



Český institut pro akreditaci, o.p.s.

Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3

Strana: 1/36

Zpracoval:

Ing. Martin Valenta

Datum zpracování:

24.10.2019

Plán standardizace – Program rozvoje metrologie 2019

Číslo úkolu: VII/05/19

Zpráva pro závěrečnou oponenturu

Podklad pro průběžné sjednocování výpočtu CMC v akreditovaných kalibračních laboratořích v oboru délka

Zadavatel: Česká republika – Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, organizační složka státu

Řešitel: Ing. Martin Valenta, ČIA

Spoluřešitel: Ing. František Dvořáček, ČMI

Schválil: Ing. Milan Badal, ČIA

Datum: 07.11.2019

Rozdělovník: 1 × ÚNMZ
1 × ČIA, útvar 600
2 × oponenti

Výtisk č.:



Český institut pro akreditaci, o.p.s.

Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3

Strana: 2/36

Zpracoval:
Ing. Martin Valenta

Datum zpracování:
24.10.2019



Český institut pro akreditaci, o.p.s.

Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3

Strana: 3/36

Zpracoval:

Ing. Martin Valenta

Datum zpracování:

24.10.2019

1. RESUMÉ

Sjednocení způsobu stanovení CMC především z hlediska zvažovaných faktorů, ovlivňujících nejnížší udávanou nejistotu, výrazně zvyšuje porovnatelnost výkonu jednotlivých laboratoří v oboru délka. Vliv faktorů, které byly laboratoří pro stanovení CMC zanedbány, může být významný, a výsledná hodnota nejnížší nejistoty tak může být v jednotlivých případech zavádějící. Výstupem řešení úkolu je zveřejnění přehledu nejdůležitějších příspěvků k nejistotě v oboru délka, jejichž vliv nelze při stanovování CMC opomenout.



OBSAH

1. RESUMÉ.....	3
1. Úvod.....	5
2. Zásady řešení úkolu programu rozvoje metrologie.....	6
3. Možné vlivy na velikost nejistoty měření	8
3.1 Běžné vlivy působící při měření délky:.....	8
4. Kalibrace koncových měrek komparačně	11
4.1 Základní příspěvky k nejistotě.....	12
4.2 Další vlivy.....	14
4.3 Příklad výpočtu nejistoty	15
5. Posuvná měřidla	21
5.1 Příspěvky k nejistotě měření posuvných měřidel	21
5.2 Další vlivy.....	21
5.3 Příklad výpočtu nejistoty	22
6. Mikrometrická měřidla.....	27
6.1 Příspěvky k nejistotě při měření chyby mikrometrických měřidel.....	27
6.2 Další vlivy.....	27
7. Číselníkové úchylkoměry.....	29
8. Čárková měřidla	30
8.1 Příspěvky k nejistotě měření čárkových měřidel.....	30
8.2 Další vlivy.....	30
9. Kalibrace měřidel na délkoměru	32
9.1 Příspěvky k nejistotě.....	32
10. Závěr.....	34
11. Shrnutí	35
11.1 Technická část článku do metrologie.....	35
11.2 Koncepce prezentace	35
12. Literatura:	36



1. Úvod

Přestože pojem CMC je již rozšířený a známý, není mezi odbornou veřejností zcela jednoznačný přístup k užití jednotlivých hodnot v tabulce CMC. Tato tabulka svým každým jednotlivým řádkem specifikuje schopnosti laboratoře To je mj. dáno tím, že samotné hodnoty v polích tabulky CMC bez kontextu dalších parametrů CMC nemají dostatečnou vypovídací hodnotu. Také nejnižší udávaná nejistota není přes svůj název skutečnou nejistotu, ale reprezentací schopnosti laboratoře dosáhnout určitých hodnot nejistoty při kalibraci. Obvykle je udána jednou hodnotou (nebo poměrně jednoduchým výpočtem) vztažena k definovanému rozsahu veličiny. Tento rozsah si laboratoř volí podle svých zvyklostí a potřeb, je tedy nutné mít dostatečnou důvěru ve způsob, jakým laboratoř sestavila celou tabulku CMC. I proto se v jejím záhlaví objevuje u názvu pro nejmenší nejistotu termín „udávaná“. Laboratoř může v určitých, ne příliš četných případech kalibrací dosáhnout i reálné nejistoty kalibrace nižší, než je hodnota uvedená v příslušné tabulce CMC v příloze osvědčení, na kalibrační list ale laboratoř v takovém případě musí uvést hodnotu z tabulky CMC.

Nejnižší udávaná nejistota je bez znalosti faktorů, které byly do jejího výpočet zahrnuty a které byly zanedbány, dalším podstatným zkrácením informace. Zanedbání kteréhokoli z vlivů by mělo být odůvodněno a přiměřeně zdůvodněno. Vhodným zdůvodněním je postup pro výpočet nejistot včetně podkladů, na základě kterých byl tento postup definován a realizován. Protože zanedbávání některých vlivů na hodnoty nejmenších udávaných nejistot nejsou vždy zřejmá, je vhodné sestavit pro každý obor přehled faktorů, které při stanovení CMC a především při výpočtu nejnižší udávané nejistoty opomenout nelze z důvodu jejich zásadního vlivu na výslednou hodnotu a především na porovnatelnost nejnižší udávané nejistoty s hodnotami, udávanými jinými kalibračními laboratořemi. Využití samozřejmě najde i v ostatních laboratořích, pokud měří délku a potřebují stanovit svou vlastní tabulku CMC nebo i jen nejistoty měření.

Tento úkol navazuje na stejně cílené úkoly z předchozích roků, které řešily obdobnou problematiku správného stanovování hodnot CMC:

- PRM VII/05/17 pro obor teplota
- PRM VII/04/18 pro obor statický objem
- PRM VII/05/18 pro obor tlak



2. Zásady řešení úkolu programu rozvoje metrologie

Hlavním cílem úkolu je zpracování seznamu faktorů, ovlivňujících nejistotu kalibrace délky, které při výpočtu nejnižších udávaných nejistot měření nelze bez řádného odůvodnění zanedbat. Seznam má sloužit odborné veřejnosti, především kalibračním laboratorům a odborným posuzovatelům a při sestavování tabulky CMC a posuzování způsobu výpočtu v ní uvedených hodnot nejnižších udávaných nejistot měření v oboru délka. Výstup z úkolu je dále možné použít jako metodický vzor i pro další obory měření. V neposlední řadě má sloužit jako vodítko pro odborné posuzovatele, aby při hodnocení způsobu stanovování CMC postupovali co možná nejjednodušeji a bylo tak eliminováno riziko, že některý z faktorů bude při posuzování podceněn nebo naopak přeceněn.

Zjištění vyplývající z posuzování poukazují na skutečnost, že v různých KL jsou jednotlivé faktory hodnoceny rozdílně jak z hlediska důležitosti, tak z hlediska vlastního vlivu na CMC, významově jednoznačně převažuje výsledná hodnota nejnižších udávaných nejistot měření laboratoře. Při řešení úkolu byly využity i poznatky z průběhu řešení předchozích programů rozvoje metrologie, předně těch, které řešily shodnou problematiku pro kalibrace v jiných oborech (viz výše).

Na rozdíl od předchozích oborů je obor měření délky velmi obsáhlý, proto se řešení zaměřilo v první řadě na vhodné rozdělení oboru tak, aby byla zastoupena měřidla, u nichž kromě předpokládané vysoké míry praktického použití lze využít dostatečnou shodu ve způsobu výpočtu nejnižších udávaných nejistot měření.

Z tohoto pohledu byly v této fázi zařazeny výpočty nejnižších udávaných hodnot nejistot pro kalibrace měřidel, která jsou v rámci akreditace nejhojněji zastoupena, takto:

- koncové měřky kalibrované komparačně
- posuvná měřidla
 - posuvná měřítka
 - posuvné hloubkoměry
 - posuvné výškoměry
- mikrometrická měřidla
 - třmenové mikrometry
 - mikrometrické hloubkoměry
 - mikrometrické odpichy
- číselníkové úchylkoměry
- čárková měřidla
 - měřičská pásma
 - svinovací metry
 - ocelová měřítka

Do tohoto seznamu je vzhledem k významu nutno zařadit i kalibrace, které spojuje nikoli předmět kalibrace, ale její princip:

- kalibrace měřidel na délkoměru



- válečkové kalibry hladké
- měřicí drátky
- párové měrky
- měřicí trny
- nastavné kroužky
- nastavné měrky pro nastavování třmenových mikrometrů
- (číselníkové úchylkoměry)

Pro další některé typy neuvedených měřidel bude možné snadno analogicky odvodit výpočet hodnot nejistoty vzhledem k podobnosti způsobu měření. To platí např. pro různé typy tloušťkoměrů, dutinoměrů, úchylkoměrů s měřicími rameny apod., což jsou často různé variace výše uvedených měřidel. Výpočet nejistoty bude odvozován pro běžně používanou metodu kalibrace, která v některých případech nemusí být jen jedna.

Seznam měřidel je zaměřen na pokrytí vysokého procentuálního množství měřidel, jejichž kalibrace jsou prováděny v rámci akreditace a nezaměřuje se na měřidla, jejichž kalibrace provádí malé množství akreditovaných laboratoří. Zároveň se vyhýbá specifickým měřidlům, jako jsou např. souřadnicové měřicí stroje, kde by popis způsobu měření a výpočtu nejistot vyžadoval samostatný úkol. Současně je v těchto případech kalibrace komplikována obchodními praktikami výrobců měřidel, kdy je ovládací SW přístrojů obvykle uzamčený, různorodý a vyžaduje součinnost operátora nebo dokonce autorizovaného servisu.



3. Možné vlivy na velikost nejistoty měření

V této kapitole jsou uvedeny vlivy, které obvykle působí na nejistotu měření při kalibracích uvedených měřidel a neměly by při výpočtech být opomenuty, případně musí být doloženo, že jejich velikost je dostatečně malá, aby mohly být zanedbány.

Předpokladem je, že budou dodrženy správné postupy měření, dostatečná doba temperace a vhodné podmínky, měření nebude ovlivňováno otřesy, teplotními výkyvy nebo přímým prodejním vzduchu z klimatizace. Tyto okolnosti by měly negativní vliv na velikost výsledné nejistoty nebo by měření znehodnotily úplně.

3.1 Běžné vlivy působící při měření délky:

- **Rozptyl naměřených hodnot mezi opakovanými měřeními**

Jedno satirické desatero správného metrologa říká: „1) Neměř. 2) Když už musíš měřit, tak měř jen jednou.“. V běžné praxi tato pravidla platí snad jen v průmyslových podnicích, když metrologovi přinese pracovník ve výrobě měřidlo 5 minut před auditem.

Pro správné měření je samozřejmě důležité měření provádět opakovaně, to by mělo platit v každém měřeném bodě. Vezmeme-li v úvahu, že výsledkem měření není jediná hodnota, ale celý interval vymezený nejistotou měření a vztažený k průměrné měřené hodnotě, může jediná nesprávně naměřená hodnota celé tyto meze posunout, to lze ale do značné míry eliminovat průměrováním více zjištěných hodnot. Dále je z opakovaných hodnot vypočítán, často velmi výrazný vliv na nejistotu měření, nejistota typu A. Počet opakování by měl být volen přiměřeně vzhledem k druhu měřidla, jeho „obvyklé opakovatelnosti“ i s ohledem na rozlišitelnost daného přístroje. Např. u kalibrace posuvného měřítka, které má rozlišitelnost nejvýše 0,01 mm a při opakování měření běžně zaznamenáváme pouze dvě hodnoty, není nutné provádět sérii deseti opakovaných měření.

- **Nejistota etalonu**

Nejistota etalonu je vždy součástí nejistoty měření. Pokud se rozhodneme, že budeme dodržovat princip metrologické návaznosti (a zákon a jiné závazné dokumenty tvrdí, že ano), musí být námi použitý etalon vhodně zkalibrován. Z kalibračního listu je zřejmá jeho nejistota měření, kterou musíme při dalším měření zohlednit.

- **Vliv (rozlišitelnosti) měřidla**

U měřidel se stupnicí je započítávána do nejistoty měření velikost hodnoty, kterou jsme schopni na kalibrovaném měřidle bezpečně odečíst. Rozlišení stupnice měřidla může být přesnější, než je přístroj schopen stabilně zobrazit, odečítaná hodnota pak může kolísat, byť třeba jen částečně.

Pokud nastavujeme měřenou hodnotu na kalibrovaném měřidle a odčítáme na etalonu, jako vliv měřidla uvažujeme velikost hodnoty, se kterou jsme schopni opakovaně docílit totožné hodnoty. Tím je myšleno např. překrytí rysky a ručičky číselníkového úchylkoměru.

Stejným způsobem uvažujeme nejistotu rozlišení u etalonového zařízení, pokud není vzhledem k celkové nejistotě zanedbatelná.



U koncových měřidel (koncové měřka, kalibry, nástavce atd.) pak uvažujeme pouze rozlišení etalonu.

▪ Teplotní vlivy

Pro měření délky jde o typické vlivy. Hodnoty uvedené v kalibračním listu se vztahují k referenční teplotě 20 °C. Měřidla délky ale bohužel „trpí tou vadou“, že jsou vyráběna z materiálů, které mění svou délku v závislosti na teplotě. Abychom tento neduh co nejvíce minimalizovali, snažíme se měřit při teplotě co nejbližší 20 °C a k této teplotě kompenzujeme výsledky. Snažíme se teploty měřidel a etalonů co nejvíce stabilizovat a pro komparační měření používáme etalony s podobným koeficientem lineární délkové teplotní roztažnosti, jakou má kalibrovaný přístroj. Výsledkem je, že u části typů měřidel můžeme během výpočtu měření vliv teploty na nejistotu měření zanedbat vzhledem k velikosti ostatních příspěvků. U ostatních měřidel musíme počítat s tím, že teplota při kalibraci nebyla přesně na nominální hodnotě, zároveň ani teploty použitého etalonu a kalibrovaného měřidla nebyly totožné a i velikost hodnot koeficientů teplotní délkové roztažnosti etalonu a měřidla jsou různé, resp. u měřidel často pouze odhadnuté.

▪ Běžné teplotní vlivy:

▪ rozdíl průměrné teploty od 20 °C

Měřené délka má být vztažena k teplotě 20 °C. Při odlišné teplotě dochází ke změně rozměrů. Tuto hodnotu je možné korigovat v případě, že máme přesně monitorovaný průběh teplot. Reálnější varianta je ta, že známe teplotní interval prostředí během kalibrace a dodržujeme intervaly teploty pro vyrovnání teplot měřidel a etalonů. Z těchto údajů vypočítáme nejistotu kolísání délky v rozmezí daného intervalu.

▪ rozdíl teplot etalonu a kalibrovaného měřidla

Nejen, že se nám nepodaří teplotu v laboratoři ustálit přesně na požadované hodnotě, ale navíc i přes důslednou temperaci měřidel nedokážeme docílit dokonalého vyrovnání teplot mezi prostředím, měřidlem a etalonem. Do určité míry jsme schopni určit maximální rozdíl teplot mezi etalonem a měřidlem, pokud dodržíme předem stanovené podmínky. Příspěvek možného rozdílu teplot v kombinaci s koeficienty délkové teplotní roztažnosti nám vytvoří další často velmi výrazný příspěvek k nejistotě.

▪ rozdíl koeficientů délkové teplotní roztažnosti etalonu a měřidla

Jak bylo zmíněno výše, odchylka teplot měřidla a etalonu od 20 °C a rozdíl jejich koeficientů délkové teplotní roztažnosti vytvoří další příspěvek k nejistotě. Čím vyšší je odchylka teploty nebo rozdíl koeficientů, tím je vyšší příspěvek k nejistotě měření.

Příspěvky odchylky teploty od 20 °C a rozdílu teplotních koeficientů jsou de facto kombinovány do jednoho vlivu, a tím mezi příspěvky vznikají kovariance. Příspěvky se proto snažíme snížit na nejnižší možnou úroveň a míru kovariancí pro zjednodušení často zanedbáváme.



Český institut pro akreditaci, o.p.s.

Olšanská 54/3, 130 00 Praha 3

Strana: 10/36

Zpracoval:

Ing. Martin Valenta

Datum zpracování:

24.10.2019

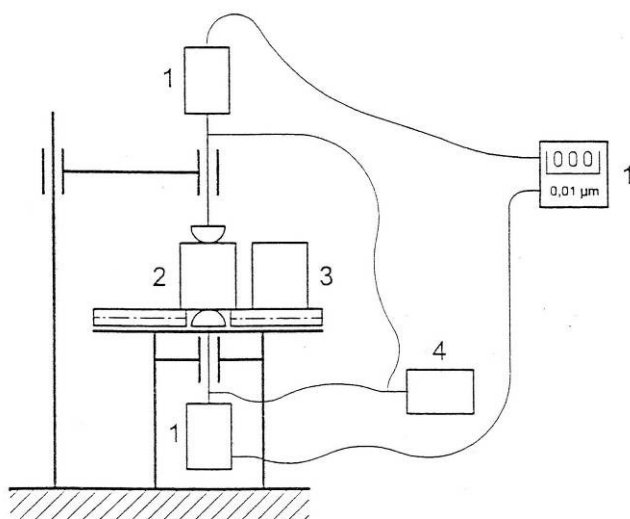
Ve většině případů měření délky ovlivňují všechny výše popsané příspěvky velikost nejistoty měření a neměly by být opomíjeny.

U jednotlivých metod bude dále popsáno, jaké jsou další možné příspěvky pro specifická měření.

4. Kalibrace koncových měrek komparačně

Koncové měrky (KM) patří k nejpřesnějším etalonům délky. Jejich kalibrace je prováděna v horních patrech návaznosti pomocí speciálního laserového interferometru a dále jsou prováděna mechanická porovnání na komparačním přístroji či délkoměru s etalonovou koncovou měrkou. Požadavky na geometrickou přesnost a možné způsoby návaznosti jsou popsány v technické normě ČSN EN ISO 3650.

KM do jmenovité délky 100 mm jsou kalibrovány ve svislé poloze na komparačním přístroji obvykle výrobců TESA, Mesing, Mitutoyo, Mahr, Carry. Principem kalibrace je porovnání dvou měrek stejných jmenovitých rozměrů mezi sebou. Je nutné mít tedy kalibrovanou koncovou měrku na jejíž hodnotu navážeme KM, kterou chceme měřit.



Obr. 1 – Schéma komparačního přístroje [1]

Komparační přístroj (obr. 1) je složen z pevného rámu s posuvem horního indikátoru ve svislé poloze, elektrického indikátoru délky s vysokou rozlišitelností (1), obvykle $0,01 \mu\text{m}$, zvedacího zařízení (4) a stolku kam se umísťují koncové měrky - referenční (2) a kalibrovaná (3).



Obr. 2 – Detail na snímače komparačního přístroje

Jak je zobrazeno na obrázku 1, k měření rozměru slouží dva snímače, které se dotýkají koncové měřky z obou stran lapovaných ploch (zobrazeny na obrázku 2). Spodní snímač je použit zejména kvůli měrkám o rozměrech do 2,5 mm, kde se předpokládá, že se mohou částečně prohýbat. Horní snímač obvykle působí na měrku silou 1 N a spodní snímač silou (0,25 až 0,63) N, aby měrka byla vždy usazena ve spodní poloze stolečku komparátoru. Konce doteků mívají obvykle kulovou plochu nebo kruhovou plošku.

KM o jmenovité délce nad 100 mm jsou měřeny v poloze vodorovné obvykle na speciálně upraveném délkoměru. V tomto případě jsou měrky podloženy v tzv. Airyho bodech (0,211 násobku délky měrky od volného konce). Vzhledem k větší délce KM jsou na měrkách obvykle umístěny snímače teploty, aby bylo možné před měřením kontrolovat, zda jsou KM tepelně stabilizované.

Nároky na přípravu KM před měřením jsou velmi vysoké a absolutní čistota i dostatečně dlouhá teplotní stabilizace jsou pro měření zásadní. Obvykle je dodržována doba teploty KM před kalibrací přímo v laboratoři se stabilním prostředím, nesmí být ale opomíjena dostatečně dlouhá teplota po umístění KM do komparačního přístroje.

4.1 Základní příspěvky k nejistotě

Metoda měření: Porovnání s etalonovou koncovou měrkou na komparačním přístroji ve svislé poloze (pro koncové měrky 0,5 mm až 100 mm) nebo na délkoměru ve vodorovné poloze (pro koncové měrky 125 mm a výše).



V tomto případě platí použití základních vlivů z kap. 3.

▪ **rozptyl naměřených hodnot mezi opakovanými měřeními**

Obvykle je prováděno 6 až 12 opakovaných měření (3 až 6 cyklů s opakovaným návratem na etalonovou měрку přes středovou hodnotu měřené KM), ze kterých je následně vyhodnocována velikost nejistoty typu A

▪ **nejistota etalonové KM**

Korekce délky etalonové koncové měřky musí být započítána do výpočtu délky kalibrované měřky (měřicí SW obvyklých výrobců komparačních přístrojů přepočítá korekce obvykle obsahuje). Délka etalonové KM však byla změřena s určitou nejistotou, která tvoří významný podíl ve výpočtu výsledné nejistoty. Zejména od velikostí nejistot použitých etalonů byla v minulosti vytvořena série pěti kalibračních řádů v dnes již neplatném dokumentu OIML R30, který se pro svou přehlednost používá dodnes.

▪ **vliv rozlišení a chyby komparačního zařízení**

Musí být kalibrována nelinearita snímačů použitého komparačního zařízení. Jeho nejistota měření, chyba linearit (pokud je nezanedbatelná) a rozlišení musí být zahrnuty do výpočtu výsledné nejistoty měření.

▪ **teplotní vlivy**

- rozdíl průměrné teploty od 20 °C

Měřená délka by měla být vztažena k teplotě 20 °C. Při odlišné teplotě dochází ke změně délky. Tuto hodnotu je možné korigovat, v případě, že máme přesně monitorovaný průběh teplot. Reálnější varianta je ta, že známe teplotní interval prostředí během kalibrace a dodržujeme intervaly teploty pro vyrovnání teplot KM a přístroje. Z těchto údajů vypočítáme nejistotu kolísání délky v rozmezí daného intervalu.

- rozdíl teplot etalonové a kalibrované měřky
- rozdíl koeficientů délkové teplotní roztažnosti koncových měrek

Pro KM z oceli je koeficient délkové teplotní roztažnosti obvykle $11,5 \frac{\mu m}{m \cdot K}$, u keramických materiálů je hodnota koeficientu přibližně $9,5 \frac{\mu m}{m \cdot K}$ a u karbidu wolframu (tvrdokovu) okolo $5,5 \frac{\mu m}{m \cdot K}$. Tato hodnota je výrobcem nejčastěji udávána s nejistotou $1 \frac{\mu m}{m \cdot K}$.

▪ **drift etalonu**

Rekalibrační interval etalonových KM je nastaven s ohledem na požadovanou stálost jejich metrologických parametrů. Nejistota driftu vychází časové stálosti metrologických parametrů. Velikost driftu můžeme mít zmapovanou podle předchozích kalibrací KM, případně je možné uvažovat hraniční hodnoty uvedené v normě ČSN EN ISO 3650. Zde uvedené hodnoty jsou mezní požadavky na geometrickou stálost a konkrétní KM nemusí této hodnoty dosahovat.

Třída přesnosti	Největší dovolená změna délky za rok
K 0	$\pm(0,02 \mu m + 0,25 \cdot 10^{-6} \cdot l_n)$
1 2	$\pm(0,05 \mu m + 0,5 \cdot 10^{-6} \cdot l_n)$

l_n je jmenovitá délka KM v milimetrech

Tab. 1 - Rozměrová stabilita dle ČSN EN ISO 3650 [1]

4.2 Další vlivy

Mezi další vlivy, které nemusí vždy působit, ale případně je nelze zanedbat patří:

- **nestředový dotek snímače komparátoru**

V tomto případě se jedná o možnou chybu měření, která vzniká tím, že doteky snímačů komparačního přístroje nesnímají délku v přesném geometrickém středu měřicí plochy KM. To může být způsobeno nepřesnou vodicí šablonou, seřízením komparačního přístroje nebo ručním nastavením při měření KM ve vodorovné poloze. K rozdílným hodnotám při měření může také dojít při použití plochých nebo kulových doteků snímačů, zejména u KM s horším povrchem měřicí plochy. Vliv se ve většině případů objevuje, avšak může být eliminován.

- **nesouosost měřících doteků**

Nejčastěji vzniká při nesprávném seřízení komparačního přístroje nebo při opotřebování vodicích ploch pro posuv přestavitelného doteku. Při správném seřízení přístroje, který je v dobrém stavu, může být vliv zanedbatelný. Při opotřebování vodicích ploch může tento příspěvek znehodnotit celou nejistotu měření. Běžně se tento vliv výrazněji projeví u měření delších KM na komparačním přístroji. Důvodem může být menší tuhost nebo deformace vodicího rámu pro posuv horního snímače, případně opotřebování vodicích ploch.

- **různá elastická deformace při použití KM z různých materiálů**

Rozdílné materiály etalonové a kalibrované KM způsobují různou plastickou deformaci KM vlivem přítlaku doteků snímačů. Tento vliv je možné korigovat vzhledem k modulům pružnosti a velikosti Poissonovy konstanty materiálů KM, působící síle, taru a velikosti doteků. Jednodušší cestou je zahrnout tento vliv do nejistoty měření. Projevuje se zejména u přesných měření KM pomocí komparačních přístrojů s kulovými doteky. Nejčastěji jsou KM vyráběny z oceli ekvivalentní k 19 422 (podle dříve používané normy ČSN 42 0002, podle technické normy ČSN EN 10027-2 je nové označení 1.2063), keramiky ZrO₂, kde je nepatrně rozdílná hodnota modulu pružnosti nebo karbidu wolframu, který má hodnotu modulu pružnosti přibližně 3 x vyšší než ocel. Z výpočtů plyne, že pokud bychom použili k mechanickému porovnání ocelové měřky v kombinaci s měrkami keramickými, tak při použití síly 1 N horního doteku komparátoru a 0,25 N spodního doteku a předpokladu kulových doteků o průměru 6 mm, bude (při použití Hertzovy teorie) rozdíl deformace oceli

oproti keramice asi 10 nm. Naopak při kombinaci ocelových měrek s KM z tvrdokovu bude za stejných podmínek rozdíl deformací přibližně 100 nm, což zanedbatelné rozhodně již není. Přené určení deformace je uvedeno ve [2], [3], [4] a [5].

4.3 Příklad výpočtu nejistoty

Budeme vycházet ze základní rovnice:

$$L_K = A + E + M + L(\alpha \cdot \Delta t + \Delta\alpha \cdot \Delta t_{20}) + D + S + O + P$$

kde je

- L_k výsledek měření po korekci,
- A průměrná naměřená hodnota,
- E korekce etalonu,
- M korekce vlivu měřidla (rozlišení + chyba komparátoru s jeho nejistotou),
- L jmenovitá délka,
- α průměrná hodnota koeficientů teplotní roztažnosti (aritmetický průměr hodnoty etalonu a měřené KM),
- Δt rozdíl teplot měrek,
- $\Delta\alpha$ rozdíl koeficientů délkové teplotní roztažnosti obou KM,
- Δt_{20} odchylka průměrné teploty KM od 20 °C,
- D korekce driftu etalonové KM,
- S korekce nestředového doteku komparátoru,
- O korekce na nesouosost doteků komparátoru,
- P korekce na rozdílnou elastickou deformaci při měření KM různých materiálů.

Platí:

$$\alpha = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2},$$

$$\Delta t = t_1 - t_2,$$

$$\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2,$$

$$\Delta t_{20} = 20 - \frac{t_1 + t_2}{2}.$$

Indexy 1 a 2 se vztahují k etalonové KM (1) a měřené KM (2).



Z rovnice je zřejmé, že některé vlivy nelze korigovat, protože i při znalosti jejich velikosti není známé znaménko (M , D) nebo jsou obtížně vyčíslitelné a odhadujeme jejich maximální mez ze zkušeností vlastních, jiných laboratoří, tabulek a výzkumů (S , O , Δt , $\Delta\alpha$). Dále je rovnice zjednodušena tím, že počítáme s průměrnou hodnotou délkové teplotní roztažnosti materiálů KM a průměrným rozdílem teploty od 20 °C. Záměrně ignorujeme drobné kovariance u výpočtů nejistoty délkové teplotní roztažnosti v kombinaci s odchylkou teploty KM od 20 °C. U vlivu měřidla dále pro zjednodušení kombinujeme všechny jeho možné chyby do jednoho vlivu.

Vztah pro výslednou nejistotu je potom:

$$u^2 = u_A^2 + u_E^2 + u_M^2 + (L \cdot \alpha \cdot u_{\Delta t})^2 + (L \cdot u_{\Delta\alpha} \cdot u_{\Delta t_{20}})^2 + u_D^2 + u_S^2 + u_O^2 + u_P^2$$

kde je

- u_A je nejistota typu A,
- u_E nejistota etalonu,
- u_M nejistota vlivu měřidla,
- $u_{\Delta t}$ nejistota rozdílu teplot,
- $u_{\Delta t_{20}}$ nejistota odchylky od 20 °C,
- $u_{\Delta\alpha}$ nejistota rozdílu koeficientů teplotní roztažnosti,
- u_D nejistota driftu etalonu,
- u_S nejistota nestředového doteku komparátoru,
- u_O nejistota nesouososti doteků komparátoru,
- u_P nejistota rozdílné pružné deformace.



Obecná tabulka přehledu nejistot odpovídající více uvedenému vztahu pro nejistotu:

nejistota vlivu X_i	odhad x_i	standardní nejistota $u(x_i)$	rozdělení pravděpodobnosti	koeficient citlivosti c_i	příspěvek k nejistotě $u_i(y)$
A			normální	1	
E			normální	1	
M			rovnoměrné	1	
Δt			rovnoměrné	$L \cdot \alpha$	
$\Delta t_{20} \cdot \Delta \alpha$			obecné	L	
D			rovnoměrné	1	
S			rovnoměrné	1	
O			rovnoměrné	1	
P			rovnoměrné	1	
L_k					

Tab. 2 - Obecná tabulka přehledu jednotlivých vlivů

Je zbytečné uvádět vzorce pro výpočet standardní nejistoty určované způsobem A, přepočet velikosti vlivů na standardní nejistoty s ohledem na rozdělení pravděpodobnosti. To bývá uvedeno v každém článku zabývajícím se základy výpočtů nejistot měření.

Uvedeme jednoduchý příklad pro běžné měření:

Komparační porovnání dvou ocelových KM jmenovité délky 10 mm. Během měření byla zjištěna průměrná odchylka délky 0,05 μm , hodnota výběrové směrodatné odchylky pro 6 opakovaných měření je 0,014 μm . Teplota v laboratoři se pohybuje v rozmezí 20 $^{\circ}\text{C} \pm 1$ $^{\circ}\text{C}$. Vliv měřidla (zjistíme z kalibračního listu mechanického komparátoru) je 0,05 μm , z kalibračního listu etalonu zjistíme nejistotu měření $U = (0,1 + 1 \cdot l) \mu\text{m}$ (kde l je jmenovitá délka KM v metrech). Etalon byl kalibrován pravidelně a jeho změny se pohybovaly v rozmezí 0,04 μm . Obě porovnávané KM mají udánu hodnoty koeficientu délkové teplotní roztažnosti $(11,5 \pm 1) \frac{\mu\text{m}}{\text{m} \cdot \text{K}}$. Po dostatečně dlouhé době temperace je rozdíl teplot KM 0,05 $^{\circ}\text{C}$. Chybu díky nestředovému doteku komparátoru i nesouososti doteků odhadujeme 0,02 μm .



Po shrnutí:

nejistota vlivu X_i	odhad x_i	standardní nejistota $u(x_i)$	rozdělení pravděpodobnosti	koeficient citlivosti c_i	příspěvek k nejistotě $u_i(y)$
A	0,000050 mm	0,0057 μm	normální	1	0,0057 μm
E	0,00002 mm	0,0550 μm	normální	1	0,0550 μm
M	0 mm	0,0289 μm	rovnoměrné	1	0,0289 μm
Δt	0 °C	0,0289 °C	rovnoměrné	0,115 $\frac{\mu\text{m}}{^\circ\text{C}}$	0,0033 μm
$\Delta t_{20} \cdot \Delta \alpha$	0 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$	0,6667 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$	obecné	0,01 m	0,0067 μm
D	0 mm	0,0231 μm	rovnoměrné	1	0,0231 μm
S	0 mm	0,0115 μm	rovnoměrné	1	0,0115 μm
O	0 mm	0,0115 μm	rovnoměrné	1	0,0115 μm
P	0 mm	0,0000 μm	rovnoměrné	1	0,0000 μm
L_k				$u =$	0,0689 μm

Tab. 3 - Velikosti vlivů na nejistotu dle uvedeného příkladu

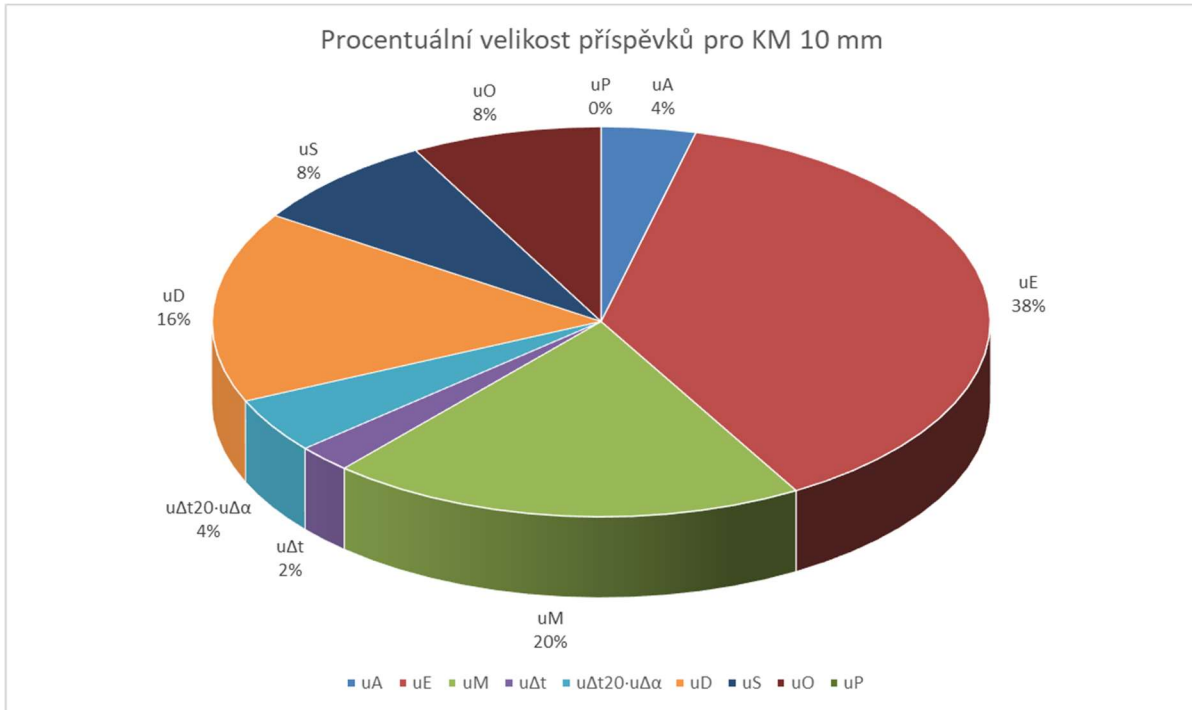
Standardní nejistota má tedy hodnotu: $u = 0,0689 \mu\text{m}$.

Předpokládáme normální rozdělení koeficient rozšíření $k = 2$. Pak hodnota rozšířené nejistoty měření bude mít velikost:

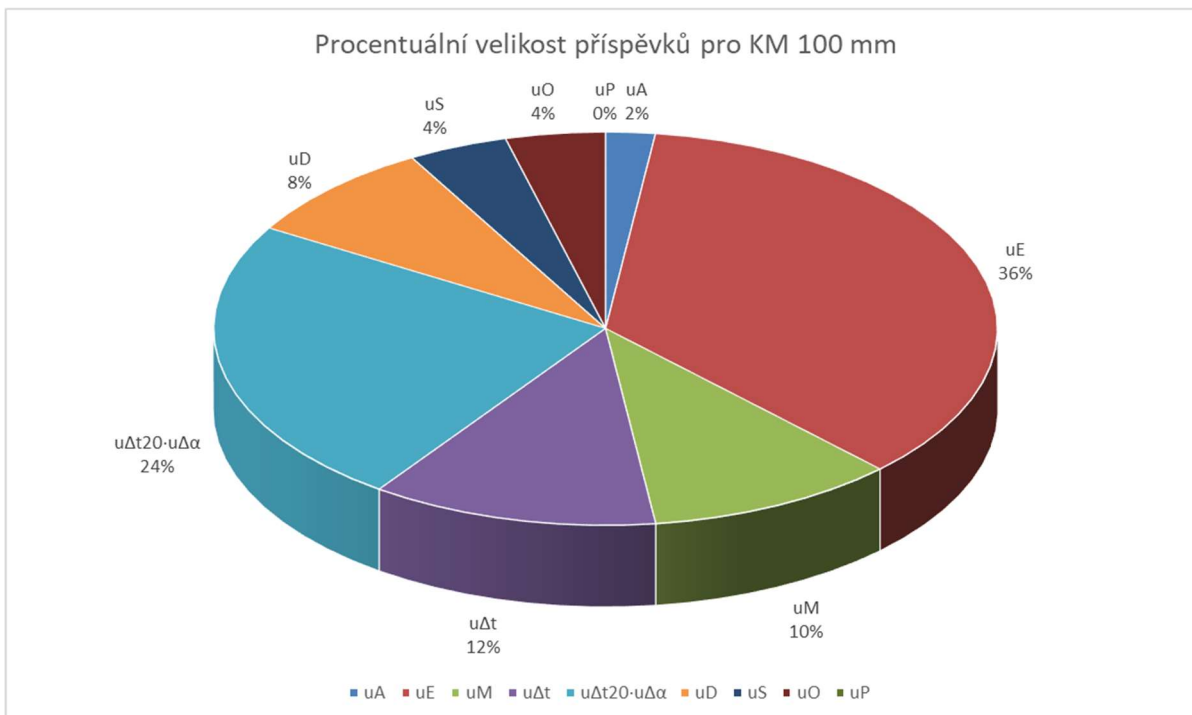
$$U = 0,14 \mu\text{m}.$$

Podle zkušeností není obvykle nutné kontrolovat platnost centrální limitní věty. V tomto konkrétním případě, **pokud by hodnota výběrové směrodatné odchylky s z opakovaných měření překročila hodnotu 0,04 μm , koeficient rozšíření $k = 2$ již nebude odpovídat pokrytí pravděpodobnosti 95 % a je nutné jej odvodit z výpočtu efektivních stupňů volnosti, což je popsáno např. v Příloze E dokumentu EA 4/02 M:2013.**

V následujících dvou grafech je zobrazeno procentuální porovnání jednotlivých příspěvků pro koncové měřky velikosti 10 mm a 100 mm se stejnými parametry.



Graf 1 - Velikost příspěvků k nejistotě pro výše uvedený příklad pro KM 10 mm



Graf 2 - Velikost příspěvků k nejistotě pro výše uvedený příklad pro KM 100 mm



U koncových měrek není v kalibračním listu běžně uváděna nejistota pro jednotlivé měrky, ale je uváděna buď pomocí lineárního vzorce:

$$U = (K + R \cdot l_n)$$

nebo kvadratického vyjádření:

$$U = \sqrt{K^2 + (R \cdot l_n)^2},$$

kde je

K konstantní část nejistoty měření,

R relativní část nejistoty závislá na měřené jmenovité délce,

l_n jmenovitá délka KM.

V ČR je dlouhodobě užíváno rozdělení nejistot dle kalibračních řádů dle již neplatného dokumentu OIML R30:

Kalibrační řád	Nejistota U pro $k = 2$
	μm
1.	$0,02 + 0,2l_n$
2.	$0,05 + 0,5l_n$
3.	$0,1 + 1l_n$
4.	$0,2 + 2l_n$
5.	$0,5 + 5l_n$

Tab. 4 - Nejistoty kalibrací KM dle OIML R30

kde je

l_n jmenovitá délka KM v metrech,

Tyto údaje lze považovat za platné pro kalibrace měrek pomocí etalonu stejného materiálu, pokud pro porovnání použijeme vždy etalonovou KM alespoň o řád vyšší a ostatní příspěvky jsou dostatečně nízké. U kalibrací KM s nejistotou 2. řádu je obvykle sada měřena $2 \times$ nezávisle dvěma pracovníky.



5. Posuvná měřidla

Posuvná měřidla patří spolu s mikrometrickými měřidly mezi nejrozšířenější typy pracovních měřidel používaných v průmyslu. Nejběžnější typy těchto měřidel jsou

- posuvná měřítka
- posuvné hloubkoměry
- posuvné výškoměry

Posuvná měřítka jsou často vybavena doteky a čelistmi pro měření vnějších i vnitřních rozměrů a jednoduchým hloubkoměrem.

Etalonem pro kalibraci posuvných měřidel jsou obvykle koncové měrky různých rozměrů odstupňovaných tak, aby pokryly celý rozsah hlavní stupnice měřidla a prověřily i měření případné pomocné stupnice (noniové nebo číselníkového úchylkoměru).

Dále mohou být používány další typy nastavných měřidel, např. nastavné kroužky.

5.1 Příspěvky k nejistotě měření posuvných měřidel

Metoda měření: Porovnání s koncovými měrkami (a jinými koncovými měřidly).

Působí všechny vlivy popsané v kap. 3.1 a dále obvykle uvažujeme:

- **nejistota Abbeho chyby**

Princip konstrukce posuvných měřidel neodpovídá požadavkům, které definoval Ernst Abbe v roce 1890, a měřená hodnota je ovlivňována přítlačnou silou a vzdáleností měřené součásti od osy posuvu čelistí měřidla. Pokud bude operátor při měření působit vždy stejnou silou, měřená hodnota může být odlišná vzhledem ke vzdálenosti měřeného předmětu od osy pohybu měřidla.

5.2 Další vlivy

Další vlivy, které nemusí vždy působit, ale často je nelze zanedbat jsou:

- **stav měřidla**

U pracovních posuvných měřidel není výjimkou poškození čelistí, koroze, „naražení“ hran, opotřebované vedení posuvu, prohnutí rámu apod. Pokud i přes špatný stav měřidla provedeme kalibraci, musí být tyto vlivy zahrnuty. Velikost příspěvku je možné odhadnout různými způsoby: podle velikosti průsvitu mezi čelistmi, posunutí nulové hodnoty (u mechanických



měřidel posunutí stupnice, u digitálních může jít poškození měřicí plochy a tím znemožnění doteku měřicích ramen po celé délce), podle „viklání“ posuvné čelisti atd.

▪ chyba etalonu

Z kalibračního listu etalonu známe jeho rozměry, které můžeme zahrnout do výpočtu výsledné chyby kalibrovaného měřidla. Pokud takto neučiníme a hodnoty odchylek délky etalonů jsou nezanedbatelné, musíme zahrnout vliv na chybu etalonu.

▪ vliv operátora

U posuvných měřidel s číselníkovým úchylkoměrem jde především o chybu paralaxy, která vzniká při pohledu na ručičku úchylkoměru měřidla pod nesprávným úhlem.

5.3 Příklad výpočtu nejistoty

Budeme vycházet ze základní rovnice:

$$L_K = A + E + M + L(\alpha \cdot \Delta t + \Delta\alpha \cdot \Delta t_{20}) + Z + K + S + O$$

kde je

L_k výsledek měření po korekci,

A průměrná naměřená hodnota,

E korekce etalonu,

M korekce vlivu měřidla (rozlišení měřidla),

L jmenovitá délka,

α průměrná hodnota koeficientů teplotní roztažnosti (aritmetický průměr hodnoty etalonu a kalibrovaného měřidla),

Δt rozdíl teplot měřidel,

$\Delta\alpha$ rozdíl koeficientů délkové teplotní roztažnosti etalonů a kalibrovaného měřidla,

Δt_{20} odchylka průměrné teploty měřidel od 20 °C,

Z korekce Abbeho chyby,

K korekce chyby použitého etalonu,

S korekce stavu měřidla,

O korekce vlivu operátora.



Platí:

$$\alpha = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2},$$

$$\Delta t = t_1 - t_2,$$

$$\Delta \alpha = \alpha_1 - \alpha_2,$$

$$\Delta t_{20} = 20 - \frac{t_1 + t_2}{2}.$$

Indexy 1 a 2 se vztahují k etalonovému měřidlu (1) a kalibrovanému měřidlu (2).

Vztah pro výslednou nejistotu je potom:

$$u^2 = u_A^2 + u_E^2 + u_M^2 + (L \cdot \alpha \cdot u_{\Delta t})^2 + (L \cdot u_{\Delta \alpha} \cdot u_{\Delta t_{20}})^2 + u_Z^2 + u_K^2 + u_S^2 + u_O^2$$

kde je

u_A nejistota typu A,

u_E nejistota etalonu,

u_M nejistota rozlišení měřidla,

$u_{\Delta t}$ nejistota rozdílu teplot,

$u_{\Delta t_{20}}$ nejistota odchylky od 20 °C,

$u_{\Delta \alpha}$ nejistota rozdílu koeficientů teplotní roztažnosti,

u_Z nejistota Abbeho chyby,

u_K nejistota chyby etalonu,

u_S nejistota stavu měřidla,

u_O nejistota vlivu operátora.



Obecná tabulka přehledu nejistot odpovídající více uvedenému vztahu pro nejistotu:

nejistota vlivu X_i	odhad x_i	standardní nejistota $u(x_i)$	rozdělení pravděpodobnosti	koeficient citlivosti c_i	příspěvek k nejistotě $u_i(y)$
A			normální	1	
E			normální	1	
M			rovnoměrné	1	
Δt			rovnoměrné	$L \cdot \alpha$	
$\Delta t_{20} \cdot \Delta \alpha$			obecné	L	
Z			rovnoměrné	1	
K			rovnoměrné	1	
S			rovnoměrné	1	
O			rovnoměrné	1	
L_k					

Tab. 5 - Obecná tabulka přehledu jednotlivých vlivů

Uvedeme opět jednoduchý příklad pro běžné měření:

Kalibrace stupnice pro měření vnějších rozměrů posuvného měřítka do 150 mm pomocí koncových měrek. Během měření byla zjištěna průměrná odchylka délky 0,02 mm, hodnota výběrové směrodatné odchylky pro 5 opakovaných měření je 5,5 μm . Teplota v laboratoři se pohybuje v rozmezí $20\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$. Rozlišení měřidla je 0,01 mm, z kalibračního listu etalonu zjistíme nejistotu měření $U = (0,5 + 5 \cdot l) \mu\text{m}$ (kde l je jmenovitá délka KM v metrech). Chyby etalonových KM jsou zanedbatelné. Etalonové KM mají udánu hodnoty koeficientu délkové teplotní roztažnosti $(11,5 \pm 1) \frac{\mu\text{m}}{\text{m} \cdot \text{K}}$ u posuvného měřítka předpokládáme totožnou hodnotu s možnou chybou $\pm 2 \frac{\mu\text{m}}{\text{m} \cdot \text{K}}$. Po dostatečně dlouhé době temperace je rozdíl teplot KM a měřidla 0,5 $^\circ\text{C}$. Abbeho chyba byla odhadnuta 0,01 mm. Vliv operátora předpokládáme zanedbatelný. Měřidlo je v perfektním stavu.



Po shrnutí:

nejistota vlivu X_i	odhad x_i	standardní nejistota $u(x_i)$	rozdělení pravděpodobnosti	koeficient citlivosti c_i	příspěvek k nejistotě $u_i(y)$
A	0,01 mm	2,4597 μm	normální	1	2,4597 μm
E	0,00003 mm	0,6250 μm	normální	1	0,6250 μm
M	0 mm	5,7735 μm	rovnoměrné	1	5,7735 μm
Δt	0 °C	0,2887 °C	rovnoměrné	1,725 $\frac{\mu\text{m}}{^\circ\text{C}}$	0,4980 μm
$\Delta t_{20} \cdot \Delta \alpha$	0 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$	2,0000 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$	obecné	0,015 m	0,3000 μm
Z	0 mm	5,7735 μm	rovnoměrné	1	5,7735 μm
K	0 mm	0,0000 μm	rovnoměrné	1	0,0000 μm
S	0 mm	0,0000 μm	rovnoměrné	1	0,0000 μm
O	0 mm	0,0000 μm	rovnoměrné	1	0,0000 μm
L_k				$u =$	8,5700 μm

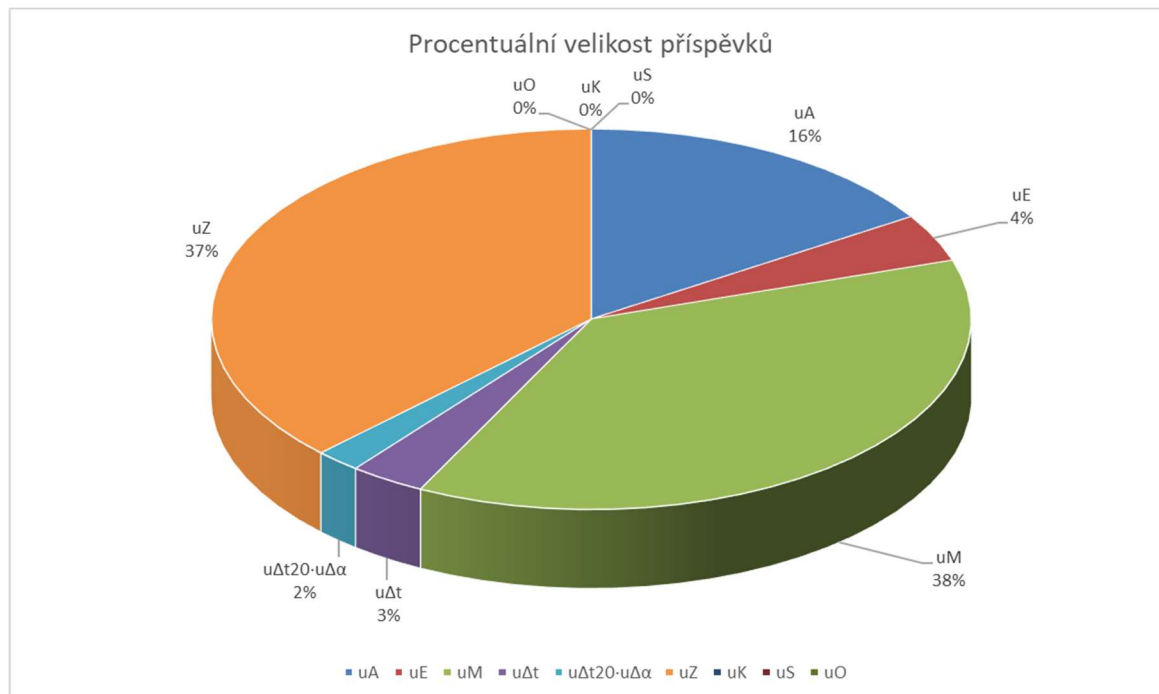
Tab. 6 - Velikosti vlivů na nejistotu dle uvedeného příkladu

Standardní nejistota má tedy hodnotu: $u = 8,5700 \mu\text{m}$.

Předpokládáme normální rozdělení koeficient rozšíření $k = 2$. Pak hodnota rozšířené nejistoty měření bude mít velikost (po zaokrouhlení na dvě platné číslice):

$$U = 17 \mu\text{m}.$$

Grafické znázornění velikosti jednotlivých příspěvků, pro výše uvedený příklad, je následující:



Graf 3 - Velikost příspěvků k nejistotě pro výše uvedený příklad kalibrace posuvného měřítka

Jak je vidět na grafu 3, největším příspěvkem k nejistotě je vliv rozlišení měřidla v kombinaci s nejistotou typu A. Abbeho vliv obvykle přispívá přibližně jednou třetinou. Teplotní vlivy u měřidel do 150 mm přispívají do hodnoty okolo 5 %. Pokud by se jednalo o posuvné měřidlo o délce 1000 mm, velikost jejich příspěvku k celkové nejistotě měření by se rovnala přibližně 25 %.

Velikosti příspěvků operátora a nezapočítané korekce etalonu jsou obvykle nevýrazné. Pokud ale měřidlo není v dobrém stavu, velikost tohoto vlivu vstupuje do rozpočtu nejistoty velmi výrazně a celkovou nejistotu může i několikanásobně zvýšit, není proto vhodné tento vliv ignorovat.

6. Mikrometrická měřidla

Mikrometrická měřidla na rozdíl od posuvných mají výhodu, že jejich měřicí osa je totožná s osou pohybu měřicího doteku. Je tedy eliminován vliv Abbeho chyby. Velmi často jsou vybavena zařízením pro vymezení konstantní přitlačné síly. Nejběžnější typy těchto měřidel jsou

- třmenové mikrometry
- mikrometrické hloubkoměry
- mikrometrické odpichy

Etalonem pro mikrometrických měřidel jsou obvykle koncové měřky různých rozměrů odstupňovaných tak, aby pokryly celý rozsah hlavní stupnice měřidla a prověřily i měření případné pomocné stupnice. Nejběžnější stoupání mikrometrického šroubu je 0,5 mm/ot. a rozsah stupnice 25 mm a i s ohledem na to vznikla unifikovaná sada koncových měrek deseti kusů odstupňovaných tak, aby pokryla celý rozsah hlavní i vedlejší stupnice.

Pro kalibrace mikrometrických odpichů je využíváno délkoměru, přičemž délkoměr lze použít také u kalibrace mikrometrických hloubkoměrů. V těchto případech jsou uplatňovány vlivy nejistoty uvedené v kapitole „*Kalibrace měřidel na délkoměru*“.

Dále mohou být používány další typy nastavných měřidel, např. nastavné kroužky.

6.1 Příspěvky k nejistotě při měření chyby mikrometrických měřidel

Metoda měření: Porovnání s koncovými měrkami (a jinými koncovými měřidly)

Působí všechny vlivy popsané v kap. 3.1.

6.2 Další vlivy

Dále nejistotu ovlivňují i další vlivy, které nemusí působit vždy, ale často je zanedbat nelze:

- **stav měřidla**

U pracovních mikrometrických měřidel není výjimkou nerovnoběžnost měřicích ploch, koroze, drhnutí vedení a tím i nerovnoměrná přitlačná síla apod. Pokud z nějakého důvodu provedeme kalibraci i přes špatný stav měřidla, musí být tyto vlivy zahrnuty. V některých případech je velikost tohoto příspěvku tak výrazná, že nám může zvýšit hodnotu nejistoty měření i několikanásobně.



▪ **chyba etalonu**

Z kalibračního listu etalonu známe jeho rozměry, které můžeme zahrnout do výpočtu výsledné chyby kalibrovaného měřidla. Pokud takto neučiníme a hodnoty odchylek délky etalonů jsou nezanedbatelné, musíme zahrnout vliv na chybu etalonu.

▪ **vliv operátora**

Podobně jako u posuvných měřidel se může jednat o vliv paralaxy při pohledu na číselníkový úchylkoměr, např. u mikropasametru.

Může se jednat i o nezkušenost operátora, kdy při měření sice použije zařízení pro vymezení konstantního přítlaku, ale pokud neotáčí vřetenem vždy podobnou rychlostí, může i velikost síly při měření do určité míry kolísat.

Sestavení základní rovnice pro měření i výpočet nejistoty se provede analogicky jako v případě kalibrací koncových měrek nebo posuvných měřidel, viz kapitoly 4.3 a 5.3.



7. Číselníkové úchylkoměry

Číselníkové úchylkoměry mohou být měřeny různými metodami. Jako etalon je běžně využíván délkoměr, koncové měrky nebo speciální přístroj pro měření úchylkoměrů. Přístroje pro měření úchylkoměrů jsou konstruovány podobně jako délkoměry, ale na rozdíl od běžného délkoměru je zde úchylkoměr při měření umístěn ve svislé poloze. Při kalibraci úchylkoměrů se aplikují relevantní vlivy z kapitoly „*Kalibrace měřidel na délkoměru*“.



8. Čárková měřidla

Čárková měřidla mají často formu pravítka nebo pásku, označená jsou čárkovou stupnicí nejběžněji s krokem 1 mm. Nejběžnější typy těchto měřidel jsou

- měřičská pásma,
- svinovací metry,
- ocelová měřítka.

Kalibrují se porovnáním stupnice se stupnicí etalonového pravítka, pomocí tratě pro měření pásem s kalibrovanými vzdálenostmi rysek od daného bodu, na 3D měřicím stroji, měřicím mikroskopu nebo i pomocí koncových měrek.

8.1 Příspěvky k nejistotě měření čárkových měřidel

Metoda měření 1: Porovnání s etalonovým pravítkem (etalonovou drahou)

Působí všechny vlivy popsané v kap. 3.1. Vliv rozlišitelnosti měřidla je u této metody měření nahrazen vlivem schopnosti odečtu:

- **vliv schopnosti odečtu**

V tomto případě nahrazuje vliv měřidla, resp. rozlišení měřidla. Etalonové měřítko má obvykle stupnici s dělením 1 mm a rozdíl rysek etalonu a měřidla musíme odhadovat nebo použít lupy s přesnějším dělením. Schopnost přesnosti odečtu je pak závislá na hodnotách kalibrované pomocné lupy nebo přesnosti odhadu.

Touto metodou mohou být kalibrována měřičská pásma, svinovací metry, případně čárková měřítka.

Metoda měření 2: Přímé měření na měřicím mikroskopu nebo souřadnicovém měřicím stroji

Působí všechny vlivy popsané v kap. 3.1. Obvykle jsou touto metodou kalibrována čárková měřítka (pravítka).

Ostatní příspěvky jsou pro obě metody měření obdobné. Velký důraz klademe na dostatečnou teplotu. U svinovacích metrů a obzvláště u měřičských pásem je, vzhledem k jejich délce, část nejistoty zohledňující teplotní vlivy, velmi důležitá.

8.2 Další vlivy

Dále uvažujeme:

- **vliv překládání** (pro Metodu měření 1)

U měřičských pásem a svinovacích metrů často kalibrujeme pomocí etalonu, který má menší délku než kalibrované měřidlo. Pásmo poté několikrát umístíme na stupnici etalonového pravítka se snahou dosáhnout stejné výchozí hodnoty jako u poslední měřené hodnoty předchozího přeložení. Toho vždy docílíme s nějakou chybou, které se ve výpočtu nejistoty objeví tolikrát, kolikrát došlo k přeložení měřidla na etalonovou stupnici.



- **vliv nerovnoměrného napnutí** (pro Metodu měření 1)

Platí pro měřická pásma, která se musí napínat silou určenou výrobcem měřidla.

- **vliv operátora**

Operátor může ovlivnit nejistotu měření odečítáním hodnot při pohledu na stupnice z různých úhlů, případně jinými chybami při měření.

- **vliv měřidla**

Horší čitelnost stupnice měřidla, nerovnoměrná tloušťka čárek stupnice, případně křivé čárky stupnice kalibrovaného měřidla apod.



9. Kalibrace měřidel na délkoměru

Délkoměr je jednosouřadnicový měřicí stroj, který slouží pro měření délky rozličných měřidel, kalibrů a přípravků v jedné ose. Zaměříme se na následující běžně kalibrovaná měřidla:

- válečkové kalibry hladké,
- měřicí drátky,
- spárové měrky,
- měřicí trny,
- nastavné kroužky,
- nastavné měrky pro nastavování třmenových mikrometrů,
- číselníkové úchylkoměry,
- mikrometrické odpichy,
- (mikrometrické hloubkoměry).

Mikrometrické hloubkoměry jsou uvedeny v závorce, protože se obvykle kalibrují jinou metodou měření a použití délkoměru je v tomto případě spíše okrajové.

U všech těchto měřidel je uplatňován velmi podobný způsob výpočtu nejistoty měření s určitými specifikacemi pro určité přístroje.

Na délkoměru mohou být kalibrovány taktéž některá mikrometrická měřidla, např. mikrometrické odpichy.

Obvykle základním etalonem pro měření na délkoměru je samotný délkoměr. Podle způsobu měření mohou být použity další nastavné etalony, např. nastavné kroužky, nastavné trny nebo koncové měrky. Je možné tedy měřit přímo nebo komparačně, podobně jako koncové měrky.

9.1 Příspěvky k nejistotě

Metoda měření: Přímé měření na délkoměru

Působí všechny vlivy popsané v kap. 3.1 a dále i další vlivy, které nemusí vždy působit, ale případně je nelze zanedbat:

- **Nelinearita délkoměru**

Z kalibrace délkoměru je známá jeho linearita a je možné korigovat jeho kalibrační křivku. Pokud nebyly korekce zavedeny, je nutné započítat vliv chyby v použitém pracovním rozsahu délkoměru. Kromě korekcí lze výrazně snížit vliv chyby délkoměru měřením komparační metodou, kdy použijeme nastavný etalon co nejbližšího rozměru k velikosti kalibrovaného měřidla.



▪ **Vliv interpolace**

Délkoměry jsou nejčastěji kalibrovány buď pomocí koncových měrek nebo za použití přenosných laserových interferometrů. Zejména při měření koncovými měrkami je kalibrace provedena v omezeném množství bodů a z naměřených hodnot nelze vytvořit přesnou kalibrační křivku. Hodnoty chyb stupnice mezi kalibračními body je nutné interpolovat, přičemž vzniká nejistota správného odhadu korekce pomocí interpolační křivky.

▪ **Kosinová chyba**

Vzniká zejména u měření delších rozměrů, a to vlivem nerovnoběžnosti os měřeného přístroje a osou pohybu délkoměru a vliv má také nerovnoběžnost měřicích ploch kalibrovaného přístroje.

▪ **Nesouosost, nesprávné seřízení, typ použitých doteků**

Pro každý druh měření by měly být použité vhodné doteky délkoměru (kulové nebo ploché se správným rozměrem) seřízené podle doporučení výrobce. Vlivem nesouososti nebo použití nevhodných doteků vzniká velmi obtížně zjištělná chyba měření.

Metoda měření: Komparační měření

Působí všechny vlivy, jako u měření přímého, ale velikost chyby (nelinearity) délkoměru i část jeho nejistoty měření je redukována použitím vhodného etalonu. Čím blíže je hodnota porovnávaného etalonu hodnotě kalibrované součásti, tím je vliv těchto položek nižší. Vzniká nám naopak další příspěvek:

▪ **Nejistota druhého etalonu**

V tomto případě se jedná o nejistotu použitého koncového etalonu, např. nastavného kroužku.



10. Závěr

Přehled nejdůležitějších faktorů, které ovlivňují hodnotu nejnižších udávaných nejistot měření a které nelze při jejich výpočtu bez řádného zdůvodnění zanedbat výrazně zlepši možnost využití tabulky CMC zákazníky kalibračních laboratoří. U akreditovaných kalibračních laboratoří bude posílena důvěra, že ve svých výpočtech nejistot neopominuly žádný podstatný příspěvek a že hodnota nejnižší udávané nejistoty uvedená v tabulce CMC ve spojení s ostatními informacemi, především principem kalibrace, dobře odráží schopnost laboratoře provádět kalibrace s odpovídajícími nejistotami.

Sestavení přehledu nejdůležitějších faktorů, ovlivňujících hodnotu nejnižších udávaných nejistot měření, které nelze při jejich výpočtu, a tedy při stanovování CMC vynechat, a vysvětlení, proč právě v konkrétním případě daný vliv zanedbat lze, výrazně zlepši možnost využití tabulky CMC zákazníky kalibračních laboratoří. Do značné míry pak budou zárukou, že jsou jednotlivé vlivy uvažovány a posuzovány shodně. Dalším dopadem je harmonizace náhledu posuzovatelů, především odborných, na způsob výpočtu nejistot a stanovování CMC tak, aby zákazníci mohli odůvodněně porovnávat kalibrační laboratoře mezi sebou podle tabulek CMC, uvedených v přílohách osvědčení o akreditaci. Výsledky budou následně zformulovány do článku pro časopis Metrologie a stanou se podkladem pro seminář, určený pro odbornou veřejnost. Tento seminář současně v rámci průběžného vzdělávání odborných posuzovatelů ČIA poslouží jako školení ke zvyšování a udržování jejich odbornosti, touto cestou budou prokazatelně seznámeni s výsledkem řešení úkolu PRM 2019.



11. Shrnutí

Předchozí zpráva z průběžné oponentury uváděla aktuální stav řešení úkolu PRM a průběžné výsledky k datu konání oponentury, kterými bylo naplněno zadání přiměřeně časovému postupu. Předkládaná zpráva završuje řešení úkolu při respektování doporučení a připomínek, vznesených během průběžné oponentury.

11.1 Technická část článku do metrologie

Základem článku bude textový obsah zprávy s vynecháním pasáží, které nejsou určeny široké veřejnosti, případně s formulacemi, které budou vhodnější pro uveřejnění. Osnova článku bude respektovat osnovu zprávy.

Rozsah článku bude dán redakčním záměrem, text bude orientován na čtenáře, který se o problematiku zajímá, podrobné informace a úplný text zprávy bude opět k dispozici všem zájemcům o podrobnosti na stránkách Úřadu.

11.2 Koncepce prezentace

Stejně jako při řešení předchozích úkolů autoři předpokládají grafickou (prezentační) podobu zprávy, doplněnou ústním komentářem. Odpovědnost za obsah ponесou autoři řešení úkolu, kteří budou současně i přednášejícími.



12. Literatura:

- [1] ČSN EN ISO 3650
- [2] J. E. Decker, R. Schödel, G. Bönsch, “Overview of Uncertainty Analyses for Gauge Block Calibration”, NIST, PTB
- [3] T. Doiron, J. Beers, “The Gauge Block Handbook”, NIST
- [4] https://en.wikipedia.org/wiki/Contact_mechanics
- [5] https://cs.wikipedia.org/wiki/Hertzův_tlak
- [6] JCGM 100:2008
- [7] EA 4/02 M:2013