

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY



FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

NEJISTOTY PŘESNÝCH DÉLKOVÝCH MĚŘENÍ

UNCERTAINTIES OF ACCURATE LENGHT MEASUREMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN ŠRÁMEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. FRANTIŠEK VDOLEČEK, CSC.

BRNO 2008

ZADÁNÍ ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

(na místo tohoto listu vložte originál a nebo kopii zadání Vaší práce)

LICENČNÍ SMLOUVA

(na místo tohoto listu vložte vyplněný a podepsaný list formuláře licenčního ujednání)

Abstrakt

Diplomová práce má za úkol seznámit čtenáře, který se zajímá o problematiku nejistot délkových měření, s praktickou stránkou řešení těchto nejistot u jednoho velmi často používaného kalibračního postupu měření na délkoměru SIP. Toto měření bylo realizováno na půdě Českého metrologického institutu, kde autor pracuje, a tak mohl plně čerpat z množství vlastních zkušeností i zkušeností svých nadřízených a kolegů.

Autor považuje národní metrologický orgán (ČMI) za dostatečnou záruku pro dále uváděné materiály, jak z hlediska odborné způsobilosti, tak i z hlediska formální korektnosti práce.

Abstract

This diploma thesis is supposed to inform readers interested in the distance measurements uncertainty on practical issues connected with the solving of these troubles when utilising a frequently used calibration method - the SIP distance meter. This measuring was implemented by the Czech Metrologic Institute, where the author works; therefore he could take advantage of his rich experience as well as experience of his superiors and colleagues.

The author regards the national metrological institute (ČMI) as a sufficient guarantee for the hereinafter presented materials, both regarding the professional qualification and from the perspective of formal rightness of this thesis.

Klíčová slova

Metrologie, měření, měřicí přístroj, etalon, postup měření, výsledek měření, přesnost měření, nejistota měření, chyba měření, kalibrace

Keywords

Metrology, measurement, measuring instrument, etalon (standard), measurement procedure, result of a measurement, accuracy of measurement, uncertainty of measurement, error of measurement, calibration

Poděkování

Autor děkuje v první řadě své rodině, která mu poskytla zázemí, prostor a byla nucena se obrnit trpělivostí téměř hodnou světců.

Dále pak:

Ing. Duchoňovi, vedoucímu oddělení měření délky v ČMI OI Brno, za poskytnutí odborné pomoci a prostoru pro tvorbu bakalářské práce

Ing. Vdolečkovi CSc., mému odbornému vedoucímu diplomové práce

sl. Karellové za překlad abstraktu

Obsah:

Zadání diplomové práce.....	2
Licenční ujednání.....	3
Abstrakt.....	7
1 Úvod.....	11
2 Nejistoty měření.....	13
2.1 Způsob vyhodnocování nejistot měření a jejich typy	
2.2 Vyhodnocení standardních nejistot způsobem A	
2.3 Vyhodnocení standardních nejistot způsobem B	
2.4 Nejistoty kombinované	
2.5 Nejistoty rozšířené	
2.6 Princip vyhodnocení nejistoty nepřímých měření	
3 Délkoměr SIP1002M – charakteristika.....	19
3.1 Princip činnosti a konstrukce přístroje	
3.2 Možnosti použití a měřicí přípravky	
3.3 Používaný HW a SW	
4 Analýza nejistot při měření délkoměrem SIP 1002M.....	25
4.1 Zdroje nejistot při měření délkoměrem	
4.2 Podrobná analýza nejistot při měření délkoměrem	
4.2.1 Podrobná analýza nejistot při měření válcového kalibru	
4.2.2 Podrobná analýza nejistot při měření závitového kroužku	
4.3 Korekce chyb	
4.4 Příklad praktického výpočtu nejistot	
4.4.1 Příklad praktického výpočtu nejistot při měření válcového kalibru	
4.4.2 Příklad praktického výpočtu nejistot při měření závitového kroužku	
5 Zpracování automatického vyhodnocení nejistot do programového vybavení.....	39
5.1 Výpočtový modul pro nejistotu měření délkových měření	
5.2 Výpočtový modul pro nejistotu měření závitového kroužku	
6 Závěr.....	41
7 Užitá literatura.....	43
8 Seznam příloh.....	45

1 Úvod

Tato bakalářská práce by se s jistou mírou nadsázky dala nazvat kuchařkou určenou pro ty, kteří se zatím podrobně neseznámili s teoretickým, ani s praktickým postupem výpočtu nejistoty měření v metrologii, konkrétně při provádění přesných délkových měření.

Význam metrologie v poslední době neustále roste, což souvisí s neustálým zvyšováním přesnosti, a tím i kvality výroby, se kterou je i provázán další rozvoj a modernizace měřicích prostředků. Souběžně s tím dochází ke změnám i v oblasti normalizace, kdy v České republice v rámci harmonizace naší soustavy norem s mezinárodními normami ISO/IEC a EN byly přejímány i nové normy pro měřidla a metody měření. Součástí těchto přejímaných norem jsou i normy zabývající se nejistotami měření.

V této souvislosti je nutné podotknout, že metrolog podniku nebo vedoucí laboratoře se dnes neobejde bez základních znalostí matematické statistiky potřebných při vyhodnocování nejistot měření, statistické přejímce apod. Řada metrologů starší generace, kteří jsou mnohdy velmi dobrými praktiky, tyto znalosti často nemají, jelikož je nepotřebovali.

V současné době se prolínají dva přístupy k vyhodnocování výsledků měření. První, v našich končinách patřičně zažitý a dlouhou dobu v praxi používaný, představuje klasické vyhodnocování chyb měření. Tento přístup se uplatňuje u měření, jehož výstupem je jediný výsledek měření, např. kalibrace měřidla. Tato klasická metoda však již neumožňuje plnohodnotné vyjádření dosažené přesnosti měření, zejména popis hlavních vlivů na dané měření, které mají vliv na jeho kvalitu a další požadované parametry.

Novým přístupem je v souladu s novými národními a mezinárodními předpisy z oblasti metrologie přístup z pohledu nejistoty měření. Je to přístup, který umožňuje efektivnější vyšetření všech vlivů na měření a faktorů, které naše měření mohou ovlivnit.

Jeho zavedení v praxi znamená, že k výsledku měření při kalibraci přidružíme nejistotu měření, která je vyhodnocena z skutečných podmínek měření, za kterých byla kalibrace provedena. Po n opakovaných kalibracích stejného nebo podobného měřidla pak vypočtená nejistota může být vyhodnocena znovu, tentokrát již na základě opakovaných měření za podmínek opakovatelnosti měření.

Bakalářská práce Vás seznámí jednak s obecným přístupem k výpočtu a tvorbě nejistot měření, ale i s praktickou ukázkou jejich aplikace při daném délkovém měření. Její součástí jsou i výpočtové moduly pro automatické zjišťování hodnot nejistot při dvou typech měření délkových měření. Toto měření bylo realizováno na půdě Českého metrologického institutu, konkrétně v jedné z laboratorů oddělení měření délky Oblastního inspektorátu ČMI v Brně, konkrétně na modernizovaném délkoměru SIP 1002M.

2 Nejistoty měření

Pojem nejistota měření je definován v ČSN 01 0115 jako parametr přidružený k výsledku měření charakterizující rozsah hodnot, které je možno důvodně přiřadit k měřené veličině.

Tuto poněkud těžkopádnou definici lze vyložit takto:

Nejistota měření určuje interval okolo výsledku měření, ve kterém leží (s určitou pravděpodobností) pravá hodnota veličiny. Jinými slovy: Pravou hodnotu veličiny sice nelze určit, ale lze ji stanovit (pomocí nejistoty) intervalem "od - do", ve kterých bude pravděpodobně ležet.

2.1 Způsob vyhodnocování nejistoty měření a její typy

Na počátku vyhodnocení nejistoty měření stojí detailní pochopení podstaty tohoto měření, které bývá popsáno tzv. modelem měření. Nejistoty měření se skládají z několika dílčích složek. Ke stanovení jejich velikosti se užívají podle ČSN P ENV 13005 dva základní způsoby (typy) stanovení nejistoty:

- způsob A vyhodnocení standardní nejistoty měření (statistické zpracování naměřených údajů);
- způsob B vyhodnocení standardní nejistoty měření (jiné než statistické zpracování naměřených údajů).

V normě ČSN P ENV 13005 jsou pak definovány druhy nejistoty:

- standardní nejistota;
- kombinovaná nejistota;
- rozšířená nejistota.

2.2 Vyhodnocení standardních nejistot měření způsobem A

Dle definice je nejistota typu A stanovena výpočtem z opakovaně provedených měření dané veličiny. V praxi to znamená, že pokud provedeme opakovaný odečet hodnoty neměnné měřené veličiny a máme k dispozici měřicí přístroj s dostatečným rozlišením, nevyhneme se jistému rozptylu naměřených hodnot.

Předpokládáme, že během tohoto opakovaného měření se nemění ani daná měřená veličina, ani ovlivňující veličiny, které na naše měření působí. Dále je v definici uvedeno, že mírou nejistoty typu A je výběrová směrodatná odchylka výběrového průměru. (Výběrová odchylka proto, že naměřené hodnoty x představují určitý malý výběr z prakticky neomezeného množství hodnot, kterých veličina může nabývat. Výběrového průměru proto, že hodnota, která se uvádí jako výsledek měření, se získá výpočtem průměrné hodnoty opakovaně provedených odečtů.)

Tomuto matematickému popisu také odpovídá příslušný vztah pro výpočet nejistoty typu A:

$$u_A(x) = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.1)$$

kde platí:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.2)$$

Pro platnost tohoto vztahu je nutné, aby počet odečtených měření byl větší než 10 ($n \geq 10$), ze kterých se nejistota typu A vypočítá. Není-li možné dodržet tuto podmínku, je nutno provést doplňkovou korekci pro zohlednění malého počtu opakovaných měření a nebo nejistotu vyhodnotit způsobem B.

2.3 Vyhodnocení standardních nejistot způsobem B

Postup pro stanovení standardní nejistoty typu B je založen na stanovení nejistoty jiným než statistickým vyhodnocením série pozorování. V tomto případě vychází stanovení nejistoty z určitých odborných znalostí a racionálního úsudku pracovníka, který měření provádí a nejistoty následně vyhodnocuje. Tyto nejistoty mohou být odvozeny na základě:

- údajů a zkušeností z dříve provedených měření;
- zkušeností s chováním a vlastnostmi příslušných materiálů a měřicího vybavení, popřípadě jejich obecné znalosti;
- údajů výrobce měřicí techniky;
- údajů uváděných v kalibračních listech;
- nejistot referenčních údajů převzatých s příruček.

Při určování nejistoty metodou typu B se vychází z dílčích nejistot jednotlivých zdrojů $u_B(z_j)$. Je-li známa maximální odchylka j -tého zdroje nejistoty $z_{j\max}$, určí se nejistota $u_B(z_j)$ podle následujícího vztahu:

$$u_B(z_j) = \frac{z_{j\max}}{k} \quad (2.3)$$

Kde k je součinitel vycházející ze zákona rozdělení, kterým se příslušný zdroj nejistot řídí, takže např. pro normální (Gaussovo) rozdělení je $k = 2$, popř. 3, pro rovnoměrné rozdělení $k = 1,73$ atd.

V některých případech však může být známa již přímo hodnota standardní nejistoty $u_B(z_j)$ (např. z kalibračního listu měřidla).

Výsledná nejistota se určí metodou B pro p zdrojů $z_1, z_2, \dots, z_j, z_p$ dle následujícího vztahu:

$$u_B(x) = \sqrt{\sum_{j=1}^p A_j^2 u_B^2(z_j)} \quad (2.4)$$

kde: $u_B(z_j)$ jsou nejistoty jednotlivých zdrojů

A_j jejich součinitele citlivosti

Touto úpravou se nejistotě typu B dostává charakteru směrodatné odchylky a jako s takovou se s ní dále pracuje.

Použití rovnoměrného rozdělení představuje přiměřené statistické vyjádření nedostatečné znalosti vstupní (měřené) veličiny x , pokud o ní nejsou známy jiné informace, než jsou např. limity její variability.

Pokud ale víme, že pravděpodobnost výskytu hodnot v okolí středu intervalu hodnot je vyšší než pravděpodobnost výskytu hodnot v krajích intervalu, může být vhodnější použití trojúhelníkového nebo normálního rozdělení. Naopak, pokud je výskyt hodnot v mezích intervalu pravděpodobnější než ve středu intervalu, může být vhodnější použití U rozdělení.

2.4 Nejistoty kombinované

V reálné praxi jen málokdy vystačíme s jedním typem nejistoty měření. Ve většině případů se stanovuje kombinovaná nejistota měření, která je výsledkem kombinace obou typů nejistoty měření A i B. Výsledná kombinovaná standardní nejistota výsledků měření (veličiny x) je geometrickým součtem nejistoty typu A a nejistoty typu B dle následujícího vztahu:

$$u_c(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)} \quad (2.5)$$

Standardní kombinovaná nejistota u_c byla určena s pravděpodobností $P = 68\%$, tj. pro koeficient rozšíření $k = 1$. Pro jinou pravděpodobnost se nejistota měření upraví vynásobením koeficientem rozšíření vhodného rozdělení (viz. níže).

2.5 Nejistoty rozšířené

Jak již bylo v textu uvedeno, výše uvedeným postupem se získá standardní kombinovaná nejistota. Označení „standardní“ vyjadřuje, že při skládání této nejistoty byly použity hodnoty směrodatných odchylek. Za určitých podmínek je možno považovat rozdělení takto určené nejistoty za přibližně normální. Z toho je zřejmé, že takto vypočtená nejistota měření pokrývá asi 67 % možných variant výsledků. Jinými slovy až 1/3 výsledků měření se může ocitnout mimo takto stanovené pásmo nejistot.

Z metrologického hlediska je taková situace nepřijatelná, proto přistupujeme k vynásobení standardní nejistoty koeficientem rozšíření, který nám umožní získat pokrytí možných výsledků s vyšší pravděpodobností. V praxi se nejčastěji používá postup určení koeficientu rozšíření dohodou pro určitou odhadovanou pravděpodobnost pokrytí výsledku měření. Z paralely s normálním rozdělením jsou vžité dva základní koeficienty:

$k = 2$ pro pravděpodobnostní pokrytí přibližně 95%;

$k = 3$ pro pravděpodobnostní pokrytí přibližně 99,7%.

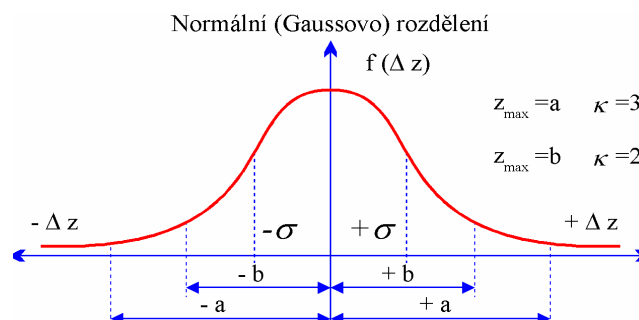
Rozšířenou nejistotu vypočteme ze vztahu:

$$U = k \times u_c \quad (2.6)$$

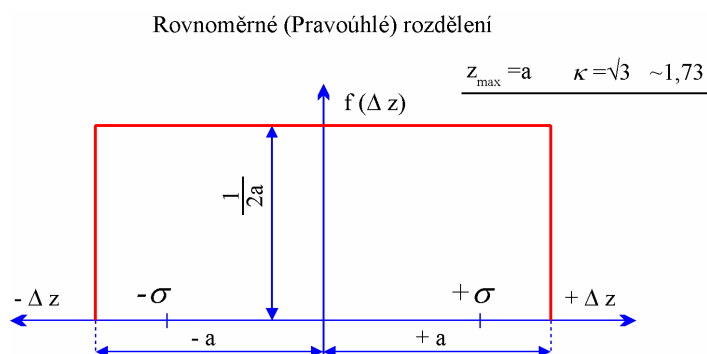
Druhy používaných rozdělení:

Normální rozdělení (Gaussovo) s $k = 2$ se použije tehdy, kdy je pravděpodobnost malých odchylek značná, zatímco pravděpodobnost velkých odchylek rovných mezím, velmi malá či zanedbatelná (pak $k = 3$, např. je-li zdrojem nejistoty měřicí přístroj od spolehlivého výrobce, u něhož lze předpokládat, že většina přístrojů bude zdrojem pouze malých chyb).

Normální rozdělení se též předpokládá pro výsledek výpočtu nejistoty typu A, případně pro výsledek výpočtu kombinované standardní nejistoty.

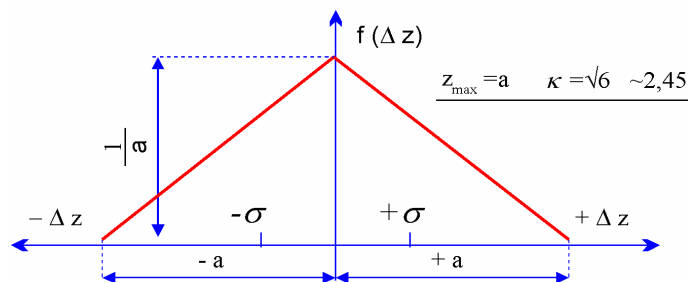


Rovnoměrné rozdělení s $k = 3^{1/2}$ (pravoúhlé) se použije v případech, kdy je stejná pravděpodobnost výskytu kterékoliv odchylky v celém daném intervalu. Tato aproximace se v běžné praxi využívá nejčastěji. Především proto, že většinou nejsou k dispozici dostatečné poznatky o rozdělení pravděpodobnosti výskytu odchylek, a tudíž není důvod dávat některým odchylkám přednost tím, že se použije jiný typ rozdělení.



Trojúhelníkové rozdělení s $k = 6^{1/2}$ (Simpsonovo) se používá k modelování situace v případech velmi podobných normálnímu rozdělení. Simpsonovo rozdělení lze použít například u specifikace stability v době mezi kalibracemi, pokud je dlouhodobým sledováním potvrzeno, že skutečné chyby jsou prakticky stále nižší, než výrobcem udávané hodnoty.

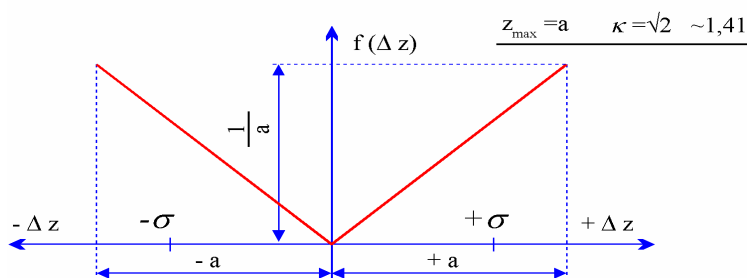
Trojúhelníkové (Simpsonovo) rozdělení



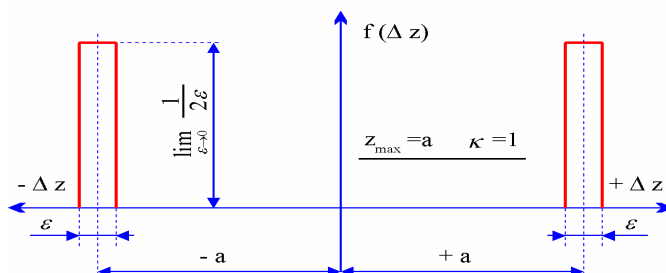
Bimodální rozdělení s $k = 2^{1/2}$ se aproximuje průběh nejistot, např. u těch měřicích přístrojů, které výrobce rozděluje do jistých tříd přesnosti, a tedy u některé střední třídy se nemohou vyskytovat přístroje ani s malými chybami (ty budou zařazeny do předcházející přesnější třídy), ani s velkými chybami (ty budou naopak v následující méně přesné třídy).

Lze jej použít pro hodnocení pravděpodobnosti chybného odečtu na noniu posuvky či mikrometru (pokud jsou rysky pevné a pohyblivé části proti sobě, pravděpodobnost omylu se blíží k nule, zatímco čím blíže je ryska pohyblivé části ke středu mezery mezi dvěma ryskami na pevné části, tím je pravděpodobnost omylu vyšší).

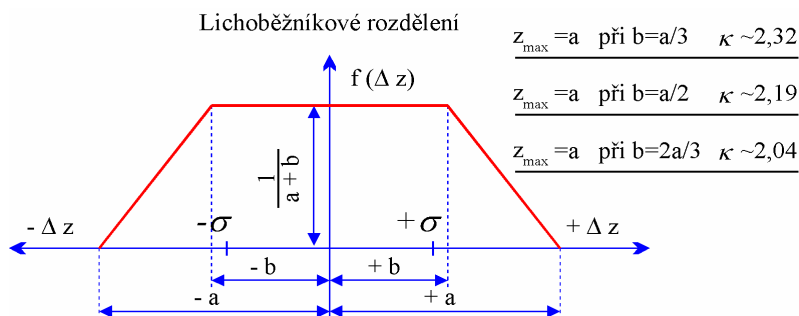
Bimodální - trojúhelníkové rozdělení



Bimodální - Diracovo rozdělení



Lichoběžníkové rozdělení s $k = 2,04 - 2,32$ se využívá v případě, kdy se v určité oblasti hodnot chová veličina podle rovnoměrného rozdělení, ale i mimo tuto oblast se též mohou vyskytovat hodnoty ovlivňující veličinu, ovšem s klesající pravděpodobností směrem k mezním hodnotám. (např. pokud je teplota v laboratoři regulovaná systémem klimatizace, který je dimenzován na běžné teplotní výkyvy venkovního prostředí, ale nepostačuje pokrýt teplotní extrémy).



2.6 Princip vyhodnocení nejistoty nepřímých měření

Nepřímá měření jsou měření, u kterých se měřená veličina Y vypočítá pomocí známé funkční závislosti z n veličin X_i , určených přímým měřením, jejichž odhady a nejistoty (případně i kovariance) jsou známy.

Platí tedy:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (2.7)$$

kde f je známá funkce.

Odhad y hodnoty výstupní veličiny Y lze stanovit ze vztahu:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.8)$$

kde $x_1, x_2, \dots, x_n$ jsou odhady vstupních veličin $X_1, X_2, \dots, X_n$.

Velikost standardní nejistoty je v případě, že vstupní veličiny jsou mezi sebou korelovány, dána vztahem:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^m A_i^2 \times u^2(x_i) + 2 \times \sum_{i=2}^m \sum_{j=1}^{i-1} A_i \times A_j \times u(x_{i,j}) \quad (2.9)$$

kde u_y je kombinovaná standardní nejistota veličiny y , $u(x_{i,j})$ jsou kovariance nejistoty mezi veličinami x_{ij} ,

A_i a A_k jsou převodové koeficienty aktuálních hodnot x a p (parametry veličin x).

$$u(x_{i,j}) = r(x_{i,j}) \times u(x_i) \times u(x_j) \quad (2.10)$$

Kde $r(x_{i,j})$ je součinitel korelace mezi veličinami x_i a x_j a $u(x_i)$, resp. $u(x_j)$ jsou jejich nejistoty.

3 Délkoměr SIP 1002M – charakteristika

V dnešní metrologii jsou jednoosé délkoměry poměrně často zastoupeny v oblasti měření různých typů součástí, měřidel či jejich různých komponentů. Tyto přístroje si získaly oblibu pro svou jednoduchou obsluhu a nízké nároky na provoz. Navíc některé starší typy délkoměrů prokázaly potenciál pro další modernizace a prodloužení jejich technického života. Různé typy a úrovně modernizací umožňují dokonce i zlepšovat měřicí schopnosti, jinak už někdy morálně zastaralých zařízení, při rozumných finančních nákladech.

Tyto tendence se projevují jak v různých strojírenských firmách, tak i v některých kalibračních laboratořích. Nejinak je tomu v laboratoři délky Českého metrologického institutu v Brně, kde se nachází délkoměr SIP 1002M. Zdá se tedy, že jednoosé délkoměry na prahu 21. století uhájí své místo na slunci i v době masivního nástupu „třísouřadnicové“ techniky.

3.1 Princip činnosti a konstrukce přístroje

Délkoměr SIP 1002M (obr. 3.1) je jednoosý přístroj určený k dotykovému statickému měření délkových rozměrů do maximální hodnoty 1 m. Jeho lože je tvořeno masivním ocelolitinovým odlitkem, který svojí konstrukcí a řešením zajišťuje dostatečnou tuhost a odolnost délkoměru (obr. 3.2). Stavěcí šrouby umožňují vyvážení přístroje v podélné i příčné ose.

Po celé délce lože jsou vedeny drážky pro vedení pojízdné pinoly s dotekem, tak i pro ustavení levého pevného dotyku. Pro regulaci posuvu pinoly se stavitelným dotykem slouží ozubený převod s ovládáním pomocí kola s kličkou, tzv. „soustruhového“ typu. Pinola je vybavena aretací umožňující mikroposuv.



Obr. 3.1 - celkový pohled na SIP 1002 M zprava



Obr. 3.2 – celkový pohled na SIP 1002 M a jednotku TESA (vedle LCD)

Stavitelný měřicí dotek na pinole (obr. 3.3) umožňuje nastavení měřicí síly v rozsahu 0,5 N až 1 N. Odměrovací systém délkoměru se skládá ze dvou základních prvků:

- ocelového pravítka SIP 500 mm umístěné v posuvné pinole;
- dvou snímacích kamer umístěných v loži délkoměru.

Ocelové měřítko (obr. 3.4) je nalisováno uvnitř v posuvné pinole a je orientováno s směrem dolů, tak aby bylo umožněno odečítání rysek snímacími kamerami (obr. 3.5) a zároveň nedocházelo k nežádoucímu osvitu. Na délkoměru jsou umístěny dvě snímací kamery (pro rozsah 0 mm – 500 mm a 500 mm – 1 000 mm) a umožňují přesné odečítání rysek ocelového pravítka. Přepínání kamer při přejezdu je řešeno v měřicím sw. Pohyblivý dotek délkoměru je vybaven analogovou jednotkou TESAtronic TTA20, ke které je připojen délkový snímač stejného výrobce. Tento snímač je spřáhnut s pohyblivým dotekem délkoměru SIP 1002M.



Obr. 3.3 – Dotečky pro měření vnějšího průměru

Obr. 3.4 – Otočená pinola při údržbě
(uprostřed je pravítko SIP)

Délkoměr umožňuje instalaci koutového odražeče laserového interferometru Packard 5529A či Renishaw ML 10 (obr. 3.5). Tento fakt znamená, že můžeme dosáhnout mnohem vyšší přesnosti měření než při klasickém měření délkoměrem, a navíc při použití bohatého vybavení délkoměru značně rozšíříme obálku možností aplikace laserového interferometru.



Obr. 3.5 – Snímací kamera v loži délkoměru



Obr. 3.6 – Umístění koutového odražeče

3.2 Možnosti použití a měřicí přípravky

Sestava délkoměru SIP 1002M obsahuje rozličné množství různých typů doteků a měřicích přípravků (obr. 3.7). Tyto doplňky jsou unifikovány pro celou typovou řadu délkoměrů firmy SIP. Dále pak se v praxi užívají různé druhy nastavných kalibrů, které jsou nutné pro přesné měření. Přípravky a doteky se umísťují buď na měřicí stolek, který poskytuje možnost nastavení i vyvážení ve třech osách, nebo přímo na základní dotyky délkoměru.

Délkoměr SIP 1002 M umožňuje provádět měření:

- vnějších průměrů válcových kalibrů, trnů, závitových drátků apod. (obr. 3.10);
- vnitřních průměrů nastavných kroužků, clonových kotoučů apod.;
- plochých součástí se vzájemně rovnoběžnými plochami, např. koncové měrky, etalonové folie, stupňové měrky, spárové měrky apod. (obr. 3.8);
- středních průměrů závitových trnů;
- středních průměrů závitových kroužků (obr. 3.9);
- kalibrace číselníkových a digitálních úchylkoměrů (i páčkových).

Pro vlastní nastavení délkoměru před měřením používáme:

- nastavný trn SIP o průměru 50 mm;
- nastavný kroužek SIP o průměru 40 mm;
- přesný válcový kalibr o průměru 4 mm;
- koncovou měrku o délce 5 mm.



Obr. 3.7 – Ukázka příslušenství



Obr. 3.8 – Nastavitelný měřicí stolek a měřicí přípravky

Nástavné trny a kalibry jsou kalibrovány a dále navázány na etalony ČMI Brno. Metrologické doplňky prokazují svou užitečnost v každodenní praxi, jsou plně kompatibilní s konstrukcí délkoměru SIP 1002 M a umožňují plnit nároky na přesná měření v co možná největší míře (viz. foto dále).

Jejich všestrannost vynikne zvláště při spojení s modernizovaným HW i SW počítačovým příslušenstvím, kterým byl tento délkoměr v nedávné době doplněn, což bude téma další kapitoly.



Obr. 3.9 – Měření závitových kroužků



Obr. 3.10 – Nástavný trn a jemné měřicí doteky

3.3 Používaný HW a SW

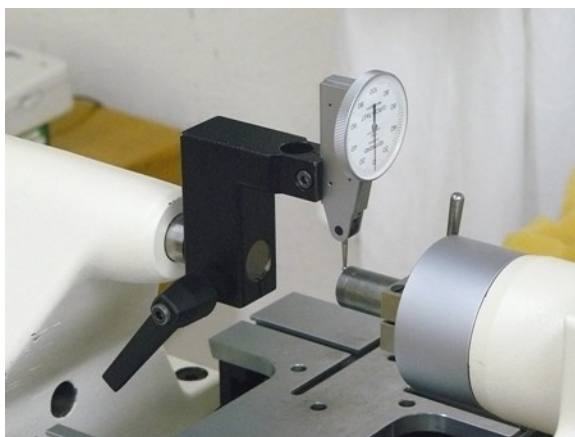
Délkoměr SIP 1002M byl původně osazen originálním elektronickým modulem SIP, zastaralým PC vybaveným procesorem Intel 486 a OS Win 3.1, ve kterém pracoval měřicí sw LMC německé firmy LW GmbH. Toto vybavení odpovídalo době svého vzniku (první polovina devadesátých let minulého století). Měřicí signál byl přenášen pomocí rozhraní RS 232C ze snímacích kamer do měřicích karet PCI, které byly umístěny ve výše uvedeném modulu. Výstup naměřených hodnot zajišťoval monitor starého PC, který neumožňoval přenos dat po síti, ani změnu jejich formátu. Původní měřicí sw LMC poskytoval pouze omezené prostředky k editaci, výstupu a správě naměřených dat.

Z těchto důvodů jsme po dohodě s vedením přistoupili k nutné modernizaci této sestavy (délkoměr, počítačový hw, počítačový sw), která již nesplňovala požadavky na soudobou měřicí techniku.

Výsledný upgrade spočíval v zástavbě nového PC s procesorem Intel Pentium IV a OS Windows XP. Odměřovací systém byl zachován, pouze došlo k náhradě modulu SIP za interní zařízení, které je součástí nového PC. Toto PC zároveň umožňuje on-line práci na firemní síti či na Internetu. Tak byla zachována „švýcarská“ metrologická kvalita délkoměru a zároveň byly vytvořeny základy pro další doplnění o sw produkty.

Těmito sw produkty použitých při modernizaci jsou:

- měřicí sw Comparator od české firmy TOPMES, s.r.o.;
- metrologický sw QMSOft od německé firmy LW GmbH.



Obr. 3.9 – Měření číselníkového úchylkoměru



Obr. 3.10 – Vyhodnocení měření v QMSoftu

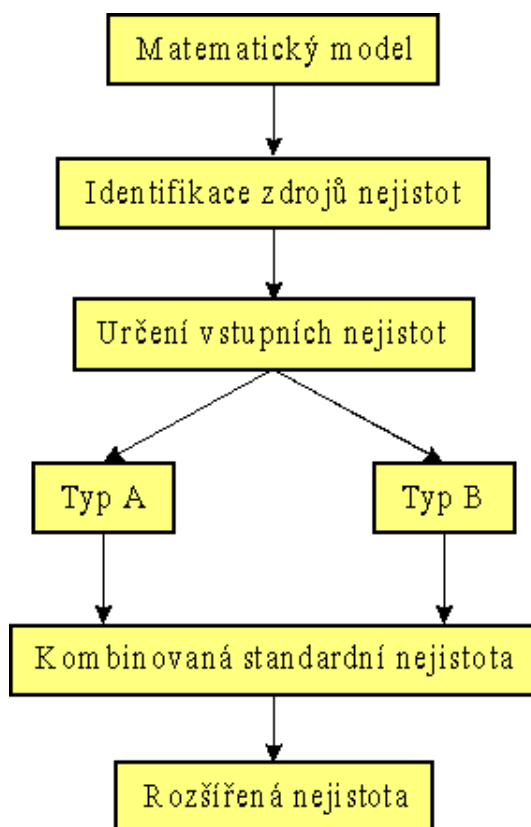
Měřicí sw Comparator je jednoduchý program, který slouží k vlastnímu měření, nastavování konstant apod. Umožňuje také snadný export naměřených dat do jiných aplikací používaných při měření na tomto délkoměru. Jedná se např. o textový či tabulkový editor a v neposlední řadě o metrologický sw QMSoft.

QMSoft je metrologický sw, který umožňuje jak samotné zpracování naměřených dat, tak i jejich následné vyhodnocení dle patřičných norem a poté i vytvoření výsledného kalibračního či jiného certifikátu. Je rozčleněn do jednotlivých modulů podle druhů měřidel a typů jejich zkoušek. Obsahuje také databázový modul pro zprávu měřidel. Tyto parametry usnadňují jak samotnou kalibraci, zejména odpadá zbytečná administrativa (papírový záznam o měření), tak i následné zpracování naměřených údajů a jejich rychlou a kvalitní prezentaci, ať už v papírové formě pro zákazníka (síťová tiskárna), nebo v elektronické podobě k archivaci.

4 Analýza nejistot při měření délkoměrem SIP1002M

Určování nejistot při měření na délkoměru má svůj nezanedbatelný význam jak z hlediska orientace na přání zákazníků a kvality vlastního měření, ale také z důvody snahy o splnění požadavků evropských a mezinárodních norem. Samozřejmě nemůžeme opomenout ani vliv akreditačních orgánů, jak z pohledu vlastního akreditačního procesu, tak i navazujících porovnávacích měření, kterých se zúčastní ostatní metrologické laboratoře, mnohdy i zahraniční.

Z těchto důvodů je patrná důležitost formálně správného a plnohodnotného zpracování nejistot při přesných délkových měření na délkoměru SIP 1002M. Při analýze nejistot se autor mohl opřít o již existující závazný dokument – pracovní postup č.633-MP-C029, který je majetkem ČMI Brno.



Obr. 4.1 – Postup při vyjadřování nejistot měření

4.1 Zdroje nejistot při měření délkoměrem

Nejistota měření odráží omezenou možnost znalostí hodnoty měřené veličiny. Kompletní znalost by vyžadovala obrovské množství informací. Faktory ovlivňující nejistotu a způsobující, že výsledek měření nemůže být charakterizován jedním číslem, nazýváme *zdroji nejistot*.

Na zdrojích nejistot měření se podílí celá řada faktorů a snaha o objektivní podchycení a správné vyhodnocení všech složek nejistot a jejich podílu na celkové nejistotě měření je, až na výjimky jednoduchých přímých postupů měření, poměrně náročnou a složitou záležitostí vyžadující objektivní analýzu.

Základní druhy zdrojů nejistot, se kterými musíme při praktických měření počítat:

- měřicí přístroj, měřicí zařízení, měřidlo (nejistota kontrolního prostředku);
- etalon (kalibrace);
- pracovník – operátor (obsluha měřicího stroje);
- kontrolní prostředí (vliv prostředí);
- výrobek – součást (vliv kontrolovaného objektu);
- metoda měření (postup při měření objektu).

1. Vlivy měřicího přístroje:

- rozlišitelnost odečtu z přístroje;
- vnitřní tření v přístroji;
- stabilita (časová specifikace) přístroje;
- dynamické chyby přístroje;
- zanedbané systematické chyby;
- vliv výměnných částí přístroje.

2. Vlivy etalonu:

- nejistota použitého etalonu;
- návaznost etalonu.

3. Vlivy operátora měřicího stroje:

- kvalifikace, motivace a pečlivost;
- fyzický a psychický stav kontrolora;
- náhodné omyly při odečítání nebo zápisu;
- nedodržení metodik při měření;
- paralaxa.

4. Vlivy kontrolního prostředí:

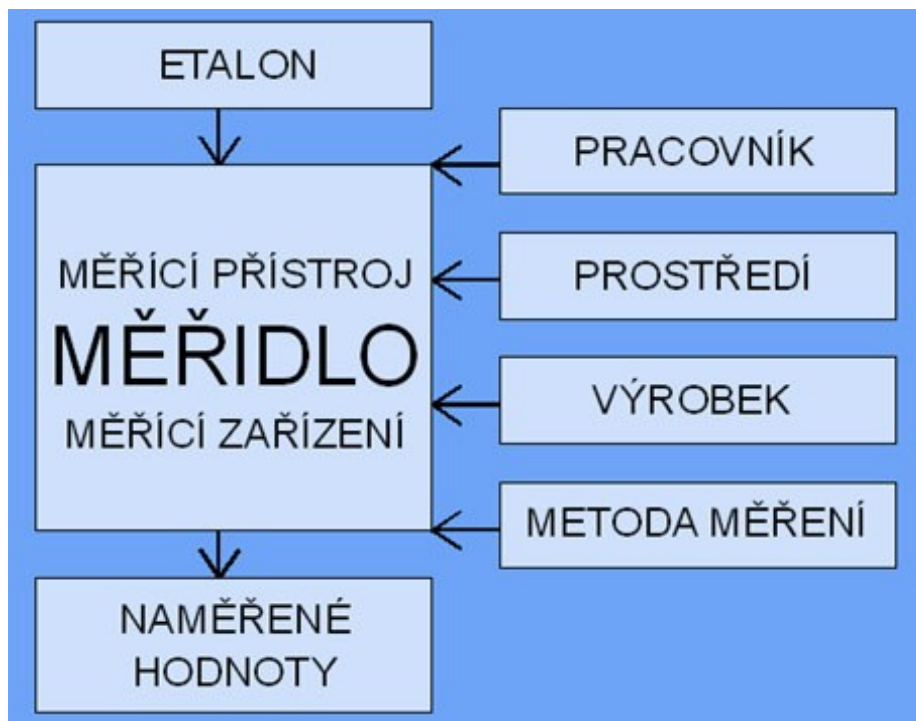
- teplota, teplotní odchylka;
- tlak, změna tlaku;
- relativní vlhkost;
- osvětlení, příp. jeho frekvence a tepelné vyzařování;
- čistota ovzduší, prostředí, prašnost.

5. Vlivy měřené součásti:

- odchylky tvaru a kvalita povrchu;
- vlastností materiálu (např. pružnost).

6. Vlivy metody měření:

- postup při měření objektu;
- provozní definice.



Obr. 4.2 – Zdroje nejistot při měření

Významné zdroje nejistot podrobněji:

Vliv rozptylu naměřených hodnot-nejistota typu A

Příspěvek k nejistotě se vypočítá podle vztahu : $u_A = s/\sqrt{n}$, kde s je směrodatná odchylka, a n je počet opakovaných měření. K výpočtu s lze použít kalkulátor se statistickými funkcemi, nebo MS Excel.

Vliv etalonu

V kalibračním listu etalonu musí být uvedena rozšířená nejistota U . Koeficient rozšíření k rovněž musí být uveden a je většinou roven dvěma. Nejistota U bývá někdy uvedena ve tvaru:

$$U = a + bL \quad (4.1)$$

kde L je měřená délka v metrech. Příspěvek k nejistotě se vypočítá podle vztahu:

$$u = U/k \quad (4.2)$$

Vliv rozlišovací schopnosti

Měřicí přístroje, měřicí metody i obsluha měřicích přístrojů má konečnou rozlišovací schopnost. Někdy může být pro daný účel záměrně snížena například z důvodu chvění měřené

soustavy. U přístrojů se stupnicí se bere podle schopnosti obsluhy (použití lupy) a velikosti nejmenšího dílku stupnice obvykle v rozmezí (0,1 až 1) dílku. U digitálních přístrojů může být přepínatelná a je rovna přinejmenším poslednímu digitu. Příspěvek k nejistotě se vypočítá podle vztahu :

$$u = R/\sqrt{3} \quad (4.3)$$

kde R je rozlišovací schopnost, a $1/\sqrt{3}$ je koeficient plynoucí z rovnoměrného rozdělení pravděpodobnosti.

Vliv rozdílu teplot hmotného etalonu a měřeného předmětu

Hmotný etalon a měřený předmět mají průměrnou hodnotu koeficientu teplotní roztažnosti α $\alpha = (\alpha_1 + \alpha_2)/2$ a různé teploty t_1 a t_2 .

Rozdíl délky způsobený teplotní roztažností je dán vztahem:

$$\Delta L = L\alpha(t_1 - 20) - L\alpha(t_2 - 20) = L\alpha(t_1 - t_2).$$

Příspěvek k nejistotě se vypočítá podle vztahu :

$$u = L\alpha(t_1 - t_2)/\sqrt{3} \quad (4.4)$$

kde L je měřená délka, α je průměrná hodnota koeficientu teplotní roztažnosti, $(t_1 - t_2)$ je maximální hodnota rozdílu teplot hmotného etalonu a měřeného předmětu a $1/\sqrt{3}$ je koeficient plynoucí z předpokladu rovnoměrného rozdělení pravděpodobnosti.

Vliv odchylky teploty od 20 °C

Hmotný etalon a měřený předmět mají průměrnou teplotu $t = (t_1 + t_2)/2$ a různé koeficienty teplotní roztažnosti α_1 a α_2 .

Rozdíl délky způsobený teplotní roztažností je dán vztahem:

$$\Delta L = L\alpha_1(t - 20) - L\alpha_2(t - 20) = L(t - 20)(\alpha_1 - \alpha_2) \quad (4.5)$$

Příspěvek k nejistotě se vypočítá podle vztahu:

$$u = L((t - 20)/\sqrt{3})((\alpha_1 - \alpha_2)/\sqrt{3}) \quad (4.6)$$

kde L je měřená délka, $(t - 20)$ je maximální hodnota odchylky teploty od 20 °C, $(\alpha_1 - \alpha_2)$ je maximální hodnota rozdílu koeficientů teplotní roztažnosti a $1/\sqrt{3}$ je koeficient plynoucí z předpokladu rovnoměrného rozdělení pravděpodobnosti.

4.2 Podrobná analýza standardních nejistot při měření délkoměrem

4.2.1 Podrobná analýza standardní nejistoty měření válcového kalibru

Pro analýzu výpočtu standardní nejistoty přímého měření byl vybrán broušený válcový kalibr o jmenovitém průměru 4 mm ze sady trnů pro měření závitů (výrobce Zbrojovka Brno). Vlastní měření probíhá pomocí jemných doteků (viz obr. 4.3). Před vlastním měřením je nutné nastavit doteky délkoměru pomocí nastavného kalibru SIP 50 mm nebo na „nulu“ a připravit měřidlo ke kalibraci v souladu s pracovním postupem 633-PM-C029, který je majetkem ČMI Brno.



Obr. 4.3 – měření válcového kalibru

Vlastní délkoměr je navázán na etalon – laserový interferometr Renishaw ML 10, jehož vlastní nejistota taktéž hraje svou roli při výpočtu standardní nejistoty měření. Měření kalibru se řídí akreditovaným pracovním postupem. Teplota okolí se snímá digitálním systémem Amet, který umožňuje správu a archivaci naměřených hodnot teploty. Nízká hodnota rozdílu teplot etalonového a kalibrovaného měřidla je zajištěna temperováním měřidla v klimatizované laboratoři (v rozsahu $20^{\circ}\text{C} \pm 0,3^{\circ}\text{C}$), opět v souladu s výše uvedeným pracovním postupem.

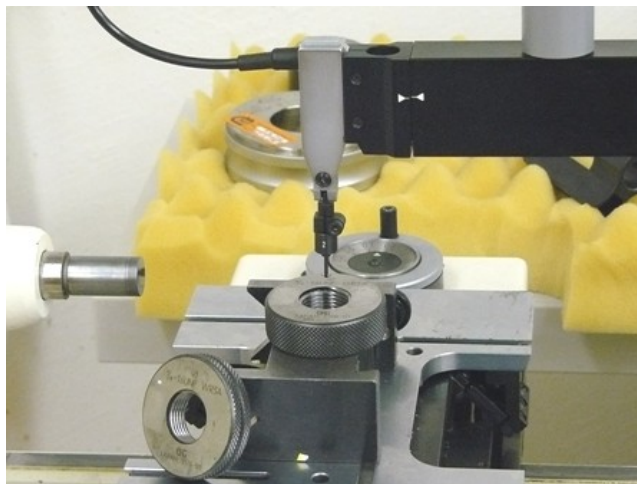
Naměřený rozměr získáme odečtením hodnoty z měřicího sw Comparator. Vlastní výpočet standardní nejistoty u tohoto přímého měření se provádí dle pravidel popsanych v kapitole 2 (dle dokumentu EA 4/02) a bude dopodrobna rozepsán v článku 4.4.1.

Tabulka 1: Příklad možného zápisu vstupních dat pro výpočet standardní nejistoty:

Jmenovitý rozměr	$L =$	1	m
Směrodatná odchylka z opakovaných měření	$s =$	0,2	μm
Počet opakovaných měření	$n =$	5	
Rozšířená nejistota etalonu pro koeficient rozšíření $k = 2$	$U_E =$	0,3	+
		0,4	$L \quad \mu\text{m}$
Vliv kalibrovaného měřidla (čtení-rozlišovací schopnost, měřicí síla, povrch)	$KM =$	0,1	μm
Koeficient teplotní roztažnosti	$\alpha =$	11,5	$\mu\text{m}/\text{m } ^{\circ}\text{C}$
Rozdíl koeficientů teplotní roztažnosti	$\pm\alpha =$	2	$\mu\text{m}/\text{m } ^{\circ}\text{C}$
Rozdíl teplot etalonového a kalibrovaného měřidla	$\pm t =$	0,19	$^{\circ}\text{C}$
Odchylka teploty od 20°C	$\pm t_{20} =$	0,3	$^{\circ}\text{C}$

4.2.2 Podrobná analýza standardní nejistoty měření závitového kroužku

Pro analýzu výpočtu standardní nejistoty nepřímého měření bylo vybráno měření středního průměru závitového kroužku. Toto měření se koná za pomoci teleskopického ramene vybaveného 2 dotekovým snímačem (viz obr. 4.4).

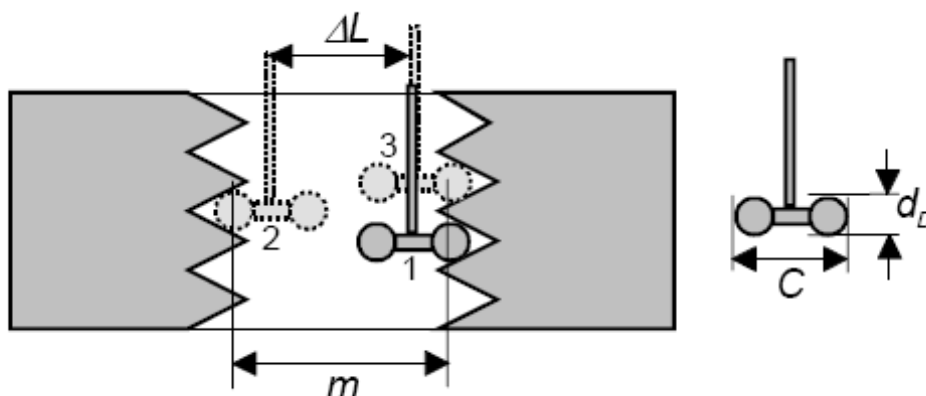


Obr. 4.4 – měření závitového kroužku

Naměřený rozměr ΔL získáme jako průměrnou hodnotu mezi body 1-2 a 2-3 (viz obr. 4.5):

$$\Delta L = (\Delta L_{1-2} + \Delta L_{2-3})/2 \quad (4.7)$$

Před vlastním měřením je nutné získat, či si ověřit konstantu C 2 dotekového snímače. Tuto konstantu zjistíme pomocí nastavného kroužku SIP nebo etalonové koncové měřky.



Obr. 4.5 – schéma měření závitového kroužku 2 dotekovým snímačem

Rozměr m je definován jako vzdálenost mezi středy kuliček doteků snímače o průměru d_D :

pro závitový kroužek (vnitřní závit) platí vztah: $m = \Delta L + C - d_D$ (4.8)

pro závitový kalibr (vnější závit) platí vztah: $m = \Delta L - C + d_D$ (4.9)

Vzhledem k tomu, že pro měření nelze vždy použít dotek s ideálním průměrem kuliček (omezený počet doteků v sadě SIP pro měření závitových kroužků), je nutné zvolit nejbližší možný průměr kuliček doteků v sadě. Vztah pro výpočet ideálního průměru doteků pro měření symetrického závitu je pro nekorelované veličiny:

$$d_0 = \frac{P}{2} \times \frac{1}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (4.10)$$

kde P je stoupání (rozteč) závitu a α označuje vrcholový úhel závitu.

Vztah pro výpočet středního průměru závitu vnitřního závitu (závitového kroužku) vychází z modelu měření na obr. 4.5 a ze vztahu 4.2.

$$D_2 = \Delta L + C + d_D \times \left(\frac{1}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} - 1 \right) - \frac{P}{2} \times \cot g\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (4.11)$$

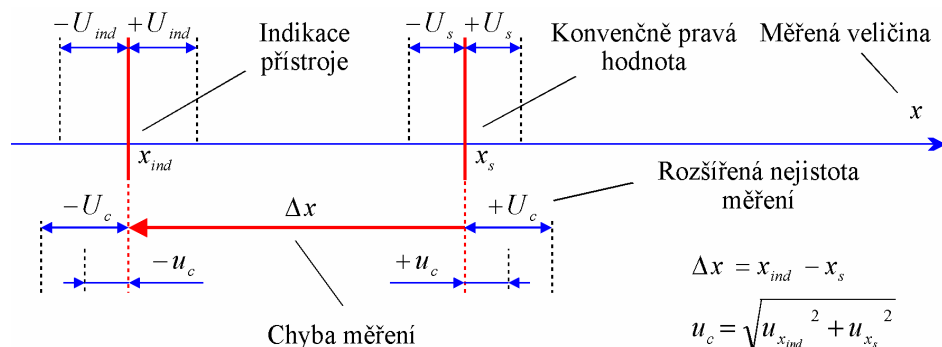
kde: P je stoupání (rozteč) závitu;
 α je vrcholový úhel závitu;
 d_D udává průměr kuliček doteku;
 ΔL je naměřený rozměr;
 C je konstanta doteku.

Vztah pro výpočet nejistoty měření středního průměru závitu vnitřního závitu vychází ze vztahu 4.9:

$$u^2(D_2) = u^2(\Delta L) + u^2(C) + c_{d_D}^2 u(d_D) + c_P^2 u^2(P) + c_{\alpha/2}^2 u^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (4.12)$$

kde: $u(\Delta L)$ je standardní nejistota spojená s měřením rozměru ΔL ;
 $u(C)$ je standardní nejistota spojená s měřením konstanty C 2 dotekového snímače;
 $u(d_D)$ je standardní nejistota spojená s měřením průměru d_D kuliček doteků snímače;
 $u(P)$ je standardní nejistota spojená s měřením stoupání P závitu kroužku;
 $u(\alpha/2)$ je standardní nejistota spojená s měřením vrcholového úhlu α závitu;
 $c_{(\alpha/2, P, d_D)}$ jsou koeficienty citlivosti;

4.3 Korekce chyb



Obr. 4.5 – znázornění vztahu mezi chybou a nejistotou

kde: U_{ind} je rozšířená nejistota indikace zkoušeného měřidla;

U_s je rozšířená nejistota konvenčně pravé hodnoty;

U_c je rozšířená nejistota měření;

Δx je chyba měření;

x_{ind} je indikace zkoušeného přístroje;

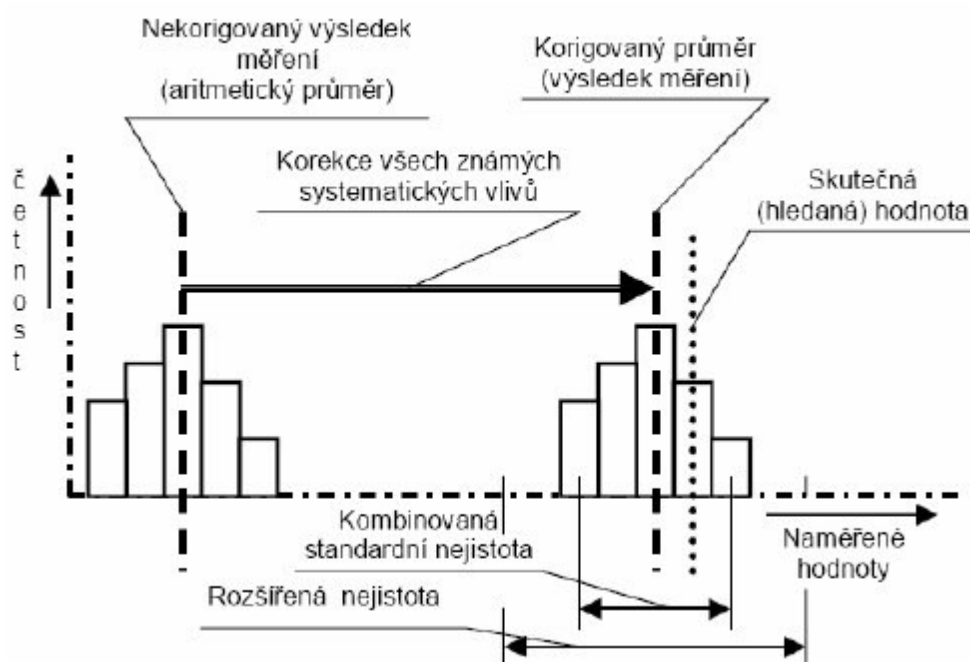
x_s je konvenčně pravá hodnota;

u_c je standardní kombinovaná nejistota chyby měření ($2 \times u_c = U_c$);

$u_{x_{ind}}$ je standardní nejistota hodnoty x_{ind} ;

u_{x_s} je standardní nejistota hodnoty x_s .

Jestliže rozpoznáme negativní vlivy na měření, můžeme s výhodou korigovat podstatnou část systematických vlivů. To platí nejen o klasických systematických chybách, ale i o nejistotách, zejména pak o nejistotách vyhodnocovaných pomocí metod typu B. Odstranění nebo alespoň zmírnění jejich negativních vlivů na výsledek měření se projeví významným zpřesněním viz obr 4.6.



Obr. 4.6 – zpřesnění výsledků měření pomocí korekce

4.4 Příklad praktického výpočtu nejistot

4.4.1 Postup stanovení rozšířené nejistoty měření válcového kalibru

Tabulka 2: Naměřené hodnoty

Číslo měření n	1	2	3	4	5
Naměřená hodnota	4,000 8	4,000 4	4,000 5	4,000 3	4,000 4

Výpočet aritmetického průměru:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 4,000\,48 \text{ mm} \quad (4.13)$$

Výpočet nejistoty způsobem A:

$$u_A(x) = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0,085 \text{ } \mu\text{m} \quad (4.14)$$

Vzhledem k tomu, že počet měření byl menší než 10, a i když je možno provést kvalifikovaný odhad na základě zkušeností z minulých měření, rozšíříme standardní nejistotu typu A o koeficient k_s , jehož velikost závisí na počtu měření (viz tabulka).

Tabulka 3: Hodnoty koeficientů četnosti měření

Počet měření n	9	8	7	6	5	4	3	2
Koeficient k_s	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,7	2,3	7,0

Výsledná nejistota typu A rozšířená o koeficient k_s :

$$u_A = u_{(A)}(x) \times k_s = 0,120 \mu\text{m} \quad (4.15)$$

Tabulka 4: Výpočty příspěvků k nejistotě

Veličina	odhad	Nejistota	Rozdělení	Koeficient citlivosti	Příspěvek k nejistotě
u_a		0,120 μm	normální	1 μm	0,120 μm
l_s	0	0,158 μm	normální	1 μm	0,158 μm
l_{ix}	0	0,058 μm	normální	1 μm	0,058 μm
l_t	0	0,11 $^{\circ}\text{C}$	rovnoměrné	0,046 $\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$	0,05 μm
l_a	0	0,2 $\mu\text{m}/\text{m}$	rovnoměrné	0,004 m	0,008 μm
Výsledná nejistota					$u_c = 0,213 \mu\text{m}$

Přehled veličin příspěvků k nejistotě použitých v předcházející tabulce:

- l_s vliv použitého etalonu $0,3 \mu - 10^{-6} + 0,4L$
- l_{ix} vliv rozlišovací schopnosti 0,1 μm
- l_t vliv rozdílu teplot etalonu a stroje $L\alpha(t_1 - t_2) / \sqrt{3}$
- l_a vliv odchylky teploty od 20 $^{\circ}\text{C}$ $L((t - 20) / \sqrt{3})((\alpha_1 - \alpha_2) / \sqrt{3})$
- Výsledná nejistota - výsledná nejistota měření válcového kalibru

Výsledná rozšířená nejistota:

$$U = u_c \times k = 0,43 \mu\text{m} \quad (4.16)$$

kde k je koeficient rozšíření.

Tabulka 5: Zadané vstupní hodnoty výpočtu

Měřená délka	$L =$	0,004	m
Směrodatná odchylka z opakovaných měření	$s =$	0,192	μm
Počet opakovaných měření	$n =$	5	
Rozšířená nejistota etalonu pro koeficient rozšíření $k = 2$	$U_E =$	0,3	+
		0,4	L μm
Rozlišovací schopnost	$D =$	0,1	μm
Koeficient teplotní roztažnosti	$\alpha =$	11,5	$\mu\text{m} / \text{m } ^\circ\text{C}$
Rozdíl koeficientů teplotní roztažnosti	$\alpha_1 - \alpha_2 =$	2	$\mu\text{m} / \text{m } ^\circ\text{C}$
Rozdíl teplot etalonového a kalibrovaného předmětu	$t_1 - t_2 =$	0,19	$^\circ\text{C}$
Odchylka teploty od $20\text{ }^\circ\text{C}$	$t_{20} =$	0,3	$^\circ\text{C}$

4.4.2 Postup stanovení rozšířené nejistoty měření závitového kroužku

V tomto případě se jedná o nepřímé měření a tak výpočet výsledné nejistoty se řídí dokumentem EA 10/10. Při měření závitového kroužku se provádí odečet naměřené hodnoty pouze jednou. Je to z důvodu jak technických (použití sw QMSoft), tak i požadavků na přesnost měření kroužku.

Pro kalibraci byl zvolen závitový kroužek Dobrý, s metrickým závitem M36 x 4, výrobce Emuge, s nominálními hodnotami:

- střední průměr závitu $D_2 = 33,402\text{ mm}$
- stoupání závitu $P = 4\text{ mm}$

- vrcholový úhel závitu $\alpha = 60^\circ$

Měřidlo bylo kalibrováno pomocí snímače s 2 dotykovým nástavcem ze sady č. 4, který je osazený kuličkami o průměru $d_D = 2,482$ mm (ideální průměr $d_0 = 2,3094$ mm). Konstanta 2 dotekového snímače je $C = 15,466$ mm. Měřicí síla byla nastavena na 0,2 N, výrobní tolerance vrcholového úhlu $\alpha/2 = 10'$.

Tabulka 6: Naměřené hodnoty

Číslo měření n	1	2	3	4	5
Naměřená hodnota	33,401 8	33,401 9	33,401 8	33,401 7	33,401 8

Rozšířená nejistota naměřeného rozměru L byla získána výpočtem, pomocí modulu pro přímá měření. Platí tedy $u_a = 1,2$ μm .

Tabulka 7: Výpočty příspěvků k nejistotě

Veličina	Odhad	Nejistota	Rozdělení	Koeficient citlivosti	Příspěvek k nejistotě
u_L	0	1,2 μm	normální	1 μm	1,200 μm
l_C	0,01 μm	0,007 μm	normální	1 μm	0,007 μm
l_{dD}	0,3 μm	0,4 μm	normální	2,012 μm	0,805 μm
l_P	0	0 μm	normální	0,078 μm	0,000 μm
$l_{\alpha/2}$	10'	5,808'	rovnoměrné	1 $\mu\text{m}/\mu\text{rad}$	0,046 μm
Výsledná nejistota		1,682 1 μrad			$u_c = 1,446$ μm

Přehled veličin příspěvků k nejistotě použitých v předcházející tabulce:

- u_L rozšířená nejistota měření rozměru L
- l_C vliv konstanty snímače
- l_{dD} vliv průměru kuliček doteku
- l_P vliv stoupání závitu
- $l_{\alpha/2}$ vliv vrcholového úhlu závitu
- Výsledná nejistota - výsledná nejistota měření středního závitu D_2

Výsledná rozšířená standardní nejistota:

$$U = u_c \times k = 2,89 \mu\text{m} \quad (4.17)$$

kde k je koeficient rozšíření.

Tabulka 8: Zadané vstupní hodnoty výpočtu

Naměřený rozměr	$L =$	33,4018	mm
Rozšířená nejistota měření rozměru L	$u_L =$	1,2	μm
Počet opakovaných měření	$n =$	5	
Konstanta doteku	$C =$	15,466	mm
Skutečný průměr kuliček doteku	$d_D =$	2,482	mm
Rozšířená nejistota měření průměru kuliček d_D	$u_L =$	0,4	μm
Ideální průměr kuliček doteku	$d_0 =$	2,309	mm
Stoupání závitu	$P =$	4	mm
Rozšířená nejistota měření stoupání závitu (v případě, že se měří)	$u_L =$	0	μm
Vrcholový úhel závitu	$<\alpha =$	60	$^{\circ} \pm 10'$

5 Zapracování automatického vyhodnocení nejistot do programového vybavení

Automatické vyhodnocování nejistot měření navazuje na předešlé příklady výpočtů nejistot, reflektuje na užívané pracovní postupy a splňuje tyto podmínky:

- jednoduchá obsluha;
- minimální náklady na používaný sw a hw;
- jednoduchá možnost editace;
- univerzálnost (možnost použití na dalších OI ČMI v ČR);
- možnost přenosu naměřených dat z měřicího sw Comparator;
- možnost přenosu výsledků nejistot z modulu do kalibračního protokolu.

Výpočtový modul je vytvořen v souboru aplikace MS Excel. Tento produkt byl vybrán z důvodu jeho masivního rozšíření ve všech Oblastních Inspektorátech ČMI v tuzemsku a jeho všeobecnou znalost použití. Umožňuje rychlé a přesné zjištění hodnoty nejistoty daného měření. Je dostatečně univerzální, aby mohl být použit pro jiné typy délkoměrů, než je SIP 1002M. Popřípadě je možné využití modulu po určité úpravě i pro jiná délková měření.

Výhodou je také možnost on-line provozu při vlastním procesu *měření – vyhodnocení – výpočet nejistoty – tvorba kalibračního certifikátu*. V současné době již oba níže uvedené soubory fungují v délkové laboratoři ČMI v Brně.

5.1 Výpočtový modul pro nejistotu délkového měření

Tento modul umožňuje výpočet nejistoty měření při přímých měření délky pomocí délkoměru SIP 1002M, tzn. nejen při měření průměru válcového kalibru, ale i mnoha jiných měření s použitím bohatého vybavení délkoměru, za předpokladu splnění podmínky přímého měření.

Vstupní hodnoty měření délky:

Měřená délka $L = 0,004$ m

Směrodatná odchylka z opakovaných měření $s = 0,192$ μ m

Počet opakovaných měření $n = 5$

Rozšířená nejistota etalonu pro koeficient rozšíření $k = 2$
 $U_e = 0,3 + 0,4 L$ μ m

Rozlišovací schopnost $D = 0,1$ μ m

Koeficient teplotní roztažnosti $\alpha = 11,5$ μ m/m $^{\circ}$ C

Rozdíl koeficientů teplotní roztažnosti $\alpha_1 - \alpha_2 = 2$ μ m/m $^{\circ}$ C

Rozdíl teplot etalonového a kalibrovaného předmětu $t_1 - t_2 = 0,19$ $^{\circ}$ C

Odchylka teploty od 20 $^{\circ}$ C $t - 20 = 0,3$ $^{\circ}$ C

Velikost Odhad	Standardní nejistota	Rozdělení	Citlivostní koeficient	Příspěvek k nejistotě
1* ... nejistota typu A	0,086 μ m	norm.	1	0,086 μ m
2* ... vliv etalonu	0,151 μ m	norm.	1	0,151 μ m
3* ... vliv rozlišovací schopnosti	0,058 μ m	rovn.	1	0,058 μ m
4* ... vliv rozdílu teplot etalonového a kalibrovaného předmětu	0,11 μ m	rovn.	0,046 μ m/ $^{\circ}$ C	0,005 μ m
5* ... vliv odchylky teploty od 20 $^{\circ}$ C	0,2 μ m/m		0,004 m	8E-04 μ m
6* ... výsledná nejistota měření délky				0,183 μ m

Výsledná rozšířená nejistota: $U = 0,37$ μ m

Vysvětlivky:

1* ... nejistota typu A

2* ... vliv etalonu

3* ... vliv rozlišovací schopnosti

4* ... vliv rozdílu teplot etalonového a kalibrovaného předmětu

5* ... vliv odchylky teploty od 20 $^{\circ}$ C

6* ... výsledná nejistota měření délky

Obr. 5.1 – Výpočtový modul pro nejistotu délkového měření

5.2 Výpočtový modul pro nejistotu měření závitového kroužku

Tento modul umožňuje výpočet nejistoty měření při kalibraci závitového kroužku pomocí délkoměru SIP 1002M a jeho příslušenství. Od modulu pro válcový kalibr se liší zejména tím, že se jedná o nepřímé měření za pomoci již dříve zmíněného 2 dotykového snímače. Jedná se především o zahrnutí vyššího počtu vlivů na nejistotu měření. Modul pro vyhodnocování nejistot měření závitového navazuje na předešlé příklady výpočtů nejistot (viz. kapitola č.4).

Vstupní hodnoty měření střešního průměru závitu D₂:

Naměřený rozměr L = 33,4018 mm

Rozšířená nejistota měření rozměru L u = 1,2 μm

Počet opakovaných měření n = 5

Konstanta dotyku C = 15,466 mm

Skutečný průměr kuliček dotyku d₀ = 2,482 mm

Rozšířená nejistota měření průměru kuliček d₀ u = 0,4 μm

Ideální průměr kuliček dotyku d₀ = 2,309 mm

Stoupání závitu P = 4 mm

Rozšířená nejistota měření stoupání závitu (v případě, že se měří) u = 0 μm

Vrcholový úhel závitu α = 60° ± 10°

Velikost	Odhad	Standardní nejistota	Rozdělení	Citlivostní koeficient	Příspěvek k nejistotě
1*	0,002 μm	1,2 μm	norm.	1 μm	1,2 μm
2*	0,3 μm	0,4 μm	norm.	2,012 μm	0,805 μm
3*	0 μm	0 μm	norm.	-0,078 μm	0 μm
4*	0,01 μm	0,007 μm	norm.	1 μm	0,007 μm
5*	10°	5,808 min = 1,882 μrad	rovnom.	0,027 μm/μrad	0,046 μm
6*					1,446 μm

Výsledná rozšířená nejistota: **U = 2,9 μm**

Vysvětlivky:

1* ... Rozšířená nejistota měření rozměru L

2* ... vliv průměru kuliček dotyku

3* ... vliv stoupání závitu

4* ... List1 / List2 / List3 /

Obr. 5.2 – Výpočtový modul pro nejistotu měření závitového kroužku

Vlastní soubory MS Excel jsou uloženy na přiloženém datovém disku CD.

6 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo ukázat výpočet nejistoty měření aplikovaný v praxi. Uvedený příklad praktické aplikace se zabýval analýzou provedeného měření a zjištění podstatných zdrojů nepřesností, a tím i příspěvků nejistot měření s jejich detailní analýzou.

K uvedení čtenáře do problematiky práce obecně zopakovala problematiku nejistot měření z pohledu terminologie a jejich definic. Dále pak byl popsán použitý měřicí systém délkoměru SIP 1002M.

Hlavní náplní vlastní práce byla analýza nejistot měření na délkoměru SIP 1002M, určení podstatných zdrojů nejistot měření, které mají vliv na konečný výsledek měření, ukázka praktických výpočtů nejistoty měření a vytvoření výpočtových modulů pro nejistoty dvou typů měření.

S velkou pravděpodobností se vytvořené výpočtové moduly stanou vítaným pomocníkem v každodenní metrologické praxi při práci se stejnými nebo obdobnými délkoměry. Úspora času, tedy i finančních prostředků bude určitě kladně hodnocena, stejně jako možnost univerzálního použití na ostatních partnerských inspektorátech ČMI.

Bakalářská práce může sloužit jako cenný zdroj informací pro kolegy, kteří se s aparátem nejistot délkových měření teprve seznamují a rovněž jako školicí materiál pro nové pracovníky ČMI Brno.

Naměřené výsledky dokazují, že i v současné době lze plnohodnotně provozovat starší měřicí techniku, která prokázala svou vysokou metrologickou hodnotu, a po dílčí modernizaci splňují i nároky na výkonnost současných měřicích přístrojů. Provedená modernizace dále umožňuje aplikaci výpočtu nejistoty měření přímo v každodenní metrologické praxi.

7 Užitá literatura

- [1] Chudý, V.; Palenčár, R.; Kureková, E.; Halaj, M.; Meranie technických veličín, 1.vydání Bratislava : Vydavateľstvo STU, 1999. 688s. ISBN 80-227-1275-2;
- [2] Vdoleček František; Technická měření; Studijní opory, VUT Brno, 2002;
- [3] Čech Jaroslav; Pernikář Jiří; Podaný Kamil: Strojírenská metrologie; 4.vydání, CERM, 2005, ISBN 80-214-3070-2;
- [4] Pernikář Jiří; Tykal Miroslav: Strojírenská metrologie II; 1.vydání, CERM, 2006, ISBN 80-214-3338-8;
- [5] EAL Committee 2: EA 4/02 Vyjadřování nejistot měření při kalibracích;
- [6] EAL Committee 2: EA 10/10 Měření středních průměrů symetrických závitů;
- [7] MPA 10-01-01 Všeobecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří, Český institut pro akreditaci, 1.vydání, 2000;
- [8] ČSN P ENV 13005 Pokyn pro vyjadřování nejistoty měření (GUM) (01 4105);
- [9] Design Tech: otevřený informační portál; Petr Zahradka – CAQ; Nejistoty měření, 5.5. 2008;
- [10] www.cmi.cz oficiální stránky ČMI;
- [11] www.cai.cz oficiální stránky ČIA.

8 Seznam příloh

Příloha č. 1 – Protokol z měření válcového kalibru;

Příloha č. 2 – Protokol z měření závitového kroužku;

Příloha č. 3 – Přiložené CD;

- Výpočtový modul nejistoty měření válcového kalibru;
- Výpočtový modul nejistoty měření závitového kroužku;
- Bakalářská práce ve formátu .pdf;
- Fotopříloha – délkoměr SIP 1002M.