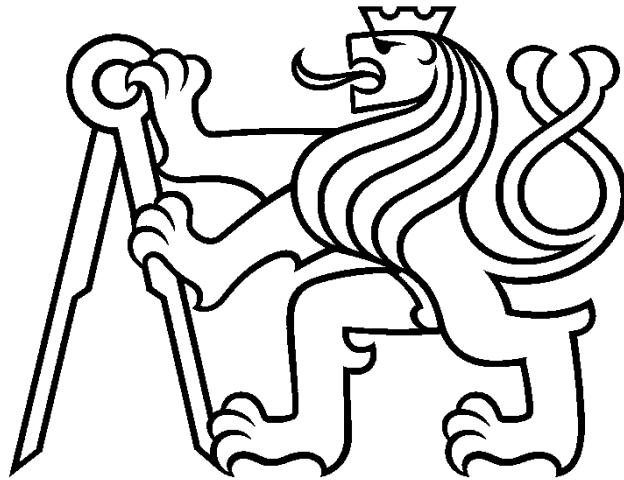


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vliv teploty prostředí v laboratoři na nejistoty měření při kalibraci.

Influence of temperature environment in laboratory on measurement
uncertainty during calibration

Lukáš Turek, 2020

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Urban

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Turek** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **476063**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací 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:

Vliv teploty prostředí v laboratoři na nejistoty měření při kalibraci.

Název bakalářské práce anglicky:

Influence of temperature environment in laboratory on measurement uncertainty during calibration

Pokyny pro vypracování:

- 1) Definice požadavků na řízení laboratoře dle příslušných norem
- 2) Environmentální vlivy na nejistoty měření
- 3) Popis vlivu teploty v laboratoři na nejistoty měření

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


Ing. Jan Urban, 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. Jan Urban
podpis vedoucí(ho) práce


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

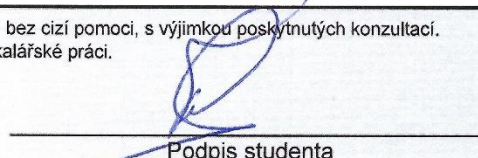

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

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


Podpis studenta

Poděkování

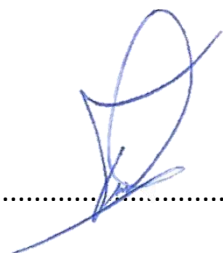
Mé poděkování patří především panu Ing. Janu Urbanovi za odborné vedení, trpělivost a vstřícnost, kterou mi v průběhu zpracování bakalářské práce prokazoval. Též mu děkuji za rozumné řešení komplikací při tvorbě práce, vzniklých výjimečným stavem na jaře a v létě roku 2020. Dále děkuji svým rodičům za podporu a pomoc se stylistikou a strukturou práce. V neposlední řadě děkuji svému dědovi Ing. Josefu Divišovi za technické a stylistické připomínky a psychickou podporu, díky které jsem vynaložil při tvorbě práce maximální pečlivost a úsilí.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že tuto diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, které jsou uvedeny v příloze této práce.

V Praze dne 30. července 2020

Podpis.....

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke at the bottom, positioned over the dotted line of the signature field.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá kalibracemi a kalibračními laboratořemi. V práci je stručně popsána historie metrologie, vysvětluje pojmy jako je řízení kvality, metrologická návaznost, nejistoty měření a kalibrace. Tyto informace tvoří pro čtenáře vědomostní základ pro porozumění praktické části práce, kde je zjišťován vliv teploty kalibrační laboratoře a kalibrovaného předmětu na kalibraci a zároveň se ověřuje, zda teplotní kompenzace plní svou funkci.

Klíčová slova

Metrologie, Kubit, Etalon, měření, IM&TE, řízení kvality, soustava jednotek SI, ISO 9000, ISO 17025, Kalibrace, Chyby měření, Nejistoty měření, Metoda RSS, Metrologická návaznost, Environmentální podmínky, Kalibrační certifikát, Záznam kalibrace, Kalibrační postup, Kalibrační laboratoř, teplotní kompenzace

Annotation

The bachelor thesis deals with calibrations and calibration laboratories. The work briefly describes the history of metrology, explains concepts such as quality control, metrological traceability, measurement uncertainties and calibration. This information forms a knowledge base for understanding the practical part of the work, where the influence of the temperature in a calibration laboratory and temperature of a calibrated object on a calibration is determined and it is verified whether the temperature compensation fulfills its function at the same time.

Keywords

Metrology, cubit, etalon, measurement, IM&TE, quality control, SI, ISO 9000, ISO 17025, calibration, measurement error, measurement uncertainty, RSS, metrological traceability, environmental conditions, calibration certificate, calibration record, calibration procedure, calibration laboratory, temperature compensation

Obsah

1	Úvod	8
2	Řízení kvality	10
3	Nejistoty a chyby měření	12
3.1	Chyby měření	12
3.2	Nejistota měření.....	13
3.3	Kombinovaná nejistota (metoda RSS).....	14
4	Kalibrace.....	16
4.1	Metrologická návaznost a kalibrace.....	16
4.2	Kalibrační postupy	19
4.3	Záznamy a certifikáty kalibrace	23
4.4	Kalibrační intervaly.....	26
5	Kalibrační laboratoř	29
5.1	ISO 17025	29
5.2	Požadavky na strukturu kalibračních laboratoří	29
5.3	Požadavky na zdroje.....	29
6	Kalibrační laboratoř dle VDI/VDE 2627.....	31
6.1	Environmentální vlivy.....	31
6.2	Tvorba požadavků pro měřicí laboratoř.....	32
6.3	Stavební plán.....	33
6.4	Vedení vzduchu	35
6.5	Vibrační izolace a osvětlení	36
6.6	Řízení kalibrační laboratoře	37
7	Kalibrační postup zjištění vlivu teploty na nejistotu	40
7.1	Předmět kalibrace	40
7.2	Druhy měřidel.....	40

7.3	Popis měřidla	40
7.4	Pomůcky potřebné ke kalibraci	40
7.5	Podmínky kalibrace	40
7.6	Rozsah kalibrace	40
7.7	Kontrola	41
7.8	Metoda kalibrace	41
7.9	Vyhodnocení kalibrace	41
7.10	Protokol o kalibraci	41
8	Kalibrace a kalibrační protokol	42
8.1	Nejistoty	44
8.1.1	Složky nejistoty typu A	44
8.1.2	Složky nejistoty typu B	45
8.1.3	Kombinovaná nejistota	45
8.2	Vyhodnocení.....	45
8.2.1	Skutečná hodnota průměru	45
8.2.2	Kruhovitost.....	47
9	Závěr.....	49

1 Úvod

Metrologie je věda o měření a mírách, zabývá se měřením technických a fyzikálních veličin. Je to veřejnosti nepříliš známá věda, často zaměňována za meteorologii a je jedním ze základních kamenů vývoje všech oborů lidského rozvoje. Ve strojírenství potřebujeme metrologii ke splnění tolerancí, bez kterých by naše stroje nefungovaly a na druhé straně spektra lidského počínání, například v hudbě, potřebujeme metrologii k ladění nástrojů na přesné frekvence, které znějí našim uším libozvučně. Napadne-li vás jakýkoliv obor, metrologie v něm hraje menší, či větší roli. V běžném životě se s metrologií setkáváme v podobě stanovených měřidel – měřidel pro obchodní styk. [1]

První zmínky o nějaké míře a tedy začátku existence metrologie jsou z období 3 000 let př.n.l. v Egyptě. Lidé využili skutečnosti, že oproti nějakému měřicímu nástroji, který by museli vyrobit a přenášet, mají s sebou neustále své tělo a lidská těla jsou si velmi podobná. Vytvořili tedy míru kubit, kterou definovali jako vzdálenost od konce prstů natažené dlaně po loket. Dále popsali jednotky pro velké a malé míry, například dlaně, palce atd. Jednotky v té době měly využití hlavně ve stavitelství a obchodu. [1] [2]

Použití jednotky, která se výrazně mění na základě tělesných rozdílů mezi lidmi není ideální a komplikovalo zejména práci stavitelů. To vedlo ke snaze o sjednocení měř a sestavení referenčního artefaktu, jež jednotku přímo definuje. Takový artefakt dnes nazýváme etalon a jedná se o ztělesnění míry. První snaha o standardizaci a územní kontrolu nad mírou byla zaznamenána v Anglii, kde v roce 1196 král Richard I. přikázal výrobu etalonů yardu z oceli a jejich distribuci po říši. Dalším milníkem vývoje metrologie byla Metrická konvence (nebo též Dohoda o metru) v roce 1875 v Paříži, kde byl založen Mezinárodní úřad pro míry a váhy. Tato společnost se ujala správy primárních etalonů, které uchovávaly jednotky stupnice a bylo s nimi možno převést tuto jednotku na měřidla nižší přesnosti. [1] [2]

Metrologický systém, který je založen na primárních etalonech a jejich návaznosti na měřidla nižší přesnosti čelí následujícím problémům:

- Nemožnost výroby přesně stejných etalonů
- Odchylka při převodu jednotky z měřidla vyšší přesnosti na nižší
- Nestabilita materiálu etalonů (časem degraduje a rozměr se mění) [1]

Ač se jednalo o nepřesnosti v řádu mikrometrů (nebo mikrogramů aj.), což je obrovský pokrok vůči nepřesnostem, se kterými se museli potýkat stavitelé v Egyptě, používající kubit, stále v důsledku závislosti na fyzickém etalonu, jako definici jednotky, nebylo možné zajistit, že v průběhu času se definice jednotky nezmění. To vedlo metrology k použití fyzikálních zákonů k definici jednotek. Například délková míra metr byla jako první v roce 1983 definována základní fyzikální konstantou, rychlostí světla ve vakuu c . Takto definovaná jednotka má nepřesnost absolutně nulovou. Jakákoliv realizace jednotky ovšem ztratí jistou přesnost, důležité avšak je, že definice je navždy stálá. Dnes je jednotka délky metr definována fixací číselné hodnoty rychlosti světla ve vakuu c , aby byla rovna 299 792 458, je-li vyjádřena jednotkou m^{-1} , kde sekunda je definována pomocí cesiové frekvence $\Delta\nu_{CS}$. Nejmenší nepřesnosti dnes při realizaci jednotky metru dosahuje pevnolátkový Nd:YAG laser s relativní nepřesností $8,9 \cdot 10^{-12}$. [3] [1] [4]

V roce 1960 byla mezinárodní soustava jednotek SI vyhlášena jako mezinárodně platná. Obsahuje sedm základních jednotek a dvě úhlové jednotky, mezi které patří již zmíněná délka (metr, m), hmotnost (kilogram, kg), čas (sekunda, s), elektrický proud (ampér, A), termodynamická teplota (kelvin, K), svítivost (kandela, cd), látkové množství (mol, mol), úhel (radián, rad) a plošný úhel (steradián, Sr). Poprvé od 20. května 2019 jsou všechny tyto jednotky definovány fyzikálními konstantami. Ze základních jednotek je odvozeno dalších 19 jednotek, mezi které patří například frekvence (Hertz, Hz), přičemž $1 Hz = 1/s$. [5]

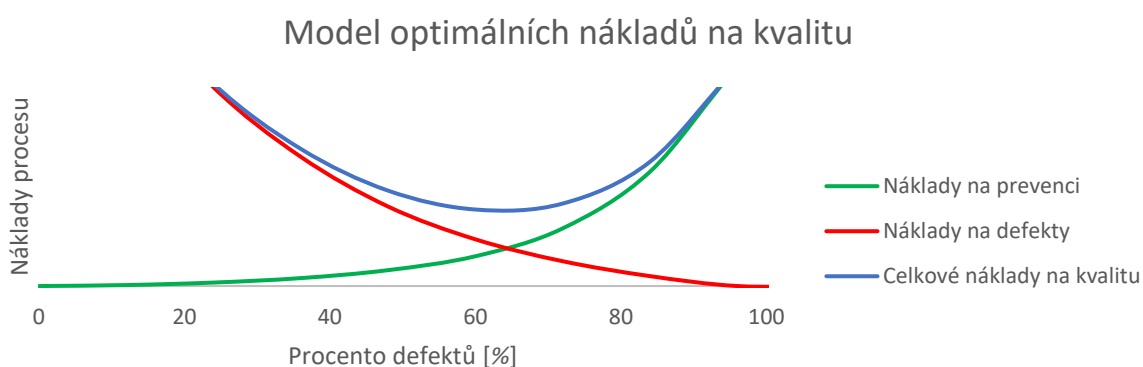
Možnosti metrologie jsou dnes tedy obrovské a zdá se být náročným úkolem efektivně využít nástrojů metrologie v podniku. V teoretické části mé práce mnohé základy této problematiky čtenáři vyjasním. V praktické části navážu na nově nabyté znalosti a zjistím vliv změny teploty prostředí kalibrační laboratoře na nejistoty měření. Původně jsem měl praktickou část provést v BOSCH Diesel v Jihlavě, kde mají jednu z nejlépe vybavených kalibračních laboratoří v České republice, nicméně kvůli pandemii na jaře v roce 2020 nebylo možné se do podniku dostat.

2 Řízení kvality

Jak metrologii využít v profesionální sféře v podnicích částečně řeší systémy řízení kvality. Tyto systémy jsou normované a je v zájmu podniků získat jejich certifikaci (jednak kvůli prestiži, hlavně avšak pro vůbec možnost ucházet se o specifické zakázky).

Nejrozšířenějším systémem řízení kvality je norma ISO 9000. Tato norma zajišťuje, že dodavatelé navrhují, vyrábí a dodávají produkty a služby dle předem definovaných kvalit a standardu. Použitím normy ISO 9000 lze identifikovat a řešit odlišné výrobky. Jedná se o mateřskou normu, pod kterou spadají normy ISO 9001, ISO 9002 a ISO 9003. [6]

Dále existuje norma ISO 17025, která již přímo stanovuje podmínky pro kalibrační laboratoře a kterou se budeme zabývat dále. [7]



Graf 1 (2) – Model optimálních nákladů na kvalitu [1]

S globalizací obchodu souvisí zvyšující se tendence konkurenčního boje mezi podniky. Jednou účinnou zbraní v tomto boji je zavedení systému řízení kvality. Důvody a následný užitek zavedení systému řízení kvality ISO 9000 v podniku jsou následující:

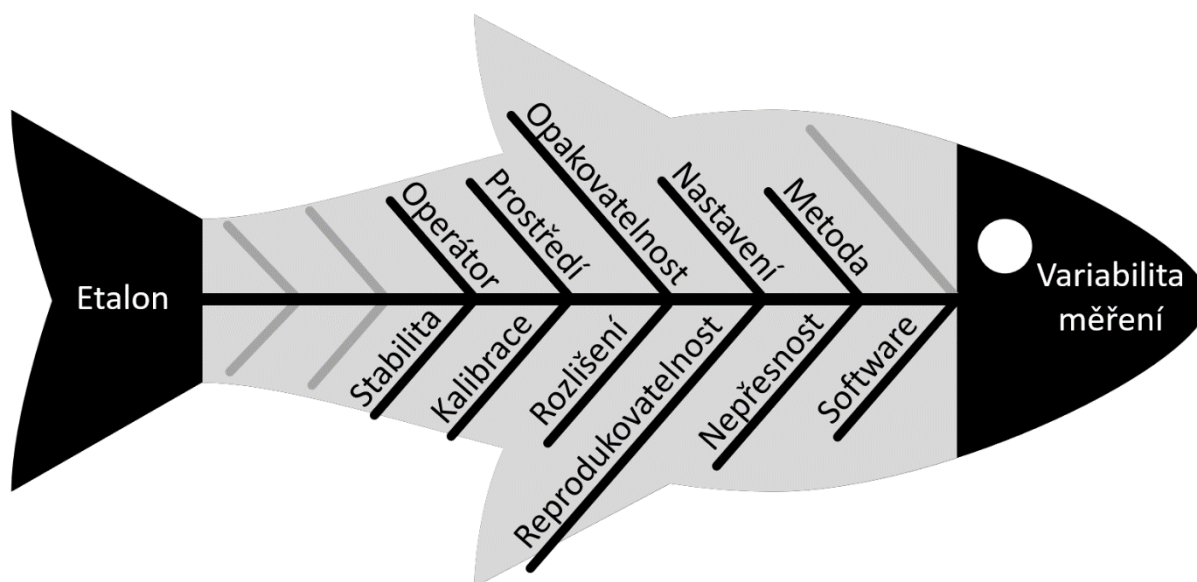
- Důkladně definované postupy zlepšují konzistenci výstupu. Veškerá činnost je provedena správně již poprvé.
- Kvalita je neustále měřena a kontrolována. Vedení podniku mají informace o chodu procesů a zaznamenají odchylky od normálu.
- Včas se provádí opravné a prevenční procedury.
- Z identifikace a porozumění chyb vyplývá snížení počtu defektů.
- Defekty jsou zaznamenány dříve a způsobují nižší nechtěné náklady.

- Srozumitelně definované a dokumentované procedury jsou srozumitelné pro nové pracovníky. Ti začnou pracovat efektivně dříve.
- Snížení produkčních nákladů, vycházející ze zjednodušené a usměrněné výroby s méně chybami. [6]

Inženýr, profesor a manažer Joseph M. Juran vytvořil model tří variabilních nákladů, a to nákladů na prevenci, defekty a celkové náklady na kvalitu. Tento model, zobrazený na grafu 1 (2), bere náklady na prevenci jako klesající funkci, náklady na defekty jako klesající funkci a celkové náklady jako součet těchto dvou funkcí, s minimem v jejich průniku. Model je obecný, při použití v daném podniku budou nákladové funkce individuální a při jejich sestavení je třeba brát v potaz mnoho faktorů výroby a funkce podniku. [8] [9]

3 Nejistoty a chyby měření

Věda nás doposud nedokázala uvolnit ze sevření fyzikálních zákonů a každé měření je tedy ovlivněno jedním či vícero zdroji chyb. S těmito chybami je třeba se naučit pracovat a jejich vyhodnocením určit nejistotu měření. Faktory, které typicky ovlivňují měření jsou na obrázku 1 (3). [1]



Obrázek 1 (3) – Ishikawa diagram „rybí kost“ zdrojů variability měření [obrázek autor, 2020]

Každý z těchto faktorů více či méně ovlivňují nepřesnost měření. Tuto nepřesnost či nejistotu je v mnoha případech důležité znát. Jestliže by například nebyla při pokutování řidičů za překročení nejvyšší dovolené rychlosti brána v potaz nepřesnost radarů měřících rychlost vozidel, která je řekněme $\pm 3 \text{ km/h}$, policisté by nesprávně trestali řidiče, který by jel v obci dovolenou rychlostí 50 km/h , radar mu avšak změřil 53 km/h . Jeden ze způsobů, jak zvýšit přesnost měření, je pravidelná kalibrace měřicího přístroje.

3.1 Chyby měření

Chyba absolutní (Δ_x) je v metrologii termín, který značí rozdíl mezi skutečnou hodnotou měřené veličiny (x_m) a hodnotou zjištěnou měřením (x_s). Právě tato hodnota trápí každého metrologa a nedá mu spát. Minimalizací vlivu faktorů ji lze snížit na nejmenší možnou úroveň.

Rovnice 1 (3.1) – Absolutní chyba [1]

$$\Delta_x = x_m - x_s$$

Dále nás zajímá nominální hodnota výsledku měření. Tu vyhodnotíme aritmetickým průměrem \bar{x} všech měření.

Rovnice 2 (3.1) – Aritmetický průměr [1]

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

Rozlišujeme dva základní druhy chyb. Systematické a náhodné. Systematická chyba je zapříčiněna nedokonalostí měřicího přístroje a metody. Tato chyba má při opakovaném měření za identických podmínek stálou hodnotu a pokud není udána výrobcem měřicího přístroje, stanovíme její hodnotu na polovinu nejmenšího dílku měřidla (pro posuvné měřítko je tedy systematická chyba 0,05 mm). Určuje se tedy jako chyba absolutní. [1]

Náhodná chyba měření je zapříčiněna náhodnými rušivými vlivy (otřesy, změny teplot, tlaku vzduchu, nedokonalostí smyslů osoby provádějící měření atp.). Nelze ji zcela odstranit, zjišťuje se statistickými metodami (obvykle normálním Gaussovým rozložením) po opakování měření a následnou analýzou výsledků. Číselně náhodnou chybu nejčastěji zastupuje výběrová směrodatná odchylka s . [1]

Rovnice 3 (3.1) – Směrodatná odchylka [1]

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

3.2 Nejistota měření

Ze všech chyb, které při daném měření vznikají, získáme nejistotu měření, což je rozsah hodnot, mezi kterými s jistotou tvrdíme, že se nalézá skutečná hodnota veličiny. Existují dva způsoby vyhodnocení nejistoty měření a to metoda typu A a metoda typu B. [10]

Jakmile určíme jednotlivé zdroje chyb, příkladem mohou být chyby v úvodu této kapitoly, určíme typ nejistoty. Metoda typu A je způsob určení nejistoty měření statistickou analýzou řady pozorování.

Velmi často se používá výběrová směrodatná odchylka řady měření či jiné metody statistického vyhodnocení. K určení nejistoty měření se provede řada deseti měření v tabulce 1. Pro naše data je nejistotou měření výběrová směrodatná odchylka 10 odečtů. [10]

Tabulka 1 (3.2) – Data měření nejistot [10]

Příklad nejistoty typu A

1	10,05
2	9,98
3	9,97
4	9,98
5	10,01
6	10,02
7	10,03
8	10,01
9	10,05
10	10,00
Suma	100,11
Průměr	10,01
Výběrová směrodatná odchylka	0,029

Metoda typu B je způsob určení nejistoty měření jinými prostředky, než je statistická analýza řady pozorování. Například to může být historie parametru, další informace o parametru procesu, zakládající se na specifikacích a referenčních datech, například příručky fyziky. Určitá měření jsou často ovlivněna kombinací více zdrojů nejistot, a to nejistot typu A i B. Pro získání celkové nejistoty (absolutní chyby) je třeba nejistoty početně zkombinovat. Pro takový účel slouží metoda RSS. [10] [11]

3.3 Kombinovaná nejistota (metoda RSS)

Jednotlivé složky celkové nejistoty nelze sčítat. Pro kombinaci složek nejistoty se používá metoda root sum squared (metoda nejmenších čtverců). Tato metoda zohledňuje, že jednotlivé složky celkové nejistoty jsou náhodné a nezávislé na sobě. Obecný vzorec RSS je:

Rovnice 4 (3.3) – Obecný vzorec pro kombinovanou nejistotu [10]

$$u_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2}$$

Kde u_k je nejistota kombinovaná, u_i jsou jednotlivé komponenty nejistoty a n je počet komponent nejistoty.

Složky nejistoty typu A se tedy kombinují pomocí metody RSS následovně:

Rovnice 5 (3.3) – Kombinace nejistot typu A [10]

$$u_{k_a} = \sqrt{u_{1_a}^2 + u_{2_a}^2 + u_{3_a}^2 + u_{4_a}^2 + \dots + u_{n_a}^2}$$

Složky nejistoty typu B jsou obdobně kombinovány:

Rovnice 6 (3.3) – Kombinace nejistot typu B [10]

$$u_{k_b} = \sqrt{u_{1_b}^2 + u_{2_b}^2 + u_{3_b}^2 + u_{4_b}^2 + \dots + u_{n_b}^2}$$

Nakonec kombinace nejistot obou typů A a B je:

Rovnice 7 (3.3) – Kombinace obou typů nejistot A a B [10]

$$u_{k_{ab}} = \sqrt{u_{k_a}^2 + u_{k_b}^2}$$

Pro názornost si uveďme příklad výpočtu nejistoty měření. Nechť máme zdroj nejistoty opakovatelnost, jenž je vyčíslen výběrovou směrodatnou odchylkou na $u_{opak} = 0,015 \text{ mm}$ a zdroj nejistoty reprodukovatelnost $u_{repr} = 0,005 \text{ mm}$. Kombinovaná nejistota typu A je:

Rovnice 8 (3.3) – Příklad kombinace nejistot typu A [10]

$$u_{k_a} = \sqrt{u_{opak}^2 + u_{repr}^2} = \sqrt{0,015^2 + 0,005^2} = 0,015811 \text{ mm}$$

Dále uvažujme zdroje nejistot pro metodu typu B rozlišení ($u_{rozl} = 0,001 \text{ mm}$), kalibraci ($u_{kal} = 0,0002 \text{ mm}$) a teplotu ($u_t = 0,005 \text{ mm}$). Nejistoty zkombinujeme pro získání celkové nejistoty typu B:

Rovnice 9 (3.3) – Příklad kombinace nejistot typu B [10]

$$u_{k_b} = \sqrt{u_{rozl}^2 + u_{kal}^2 + u_t^2} = \sqrt{0,001^2 + 0,0002^2 + 0,005^2} = 0,016614 \text{ mm}$$

Z celkových nejistot u_{k_a} a u_{k_b} spočítáme kombinovanou nejistotu:

Rovnice 10 (3.3) – Kombinace obou typů nejistot A a B [10]

$$u_{k_{ab}} = \sqrt{u_{k_a}^2 + u_{k_b}^2} = \sqrt{0,015811^2 + 0,016614^2} = 0,016614 \text{ mm}$$

Tím jsme získali celkovou nejistotu našeho měření. [10]

4 Kalibrace

4.1 Metrologická návaznost a kalibrace

Společně se zavedením systému řízení jakosti je nezbytné důkladně spravovat měřidla a měřicí systémy, jež společnosti či podniku umožňují kontrolovat přesnost a preciznost produktu. Tato přesnost přímo vychází z kalibrace, kterou definujeme dále. Avšak nejprve je třeba pochopit pojem metrologická návaznost. [12]

Mezinárodní metrologický slovník International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM) definuje metrologickou návaznost jako: „*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*“ [13]. Řetězec kalibrací je sousled referencí jednotky, od definice jednotky, přes primární a sekundární etalony až po podniková procesní měřidla. [14]

Tato vlastnost výsledku měření je de facto nepřesnost výsledku. Je vztažená na řetězec kalibrací, což je nepřerušovaný řetězec návaznosti etalonů a měřidel od definice jednotky přes primární a sekundární etalony až po měřidla ve výrobě daného podniku, které na sebe přímo navazují, čímž se s každým krokem snižuje přesnost. Řetězci kalibrací snadno porozumíme z metrologické pyramidy na obrázku 2 (4.1). [15]



Obrázek 2 (4.1) – Příklad metrologické návaznosti [16]

Dle americké společnosti pro akreditaci laboratoří (A2LA) je metrologická návaznost založena na šesti základních složkách:

- 1) Již zmíněný nepřerušovaný řetězec kalibrací – zpětná návaznost až k definici SI
- 2) Měřicí nepřesnost – nepřesnost musí být definovaná pro každý stupeň v řetězci, z čehož následně získáme celkovou nepřesnost
- 3) Dokumentace – každá definice nepřesnosti musí být provedena dle předepsaných metod a výsledek musí být uchován v záznamu kalibrace
- 4) Kompetence – společnosti zúčastněné v řetězci musí být pro svou činnost správně vybaveny a akreditovány
- 5) Reference k jednotkám SI – Definice jednotek SI jsou vždy brány jako vrchol řetězce a nelze je nijak nahradit
- 6) Rekalibrace – Pro zachování návaznosti musí být prováděny ve vhodných intervalech [17]

Proč se zabýváme metrologickou návazností? Její užitek je nedožitelný. Představme si, že komerční letoun Airbus A380 letí z Letiště Václava Havla do New Yorku. Během letu se poškodí komponenta letadla, ohrožující let. Díl je nutné před následujícím letem vyměnit. Ve světě bez metrologické návaznosti by v Americe nebylo možné získat či vyrobit konkrétní díl, jenž byl navržen v dílnách Airbusu v Evropě, neboť přísné tolerance v leteckém průmyslu společně s rozdílnými mírami v Americe (což je přímým výsledkem neexistence metrologické návaznosti) způsobí, že náhradní díl vyrobený v Americe nebude nikdy rozměrově odpovídat originálnímu dílu z Evropy. Díl by tedy musel být přivezen s velkými náklady z Evropy a letadlo by zůstalo mnoho dní uzemněné, ztrácejíc aerolinkám velké množství peněz. [1]

Termín, na jehož vysvětlení se jistě každý čtenář těší již od úvodní strany, je kalibrace. Mezinárodní metrologický slovník plně definuje pojem kalibrace následovně: „*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.*

Poznámka 1: Kalibrace smí být vyjádřena údajem, kalibrační funkcí, kalibračním diagramem, kalibrační křivkou nebo kalibrační tabulkou. V některých případech se smí skládat ze součtových nebo násobných korekcí indikace s přidruženou nejistotou měření.

Poznámka 2: Kalibrace nemá být zaměňována s justováním měřicího systému, často mylně nazývaným „samokalibrace“, ani s ověřením kalibrace.

Poznámka 3: Samotný první krok ve výše uvedené definici je často chápán jako kalibrace“ [18]

Tato definice je pro nezasvěcené opět hůře srozumitelná, což je na jednu stranu výhodné, neboť ne každý má tak možnost dostat se do oboru metrologie, na druhou stranu v průběhu této práce se dostaneme ke složitějším definicím, bylo by tedy výhodné tyto základní termíny efektivně vysvětlit.

Pro začátek je důležité říci, že kalibrace je činnost či proces. Jednou součástí kalibrace je soubor úkonů, jejichž výsledkem je porovnání dvou hodnot veličin. Jedná se o hodnoty veličin

- které vyčteme z měřicího přístroje, či měřicího systému, který kalibrujeme, (někdy též hodnoty reprezentovány ztělesněnou mírou)
- referenční, které sestavujeme z etalonů [1]

Hodnoty musí být získány za specifikovaných podmínek. Na základě daného porovnání a tedy výsledkem celého procesu kalibrace je možnost přiřadit hodnoty měřené veličiny k indikacím (indikace je hodnota měřené veličiny, kterou vyčteme přímo na měřicím zařízení), případně stanovení korekcí ve vztahu k indikacím. Dále je výstupem kalibrační certifikát s určitou životností. [1]

V praxi kalibrujeme například měřicí přístroje typu délkoměr, souřadnicový měřicí stroj (CMM), váhy atd. Jako triviální příklad procesu kalibrace si můžeme představit kalibraci váhy. Nejprve získáme dvě hodnoty veličin, zmíněné ve dvou bodech výše. V kontrolovaném prostředí tedy položíme na váhu etalon, který ztělesňuje 1 kilogram. Váha indikuje 1,04 kilogramu. Máme tedy hodnoty:

$$m_1 = 1,00 \text{ kg}$$

$$m_2 = 1,04 \text{ kg}$$

Porovnáním zjistíme, že $\Delta m = 0,04 \text{ kg}$. Na základě této odchylky zavedeme korekci indikace $0,04 \text{ kg}$ a to buďto přičtením $0,04 \text{ kg}$ ke každému měření měřidlem, anebo mechanickou či softwarovou úpravou vah tak, aby jejich indikace byla o $0,04 \text{ kg}$ větší. [15]

Nyní víme, co je kalibrace. Je vhodné dále zmínit, za jakých okolností je třeba kalibraci provést. Kapitola 6.4.6 normy ČSN EN ISO/IEC 17025 říká, že měřicí zařízení je třeba kalibrovat, jestliže přesnost měření nebo nejistota měření ovlivňuje platnost uváděných výsledků a kalibrace zařízení je také vyžadována pro zajištění metrologické návaznosti uváděných výsledků [15]

4.2 Kalibrační postupy

Již zmíněný pojem měřicí zařízení dále rozšířím pomocí anglické zkratky IM&TE (inspection, measuring, and test equipment), což v překladu znamená nástroje pro kontrolu, měření a testování. Všechny standardy týkající se systému kvality požadují, aby při kalibraci IM&TE kalibrační technik detailně popisoval svou práci (to zahrnuje kalibrační postupy, protokoly, pracovní instrukce a jiné). Tento požadavek je důležitý z hlediska opakovatelnosti kalibrace za stejných podmínek a stejného postupu pro získání konzistentních výsledků kalibrace. [1]

Zápisem kalibračních postupů se zabývá kapitola 6.2.1 normy ISO Q10012:2003. Norma říká, že zápisy kalibračních postupů musí být zdokumentovány v nezbytném rozsahu a validovány, aby byla zajištěna platnost výsledků měření, řádné provádění kalibrací a důslednost uplatňování kalibračních postupů. Zápisy kalibračních postupů musí být stále aktuální a přístupné. Z normy je zejména třeba zdůraznit, že změny kalibračních postupů musí být řízené a autorizované. [19]

Podobně požadavky zápisu kalibračních postupů popisují v kapitole 5.9 normy NCSLI RP-6: „Documentation should be provided containing sufficient information for the calibration of measurement equipment“. Ve větším rozsahu je toto tvrzení popsáno následujícími body:

- Zdroj – Nechtě je kalibrace provedena interně, jinou společností, výrobcem, nebo společně kombinací těchto tří možností
- Úplnost – Kalibrační postupy musí být popsány do dostačující hloubky, aby kvalifikovaný pracovník dokázal provést kalibraci.
- Dozor – Veškeré procedury musí být kontrolovány a potvrzeny. Potvrzení musí být zobrazeno na dokumentu.
- Software – Za předpokladu, že je kalibrace prováděna softwarem, jeho činnost musí probíhat dle příslušného návodu

Dále je zmíněn vhodný obsah interních procedur:

- Parametry – Popis přístroje, výrobce, modelové číslo, environmentální podmínky, specifikace atd.
- Měřicí standardy – Obecný popis měřicích standardů, přesnost
- Předběžné operace – Toto zahrnuje veškeré bezpečnostní a provozní úkony, způsoby čištění
- Kalibrační proces – Detailně popsaná sada instrukcí samotné kalibrace rozdělená do pevně definovaných segmentů, horní a dolní mezní limity a další požadované instrukce
- Kalibrační výsledky – Jedná se o tabulku či dokument na záznam výkonnostních výsledků
- Závěrečné operace – Přístroje se označují štítky, zavedení prostředků pro zabezpečení kalibrace a zábrana vniku nečistot do kalibrovaného přístroje
- Skladování a zacházení s přístrojem – Tyto požadavky zajišťují trvanlivost kalibrace [1]

Nyní již víme, že kalibraci je nutné provádět. Kde ale začít? Měřicí přístroje se odlišují v příliš velkém rozsahu, aby bylo možné držet se nějakého obecného návodu. Servisní manuály od výrobce mohou obsahovat kalibrační postupy měřicího přístroje, od čehož se lze odrazit. Tyto postupy jsou avšak obvykle vágní, často chybí informace k zajištění kvalitní kalibrace, jako jsou požadovaná zařízení, environmentální podmínky a jiné. Jiní výrobci v servisních manuálech kalibraci nezmiňují vůbec, záleží zde pouze na rozhodnutí daného podniku. [1]

Co se týče způsobu naložení s informacemi získanými kalibrací IM&TE, máme dva krajní způsoby. V případě, že měřicí přístroj je náchylný k poškození při změně jeho indikace, nebo jeho indikaci nelze měnit, výsledné hodnoty kalibrace se zaevidují a při každém následném měření se použije korekce, vycházející z korelace. Druhý přístup zcela naopak vyžaduje úpravu měřicího přístroje při každé kalibraci, ať už během kalibrace zjistíme, že je to potřeba, či ne. Tyto metody lze kombinovat a u přístrojů, u kterých je to vhodné, upravovat měřicí přístroj jen pokud:

- a) měří mimo rozsah, který požadujeme,
- b) měří v rozsahu, ale blíže k limitu rozsahu, než je nepřesnost kalibrace
- c) trend hodnot během kalibrace naznačuje, že při následujícím měření indikace přístroje překročí rozsah. [1]

Tabulka 2 (4.2) – Ukázkový kalibrační předpis s tabulkou specifikací [1]

Název: Kalibrační procedura vah		Číslo procedury SOP11C002	Revize 02																															
Autor: Pavel Novák		Datum: 28.11.2001	Schváleno: Ing. Jan Vágner																															
PŘEČTĚTE SI KOMPLETNÍ SADU ÚLOH PŘED ZAČÁTKEM KALIBRACE																																		
<p>1. ÚČEL Tato standardní operační procedura (SOP) popisuje povinnosti metrologického odvětví ohledu kalibrace vah. Účelem této SOP je vysvětlení čtenáři formátu a struktury kalibrační procedury.</p> <p>2. ROZSAH Tato SOP se týká všech vah, které mají přímý vliv na kvalitu výrobků, dodávaných podnikem ABC metrologické služby Praha</p> <p>3. POVINNOSTI 3.1. Každý metrolog, jenž kalibruje váhy má povinnost postupovat dle této SOP. 3.2. Osoba, jenž je odpovědná za opravu a kalibraci vah je povinna mít navléknuty gumové rukavice a ochranu očí. Kalibrované váhy musí být vyčištěny a dekontaminovány před započítáním kalibrace.</p> <p>4. DEFINICE 4.1. NIST – National Institute of Standards and Technology (Národní institut standardů a technologie) 4.2. IM&TE – Inspection, Measurement, and Test Instrument (kontrolní, měřicí a testovací nástroje)</p> <p style="text-align: center;">IM&TE SPECIFIKACE</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Výrobce</th> <th>P/N</th> <th>Použitelný rozsah</th> <th>Přesnost</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Allied</td> <td>7206A</td> <td>500 mg ~ 500 g</td> <td>$\pm 30 \text{ mg}$ (500 ~ 30) g</td> </tr> <tr> <td>Denver</td> <td>400</td> <td>500 mg ~ 400 g</td> <td>$\pm 30 \text{ mg}$ (500 mg ~ 30 g) > 30 g $\pm 0.1\%$ of Rdg</td> </tr> <tr> <td>Ohaus</td> <td>V02310</td> <td>50 mg ~ 210 g</td> <td>$\pm 30 \text{ mg}$ (50 mg ~ 3 g) > 3 g $\pm 0.1\%$ of Rdg</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">POŽADAVKY NA NÁSTROJ (STRANDARDNÍ)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Váhový rozsah</th> <th>Přesnost</th> <th>Třída</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>25 kg</td> <td>$\pm 2,5 \text{ g}$</td> <td>F</td> </tr> <tr> <td>5 kg</td> <td>$\pm 12,0 \text{ mg}$</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>50 mg</td> <td>$\pm 0,01 \text{ mg}$</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>1 mg</td> <td>$\pm 0,01 \text{ mg}$</td> <td>3</td> </tr> </tbody> </table>				Výrobce	P/N	Použitelný rozsah	Přesnost	Allied	7206A	500 mg ~ 500 g	$\pm 30 \text{ mg}$ (500 ~ 30) g	Denver	400	500 mg ~ 400 g	$\pm 30 \text{ mg}$ (500 mg ~ 30 g) > 30 g $\pm 0.1\%$ of Rdg	Ohaus	V02310	50 mg ~ 210 g	$\pm 30 \text{ mg}$ (50 mg ~ 3 g) > 3 g $\pm 0.1\%$ of Rdg	Váhový rozsah	Přesnost	Třída	25 kg	$\pm 2,5 \text{ g}$	F	5 kg	$\pm 12,0 \text{ mg}$	1	50 mg	$\pm 0,01 \text{ mg}$	2	1 mg	$\pm 0,01 \text{ mg}$	3
Výrobce	P/N	Použitelný rozsah	Přesnost																															
Allied	7206A	500 mg ~ 500 g	$\pm 30 \text{ mg}$ (500 ~ 30) g																															
Denver	400	500 mg ~ 400 g	$\pm 30 \text{ mg}$ (500 mg ~ 30 g) > 30 g $\pm 0.1\%$ of Rdg																															
Ohaus	V02310	50 mg ~ 210 g	$\pm 30 \text{ mg}$ (50 mg ~ 3 g) > 3 g $\pm 0.1\%$ of Rdg																															
Váhový rozsah	Přesnost	Třída																																
25 kg	$\pm 2,5 \text{ g}$	F																																
5 kg	$\pm 12,0 \text{ mg}$	1																																
50 mg	$\pm 0,01 \text{ mg}$	2																																
1 mg	$\pm 0,01 \text{ mg}$	3																																

Tabulka 3 (4.2) – Příklad instrukcí kalibračního postupu [1]

5. POSTUP

5.1. Kontrola

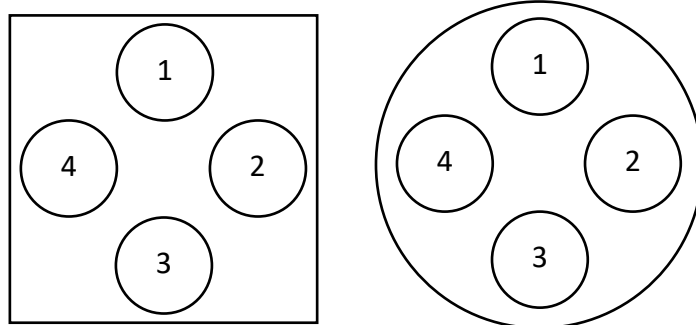
5.1.1. Obecná kontrola pro seznámení čtenáře se systémem číslování a formátování kalibrační procedury.

5.2. Vyrovnání testovacích přístrojů

5.2.1. Buďte explicitní a maximálně specifický v popisu instrukcí. Popisujte pro nejméně kvalifikovaného technika společnosti, nikoliv vedoucího oddělení.

5.3. Kalibrace „okrajů“ vázicí desky

5.3.1. Dle příkladu na obrázku rozložte standard (závaží) o přibližně jedné polovině měřicího rozsahu vah na okraj 1 (jednotlivé váhy rozložte na osy desky do jedné poloviny mezi středem vah a použitelným okrajem). Zaznamenejte indikaci vah na kalibrační list.



5.4. Dokončení zápisu do kalibračního listu

5.4.1. Zápis identifikačních kódů každého závaží

6. SOUVISEJÍCÍ POSTUPY

7. ZÁZNAMY

8. REVIZE DOKUMENTU

Číslo revize	Popis změn
00	Nový dokument
01	Rozšíření popisu krajních mezí kalibrace
02	Změna přesností na $\pm 0,1\%$ rozlišovací schopnosti a zavedení použitelného rozsahu na spodní a horní hraně všech vah

ODPOJTE A ZAJISTĚTE VEŠKERÉ IM&TE

IM&TE KALIBRAČNÍ BODY

Výrobce	Číslo dílu	Kalibrační testovací body [g]
Allied	7206A	0,5; 1; 1; 10; 50; 100; 500
Denver/Fischer	400	0,5; 10; 20; 50; 100; 400
Ohaus	V02130	0,05; 0,5; 5; 10; 100; 210

4.3 Záznamy a certifikáty kalibrace

Po dokončení kalibrace je vhodné uchovat nějaký záznam o proběhlé kalibraci. V případě, že během kalibrace nastane problém, či daný IM&TE vykazuje vlastnosti mimo normu, je vhodné tuto informaci uchovat v nějakém záznamu kalibrace, aby se při příští kalibraci neztrácel čas a zdroje podniku při řešení opět stejného problému. Kromě toho je samozřejmě výhodné mít záznamy o obecné historii všech IM&TE podniku a vývoji jejich přesnosti a preciznosti po celou dobu od nákupu až po odstavení z produkce, neboť na základě těchto informací lze porovnávat jednotlivé výrobce IM&TE a rozhodovat o příštích nákupech. Tyto vědomosti a zkušenosti jsou neocenitelné. Obecně je doporučováno, aby záznam kalibrace obsahoval následující:

1. Identifikační kód nebo číslo IM&TE určené podnikem, majitelem, výrobní a sériové číslo, případně příslušnost k odvětví a lokaci v podniku.
2. Kalibrační interval daného IM&TE
3. Environmentální podmínky během průběhu kalibrace
4. Měřicí rozsah a tolerance IM&TE
5. Měřicí rozsah a tolerance etalonů a standardů, použitých při kalibraci
6. Informace o metrologické návaznosti etalonů a standardů, které jsme použili při kalibraci IM&TE a platnost kalibrace těchto etalonů a standardů (tento požadavek je explicitně vyřčen v kapitole 6.5.1 normy ČSN EN ISO/IEC 17025)
7. Konkrétní použitou kalibrační proceduru a revizní číslo
8. Stav IM&TE před a po kalibraci
9. Doba platnosti kalibrace
10. Prostor na komentáře a poznatky
11. Podpis kalibračního technika, případně i dohlížející osoby a datum dokončení kalibrace [1]

Záznam kalibrace je vhodné uchovat v elektronické, případně i v tištěné podobě. Tištěný záznam musí být zabezpečen proti nedovoleným úpravám a poškození. Pokud je třeba záznam upravit ve výsledku nalezené chyby, či z jiného důvodu, špatné hodnoty musí být přeškrtnuty, avšak musí zůstat čitelné. Výhodný způsob z hlediska přehlednosti, jak uchovávat elektronické záznamy, je shrnut v následujících bodech:

- Standardizování názvů souborů – unikátní identifikační číslo IM&TE (například pětimístné) a následně datum kalibrace.
- Uchovávání revizí záznamů v novém souboru a to s označenými změnami, datem a podpisem osoby, která provedla revizi
- Založení tabulky (například v Microsoft Excel) s funkční databází záznamů kalibrace včetně odkazů na reálné umístění souborů [1]

Důležitý je rozdíl mezi kalibračním certifikátem a záznamem kalibrace. Jestliže kalibraci provádí samotný podnik, záznam společně s kalibračním štítkem, jenž je fyzicky na IM&TE, je brán jako přímá náhrada kalibračního certifikátu. Pokud však kalibraci provádí externí osoba, po jejím dokončení musí podniku předat jak kalibrační certifikát, tak i záznam kalibrace. Certifikát je opět vhodné ukládat v elektronické podobě, neboť je jich nepřeberné množství. V Německu za rok 2016 bylo provedeno okolo 10 000 kalibrací primárních etalonů, pro IM&TE bude toto číslo o mnoho řádů vyšší. Stejně jako záznam i certifikát musí obsahovat nějaké základní informace, příklad obsahu kalibračního certifikátu je na obrázku 3 (4.3). [20]

Certifikát může být pro podnik velmi užitečný, záleží, jak je s ním naloženo. Obvyklé je, že je certifikát uložen (možná je vhodnější termín pohřben) do archivu a již nespátří světlo světa. Pokud má ale podnik zájem zlepšovat vnitřní procesy, zvyšovat efektivitu a cílit k dokonalosti, zaznamená si alespoň data před a po kalibraci, tedy zda došlo k opravě či zásahu do IM&TE. Tento údaj je užitečný při determinaci kalibračních intervalů, což se dozvíme dále. [1]



Kalibrační laboratoř MAVIS
 Svatopluka Čecha 152
 CZ – 473 01 Nový Bor
 tel.: +420 487 725 913, 487 722 116
 fax: +420 487 722 416
 e-mail: obchod@mavis.cz
 internet: www.mavis.cz

Kalibrační list č. KL-XXXX-XX

Datum vystavení : xx.xx.xxxx

Strana 1 (celkem 1)

Zadavatel :

Předmět : Termoelektrický snímač teploty MTC10-xx-xxx-xx

Typ : Plášťový, 1 x „J“, izolovaný, průměr P 3 mm, délka XXX mm v.č. xx xx xxxx

Použitý etalon : E6-KL , typ „1xPt100“ , STS-100 A 500 výr.č. 604252-14
 Kalibrační list : 1033-KL-20052-15 (ČMI Praha)
 E3-KL , Laboratorní multimetr KEITHLEY 2002, výr. č. 1293576
 Kalibrační list : 1031-KL-20213-14 (ČMI Praha)

Popis kalibrace : Kalibrace byla provedena porovnávací metodou s etalonem podle metodiky F-QL-1.
 Termoelektrické napětí je převedeno na teplotu podle ČSN EN 60584-1.
 Kalibrace byla provedena při teplotě okolí 23 °C ± 3 °C a relativní vlhkosti 45 % ± 15 %.

Naměřené hodnoty :

Etalonová teplota T_e °C	Naměřená hodnota mV	Teplota snímače T_z °C	Rozdíl $T_z - T_e$ °C	Nejistota °C
200,0	10,7745	199,9	- 0,1	0,6
400,0	21,8590	400,2	+ 0,2	0,6
600,0	33,0829	599,7	- 0,3	1,2

Nejistota : Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření $k=2$, což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí asi 95 %. Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA-4/02. V nejistotě není zahrnuta nejistota daná metrologickými vlastnostmi zkoušeného snímače.

Datum kalibrace : xx.xx.xxxx

Kalibraci provedl : Ing. Šilar Martin

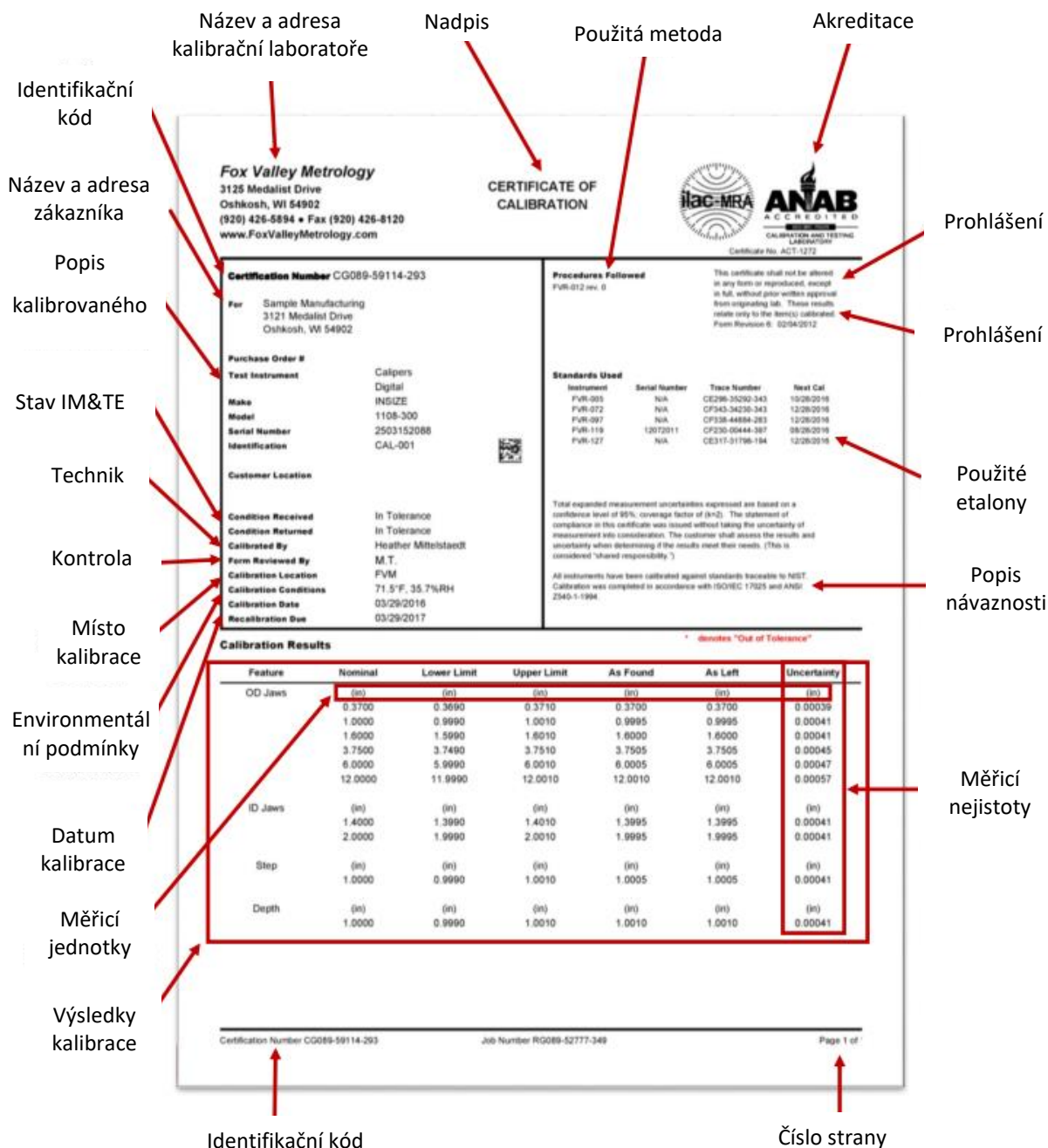
Vedoucí K.L. : Ing. Zlámal Zdenek



Konec kalibračního listu

Kalibrační list může být rozšiřován pouze v celkovém počtu stran beze změn. Změny a doplňky mohou být provedeny pouze laboratoři, která KL vystavila. Výsledky měření platí jen pro měřidlo uvedené v kalibračním listu. Bez razítka a podpisu neplatné !

Obrázek 3 (4.3) – Příklad kalibračního listu [21]



Obrázek 4 (4.3) – Příklad kalibračního certifikátu [22]

4.4 Kalibrační intervaly

Spolehlivost IM&TE nezávisí na přesnosti, rozsahu, či jiných parametrech daného nástroje, ale na způsobu používání a environmentálních podmínkách. Podobně, jako u letadel, která jsou více spolehlivá, když se více používají, také IM&TE neschází, když se nepoužívají a nechávají se takzvaně zatuhnout. Stroje musí pracovat. [1]

Kalibrační intervaly jsou vysoce individuální, jeden podnik může daný IM&TE, který používá pouze v místnosti s kontrolou klimatu kalibrovat jednou ročně, zatímco druhému podniku

s identickým IM&TE, který přenáší a používá ve venkovním prostředí, může stačit kalibrovat jednou za měsíc. [1]

Máme-li nový podnik, žádné zkušenosti a nakupujeme IM&TE, od čeho se odrazit při volbě délek prvních kalibračních cyklů? Výrobce IM&TE obvykle předepíše doporučenou dobu, která bývá v mnoha případech 12 měsíců. Během prvních několika let sledujeme výsledky kalibrací a zaznamenáváme pro jednotlivé přístroje množství kalibrací, během kterých byla indikace IM&TE opravena. Na základě procentuální úspěšnosti rozdělíme a rozhodneme, zda u daného IM&TE kalibrační interval zvýšíme, či snížíme. Pokud například určitý IM&TE v 98% případů a výše při kalibraci není opraven, jeho kalibrační interval zvýšíme. Při 90% a méně naopak interval zkrátíme. [1]

Zvýšení intervalu nám ušetří náklady za kalibraci a za dočasně nefunkční IM&TE, zatímco snížení intervalu nás chrání před zbytečnými náklady za zmetkové výrobky, které nekalibrovaný IM&TE určil jako vhodný. [1]

Jako bývá v metrologii zvykem, neexistuje univerzální předpis, kterým lze určit kalibrační interval. Hojně používaný je nicméně předpis RP-1, který definuje různé metody určení kalibračních intervalů. Tyto metody lze řadit dle faktorů jako je efektivita, náklad za implementaci, či udržitelnost pro velké společnosti. [1]

Předpis RP-1 rozlišuje dvě kategorie metod, ty, které používají statistické testy a ostatní, které nikoliv. Nestatistické metody je snadné a levné implementovat, na druhou stranu trvá dlouhou dobu, než se jimi určený interval ustálí na rozumné hodnotě a je u nich zvýšené riziko, že IM&TE bude delší dobu před následující kalibrací vykazovat nepřesné indikace. Statistické metody naopak určí vhodný interval hned na začátku používání IM&TE, vyžadují avšak data o kalibracích jiných IM&TE získaných v podniku, či externě. Statistické metody je vhodné použít v podniku s více, než 300 IM&TE. [1]

Důležité je rozmyslet, zda zapisovat den, měsíc a rok termínů kalibrace, anebo jen měsíc a rok. U IM&TE s krátkými intervaly kalibrace je zápis pouhého měsíce a roku nevhodný, neboť reálně se interval může měnit až o měsíc. [1]

Další z faktorů, ovlivňujících interval kalibrací je druh kalibrační procedury. Pro statistické metody určování intervalu je nezbytné, aby použitá data o kalibracích určité skupiny IM&TE vycházela ze stejného druhu kalibrační procedury. [1]

Pro IM&TE, které podnik nepoužívá příliš často, je vhodné k době kalibračního intervalu přičíst zpoždění, během kterého nově kalibrované IM&TE jsou uskladněny a nejsou používány. Tento proces zpoždění kalibrace musí být využíván s opatrností, neboť různé IM&TE jsou ovlivněny nepoužíváním jinak. [1]

Rozhodování o kalibračních intervalech může být v praxi složitější, pro výrobní linky, u kterých je zmetkovitost extrémně nákladná, může odpovědná osoba rozhodnout o výjimečně krátkém intervalu. [1]

5 Kalibrační laboratoř

Základem úspěšné kalibrační laboratoře a tedy úspěšného podniku (od samotného začátku sériové výroby a koexistující standardizace si kalibrace drží důležitou roli v úspěšnosti a opakovatelnosti výroby) je zřízení již zmíněného systému kvality (dříve systém jakosti). Systém kvality jest ovšem rozsáhlý, dotýká se mnoha odvětví podniku a my se tedy budeme soustředit pouze na jeho funkci při kalibracích. Požadavky na kalibrační laboratoře jsou dány normou ČSN EN ISO/IEC 17025, která byla v roce 2017 aktualizována.

5.1 ISO 17025

Pro naše účely je třeba rozumět nejen způsobům měření nejistot a kalibrací, nýbrž je důležité rozumět také samotným metrologickým laboratořím, ve kterých se běžně uvádí vše již řečené v praxi.

Základním kamenem, na kterém musí být postavena každá konkurenceschopná kalibrační laboratoř, je norma ČSN EN ISO/IEC 17025 – Všeobecné požadavky na kompetenci zkušebních a kalibračních laboratoř (třetí vydání z roku 2017, jedna ze změn je přidání definice „laboratoře“ a zvýšení flexibility v požadavcích na procesy, postupy atd.). [23]

5.2 Požadavky na strukturu kalibračních laboratoř

Norma ČSN EN ISO/IEC 17025 požaduje, aby kalibrační laboratoř byla právním subjektem, právně zodpovědným za svou činnost. Z ohledu managementu laboratoř musí mít určitou vedoucí osobu a organizační a řídicí strukturu společně s umístěním v mateřské organizaci. [23]

Pracovníci laboratoře mají mít pravomoc k zavedení a rozvoji systému řízení kvality, zjišťování a minimalizování odchylek od zavedeného systému a zajištění efektivnosti laboratorních činností. [23]

5.3 Požadavky na zdroje

Kapitola 6 normy ČSN EN ISO/IEC 17025 se zabývá lidskými a technologickými zdroji kalibračních laboratoř. Za zmínku stojí následující body:

- Pracovníci, kteří mají vliv na laboratorní činnosti, musí jednat v souladu se systémem řízení kvality

- Laboratoř musí uchovávat záznamy o výběru, výcviku a pravomocích pracovníků a o sledování jejich kompetence
- Laboratoř musí být vybavena zařízeními, nezbytnými ke své činnosti (měřidla, software, etalony, standardy měření, referenční materiály, činidla, atd.)
- Přeprava, zacházení a skladování všech měřicích zařízení musí být prováděna tak, aby nedošlo k poškození či kontaminaci zařízení
- Nová zařízení musí být prověřena [23]

Část normy Prostory a podmínky prostředí je pro nás zejména cenná, neboť určuje následující pravidla pro kalibrační laboratoře z hlediska environmentálních podmínek kalibrační laboratoře:

- 1) *„Prostory a podmínky prostředí musí být vhodné pro laboratorní činnosti a nesmí mít nepříznivý vliv na platnost výsledků.*
- 2) *Požadavky na prostory a podmínky prostředí nezbytné pro provádění laboratorních činností se musí dokumentovat.*
- 3) *Laboratoř musí sledovat, řídit a zaznamenávat podmínky prostředí v souladu s příslušnými specifikacemi, metodami nebo postupy, nebo pokud mají vliv na platnost výsledků.*
- 4) *Opatření pro kontrolu prostor se musí zavést, sledovat a pravidelně přezkoumávat a musí zahrnovat mimo jiné:*
 - a) *přístup do prostor ovlivňujících laboratorní činnosti a jejich využívání,*
 - b) *zabránění kontaminací, interferencím nebo nepříznivým vlivům na laboratorní činnosti,*
 - c) *efektivní oddělení prostor s neslučitelnými laboratorními činnostmi.*
- 5) *Pokud laboratoř provádí laboratorní činnosti na místech nebo zařízeních mimo její trvalou kontrolu, musí zajistit, že splňují požadavky tohoto dokumentu, týkající se prostor a podmínek prostředí.“ [23]*

Takto lze obecně popsat kalibrační laboratoře. V České republice je významná především norma pro automobilový průmysl VDI/VDE 2627, neboť Česko je na automobilový průmysl značně zaměřené.

6 Kalibrační laboratoř dle VDI/VDE 2627

Nepřesnosti měření vznikají nejen v důsledku špatně kalibrovaných IM&TE, nevhodně zvolených měřících metodách a podobně, ale z velké části jsou zaviněny nestabilními environmentálními podmínkami laboratoře. Proto je třeba provést určité kroky k minimalizaci vlivu prostředí na činnost metrologické laboratoře. [24]

Norma VDI/VDE 2627 popisuje pět hlavních environmentálních vlivů na výsledky měření. Na základě rozsahu opatření, která tyto vlivy minimalizuje, a tedy míry vlivu environmentálních podmínek na měření uvnitř laboratoře, norma klasifikuje metrologické laboratoře do několika tříd. Nejvyšší je laboratoř třídy 1., na kterou jsou kladeny největší nároky kontroly prostředí a nejméně kvalitní je laboratoř třídy 4. [24]

6.1 Environmentální vlivy

Teplota je jedním z pěti environmentálních vlivů na výsledky měření. Kvůli tepelné roztažnosti má zásadní vliv na nepřesnosti měření. Metrologická návaznost je na tomto jevu přímo závislá, proto je dle DIN EN ISO 1 definována referenční teplota 20 °C, jenž je brána jako standardní teplota pro měření délek kdekoliv na světě. [24]

Termální vlastnosti měřící laboratoře – pohyb tepla a teplotní výkyvy jsou způsobené charakteristikou budovy, technickým vybavením místnosti, osvětlením a osobami, pracujícími v laboratoři. Prostorová distribuce tepla z teplotních rozdílů na jednotlivých místech v místnosti, podobně, jako tlakové výše a níže způsobují vítr. Při analýze teplotních rozdílů místnosti se obvykle zjišťuje rozdíl maximální a minimální teploty podél všech tří os místnosti. Protože metrologická laboratoř je komplexní prostředí plné zdrojů tepla, řízení teploty je obtížné. [24]

Rozdělujeme 3 druhy přenosu tepla:

- Vedení – tepelné zdroje uvnitř IM&TE; základy budovy; stěny; okna; dotyk osob
- Proudění – pasivní, tedy prostorová distribuce tepla (průvan) a aktivní, tedy klimatizace
- Záření – světla, osoby, zařízení, stavba [24]

Pro vyrovnání bodů generujícím teplo (především lidé a výpočetní technika), a zajištění stejných podmínek měření v celé laboratoři je nezbytné zajistit, aby byla distribuce vzduchu v místnosti co největší a teplotní rozdíly na jednotlivých místech co nejnižší. K tomu poslouží klimatizace, kterou lze programovat k rychlému vyrovnávání teplotních výkyvů. [24]

Dále kalibrační laboratoře ovlivňuje vlhkost vzduchu. Ta ovlivňuje objem a tvary zejména kamenných či plastových objektů. Bylo zjištěno, že pro minimalizaci vlivu vlhkosti vzduchu na nepřesnosti měření je vhodné v místnosti udržet relativní vlhkost vzduchu 40-60 %. V České republice je k zajištění vlhkosti 40 % v zimě potřeba použití zvlhčovače vzduchu. [24]

Vlhkost vzduchu je ovlivněna například změnami teploty v místnosti, vnějšího klimatu, osobami a vybavením v místnosti (květiny v květináči například do laboratoře nepatří), či mytím podlahy vodou. [24]

Třetím vlivem je rychlost pohybu vzduchu. Kontinuální proud čistého vzduchu místností je nezbytný pro zachování zmíněné teploty a vlhkosti. Objem vzduchu přímo závisí na množství tepla, které je třeba odvést z místnosti. Rychlost pohybu vzduchu závisí na počtu vstupů a výstupů vzduchu, velikosti místnosti a překážkách. [24]

Dále je důležitá čistota vzduchu. K zachování čistoty v laboratoři slouží vzduchové filtry, které jsou součástí klimatizace. Ty udržují úroveň prachu na přijatelné úrovni. [24]

Nakonec vibrace mají také zásadní vliv na kalibrační laboratoř. Nejen, že se měřicí přístroje v jejich důsledku rychleji opotřebují, především se snižuje jejich přesnost. [24]

Zdroje vibrací mohou být určité přístroje v místnosti, jejich instalaci je vhodné se vyhnout. Nejvíce vibrací je avšak přenášeno zemí z okolních místností, výrobní části podniku, nebo i z blízké dálnice. Charakteristika vibrace objektu vychází z kombinace proměnných: hmotnost, tuhost a tlumení. [24]

6.2 Tvorba požadavků pro měřicí laboratoř

Před samotnou stavbou měřicí laboratoře je třeba definovat požadavky pro její environmentální podmínky. Je třeba sepsat seznam veškerých IM&TE a to těch, které jsou plánované v budoucnu a pomocného vybavení. Z příruček a manuálů všech zařízení sepsat podmínky, které pro daný přístroj výrobce definoval jako pracovní. [24]

Při návrhu systému klimatizace musíme brát v potaz:

- Metrologické požadavky IM&TE
- Velikosti prostoru, tlumení, zvukovou izolaci
- Rozsah nákladů na provoz a údržbu klimatizace
- Náročnost údržby
- Přístup vzduchu
- Bezpečnostní opatření

Z hlediska ergonomie a komfortu práce je vhodné volit bledé barvy stěn a podlah. Bezpečnost je samozřejmostí. [24]

6.3 Stavební plán

Výběrem vhodného místa pro stavbu metrologické laboratoře snížíme náklady na opatřeních proti vlivům na výsledky měření. Místo vybíráme dle nejnižších možných vlivů vibrací, venkovní teploty, nečistot a hluku. Laboratoř je vhodné stavět přímo na zemi či v podzemním patře, nikoliv ve vyšších patrech budovy. Rozložení půdy je ideálně skalnaté. Základy laboratoře norma popisuje v následujících bodech:

- 0,5 m tlustá vrstva štěrku
- Teplotní a vlhkostní izolace s vysokým modulem elasticity (například skleněná pěna)
- Železobetonová deska o tloušťce 0,5 m [24]

Pokud je laboratoř přistavována k již existující budově, je třeba zjistit, zda okolní místnosti negenerují přílišné hladiny vibrací. Laboratoř je vhodné umístit tak, aby nebyla ohřívána sluncem. Na severní polokouli je tedy vhodná severní strana budovy, na jižní polokouli pochopitelně na jižní straně budovy. Další aspekt volby umístění laboratoře je chod materiálu a organizace výroby. [24]

Velikost místnosti přímo vychází z metrologických činností, které budou v laboratoři prováděny a tedy na počtu a velikosti IM&TE a plánovaném počtu pracovníků. K tomu je třeba přičíst rezervní prostor na servis IM&TE a případné budoucí rozšíření činností laboratoře. Výšku místnosti lze určit dle výšky nejvyššího IM&TE a způsobu oběhu vzduchu, který jsme navrhli. [24]

Účinnou tepelnou izolaci je třeba použít ve stěnách a v podlaze. Jestliže strop laboratoře je přímo střecha, není vhodné použití střešního okna a povrch střechy by měl být z materiálu,

pohlcujícího co nejméně tepla. Pro snadné čištění volíme hladký povrch stěn a podlahy. U laboratoří s vyššími nároky na přesnost mohou být stěny dvojité se vzduchovou mezerou, jenž může regulovat teplotu vnitřní stěny. Rezonanční frekvence stěn musí být dostatečně vysoká, aby nebyly vybuzeny rezonance vibracemi z okolí a technikou klimatizace. Proto je také vhodné technické vybavení klimatizace umístit mimo místnost tak, aby co nejméně zasahovala do prostředí, které v laboratoři vytváříme. Podlaha musí být rovná a musí splňovat požadavky na zatížení všemi IM&TE. Mytí podlahy je vhodné provádět takovými prostředky, které nevytvoří tenkou vodivou vrstvu po celé ploše podlahy. Laboratoře 1. a 2. třídy by neměly mít okna. [24]

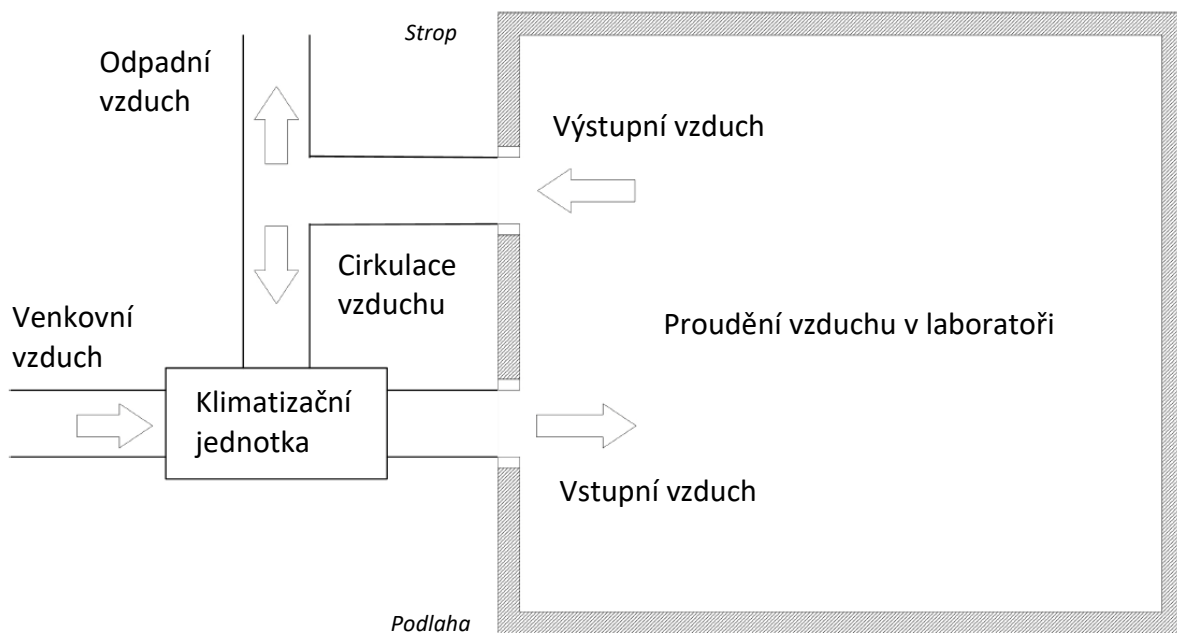
Vstup do místnosti může být řešen dvojitými dveřmi pro zamezení úniku tepla z laboratoře a vniku prachu a jiných nečistot. Pro vstup materiálu je vhodné postavit menší otvor. Dveře konstruujeme tak, aby je nebylo možné otevírat a zavírat prudce, ke snížení vzniku tlakových vln (použijeme dveřní zavírače se silným tlumičem). Pokud má personál laboratoře předepsané pracovní oblečení, převlékat by se měl v nějaké jiné místnosti, například přidružené šatně. [24]

6.4 Vedení vzduchu

Pro vedení vzduchu laboratoří norma doporučuje důkladné promyšlení symbiózy rozmístění tepelných zdrojů, pevných překážek a rozmístění vstupů a výstupů vzduchu tak, aby bylo v místnosti co nejméně slepých míst, kterými neproudí vzduch. Dále aktivní chlazení IM&TE a počítačů je vhodné směřovat tak, aby neovlivnilo jiné IM&TE. Rychlost vzduchu by neměla překročit 0,2 m/s, neboť při této rychlosti přestává být pro většinu lidí teplota 20 °C při vlhkosti 40-60 % snesitelná. [24]

Pro laboratoře 1. až 3. stupně je třeba, aby v místnosti byl mírný přetlak, například 5 Pa, aby při otevírání dveří nedocházelo k nasání nečistot a vzduchu o jiné teplotě, než kterou udržujeme v laboratoři. [24]

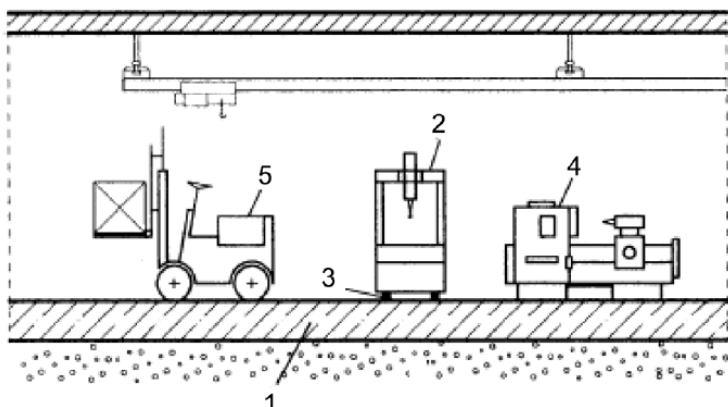
Jednoduchý příklad vedení vzduchu je na obrázku 5 (6.4).



Obrázek 5 (6.4) – Příklad vedení klimatizovaného vzduchu metrologickou laboratoří (pohled ze strany laboratoře) [24]

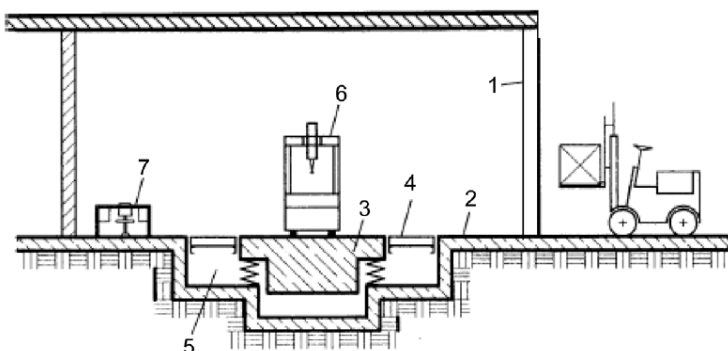
6.5 Vibrační izolace a osvětlení

Nechtěné vibrace lze minimalizovat použitím tlumících prvků. Před stavbou laboratoře je vhodné rozmístit po okolí vibrační senzory a provést analýzu, jak propracovaný systém tlumení bude vyžadován. Způsoby tlumení jsou na obrázcích 6.6, 6.7 a 6.8 [24]



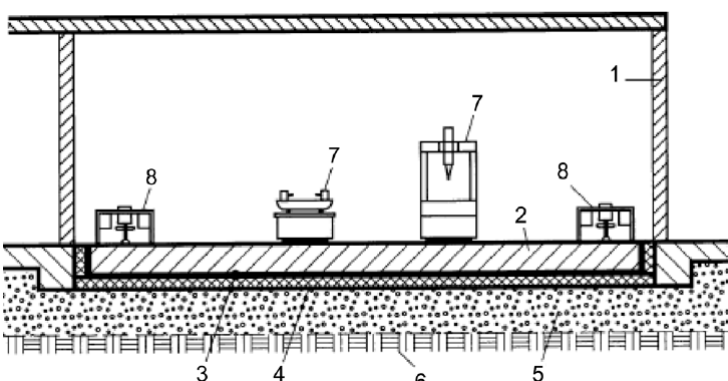
Obrázek 6 (6.4) – Pasivní systém tlumení vibrací na IM&TE [24]

Na obrázku 6 (6.4) je nejjednodušší a nejméně efektivní způsob tlumení vibrací. Tlumení je provedeno pouze tlumiči přímo na kontaktních plochách IM&TE a podlahy. Body značí následující: 1 je betonová podlaha, 2 IM&TE, 3 tlumiče vibrací, 4 výrobní stroj a 5 vysokozdvizný vozík, tedy zdroje vibrací. [24]



Obrázek 7 (6.4) – Pasivní systém tlumení vibrací s oddělenou deskou [24]

Obrázek 7 (6.4) ukazuje způsob tlumení laboratoře s oddělenou deskou pro IM&TE. Body značí: 1 je struktura budovy, 2 základová deska s prohlubní, 3 pasivní odpružená deska, 4 poklop, 5 prostor na kontrolu, 6 IM&TE a 7 stůl. [24]



Obrázek 8 (6.4) – Pasivní systém tlumení vibrací pro celou místnost [24]

Na obrázku 8 (6.4) je metrologická laboratoř, ve které je celá místnost vibračně tlumená. Body značí: 1 Budova, 2 masivní základová deska, 3 tepelná a vlhkostní izolace, 4 pružná izolační vrstva, 5 vrstva štěrku, 6 půda, 7 IM&TE a 8 stoly. [24]

Metrologická laboratoř by měla být osvětlena rovnoměrně a to použitím světla neutrální barvy. Není vhodné použití tradičních žárovek, které vyzařují velké množství tepla. Účinná technologie osvětlení jsou světlo emitující diody (LED), které vyzařují minimum tepla. Světla je vhodné nechávat neustále zapnutá, jejich zapínání a vypínání ovlivňuje teplotní spád. Praxe ukázala, že světelná intenzita okolo 750 lux je pro metrologické činnosti ideální. V potaz musíme brát také osvětlení jednotlivých pracovních stanovišť a stolů. To by opět mělo být provedeno technologií LED, avšak počet těchto světel je dobré minimalizovat. [24]

6.6 Řízení kalibrační laboratoře

Cílem kalibrační laboratoře je spolehlivost, opakovatelnost a konzistence měření a minimalizace náhodných jevů, kvůli kterým vznikají chyby a odchylky. Chceme-li dosáhnout ideálních měřicích podmínek kalibrační laboratoře, systém kontroly environmentálních podmínek laboratoře vyžaduje kromě kvalitního hardware (tedy důmyslně rozmístěných výměníků tepla a regulátorů vlhkosti) dále také robustní software. Tím je myšlen počítačový systém, jehož funkce jsou

- Přijímat data měřičů teploty a vlhkosti, průtokoměrů tepelných výměníků a všech dalších senzorů, které jsou součástí systému regulace environmentálních podmínek laboratoře
- Tato data zpracovat pomocí programátorem sestaveného algoritmu, jenž číselně určí odchylky od teplotního a vlhkostního normálu, případně u větších a přesnějších kalibračních laboratořích sestaví teplotní mapu prostoru
- Pro odchylky či teplotní mapu spočítat algoritmus potřebné opravy, a tedy potřebné zvýšení či snížení výkonu jednotlivých prvků regulace podmínek v laboratoři
- Odeslat opravné řídicí signály pro dané regulační prvky. [25]

V ideálním případě tento čtyřdílný proces probíhá kontinuálně v reálném čase. Při programování takového systému je třeba brát v potaz i náhodné faktory, jako je výpadek proudu, vhodná je implementace záložního zdroje proudu typu UPS, který obsluhuje kalibrační laboratoře umožní dokončit důležité úkony a zajistí jim prostor pro opravu závady za stálé funkce systému. Před stavbou laboratoře je vhodné vytvořit počítačovou simulaci se zdroji tepla, na jejímž základě navrhne výkon a rozložení klimatizace a topení. [25]

Rozložení senzorů má zásadní vliv na funkci ovládní klimatu v laboratoři. Sensory teploty by měly být dostatečně daleko od stěn (přibližně 0,5 m). Mezera mezi dvěma senzory je doporučena 1 m. Vzduch kolem senzoru musí volně proudit. [24]

Norma VDI/VDE 2627 nabízí několik poznatků pro řízení kalibrační laboratoře. Údaje o aktuální teplotě a vlhkosti, získané z mnoha senzorů uvnitř laboratoře, je vhodné zobrazovat na displejích v laboratoři a před ní. K laboratoři by měl mít přístup jen omezený počet osob. Ke snížení počtu hýbajících se nohou je výhodné používání podávacího okénka na materiál.

Při instalaci veškerých měřicích přístrojů a nastěhování obsluhy je třeba místnost řádně vyčistit. Norma popisuje čtyři kroky čištění.

- Několikanásobné umytí podlah prázdné laboratoře mokrým hadrem
- Setření stěn a podlahy prázdné laboratoře vlhkým hadrem
- Nastěhování obsluhy a instalace měřicích přístrojů
- Opětovné důsledné umytí podlah a všech ostatních povrchů [24]

Během chodu laboratoře je vhodné pravidelně uklízet. Udržení čistoty usnadní rohožky před vstupem do místnosti. [24]

Kapitola 9 normy VDI/VDE se zabývá třídami metrologických laboratoří, specializující se na délkové měření. Třídy laboratoří jsou

- 1 – Kalibrace referenčních etalonů, měření vah
- 2 – Kalibrace pracovních etalonů, měření dílů s vysokou přesností
- 3 – Měřicí úkoly při monitorování procesů, měření přístrojů, nástrojů, kontrolních, měřicích a zkušebních zařízení, kontroly vzorků pro dokumentaci, měření opotřebitelných dílů a počátečních vzorků
- 4 – Sledování výroby a seřizování strojů, kontrola pomocných zařízení a nástrojů (zkoušky ve výrobním oddělení)
- S – Měřicí laboratoř se speciálními požadavky [24]

Tabulka 4 (6.6) – Doporučené klíčové údaje tříd metrologických laboratoří dle VDI/VDE 2627 [24]

	Třída kvality metrologické laboratoře dle VDI/VDE 2627				
	1	2	3	4	S
Nominální teplota místnosti [°C]	20	dle stanovení	dle stanovení	dle stanovení	dle stanovení
Teplotní spád	A	B	C	D	dle stanovení
Teplotní rozdíl na délku	A	B	C	D	dle stanovení

Vhodná poznámka je, že u dílů, které měříme, je třeba před měřením nechat vyrovnat teplotu pro minimalizaci nepřesnosti měření, způsobené teplotní roztažností. Doba, po kterou se teplota vyrovnává, se různí na základě materiálu a rozměrů dílu. [24]

7 Kalibrační postup pro zjištění vlivu teploty na nejistotu

Popis kalibrace jsem sestavil empiricky na základě měření dvou kroužků $\varnothing 30\text{ mm}$ a $\varnothing 60\text{ mm}$ pod dohledem vedoucího mé práce, pana Ing. Jana Urbana.

7.1 Předmět kalibrace

Kalibrační postup se vztahuje na experimentální zjištění vlivu teploty na nejistotu kalibrace měřidel nastavovacích a kontrolních kroužků na kalibračním CMM Zeiss UPMC 850 CARAT.

7.2 Druhy měřidel

- I. Nastavovací a kontrolní kroužek $\varnothing 30\text{ mm}$ – Mk/30 JD
- II. Nastavovací a kontrolní kroužek $\varnothing 60\text{ mm}$ – Mk/60 JD

7.3 Popis měřidla

Nastavovací a kontrolní kroužky jsou normály vnitřních průměrů, sloužící k nastavování, kontrole a kalibraci laboratorních měřících přístrojů (například délkoměrů, kruhoměrů, nebo CMM). Každý kroužek je označen skutečně naměřenou hodnotou vnitřního průměru, který je uveden v dokladu nebo protokolu měřidla

7.4 Pomůcky potřebné ke kalibraci

Technický líh; Iněná utěrka; konzervační prostředky – olej; kalibrační CMM

7.5 Podmínky kalibrace

Kalibrace kroužků se provádí za tří referenčních teplot prostředí:

- $21 \pm 0,4\text{ °C}$
- $20 \pm 0,4\text{ °C}$
- $19 \pm 0,4\text{ °C}$

Před vlastní kalibrací musí být kalibrovaný kroužek i příslušný etalon (kalibrační CMM či kruhoměr) minimálně 8 hodin v místnosti s referenční teplotou.

7.6 Rozsah kalibrace

- Předběžná vzhledová kontrola a úprava kroužku
- Uchycení kroužků do přípravku a zapojení teplotních čidel
- Měření metrologických parametrů

- Úchylky tvaru (kruhovitost)
- Skutečný rozměr

7.7 Kontrola

Kontroluje se přelapování povrchu (měřicí plochy nesmějí být poškrábány, zkorodovány, nebo jinak poškozeny). Kroužek se vyčistí lihem a vytře do sucha. Následuje vizuální kontrola vnitřního povrchu.

7.8 Metoda kalibrace

Zjištění skutečného rozměru se provádí scanningem na CMM desetkrát ve třech rovinách (A – 2 mm od čela kroužku s popiskem; B – Uprostřed šíře kroužku; C – 2 mm od spodního čela kroužku). Dostaneme průměrnou hodnotu průměru D.

Zjištění úchylky tvaru (kruhovitosti) se provádí scanningem na CMM desetkrát ve třech rovinách (A – 2 mm od čela kroužku s popiskem; B – Uprostřed šíře kroužku; C – 2 mm od spodního čela kroužku). Dostaneme průměrnou hodnotu kruhovitosti.

7.9 Vyhodnocení kalibrace

Měřené hodnoty se v průběhu kalibrace zaznamenávají a porovnají se s dovolenými chybami uvedenými v tabulce.

Tabulka 5 (7.9) – Dovolené chyby kroužku

Průměr kroužku [mm]	Úchylka průměru [μm]	Úchylka kruhovitosti [μm]
30	0,6	0,3
60	0,3	0,4

Na základě vyhodnocení zkoušek rozhodne pracovník provádějící kalibraci, zda kalibrovaný kroužek vyhovuje či nevyhovuje stanoveným požadavkům. Výsledek kalibrace se zanes do dokladu měřidla a do protokolu o kalibraci. V případě překročení dovolené úchylky specifikované přesnosti je konzultováno s uživatelem měřidla rozšíření tolerance, v dokladu měřidla se následně k naměřené hodnotě připíše „povoleno“ a v kolonce předepsané hodnoty se připíše poznámka o rozšíření tolerance.

7.10 Protokol o kalibraci

Protokol o kalibraci musí obsahovat zadavatele, předmět kalibrace, použitý etalon, popis kalibrace, naměřené hodnoty, nejistotu, datum kalibrace a kalibračního technika.

8 Kalibrace a kalibrační protokol

Dle mnou sestaveného kalibračního postupu jsem kalibroval nastavovací a kontrolní kroužky Ø30 mm – Mk/30 JD a Ø60 mm – Mk/60 JD. Měřil jsem metrologické parametry skutečnou hodnotu průměru a kruhovitost. Součástí kalibrace jsem zkoumal vliv environmentálních podmínek na kalibraci a to při třech stavech prostředí:

- Teplota prostředí, kalibrovaného předmětu a etalonu $20 \pm 0,4$ °C; relativní vlhkost prostředí 50 ± 5 %
- Teplota prostředí, kalibrovaného předmětu a etalonu $21 \pm 0,4$ °C; relativní vlhkost prostředí 50 ± 5 %
- Teplota prostředí, kalibrovaného předmětu a etalonu $22 \pm 0,4$ °C; relativní vlhkost prostředí 50 ± 5 %

Každé měření jsem také provedl při dvou nastaveních měřicího softwaru Zeiss Calypso – S použitím teplotní kompenzace (TK) a bez použití teplotní kompenzace. Teplotní kompenzace přepočítávala naměřené hodnoty na základě aktuální teploty měřené teplotními senzory kalibrovaného předmětu. V teorii by tedy měla TK vyrušit vliv změny teploty na kalibraci. Protože nás zajímá právě vliv teploty na kalibraci, pozorování a hodnocení výsledků nebudu vztahovat na předepsané nominální hodnoty a tolerance kruhovitosti a průměru kroužků. Měření budu porovnávat mezi sebou.

Během kalibrace jsem tedy provedl dohromady 120 měření (2 různé kroužky, 3 stavy prostředí, 2 nastavení kompenzace teploty a pokaždé 10 měření pro vyloučení náhodných chyb). Při každém měření software vygeneroval protokol, příklad protokolu je na následující straně na obrázku 9 (8). Z celého protokolu pro mě byly důležité dvě hodnoty a to naměřená hodnota průměru a naměřená hodnota kruhovitosti (hodnoty jsem na obrázku zvýraznil). Považuji za důležité zmínit, že měřítko kruhovitosti je 1:0002. Ačkoliv se tedy dle obrázku zdá, že kroužek není kroužek, ale značně nepravidelná brambora, ve skutečnosti pouhým okem nelze na kroužku pozorovat nepravidelnost kruhovitosti.

Z tepelné roztažnosti materiálů je jasné, že kroužky se vlivem zvýšení teploty roztáhnou, což bych měl být schopen zaznamenat na skutečné hodnotě průměru při měření bez TK (přičemž na kruhovitosti vliv nezaznamenám). Zároveň jsem předpokládal, že ověřím funkci TK.



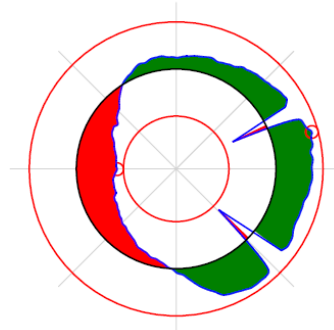
ZEISS CALYPSO

6.0.28

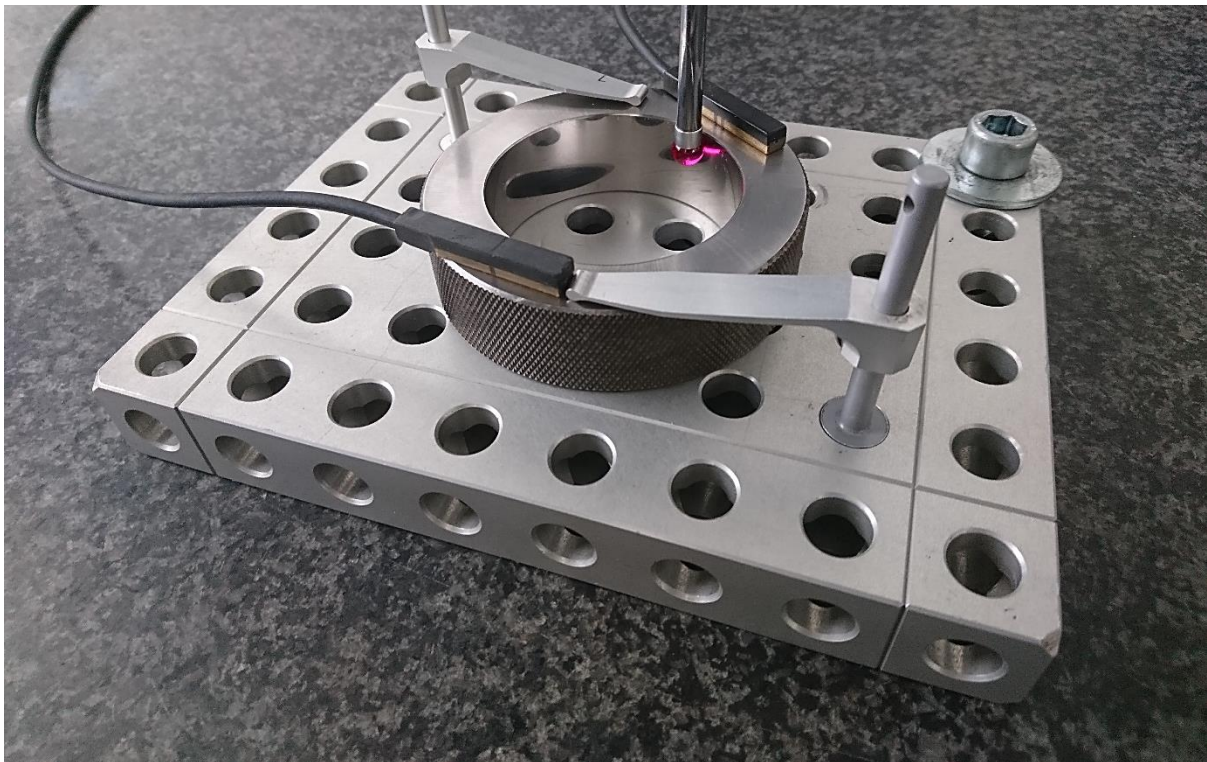
Part name	krouzek_D60	Last 1 measurements	► Approval ≠ locked
Drawing number			
Variant			
Department		Measurement number	1
Order number		Time/Date	14.7.2020 8:55
Gage equipment	UPMC_8_C	Run	Všechny charakteris...
Operator	Master	No. measured values	2
Text	<input type="text"/>	No. values error	● 0

Name	Value	Nominal Value	Upper Allowance	Lower Allowance	Deviation	+/-
Průměr_Kružnice3	60.0195	60.0219			-0.0025	
Kruhovitost_Kružnice3	0.0026	0.0000	0.0030	0.0000	0.0026	

Points 1151
 Filter type Gauss
 Lc
 upr 50
 Scan speed 5.00
 Probe radius 3.9999



Obrázek 9 (8) – Příklad protokolu měření na CMM



Obrázek 10 (8) – Kroužek v přípravku během měření

8.1 Nejistoty

Při měření kroužku $\varnothing 30 \text{ mm}$ – Mk/30 JD jsem získal hodnoty průměru dle tabulky 5 (8.1).

Tabulka 6 (8.1) – Hodnoty průměru kroužku $\varnothing 30 \text{ mm}$

Měření [mm]	1	2	3	4	5
20 °C s TK	30,01568	30,01567	30,01568	30,01569	30,01568
20 °C bez TK	30,01567	30,01569	30,01565	30,01565	30,01565
21 °C s TK	30,01578	30,01557	30,01581	30,01583	30,01583
21 °C bez TK	30,01643	30,01645	30,01643	30,01643	30,01642
22 °C s TK	30,01578	30,01579	30,01577	30,01580	30,01580
22 °C bez TK	30,01659	30,01661	30,01663	30,01661	30,01660
Měření [mm]	6	7	8	9	10
20 °C s TK	30,01567	30,01569	30,01569	30,01568	30,01568
20 °C bez TK	30,01567	30,01568	30,01569	30,01569	30,01568
21 °C s TK	30,01584	30,01582	30,01583	30,01582	30,01583
21 °C bez TK	30,01644	30,01644	30,01641	30,01645	30,01643
22 °C s TK	30,01578	30,01580	30,01581	30,01581	30,01583
22 °C bez TK	30,01662	30,01662	30,01664	30,01662	30,01662

Hodnoty jsem následně vyhodnocoval v Microsoft Excel. Nejprve jsem spočítal aritmetické průměry jednotlivých měření. Tyto hodnoty jsou v tabulce 6 (8.1).

Tabulka 7 (8.1) – Aritmetické průměry

20 °C s TK	20 °C bez TK	21 °C s TK	21 °C bez TK	22 °C s TK	22 °C bez TK
30,01568	30,01567	30,01580	30,01643	30,01580	30,01662

Pro každou hodnotu bylo třeba spočítat kombinovanou nejistotu.

8.1.1 Složky nejistoty typu A

- Nepřesnost CMM – dle kalibračního protokolu CMM je jeho chyba měření ve 3D $u_1 = (0,7 + L/600) \mu\text{m}$. Pro měření kroužku $\varnothing 30 \text{ mm}$ to znamená chybu:

$$u_{1a} = (0,7 + 30/600) = \mathbf{0,75 \mu\text{m}}$$

- Výběrová směrodatná odchylka – příklad výpočtu výběrové směrodatné odchylky pro měření 20 °C s TK:

$$u_{2a} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{10-1} \sum_{i=1}^{10} (x_i - 30,01568)^2} = \mathbf{0,0008 \mu m}$$

8.1.2 Složky nejistoty typu B

- Rozlišení – rozlišení kalibračního CMM je:

$$u_{1b} = \mathbf{0,08 \mu m}$$

- Teplota – během měření se mi podařilo udržet teplotu kroužku mezi $t_1 = 22,016 - 22,13$ °C. Teplotní roztažnost materiálu kroužku je $\alpha_T = 16 \frac{\mu m}{m \cdot K}$

$$u_{2b} = \alpha_T \cdot l_0 \cdot \Delta t = 0,00016 \cdot 30 \cdot 0,8 = \mathbf{0,38 \mu m}$$

8.1.3 Kombinovaná nejistota

$$u_{k_a} = \sqrt{u_{1a}^2 + u_{2a}^2} = \sqrt{0,75^2 + 0,0008^2} = 0,75 \mu m$$

$$u_{k_b} = \sqrt{u_{1b}^2 + u_{2b}^2} = \sqrt{0,08^2 + 0,38^2} = 0,39 \mu m$$

$$u_{k_{ab}} = \sqrt{u_{k_a}^2 + u_{k_b}^2} = \sqrt{8,15^2 + 0,38^2} = \mathbf{0,85 \mu m}$$

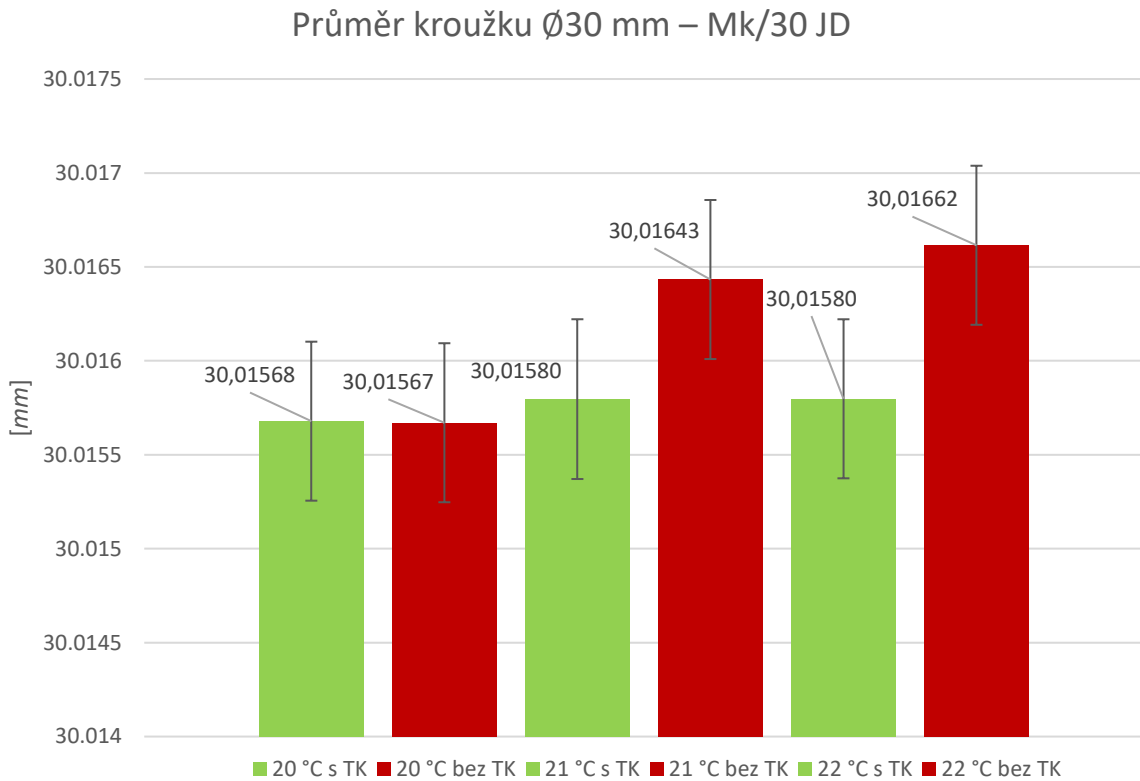
Kombinovaná nejistota pro měření průměru kroužku $\varnothing 30$ mm při 20 °C s TK tedy vyšla $u_{k_{ab}} = 8,16$. Obdobně jsem spočítal nejistoty všech dalších měření.

8.2 Vyhodnocení

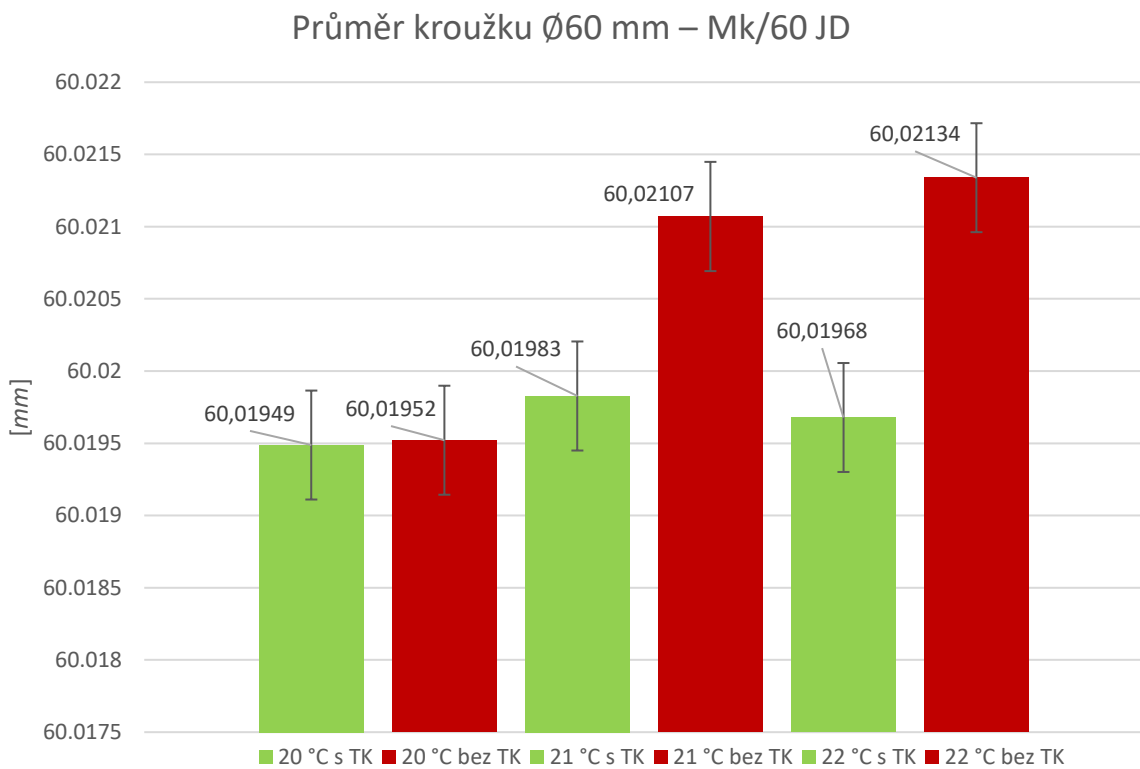
8.2.1 Skutečná hodnota průměru

Aritmetické průměry jednotlivých měření jsem následně vynesl v grafech 2 (8.2.1) a 3 (8.2.1) společně s kombinovanými nejistotami (černé chybové úsečky). Zelené sloupce jsou měření s TK a červené bez TK.

Z grafů je vliv teploty na kalibraci zřejmý. Hypotéza, že skutečná hodnota průměru se vlivem teplotní roztažnosti zvětší, se mi potvrdila. Červené sloupce, tedy měření bez TK, zaznamenávají trend lineárního růstu. Zelené sloupce grafu, měření s TK, se za různých teplot příliš neliší a kombinované nejistoty těchto tří sloupců se překrývají, TK tedy funguje, jak má. Rozpětí průměrů je 0,00094 mm pro kroužek $\varnothing 30$ mm a 0,00185 mm pro $\varnothing 60$ mm.



Graf 2 (8.2.1) – Průměr kroužku Ø30 mm – Mk/30 JD



Graf 3 (8.2.1) – Průměr kroužku Ø30 mm – Mk/30 JD

8.2.2 Kruhovitost

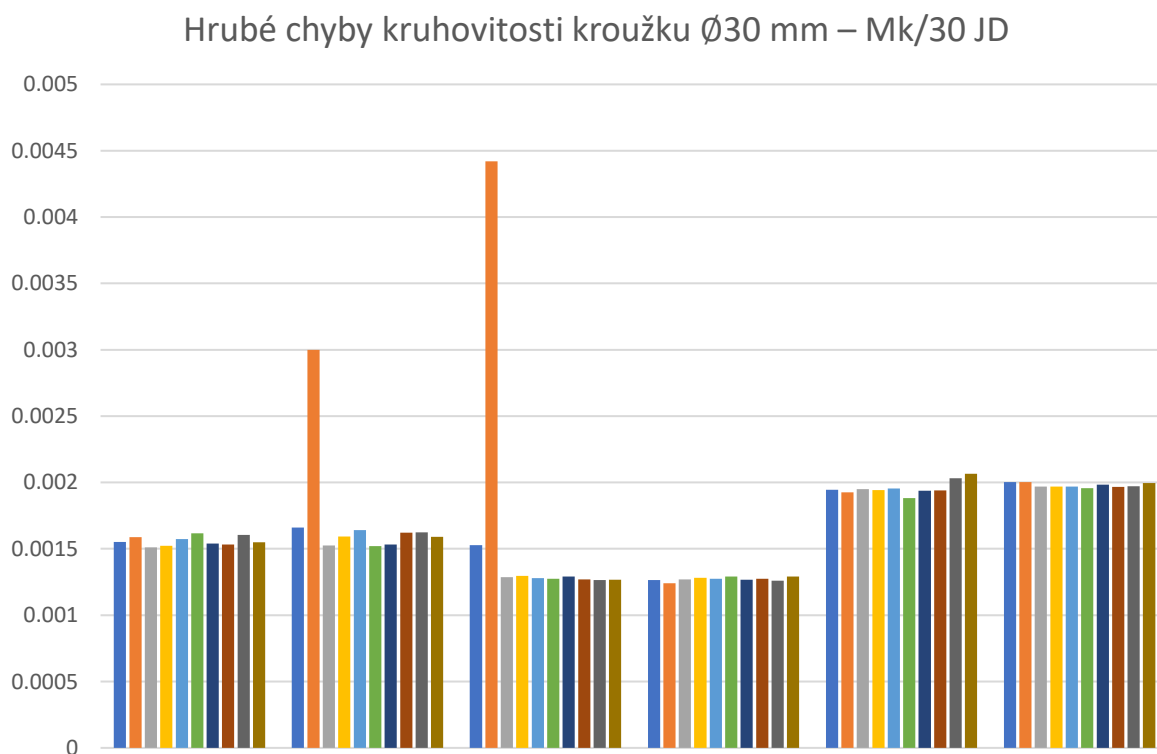
Při vyhodnocení dat jsem nejprve analyzoval data z hlediska hrubých chyb. Dvě takové chyby jsem našel u měření kruhovitosti kroužku $\varnothing 30$ mm – Mk/30 JD. Tato měření:

- Druhé měření při 20 °C bez TK
- Druhé měření při 21 °C s TK

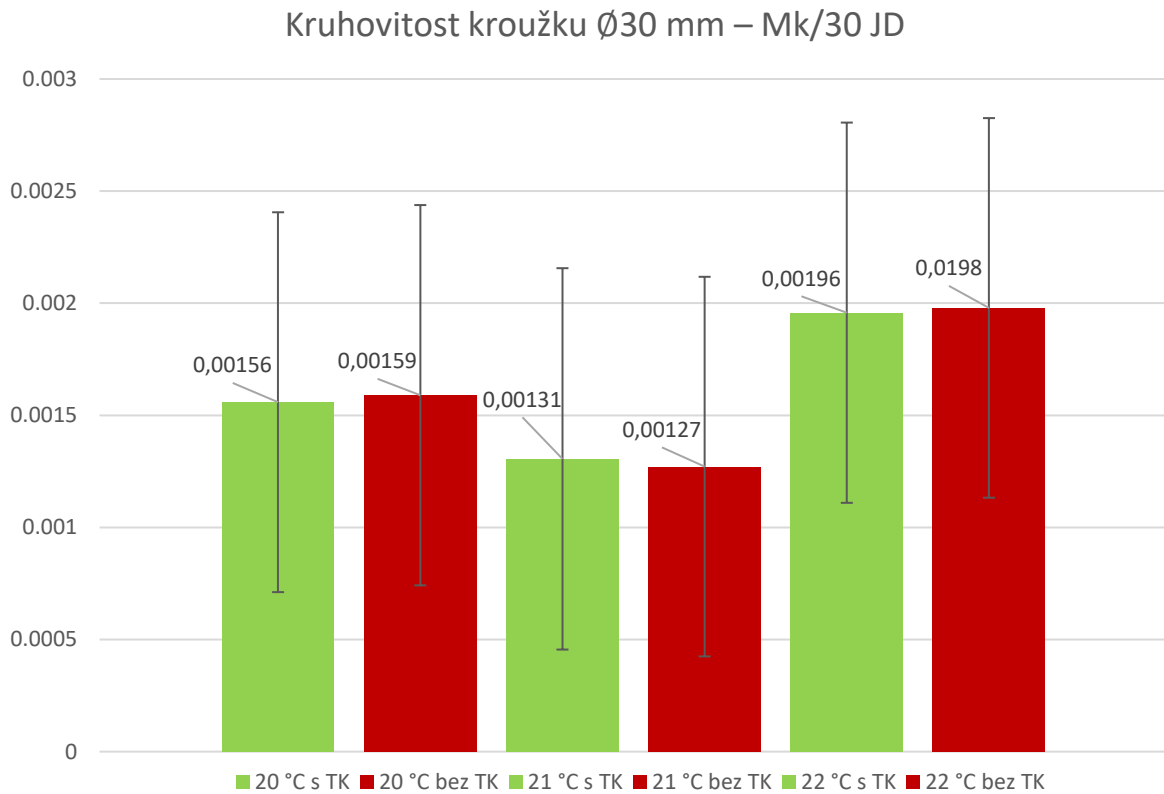
byla z hlediska opakovatelnosti měření zcela mimo. Chybové hodnoty můžete vidět na grafu 4 (8.2.2). Tyto dvě hodnoty jsem tedy z vyhodnocení vyloučil.

Po vyhodnocení kruhovitosti obou kroužků – graf 5 (8.2.2) a graf 6 (8.2.2) jsem došel k závěru, že kruhovitost opravdu nebyla ovlivněna změnou teploty. Takovou skutečnost lze vyvodit již ze skutečnosti, že chybové úsečky všech sloupců se překrývají. Kroužek se tedy roztahuje rovnoměrně, což neovlivní jeho tvar, nýbrž pouze průměr. Rozpětí kruhovitosti kroužku $\varnothing 30$ mm – Mk/30 JD je 0,00071 mm a kroužku $\varnothing 60$ mm – Mk/60 JD 0,00070 mm.

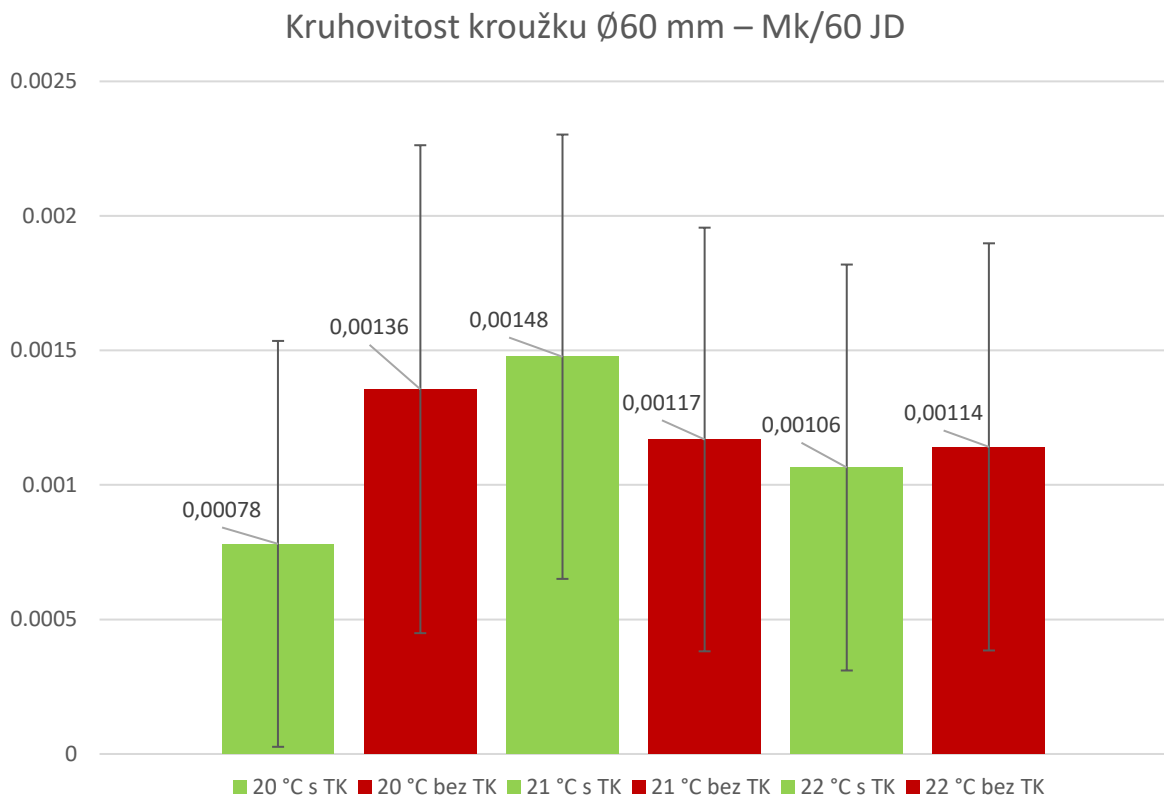
Pokud bychom chtěli pozorovat změny kruhovitosti vlivem nerovnoměrné roztažnosti, bylo by třeba kroužek kalibrovat o několik řádů přesnějším etalonem a při větších teplotních rozdílech.



Graf 4 (8.2.2) – Hrubé chyby kruhovitosti kroužku $\varnothing 30$ mm – Mk/30 JD



Graf 5 (8.2.2) – Kruhovitost kroužku $\varnothing 30$ mm – Mk/30 JD



Graf 6 (8.2.2) – Kruhovitost kroužku $\varnothing 60$ mm – Mk/60 JD

9 Závěr

Základním kamenem technického vývoje lidstva je metrologie. Bez jejích nástrojů, jako jsou kalibrace, standardizace, technické normy a systémy řízení jakosti, bychom nedosáhli sériové výroby automobilů, nebylo by možné stavět mrakodrapy, létat letadly, ani by nebylo možné použít chytrý telefon k pořízení kvalitní digitální fotografie moučnicku v kavárně.

V teoretické části práce jsem se věnoval především kalibračním a kalibračním laboratořím, přičemž jsem zdůraznil intenzitu environmentálních vlivů, jakými jsou teplota, vlhkost, pohyb vzduchu, čistota vzduchu a vibrace, na správnou funkci těchto laboratořích. Nastínil jsem, jak lze automatizovat systém klimatizací a topení pro minimalizaci vlivu zmíněných parametrů na laboratoř.

Protože jsem neměl možnost navštěvovat kalibrační laboratoř v BOSCH Diesel v Jihlavě dle původního plánu, v praktické části jsem se rozhodl ověřit vliv environmentálních podmínek na nejistotu měření a kalibraci v laboratoři na Fakultě strojní ČVUT. K tomuto účelu jsem zvolil dva kalibrační kroužky $\varnothing 30\text{ mm}$ – Mk/30 JD a $\varnothing 60\text{ mm}$ – Mk/60 JD. Na CMM Zeiss UPMC 850 CARAT jsem měřil jejich průměr a kruhovitost při teplotách v laboratoři $21 \pm 0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $20 \pm 0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $19 \pm 0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při vyhodnocení jsem zjistil, že průměr kroužků je teplotou ovlivněn, při zvýšení teploty se vlivem teplotní roztažnosti zvětší průměr kroužku. To se dalo očekávat, zajímavější bylo avšak zjištění, že softwarová teplotní kompenzace, která by teoreticky měla vyrušit vliv teploty na výsledek měření, opravdu funguje. To navíc tak spolehlivě, že při kalibraci etalonu s přesností o 1 řád nižší (tedy námi kalibrovaného kroužku), než je samotný CMM, se naměřené hodnoty společně s nejistotami překrývají.

Mohu tedy dle mého měření stanovit, že při měření délek u jednoduchých tvarů, jako je kalibrační kroužek, je možné s použitím teplotních kompenzací nastavit v kalibrační laboratoři i jinou teplotu, než normami stanovených $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1], aniž by byl ovlivněn výsledek kalibrace. Kdo byl v klimatizované místnosti při teplotě $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ déle než 20 minut může dát za pravdu, že kalibračním technikům sice nehrozí, že při práci umrznou a jejich tělo bude nalezeno neporušené v roce 3020 archeology, ale příjemné v těchto podmínkách pracovat určitě není a riziko nastydnutí je vysoké. Obzvláště vysoké riziko nastydnutí je v letních teplých měsících, když je tělo navyklé na vysoké teploty.

Bibliografie

- [1] BUCHER, Jay L. *The metrology handbook*. 2. vydání. Milwaukee, Wis.: ASQ Quality Press, 2012. ISBN 978-0-87389-838-6.
- [2] SMITH, Graham T. *Industrial metrology: surfaces and roundness*. 2. vydání. London: Springer, 2002. ISBN 9781852335076.
- [3] MATUS, Michael a Stefan HAAS. The Optical Frequency Standards for the Realization of the Meter. *Annalen der Physik.* , 10. DOI: <https://doi.org/10.1002/andp.201800287>.
- [4] INGLIS, B., J. ULLRICH a M.J.T. MILTON. The International System of Units (SI). *The International System of Units (SI)* [online]. Bureau International des Poids et Mesures, 2019, **2019**(9), 102 [cit. 2020-07-21]. ISSN 978-92-822-2272-0. Dostupné z: <https://www.bipm.org/utils/common/pdf/si-brochure/SI-Brochure-9-EN.pdf>
- [5] GUPTA, S. V. *Mass Metrology*. 2. vydání. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2019. ISBN 978-3-030-12464-9.
- [6] TRICKER, Ray. *ISO 9001:2015 audit procedures*. 4. vydání. New York, NY: Routledge, 2016. ISBN 978-1138025899.
- [7] GROCHAU, Inês Hexsel a Carla Schwengber ten CATEN. A process approach to ISO/IEC 17025 in the implementation of a quality management system in testing laboratories. *Accreditation and Quality Assurance: Journal for Quality, Comparability and Reliability in Chemical Measurement*. Springer-Verlag GmbH Germany, 2012, **17**(1), 9. DOI: 10.1007/s00769-012-0905-3.
- [8] BUTTLE, Francis Arthur. ISO 9000: marketing motivations and benefits Francis Buttle. *International Journal of Quality & Reliability Management*. Bingley, United Kingdom: Emerald, 1997, **14**(9), 11. DOI: 10.1108/02656719710186867.
- [9] PRIEDE, Janis. Implementation of Quality Management System ISO 9001 in the World and Its Strategic Necessity. *Procedia: Social and Behavioral Sciences*. 2012, **3**(58), 10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.1133>. ISSN 1877-0428.

- [10] PALEŇČÁR, Rudolf, František VDOLEČEK a Martin HALAJ. Nejistoty v měření I.: Vyjadřování nejistot. *AUTOMA*. Praha, 2001, **2001**(7-8), 5.
- [11] ALI, Salah H. R. *Automotive Engine Metrology*. 1. vydání. Cleveland, Ohio: Jenny Stanford Publishing, 2017. ISBN 978-9814669528.
- [12] ROEBBEN, G, T LINSINGER, A LAMBERTY a H EMONS. Metrological traceability of the measured values of properties of engineering materials. *Metrologia*. BIPM & IOP Publishing Ltd, 2010, **47**(2), 10. DOI: <https://doi.org/10.1088/0026-1394/47/2/S03>. Dostupné také z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0026-1394/47/2/S03>
- [13] FRANCIE. *International vocabulary of metrology: Basic and general concepts and associated terms (VIM)*. In: . Saint-Cloud: International Bureau of Weights and Measures, 2012, ročník 2012, JCGM 200:2012. Dostupné také z: https://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_200_2012.pdf
- [14] BUCHER, Jay L. *The quality calibration handbook: developing and managing a calibration program*. 1st ed. Milwaukee, Wis.: ASQ Quality Press, 2007. ISBN 978-0873897044.
- [15] SKOPAL, Miroslav Jan. Kalibrace a přesnost měření. *MM Průmyslové spektrum*. Praha, 2011, **2011**(11), 3.
- [16] LAURILA, Heikki. Metrological Traceability in Calibration: Are you traceable?. *Beamex: Calibrations and Calibration software* [online]. Pietarsaari: Beamex, 2017 [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: <https://blog.beamex.com/metrological-traceability-in-calibration-are-you-traceable>
- [17] USA. *Policy on Measurement Traceability*. In: . Frederick: The American Association for Laboratory Accreditation, 2008, ročník 2008, P102 - A2LA. Dostupné také z: https://icllabs.com/wp-content/uploads/2015/09/A2LA_P102-Policy-on-Measurement-Traceability.pdf
- [18] TNI 01 0115. *Mezinárodní metrologický slovník: Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM)*. 1. vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2008.

- [19] ISO 10012:2003. *Measurement management systems: Requirements for measurement processes and measuring equipment*. 1. vydání. France: International Organization for Standardization, 2003.
- [20] EICHSTÄDT, Sascha. *Metrologie für die Digitalisierung von Wirtschaft und Gesellschaft. PTB-Mitteilungen*. Braunschweig, 2017, **2017**(4), 113. ISSN 0030-834X.
- [21] ŠILAR, Martin a Zdeněk ZLÁMAL. Kalibrační list č. KL-XXXX-XX. In: *Měřicí, regulační a kalibrační technika: Mavis Nový Bor* [online]. Nový Bor: Mavis Nový Bor, 2020 [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: [http://www.mavis.cz/editor/filestore/Image/Kalibracni%20list\(1\).jpg](http://www.mavis.cz/editor/filestore/Image/Kalibracni%20list(1).jpg)
- [22] Calibration Certificate Requirements. In: *Fox Valley Metrology: ISO 17025 Calibration Services* [online]. Oshkosh, WI: Fox Valley Metrology, 2017 [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: <https://www.foxvalleymetrology.com/media/1753/2017-calibration-certificate-requirements.pdf>
- [23] ISO/IEC 17025:2017. *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*. 3. vydání. Geneva: International Organisation for Standardization, 2018.
- [24] VDI/VDE 2627-1 : 2015. *MEASURING ROOMS - CLASSIFICATION AND CHARACTERISTICS - PLANNING AND EXECUTION*. 1. vydání. Düsseldorf: Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure, 2015.
- [25] TASIC, Tanasko, Jovan BOJKOVSKI, Janko DRNOVŠEK a Igor PUŠNIK. Automation of a Precision Temperature Calibration Laboratory. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. Piscataway, New Jersey: IEEE, 2000, **49**(3), 6. DOI: 10.1109/19.850401.

Seznam obrázků

Obrázek 1 (3) – Ishikawa diagram „rybí kost“ zdrojů variability měření [obrázek autor, 2020]	12
Obrázek 2 (4.1) – Příklad metrologické návaznosti [16]	16
Obrázek 3 (4.3) – Příklad kalibračního listu [22]	25
Obrázek 4 (4.3) – Příklad kalibračního certifikátu [20]	26
Obrázek 5 (6.4) – Příklad vedení klimatizovaného vzduchu metrologickou laboratoří (pohled ze strany laboratoře) [24]	35
Obrázek 6 (6.4) – Pasivní systém tlumení vibrací na IM&TE [24]	36
Obrázek 7 (6.4) – Pasivní systém tlumení vibrací s oddělenou deskou [24]	36
Obrázek 8 (6.4) – Pasivní systém tlumení vibrací pro celou místnost [24]	36
Obrázek 9 (8) – Příklad protokolu měření na CMM.....	43
Obrázek 10 (8) – Kroužek v přípravku během měření	43

Seznam tabulek

Tabulka 1 (3.2) – Data měření nejistot [10]	14
Tabulka 2 (4.2) – Ukázkový kalibrační předpis s tabulkou specifikací [1]	21
Tabulka 3 (4.2) – Příklad instrukcí kalibračního postupu [1]	22
Tabulka 4 (6.6) – Doporučené klíčové údaje tříd metrologických laboratoří dle VDI/VDE 2627 [24]	39
Tabulka 5 (7.9) – Dovolené chyby kroužku	41
Tabulka 6 (8.1) – Hodnoty průměru kroužku $\varnothing 30\text{ mm}$	44
Tabulka 7 (8.1) – Aritmetické průměry	44

Seznam rovnic

Rovnice 1 (3.1) – Absolutní chyba [1]	12
Rovnice 2 (3.1) – Aritmetický průměr [1]	13
Rovnice 3 (3.1) – Směrodatná odchylka [1]	13
Rovnice 4 (3.3) – Obecný vzorec pro kombinovanou nejistotu [10]	14
Rovnice 5 (3.3) – Kombinace nejistot typu A [10]	15
Rovnice 6 (3.3) – Kombinace nejistot typu B [10].....	15
Rovnice 7 (3.3) – Kombinace obou typů nejistot A a B [10]	15
Rovnice 8 (3.3) – Příklad kombinace nejistot typu A [10].....	15
Rovnice 9 (3.3) – Příklad kombinace nejistot typu B [10].....	15
Rovnice 10 (3.3) – Kombinace obou typů nejistot A a B [10]	15

Seznam grafů

Graf 1 (2) – Model optimálních nákladů na kvalitu [1]	10
Graf 2 (8.2.1) – Průměr kroužku $\varnothing 30$ mm – Mk/30 JD	46
Graf 3 (8.2.1) – Průměr kroužku $\varnothing 30$ mm – Mk/30 JD	46
Graf 4 (8.2.2) – Hrubé chyby kruhovitosti kroužku $\varnothing 30$ mm – Mk/30 JD	47
Graf 5 (8.2.2) – Kruhovitost kroužku $\varnothing 30$ mm – Mk/30 JD.....	48
Graf 6 (8.2.2) – Kruhovitost kroužku $\varnothing 60$ mm – Mk/60 JD.....	48

Seznam Zkratek

Zkratka	Anglicky	Česky
RSS	Root sum squared	Metoda nejmenších čtverců
SI	International System of Units	Mezinárodní systém jednotek
VIM	International vocabulary of metrology	Mezinárodní metrologický slovník
A2LA	American Association for Laboratory Accreditation	Americká společnost pro akreditaci laboratoří
IM&TE	Inspection, measuring, and test equipment	Nástroje pro kontrolu, měření a testování
SOP	–	Standardní operační procedura
NIST	National Institute of Standards and Technology	Národní institut standardů a technologie
CMM	Coordinate-measuring machine	Souřadnicový měřicí stroj
TK	–	Teplotní kompenzace