/>
28. *Účinky vlhkosti na sbírkové materiály* [online]. In: . Slezská univerzita v Opavě. Opava [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: https://www.slu.cz/slu/cz/projekty/webs/zkvalitneni/vystupy-1/uhv-m0096-preventivni-konzervace/vlhkost/at_download/file/
29. BĚHÁLEK, Luboš. Polymery: Navlhavost polymerů. *Publi.cz* [online]. Liberec, 30.9.2014 [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/07.html>

30. BUDÍKOVÁ, Marie. Centrální limitní věta. *Statistika a pravděpodobnost: Přírodovědecká fakulta Masarykovy Univerzity* [online]. 2016 [cit. 2020-07-02]. Dostupné z:
<https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/prif/ps15/statistika/web/pages/centralni-limitni-veta.html>
31. Úvod do metrologie: Přesnost a chyby měření. *Informační systém Masarykovy univerzity* [online]. [cit. 2020-07-12]. Dostupné z:
https://is.muni.cz/el/1441/jaro2012/FY2RC_FM1/um/171_UVMET_07.pdf
32. Control charts. *Analyse-it* [online]. 2020 [cit. 2020-07-15]. Dostupné z:
<https://analyse-it.com/docs/user-guide/process-control/control-chart>
33. ZHANG, Lingyun a K. GOVINDARAJU. *On probability limits for phase II S control chart* [online]. Massey University: METRON - International Journal of Statistics, 2007 [cit. 2020-07-14].