

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A
ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING INSTITUTE OF
PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

VYJADŘOVÁNÍ NEJISTOTY U PŘESNÝCH DÉLKOVÝCH MĚŘENÍ II

EXPRESSING UNCERTAINTY OF ACCURATE LENGTH MEASUREMENT II

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAN ŠRÁMEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR KOŠKA, Ph.D.

BRNO 2011

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 5
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

Abstrakt

Diplomová práce má za úkol vypracovat podrobnou analýzu nejistot měření při kalibraci koncových měrek na interferometru Tesa NPL, doplněnou o praktický příklad výpočtu nejistoty měření. Součástí diplomové práce je také zapracování automatického vyhodnocení nejistot do programového vybavení přístroje Tesa NPL. Měření bylo prováděno na modernizovaném přístroji a tato modernizace je v práci taktéž popsána. 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 Tesa NPL measure instrument. 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 (CMI) 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, interferometrický přístroj na kalibraci koncových měrek

Keywords

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

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 7
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

Poděkování

Autor děkuje v první řadě své rodině, svému zaměstnavateli ČMI Brno a svým spolupracovníkům z oddělení délky na ČMI OI Brno, kteří mu poskytli zázemí a prostor k práci na této diplomové práci.

Dále pak:

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

Ing. Petru Koškovi, PhD., mému odbornému vedoucímu diplomové práce;

Mgr. Magdaleně Karelové za překlad abstraktu.

Obsah:

- 1 Úvod
- 2 Vytvoření modelu pro odhad standardní kombinované nejistoty při kalibraci koncových měrek
 - 2.1 Souhrn
 - 2.2 Způsob vyhodnocování nejistot měření a jejich typy
 - 2.3 Vyhodnocení standardních nejistoty způsobem A a B
 - 2.4 Kombinovaná nejistota měření
 - 2.5 Rozšířená nejistota
- 3 Interferometrický přístroj Tesa NPL – charakteristika
 - 3.1 Souhrn
 - 3.1 Princip činnosti a konstrukce přístroje
 - 3.2 Princip činnosti a konstrukce přístroje
 - 3.3 Použití modernizovaného HW a SW
- 4 Analýza nejistot při měření na přístroji Tesa NPL
 - 4.1 Souhrn
 - 4.2 Zdroje nejistot při interferometrickém měření
 - 4.3 Podrobná analýza nejistot při měření na přístroji Tesa NPL
 - 4.4 Příklad praktického výpočtu nejistot
- 5 Zpracování automatického vyhodnocení nejistot do programového vybavení
 - 5.1 Souhrn
 - 5.2 Výpočtový modul MS Excel pro nejistotu měření na přístroji Tesa NPL
- 6 Závěr
- 7 Užitá literatura a zdroje
- 8 Seznam příloh

1 Úvod

Tato diplomová práce má za úkol vypracovat podrobnou analýzu nejistot měření při kalibraci koncových měrek na interferometru Tesa NPL, vytvoření modelu pro odhad standardní kombinované nejistoty, kvantifikaci jednotlivých složek standardní nejistoty doplněnou o praktický příklad výpočtu nejistoty měření. Její součástí je i výpočtový modul pro automatické zjišťování hodnot nejistot při interferometrickém 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 jsou v České republice v rámci harmonizace soustavy norem s evropskými normami EN a s mezinárodními normami ISO/IEC 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 pracovník laboratoře se dnes při vyhodnocování nejistot měření nebo při statistické přejímce neobejde bez potřebných znalostí matematické statistiky. Řada metrologů starší generace, kteří jsou mnohdy velmi dobrými praktiky, tyto znalosti někdy chybí, jelikož tato vyhodnocení neprováděli.

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

Současným 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 ze 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.

Tato diplomová práce obsahuje jednak obecný přístup k výpočtu a tvorbě nejistot měření, ale i s praktickou ukázkou jejich použití při daném měření délky. Toto měření bylo realizováno na půdě Českého metrologického institutu, konkrétně v jedné z laboratoří oddělení měření délky Oblastního inspektorátu ČMI v Liberci, konkrétně na modernizovaném interferometrickém přístroji Tesa NPL.

2 Vytvoření modelu pro odhad standardní kombinované nejistoty při kalibraci koncových měrek

2.1 Souhrn

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

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

Základem určování nejistot je statistický přístup. Předpokládá se určité rozdělení pravděpodobností, které popisuje, jak se může udávaná hodnota lišit od skutečné hodnoty, resp. pravděpodobnost s jakou se v intervalu daném nejistotou skutečná hodnota může nacházet. V případě, že jde o měření jedné veličiny, na výstupu modelu měření označené Y , potom lze model měření popsat výrazem :

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_m) = f(X) \quad (2.1)$$

kde $X_1, X_2, \dots, X_m$ jsou vstupní veličiny a jejich standardní nejistoty jsou $u_{x1}, u_{x2}, \dots, u_{xm}$

Nejistota veličiny Y je dána vztahem nazvaným také všeobecný neboli kovarianční zákon šíření nejistoty:

$$u_y^2(x) = \sum_{j=1}^m A_j^2 u_{xj}^2 + \sum_{j=1; k < j}^m A_j A_k u_{xj} u_{xk} r_{xj,k} \quad (2.2)$$

kde A_j , A_k jsou převodní koeficienty modelu měření (citlivosti), které jsou dány vztahy:

$$A_j = \frac{\partial f(X)}{\partial X_j}; A_k = \frac{\partial f(X)}{\partial X_k} \quad (2.3)$$

a r_{xk} je korelační koeficient, který udává statistickou závislost (korelaci) mezi oběma veličinami X_j a X_k .

Pokud jsou vstupní veličiny nekorelované (koeficient korelace se blíží nule), potom se rovnice dá upravit na tzv. Gaussův zákon šíření nejistot:

$$u_y^2(x) = \sum_{j=1}^m A_j^2 u_{xj}^2 \quad (2.4)$$

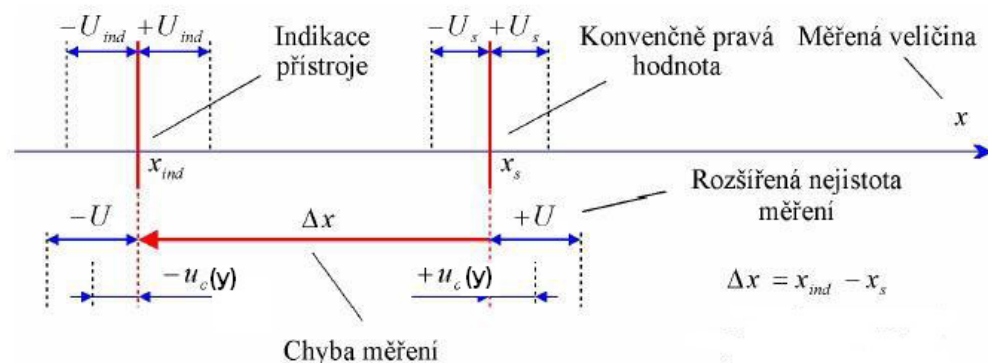
Další možnou formou zápisu rovnice 2.4 je (dle zdroje <http://eso.vscht.cz/>) je tento tvar:

$$u_y^2(x) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)$$

2.2 Způsob vyhodnocování nejistot měření a jejich typy

Účelem stanovení nejistot při měření je zjištění intervalu hodnot okolo výsledku měření, který lze přiřadit k hodnotě měřené veličiny. Nejistota měření zjištěná při kalibraci je základem pro zjištění nejistot měření ve výrobě, kontrole a zkušebně.

Nejistoty měření se do běžné praxe kalibračních laboratoří dostaly poměrně nedávno – na počátku 90.let minulého století. V roce 1990 byl vydán dokument WECC 19/90, který představoval jeden z prvních jednotících předpisů pro nejistoty, závazný pro akreditované laboratoře v rámci organizace WECC (Západoevropského kalibračního sdružení). V roce 1993 byl organizací International Organization for Standardization vydán dokument Guide the expression of uncertainty in measurement, známý pod zkratkou GUM. Krátce poté je již výsledek bez uvedené nejistoty považován za naprosto nedostačující. Vztah mezi chybou měření a nejistotou lze dokumentovat i na grafickém znázornění výsledku měření při kalibraci:



Obr. 1.1 Grafické znázornění výsledků měření při kalibraci (zdroj: www.designtech.cz)

Legenda:

- U_{ind} je rozšířená nejistota indikace zkoušeného měřidla;
- U_s rozšířená nejistota konvenčně pravé hodnoty;
- U_c rozšířená nejistota měření;
- Δx chyba měření;
- x_{ind} indikace zkoušeného přístroje;
- x_s konvenčně pravá hodnota;
- $u_c(y)$ standardní kombinovaná nejistota chyby měření ($2 \times u_c = U_c$);
- $u_{x_{ind}}$ standardní nejistota hodnoty x_{ind} ;
- u_{x_s} standardní nejistota hodnoty x_s .

2.3 Vyhodnocení standardní nejistoty způsobem A a B

2.3.1 Souhrn

Dle definice je standardní 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.)

Postupy určování kombinovaných a rozšířených nejistot se budou lišit podle toho, zda se jedná o přímé nebo nepřímé měření. Interferometrické měření při kalibraci koncových měrek je měření přímé, tudíž se jím budeme dále podrobněji zabývat.

2.3.2 Stanovení standardní nejistoty typu A při přímém měření

Standardní nejistota typu A (u_a) při přímém měření se stanoví z n opakovaných a nezávislých měření stejné hodnoty a za stejných podmínek. Odhad měřené hodnoty veličiny X je dán výběrovým průměrem z naměřených hodnot $x_1, x_2, \dots, x_n$. Výběrový průměr se určí ze vztahu:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.5)$$

Výběrová směrodatná odchylka s_x se vypočítá z naměřených hodnot (náhodný výběr) dle vztahu:

$$s_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.6)$$

Výběrová směrodatná odchylka s_x charakterizuje rozptýlení naměřených hodnot kolem výběrového průměru $\bar{x}$. Výběrový průměr udává odhad hodnoty měřené veličiny a poněvadž se určuje z náhodného výběru, má náhodný charakter. Rozptyl výběrových průměrů se stanoví ze vztahu:

$$s_{\bar{x}}^2 = \frac{1}{n} s_x^2 \quad (2.7)$$

Výběrová směrodatná odchylka výběrových průměrů $s_{\bar{x}}$ charakterizuje rozptyl hodnot výběrových průměrů a je proto zvolena jako míra nejistoty výběrového průměru $\bar{x}$ (míra nejistoty odhadu hodnoty veličiny X).

Standardní nejistota typu A je v tomto případě rovna směrodatné odchylce výběrových průměrů:

$$u_A(x) = s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.8)$$

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

$$u_A(x) = k_s s_{\bar{x}} \quad (2.9)$$

kde k_s je koeficient, jehož hodnota závisí na počtu měření n , jak ukazuje následující tabulka.

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

Tab. 1 Koeficienty pro menší počet měření než 10

2.3.3 Stanovení standardní nejistoty typu B při přímém měření

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;
- použitými metodami měření;
- nejistot referenčních údajů převzatých s příruček a jiných dokladů.

Při určování nejistoty způsobem 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:

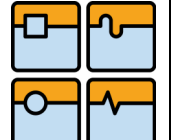
$$u_B(z_j) = \frac{z_{j \max}}{k} \quad (2.10)$$

kde k je součinitel vycházející ze zákona rozdělení, kterým se příslušný zdroj nejistot řídí, pro normální (Gaussovo) rozdělení je $k = 2$, popř. 3, pro rovnoměrné rozdělení $k = \sqrt{3}$ atd.

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

$$u_B(z_j) = \frac{U}{k} \quad (2.11)$$

kde k je opět součinitel vycházející ze zákona rozdělení a U je hodnota standardní rozšířené nejistoty uváděné v kalibračním listě daného měřidla.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 19
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

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

$$u_B(x) = \sqrt{\sum_{j=1}^n A_j^2 u_B^2(z_j)} \quad (2.12)$$

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.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 20
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

2.4 Kombinovaná nejistota měření

V reálné praxi vystačíme s jedním typem nejistoty měření jen výjimečně (v případě, že nelze statisticky vyhodnotit standardní nejistotu typu A). V drtivé většině případů se stanovuje kombinovaná nejistota měření, která je nejčastěji výsledkem kombinace obou typů standardních nejistot měření A i B, popřípadě sumací dílčích složek nejistoty měření za pomoci Gaussova zákona šíření nejistoty měření – viz vztah č. 2.4.

Máme-li tedy měřenou veličinu popsanou modelem $X = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$, pak standardní nejistota pro x , kde x je odhad měřené veličiny X a výsledek měření se tedy stanovuje příslušnou kombinací standardních nejistot odhadů vstupů $x_1, x_2, \dots, x_n$.

Tato kombinovaná standardní nejistota odhadu x je označena $u_c(x)$ a je to kladná hodnota druhé odmocniny kombinovaného rozptylu, který se pro nekorelované vstupní veličiny získá ze vztahu:

$$u_c^2(x) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)$$

Tato rovnice se spolu s jejím tvarem pro korelované veličiny nazývá Gaussův zákon šíření nejistot – viz vztah č. 2.4.

Výsledná kombinovaná standardní nejistota výsledků měření (veličiny x) může být také geometrickým součtem standardní nejistoty typu A a standardní nejistoty typu B dle následujícího vztahu, opět odvozeného ze vztahu č. 2.4:

$$u_c(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)} \quad (2.13)$$

Kombinovaná standardní nejistota měření u_c byla určena s pravděpodobností $P = 68,3 \%$, tj. pro koeficient rozšíření $k = 1$. Pro jinou pravděpodobnost se nejistota měření upraví vynásobením koeficientem rozšíření vhodného rozdělení (viz dále).

2.5 Rozšířená nejistota měření

Jak již bylo v textu uvedeno, výše uvedeným postupem se získá kombinovaná standardní 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 68,3 % 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 měření koeficientem rozšíření, který nám umožní získat pokrytí možných výsledků s vyšší pravděpodobností. V praxi se nejčastěji používá zjednodušený postup určení koeficientu rozšíření dohodou pro určitou odhadovanou pravděpodobnost pokrytí výsledku měření. Z paralely s normálním rozdělením jsou vžité tyto základní koeficienty:

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

$k = 2,58$ pro pravděpodobnostní pokrytí přibližně 99%;

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

Rozšířenou nejistotu měření vypočteme ze vztahu:

$$U = k \times u_c(x) \quad (2.14)$$

Tento zjednodušený postup se v praxi užívá pro mnohá měření v širokém rozsahu oblastí použití, jsou-li však splněny následující podmínky předpokladu normálního rozdělení standardní nejistoty:

- odhad x měřené veličiny X je získán z odhadů vstupů $x_1, x_2, \dots, x_n$, které jsou dobře popsitelné vhodnými typy rozdělení (normální, obdélníkové);
- nejistoty $u(x_i)$ těchto odhadů, které mohou být získány z vyhodnocení nejistoty buď typu A nebo B, přispívají srovnatelnými hodnotami ke kombinované standardní nejistotě $u_c(x)$;
- lineární aproximace použitá dle zákona šíření nejistot je dostatečná;
- nejistota $u_c(x)$ je dostatečně malá, protože její efektivní stupně volnosti v_{eff} jsou významné (větší než 10).

3 Interferometrický přístroj Tesa NPL – charakteristika

3.1 Souhrn

Interferometrický přístroj pro měření koncových měrek Tesa NPL v původním provedení kombinoval konvenční Twyman - Greenův interferometr s vysoce stabilní frekvencí a počítačově ovládané přístrojové vybavení, které odpovídalo době svého vzniku (konec 80. let minul. století). Přístroj umožňoval interferometrické měření koncových měrek až do délky 300 mm. Dále pak používaný SW umožňoval vyhodnocení naměřených dat v souladu s ČSN EN ISO 3650 a správu naměřených dat, včetně vyhotovení záznamu o měření. Problémem byl přenos naměřených dat do současných verzí SW.

Na laserovém interferometru TESA NPL byla zajišťována pro ČR sekundární etalonáž délky a byly na něm kalibrovány koncové měrky o rozměrech 0,3 mm až 300 mm s nejnižší nejistotou v ČR. Přístroj reprezentoval ČR ve světě v mezinárodních porovnáních organizovaných jak v rámci EURAMETu, tak při mezilaboratorním porovnávání zkoušek. Poslední porovnávání, kterého se přístrojem v původním provedení ČMI zúčastnilo bylo mezilaboratorním porovnávání měření koncových měrek organizované CENAM Mexiko. Toto měření probíhalo v roce 2008 až 2009. Velikost nejistoty, která byla pro ČR uznána jako CMC je:

$$U = \sqrt{20^2 + (0,2L)^2} \text{ nm} \quad (3.1)$$

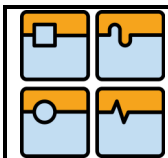
kde L je jmenovitá délka koncové měrky udaná v milimetrech.

Pomocí interferometru Tesa NPL je také zajišťována kalibrace koncových měrek prvního řádu (v rámci ČMI) s nejistotou:

$$U = (0,02 + 0,2L) \mu\text{m} \quad (3.2)$$

kde L je jmenovitá délka koncové měrky udaná v metrech.

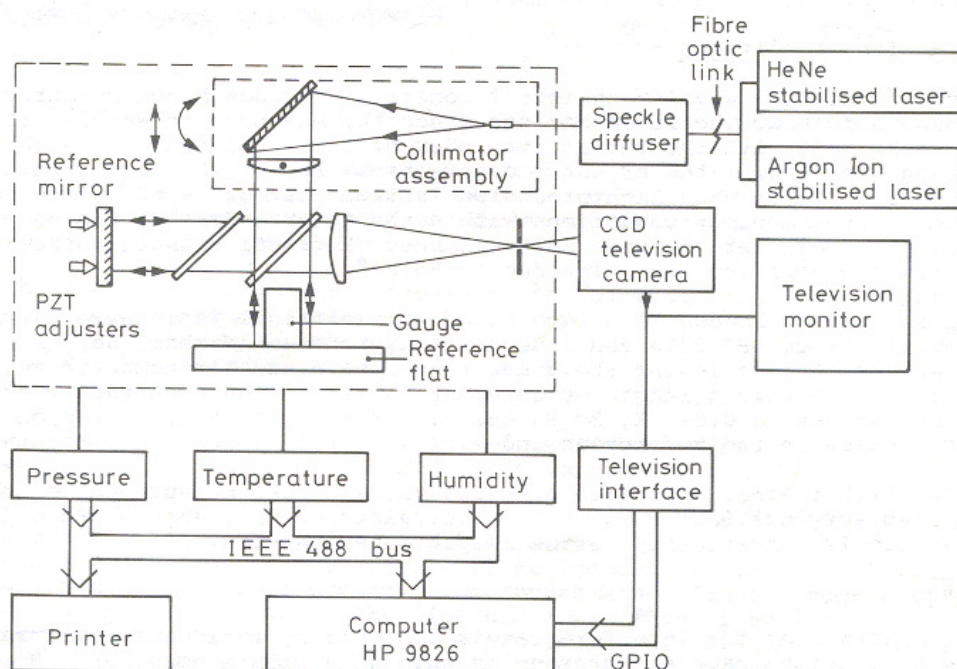
Dále jsou na tomto stroji zajišťovány kalibrace koncových měrek pro zahraniční zákazníky, kteří požadují kalibrace měrek s nejvyšší přesností.



3.2 Princip činnosti a konstrukce přístroje

Interferometr Tesa NPL se skládá ze tří základních částí: Twyman-Greenova interferometru, modulu pro zpracování naměřených dat a modulu pro vlastní měření.

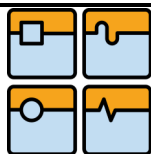
Základem přístroje Tesa NPL je Twyman-Greenův interferometr (s úspěchem používá pro měření vad optických prvků, jako jsou čočky, hranoly, rovinná paralelní skla, laserové tyče a rovinná zrcadla). Na rozdíl od Michelsonova interferometru bývá u Twyman-Greenova interferometru použit monochromatický bodový zdroj světla (laser) – viz obr. 3.1.



Obr .3.1 Schéma původního provedení přístroje Tesa NPL (zdroj: Tesa NPL Handbook)

Laserinterferometr využívá pro svoji činnost dva druhy laseru zelený ($\lambda = 543 \text{ nm}$) a červený ($\lambda = 633 \text{ nm}$). Při vlastním měření tyto lasery vytvářejí interferometrické obrazce (proužky) na povrchu funkční plochy koncové měřky i referenční desky.

Interferometrický obrazec je snímán kamerovým systémem, jehož výstup je dále zpracován pomocí měřicího SW. Načtením proužků interferenčního obrazce, na základě rozdílných vlnových délek obou ploch, dokáže měřicí SW určit délku koncové měřky.

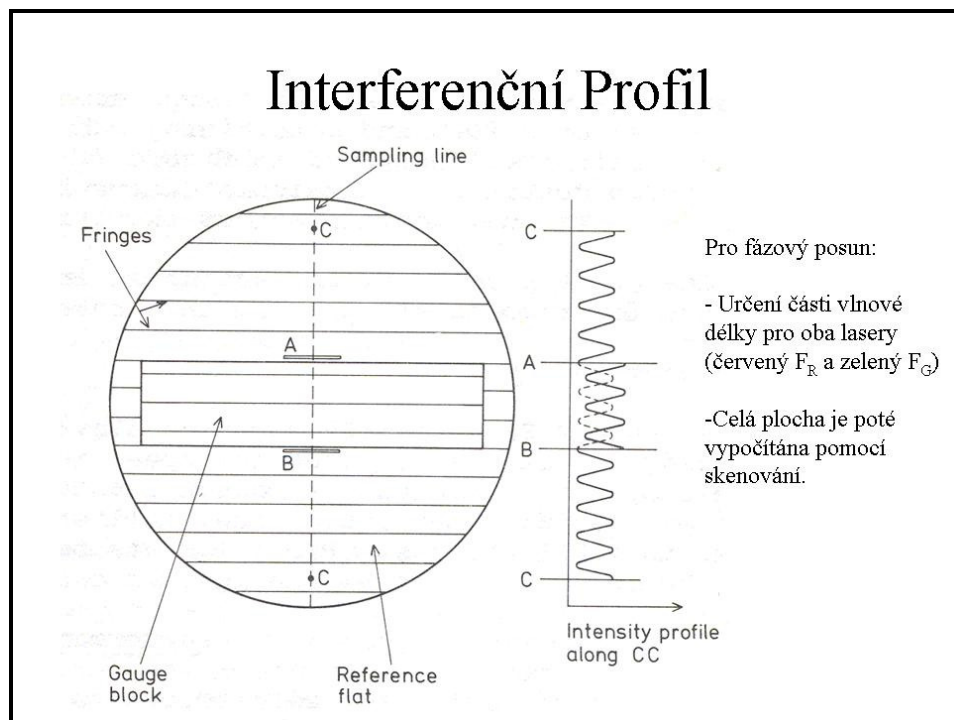


Typický interferenční obrazec

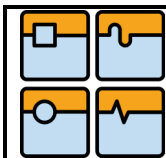


Obr. 3.2 Ukázka interferenčního obrazce při měření délky koncové měrky (zdroj: Tesa NPL Handbook)

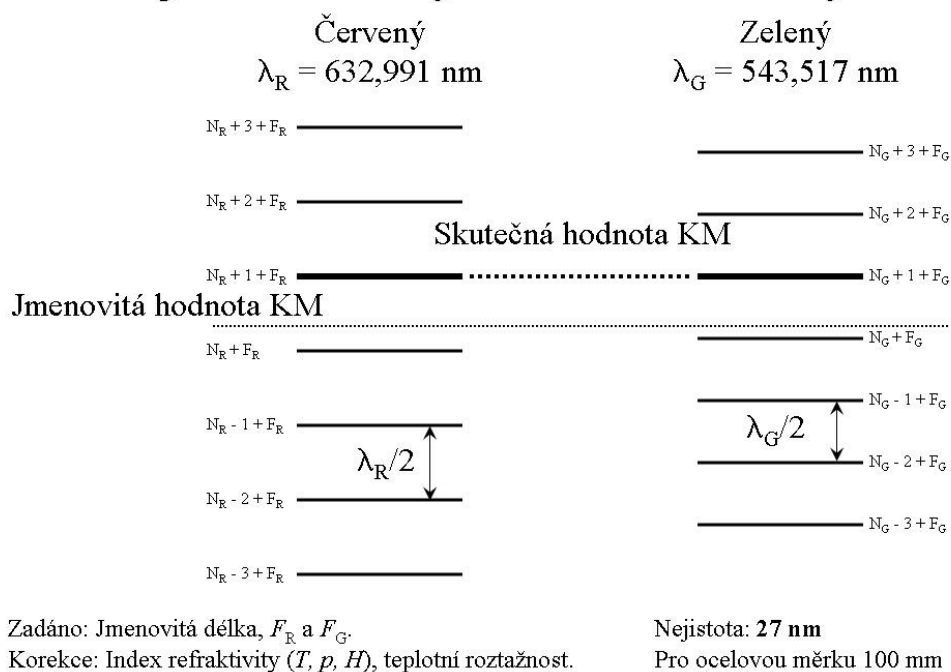
Interferenční Profil



Obr. 3.3 Schéma interferenčního profilu při použití He-Ne laseru (zdroj: Tesa NPL Handbook)



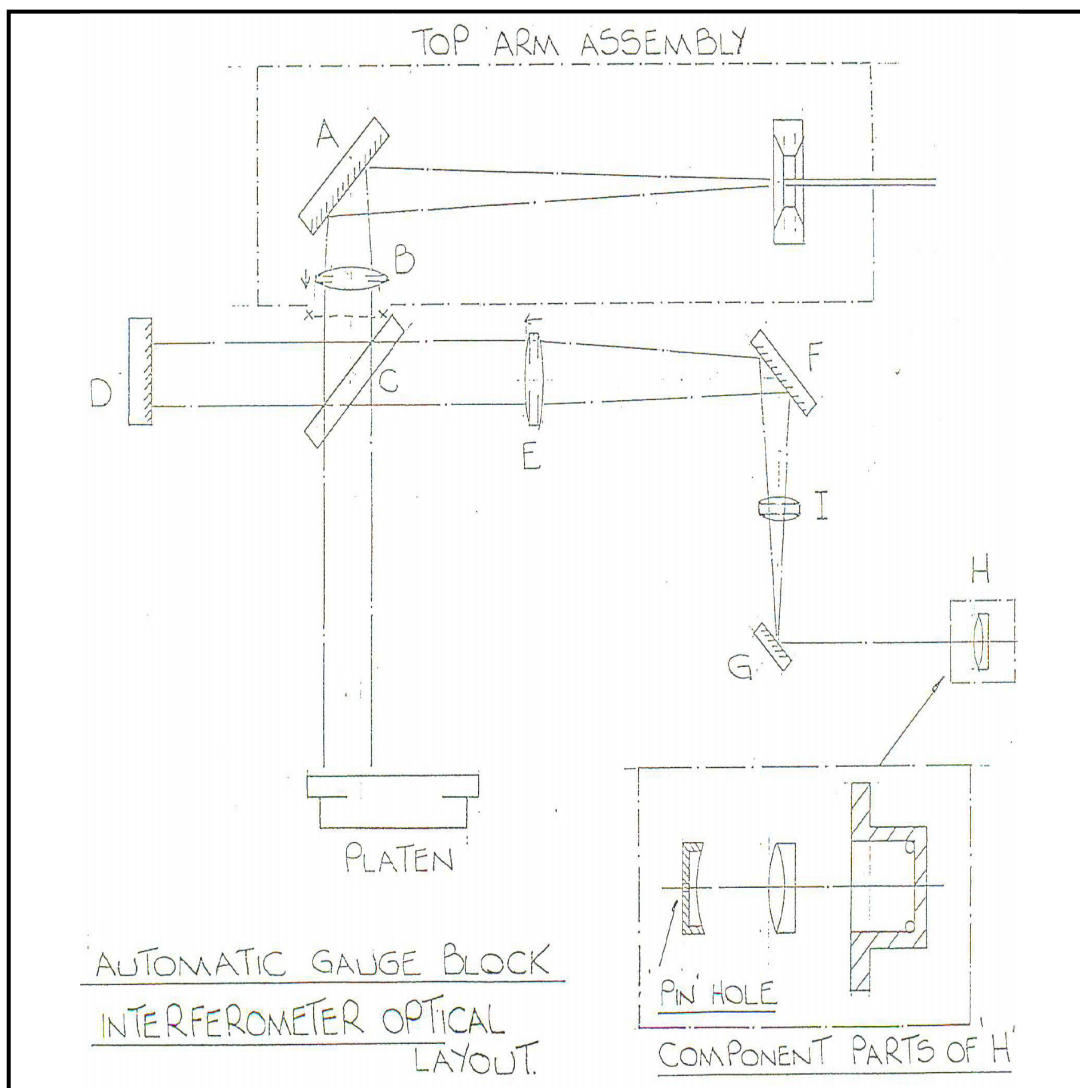
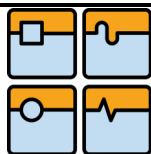
Zjištění délky koncové měrky



Obr. 3.4 Princip použití obou laserů s rozdílnou vlnovou délkou při měření na Tesa NPL
(zdroj: Tesa NPL Handbook)

Původní stav modulu pro zpracování naměřených dat byl takový, že k ovládání měřicího procesu a ke zpracování naměřených dat byl používán původní počítač HP s architekturou procesoru 486 DX4. Výpočetní software fungoval v programovacím jazyce Basic, který byl zaveden jako nadstavba systému DOS 6.22. Výstup ze snímací kamery byl realizován pomocí dvou CRT monitorů. Dále byly v modulu umístěny elektronické jednotky pro zpracování naměřených hodnot teploty, vlhkosti a tlaku vzduchu v měřicím modulu. Dále zde byly umístěny ovládací prvky pro práci s referenčními deskami.

Modul pro vlastní měření se skládal z klimatizovaného uzavíratelného boxu, ve kterém se nacházely referenční desky pro umístění koncových měrek, čidla snímačů teploty, tlaku a vlhkosti. Také zde byla umístěna původní analogová kamera pro snímání interferenčních obrazců, které vznikají při měření koncových měrek a v neposlední řadě také optická soustava Twyman-Greenova interferometru, která byla umístěna v horní části boxu.



Obr. 3.5 Náčrt optické části interferometru Tesa NPL (zdroj: Tesa NPL Handbook)

Legenda:

A – hlavní zrcadlo interferometru

B – kolimační čočka 1

C – dělič paprsku

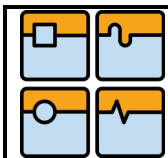
D – referenční (základní) zrcadlo

E – kolimační čočka 2

F,G – zrcadla

H – dvojitá čočka

I – vyrovnávací čočka



Obr. 3.6 Sestava Tesa NPL v původním provedení, modul pro zpracování dat vlevo, modul pro měření je vpravo (foto – autor)



Obr. 3.6 Modul pro měření s referenčními deskami v původním provedení (foto – autor)

3.3 Použití modernizovaného HW a SW

Původní stav sestavy (zejména použitý SW a HW modulu pro zpracování naměřených dat) interferometru Tesa NPL odpovídal době své výroby, tzn. druhá polovina 80. let minulého století. Toto mělo za následek prakticky nemožnost zásahu do programu z důvodu nepřehlednosti použitého programovacího jazyku. Ovládací program nebylo možno použít na soudobém počítači, protože porty, které používal pro připojení periferních zařízení nejsou již v PC využívány a nová rozhraní nedokázal starý software používat. Taktéž nebyl možný přenos a zpracování naměřených dat podle současných požadavků.

Pro účel inovace a digitalizace interferometru bylo rozhodnuto změnit výpočetní techniku, programové vybavení a doplnit měřicí zařízení digitální kamerou. Vzhledem k tomu, že velká část zařízení obsahuje velice kvalitní pomocná měřicí zařízení (teploměry, vlhkoměr, tlakoměr,...), byly úpravy prováděny tak, aby bylo možno zachovat co největší množství těchto částí z důvodu pozdější možné snadné výměny daných komponent.

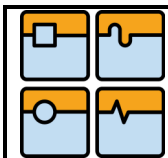
Z několika možností pořízení ovládacího softwaru bylo voleno vybavení měřicím programem, který byl vyvinut švýcarským národním metrologickým institutem (METAS). Tato volba byla cenově nejvýhodnější. Dále zde byla výhoda rychlosti úpravy stroje (3 dny), nebyla tedy nutná delší odstávka měřicího zařízení.

Nový ovládací a vyhodnocovací program, který byl na zařízení Tesa NPL instalován, je vytvořen ve vývojovém prostředí LabView. Bylo tedy možno ho nainstalovat na běžný počítač, ke kterému byly připojeny všechny potřebné moduly měřicího systému. Pokud by došlo v budoucnu k poruše PC, je možno prostředí LabView i ovládací program zprovoznit bez obtíží na jakémkoli jiném vhodném PC. Pokud v budoucnu bude také nutná výměna některé součásti systému (teploměr, vlhkoměr ...) , nová součást bude připojena k PC a v ovládacím programu bude možné snadno provést potřebné úpravy. Pokud by v původní konfiguraci došlo k poruše PC nebo jakékoliv jeho komponenty, stroj by byl prakticky neopravitelný a bez modernizace a digitalizace by nebyl schopen dále měřit.

Ve spolupráci se švýcarským národním metrologickým institutem METAS a českou dodavatelskou firmou Amtest – TM bylo v r. 2010 přikročeno k výměně těchto komponent:

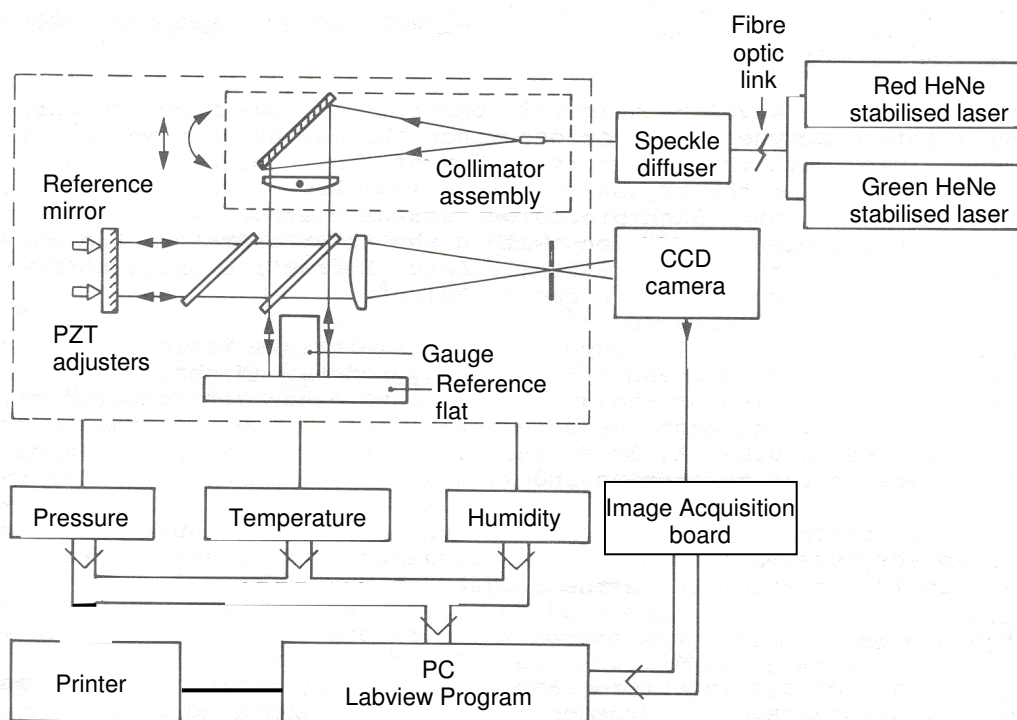
- PC Comfor Office I20 s FireWire portem + OS Windows XP;
- karta NI – GPIB (PCIe interface) + příslušné ovladače pro LabView;
- SW LabView ve verzi 8.6;
- Sw pro kameru - Vison Acquisition;
- kamera Pixelink PL-B741F 2/3" CMOS s portem 1394 FireWire.

Nový ovládací a měřicí software je naprogramován ve vývojovém prostředí LabView a je možné provádět jeho případné úpravy. Tento software byl zakoupen a zprovozněn



DIPLOMOVÁ PRÁCE

ve spolupráci se švýcarským národním metrologickým institutem METAS. Optická část interferometru Tesa NPL zůstala zachována a byla pouze vyčištěna a seřízena.



Obr.3.4 Schéma modernizovaného provedení přístroje Tesa NPL (zdroj: METAS + Tesa NPL Handbook)



Obr. 3.5 Sestava Tesa NPL v modernizovaném provedení, osazen nový TFT 19“ monitor (foto – autor)

4 Analýza nejistot při měření na přístroji Tesa NPL

4.1 Souhrn

Analýza nejistoty při měření na interferometru Tesa NPL je důležitou součástí plnohodnotné kalibrace ocelových koncových měrek v rámci sekundární etalonáže délky v národním metrologickém systému ČR, kterou zajišťuje ČMI. Uváděná rozšířená nejistota měření je nedílnou součástí kalibračních protokolů, které ČMI vystavuje svým zákazníkům.

4.2 Zdroje nejistot při interferometrickém měření

I přes provedenou modernizaci přístroje jeho měřicí (optická) část zůstala zachována, tudíž princip měření nebyl změněn. Z tohoto důvodu zdroje nejistoty měření jsou obdobné, pouze se změnily jejich příspěvky.

Zdroje nejistoty při měření na přístroji Tesa NPL:

- Vliv frekvence laseru
- Vliv načtení interferenčního obrazce – proužků (počet nebo část proužku)
- Vliv měření teploty koncové měrky
- Vliv rozdílu teplot mezi měrkou a referenční deskou
- Vliv určení koeficientu délkové roztažnosti
- Vliv refraktivitu vzduchu (index lomu vzduchu) v místě měření
- Vliv ztráty fáze laseru při odrazu od lesklé plochy
- Vliv tloušťky povrchové vrstvy (při nasátí měrky)
- Parametry měřicího přístroje (seřízení optiky, zkreslení obrazu, paralelnost/rovinnost koncové měrky)

4.3 Podrobná analýza nejistot při měření na přístroji Tesa NPL

4.3.1 Vliv frekvence laseru

Dle provedených studií výrobcem se odhaduje, že odchylka stability frekvence výstupu He-Ne laseru nepřesáhne $\pm 2 \times 10^8$ jmenovité hodnoty vlnové délky červeného laseru $\lambda \approx 633$ nm. Odchylka vlnové délky obou laserů od jmenovité hodnoty způsobená indexem lomu vzduchu je získána ze vztahu:

$$\lambda_{vX} = \frac{\lambda_{vac}}{\mu_x} \quad (4.1)$$

kde λ_{vX} je vlnová délka daného laseru ve vzduchu v nm, λ_{vac} je vlnová délka daného laseru ve vakuu v nm a μ_x je index lomu daného laseru ve vzduchu.

Výpočet vlnové délky červeného laseru ve vzduchu:

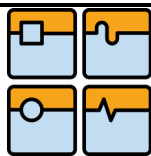
$$\lambda_{vR} = \frac{\lambda_{RVac}}{\mu_R} = \frac{632,990868}{1,0002684259} = 632,8210025 \text{ nm}$$

kde λ_{vR} je vlnová délka červeného laseru ve vzduchu v nm, λ_{RVac} je vlnová délka červeného laseru ve vakuu v nm a μ_R je index lomu červeného laseru ve vzduchu.

Výpočet vlnové délky zeleného laseru ve vzduchu:

$$\lambda_{vG} = \frac{\lambda_{GVac}}{\mu_G} = \frac{543,516540}{1,0002698247} = 543,369926 \text{ nm}$$

kde λ_{vG} je vlnová délka zeleného laseru ve vzduchu v nm, λ_{GVac} je vlnová délka zeleného laseru ve vakuu v nm a μ_G je index lomu zeleného laseru ve vzduchu.



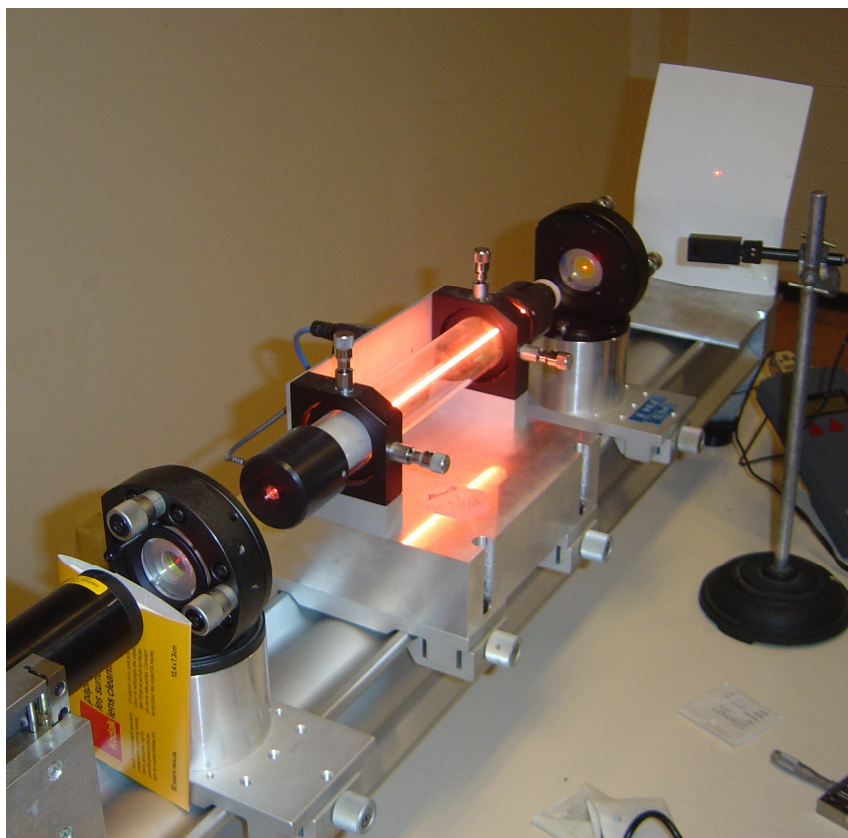
Tyto výsledky jsou potvrzeny hodnotami, které byly získány při periodické recalibraci obou laserů, která je prováděna v LPM Praha – viz. kalibrační listy v příloze č.1 a č.2. Tyto údaje korespondují dle informací poskytnutých výrobcem laserinterferometru s délkovou nejistotou danou vztahem:

$$U_{LF1} = \pm 0,034L \text{ nm} \quad (4.2)$$

Pro tuto hodnotu předpokládáme rovnoměrné (obdélníkové) rozdělení s koeficientem typickým pro daný typ rozdělení $k = \sqrt{3}$, pak hodnota standardní nejistoty tohoto příspěvku je:

$$U_{LF} = \frac{U_{LF1}}{k} = \frac{0,034}{\sqrt{3}} \times L \cong \pm 0,020L \text{ nm} \quad (4.3)$$

kde L je délka koncové měrky v mm.



Obr. 4.1 Sestava He-Ne laseru (zdroj: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>)

4.3.2 Vliv načtení interferenčního obrazce – proužků (počet nebo část proužku)

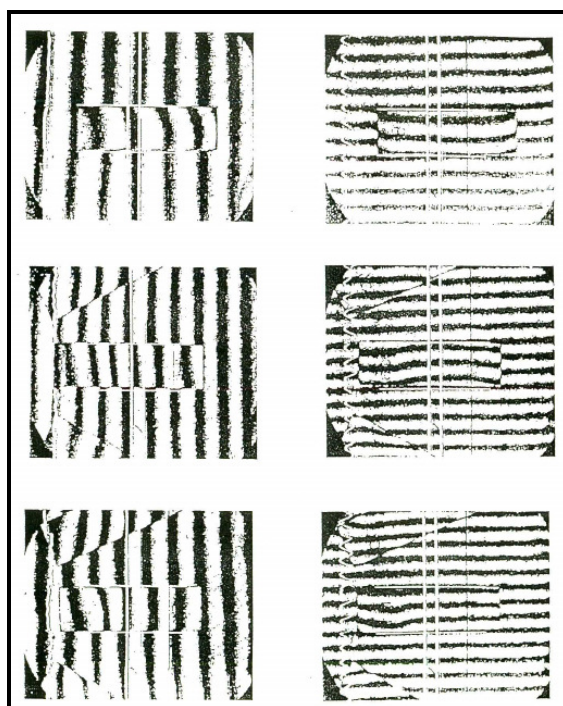
Pro měření prováděné při kalibraci tenké vrstvy standardu je výrobcem interferometru odhadovaná chyba načtení intervenčních proužků $\pm 0,025$ proužku. Pro střední hodnotu vlnové délky He-Ne červeného laseru $\lambda \approx 633$ nm je dle údajů výrobce ekvivalentní údaj nejistoty měření délky $\pm 2,6$ nm. Pro tuto hodnotu předpokládáme rovnoměrné (obdélníkové) rozdělení s koeficientem typickým pro daný typ rozdělení $k = \sqrt{3}$, pak hodnota standardní nejistoty tohoto příspěvku je:

$$U_{FF1} = \frac{2,6}{k} = \frac{2,6}{\sqrt{3}} \approx \pm 1,73 \text{ nm} \quad (4.4)$$

Délka koncové měřky je vypočítána ze středních hodnot dvou měření interferenčních proužků o dvou rozdílných vlnových délkách (633 nm a 543 nm), a tudíž konečná hodnota příspěvku pro nejistotu měření má dle výrobce interferometru tento tvar:

$$U_{FF} = f_L \times U_{FF1} \approx 0,707 \times 1,73 \approx \pm 1,22 \text{ nm} \quad (4.5)$$

kde f_L je koeficient zohledňující měření pomocí dvou laserů.



Obr. 4.2 Příklady vlivu paralelnosti a rovinnosti funkčních ploch koncových měrek na interferenční obrazec (zdroj: Tesa NPL Handbook)

4.3.3 Vliv měření teploty koncové měrky

Měření teploty koncové měrky je prováděno pomocí teploměru s platinovým odporem (PRT) a přesným automatickým odporovým můstkem – Pt100. Kalibrační list teploměru uvádí hodnotu standardní nejistoty s normálním (Gaussovým) rozdělením a pro pravděpodobnostní pokrytí 95 % ($P = 0,95$) s koeficientem rozšíření $k = 2$ je $\pm 0,005$ °C. Vztah pro určení standardní nejistoty při měření teploty koncové měrky má tento tvar:

$$U_{GT} = \alpha_{GB} \times \frac{\Delta t_{20}}{k} \times L = 11,7 \times \frac{0,005}{2} \times L \cong \pm 0,029 L \text{ } \mu\text{m} \quad (4.6)$$

kde L je délka koncové měrky v m.

Nejistota spojená s odporem umístěným v PRT je odhadována, pro přesnost odporového můstku teploměru Pt100 je udávána hodnota nejistoty způsobená ohřevem můstku $\pm 0,002$ °C.

Tento údaj koresponduje dle údajů výrobce s délkovou nejistotou danou vztahem:

$$U_{RT1} = \pm 0,063 L \text{ nm} \quad (4.7)$$

Pro tuto hodnotu předpokládáme rovnoměrné (obdélníkové) rozlišení s koeficientem typickým pro daný typ rozdělení $k = \sqrt{3}$, pak hodnota standardní nejistoty tohoto příspěvku je:

$$U_{RT} = \frac{U_{RT1}}{k} = \frac{0,063}{\sqrt{3}} \times L \cong \pm 0,036 L \text{ nm} \quad (4.8)$$

kde L je délka koncové měrky v mm.

Poznámka:

Při výpočtu hodnot bylo pracováno s koeficientem délkové roztažnosti, který byl dán vztahem:

$$\alpha_{GB} = 11,7 \text{ } \mu\text{m} \times \text{m}^{-1} \times \text{°C}^{-1} \quad (4.9)$$

4.3.4 Vliv rozdílu teplot mezi měrkou a referenční deskou

Ke korekci délkové roztažnosti koncových měrek a referenčních desek je nutné znát jejich přesnou hodnotu teploty. Při praktickém měření probíhá snímání teploty za pomoci dotykových čidel vyrobených válečků z mědi, které zajišťují dobrou tepelnou vodivost. Odhad rozdílu teplot obou prvků má dle výrobce interferometru hodnotu $\pm 0,005 \text{ } ^\circ\text{C}$. Pro tuto hodnotu předpokládáme rovnoměrné (obdélníkové) rozlišení s koeficientem typickým pro daný typ rozdělení $k = \sqrt{3}$ a vztah pro určení standardní nejistoty rozdílu teploty má tento tvar:

$$U_{TD} = \alpha_{GB} \times \frac{(t_1 - t_2)}{k} \times L = 11,7 \times \frac{0,005}{\sqrt{3}} \times L \cong \pm 0,034L \text{ } \mu\text{m} \quad (4.10)$$

kde L je délka koncové měrky v m.

4.3.5 Vliv určení koeficientu délkové roztažnosti

Při zjišťování vlivu určení koeficientu délkové roztažnosti měřených koncových měrek, vycházíme ze vztahu (4.9) pro hodnotu tohoto koeficientu. Odhad proměnlivosti (nestálosti) koeficientu je dle výrobce interferometru udán hodnotou $\pm 0,03 \text{ } \mu\text{m} \times \text{m}^{-1} \times ^\circ\text{C}^{-1}$. Tento odhad vychází z faktu, že garantované rozpětí teploty při kalibraci koncových měrek nepřesáhne hodnotu $20 \text{ } ^\circ\text{C} \pm 0,3 \text{ } ^\circ\text{C}$. Pro tuto hodnotu předpokládáme rovnoměrné (obdélníkové) rozdělení s koeficientem typickým pro daný typ rozdělení $k = \sqrt{3}$ a vztah pro určení standardní nejistoty rozdílu teploty má tento tvar:

$$U_{EC} = \frac{\Delta t_{20}}{k} \times \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)}{k} \times L = \frac{0,3}{\sqrt{3}} \times \frac{0,03}{\sqrt{3}} \times L \cong \pm 0,003L \text{ } \mu\text{m} \quad (4.11)$$

kde L je délka koncové měrky v m.

4.3.6 Vliv refraktivity vzduchu (index lomu vzduchu) v místě měření

Přesné měření délky pomocí laserinterferometru jsou ovlivňována atmosférickými podmínkami v místě měření. Tudíž je nutné sledovat parametry vzduchu v modulu pro měření, které mají přímý vliv na kalibraci koncových měrek. Tyto parametry se shrnují pod jednotný pojem – index refraktivity (lomu) vzduchu. Aparát výpočtů těchto příspěvků je podrobně popsán za pomoci Edlenových vzorců v materiálech dodaných výrobcem interferometru (viz příloha č.7). Mezi parametry, které přispívají k celkové nejistotě měření patří:

- Vliv nejistoty měření tlaku vzduchu

Hodnota největší dovolené chyby tlakoměru DRUCK DP141 je $\pm 0,015$ mbar. Pro tuto hodnotu předpokládáme rovnoměrné (obdélníkové) rozdělení s koeficientem typickým pro daný typ rozdělení $k = \sqrt{3}$. Tento údaj koresponduje se standardní nejistotou měření délky danou vztahem uváděným výrobcem:

$$U_{PR} = \frac{0,0017}{k} \times L = \frac{0,0017}{\sqrt{3}} \times L \cong \pm 0,001L \text{ nm} \quad (4.12)$$

kde L je délka koncové měrky v mm.

- Vliv nejistoty kalibrace vlastního tlakoměru

Kalibrační list tlakoměru (viz příloha č. 5) uvádí maximální chybu tlakoměru $\pm 0,015$ mbar. Kalibrační list tlakoměru uvádí hodnotu rozšířené nejistoty s normálním (Gaussovým) rozdělením a pro pravděpodobnostní pokrytí 95 % ($P = 0,95$) s koeficientem rozšíření $k = 2$. Tento údaj koresponduje se standardní nejistotou měření danou vztahem uváděným výrobcem:

$$U_{PC} = \frac{0,0232}{k} \times L = \frac{0,0232}{2} \times L \cong \pm 0,012L \text{ nm} \quad (4.13)$$

kde L je délka koncové měrky v mm.

- Vliv měření teploty vzduchu

Nejistota spojená s odporem umístěným v PRT je odhadována, pro přesnost odporového můstku je udávána výrobcem přístroje hodnota nejistoty způsobená ohřevem můstku $\pm 0,01$ °C. Pro tuto hodnotu předpokládáme rovnoměrné (obdélníkové) rozdělení s koeficientem typickým pro daný typ rozdělení $k = \sqrt{3}$. Tento údaj koresponduje se standardní nejistotou měření délky danou vztahem uváděným výrobcem:

$$U_{TR} = \frac{0,008}{k} \times L = \frac{0,008}{\sqrt{3}} \times L \cong \pm 0,005L \text{ nm} \quad (4.14)$$

kde L je délka koncové měrky v mm.

- Vliv nejistoty kalibrace vlastního teploměru vzduchu

Kalibrační list teploměru (viz přílohu č. 3) uvádí maximální chybu teploměru $\pm 0,005$ °C. Kalibrační list teploměru uvádí hodnotu rozšířené nejistoty s normálním (Gaussovým) rozdělením a pro pravděpodobnostní pokrytí 95 % ($P = 0,95$) s koeficientem rozšíření $k = 2$. Tento údaj koresponduje se standardní nejistotou měření danou vztahem uváděným výrobcem:

$$U_{TC} = \frac{0,0133}{k} \times L = \frac{0,0133}{2} \times L \cong \pm 0,007L \text{ nm} \quad (4.15)$$

kde L je jmenovitá délka měrky v mm.

- Vliv nejistoty měření vlhkosti vzduchu

Nejistota spojená s odporem umístěným v PRT je odhadována, pro přesnost odporového můstku je udávána výrobcem přístroje hodnota nejistoty způsobená ohřevem můstku $\pm 0,01$ °C. Pro tuto hodnotu předpokládáme rovnoměrné (obdélníkové) rozdělení s koeficientem typickým pro daný typ rozdělení $k = \sqrt{3}$. Tento údaj koresponduje se standardní nejistotou měření délky danou vztahem uváděným výrobcem:

$$U_{RV} = \frac{0,008}{k} \times L = \frac{0,008}{\sqrt{3}} \times L \cong \pm 0,005L \text{ nm} \quad (4.16)$$

kde L je jmenovitá délka měrky v mm.

- Vliv nejistoty kalibrace vlastního vlhkoměru

Kalibrační list vlhkoměru S3000 (viz přílohu č. 4) uvádí maximální chybu přístroje $\pm 0,2$ °C. Kalibrační list teploměru uvádí hodnotu rozšířené nejistoty s normálním (Gaussovým) rozdělením a pro pravděpodobnostní pokrytí 95 % ($P = 0,95$) s koeficientem rozšíření $k = 2$. Tento údaj koresponduje se standardní nejistotou měření danou vztahem uváděným výrobcem:

$$U_{cv} = \frac{0,0084}{k} \times L = \frac{0,0084}{2} \times L \cong \pm 0,005L \text{ nm} \quad (4.17)$$

kde L je jmenovitá délka měřky v mm.

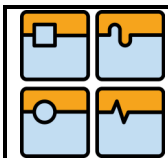
- Vliv měření obsahu CO₂ ve vzduchu v místě měření

Ještě před samotným zjišťováním spolehlivosti měření interferometru jako celku bylo provedeno zjišťování obsahu CO₂ ve vzduchu v místě měření. Důvodem byla skutečnost, že pomocí analýzy obsahu oxidu uhličitého byl upravován výpočet nejistoty měření.

Pomocí sondy pro měření CO₂ byl obsah oxidu uhličitého v atmosféře monitorován během všech činností, které jsou prováděny během měření. Bylo zjišťováno jakým způsobem se tento obsah mění, zda při měření mívá konstantní hodnotu, kolísá nebo se po čase ustaluje. Za jakých podmínek je nutné měřit, aby obsah CO₂ byl konstantní, jaké jsou maximální výchylky a jakým způsobem jsou ovlivňovány naměřené hodnoty a nejistota měření. Během zkoumání obsahu CO₂ bylo prováděno běžné měření a byly dodržovány stejné podmínky jako při běžném měření koncových měrek na interferometru Tesa NPL. V laboratoři se tedy pohybovala pouze jedna osoba, byly dodržovány doby temperování koncových měrek atd.

Sonda CO₂ byla umístěna v měřicí komoře, blízko referenční desky pro umístění koncových měrek. Obsah CO₂ byl monitorován 3 měsíce. Při práci v měřicí komoře (umísťování či odebírání základních desek s koncovými měrkami) obsah CO₂ stoupl maximálně na 1 572 ppm. Během běžné manipulace se hodnota pohybovala do 1 450 ppm. Po uzavření komory a opuštění laboratoře začala tato hodnota pozvolna klesat. Nejpozději za 3 hodiny se hodnota oxidu uhličitého ustálila na hodnotě (450 – 530) ppm. Poté během pohybu obsluhy v laboratoři a během měření hodnota CO₂ pozvolna stoupala o (100 – 200) ppm.

V měřicím softwaru přístroje byla původně nastavena konstantní hodnota obsahu CO₂ 450 ppm. Po provedení zkoušek byla tato hodnota upřesněna na 500 ppm, tedy na hodnotu poblíž které se obsah oxidu uhličitého běžně ustálí. Dále byla ve výpočtu nejistoty upravena velikost kolísání CO₂ na ± 250 ppm. Po dosažení těchto hodnot byla následně určena nejistota měření pro měření ocelových měrek. Pro tuto hodnotu předpokládáme rovnoměrné



(obdélníkové) rozdělení s koeficientem typickým pro daný typ rozdělení $k = \sqrt{3}$. Tento údaj koresponduje se standardní nejistotou měření délky danou vztahem uváděným výrobcem:

$$U_{co} = \frac{0,036}{k} \times L = \frac{0,036}{\sqrt{3}} \times L \cong \pm 0,021L \text{ nm} \quad (4.18)$$

kde L je jmenovitá délka měřky v mm.

U měřky o délce 100 mm přispívá velikost příspěvku nejistoty obsahu CO_2 250 ppm k celkové nejistotě měření velikostí standardní nejistotou hodnotou 2,1 nm.

Pokud porovnáme výslednou hodnotu rozšířené nejistoty měření pro ocelovou koncovou měřku 100 mm a teoretické velikosti nejistot určení obsahu CO_2 ve vzduchu 0 ppm, 100 ppm, 250 ppm, 400 ppm a 500 ppm, zjistíme, že rozdíly jsou v tomto rozmezí zanedbatelné, viz tabulku 1.

Tabulka 2: Hodnoty nejistoty při měření obsahu CO_2

Nejistota CO_2 [ppm]	Výsledná rozšířená nejistota měření pro měřku 100 mm [nm]
0	27
100	28
250	28
400	28
500	29

Z těchto zjištění byl učiněn závěr, že v místě měření je dosahováno dostatečně stabilní hodnoty obsahu oxidu uhličitého a jeho příspěvek k nejistotě měření je na takové úrovni, že celkovou nejistotu měření koncových měrek ovlivňuje zanedbatelnou měrou. Bylo tedy rozhodnuto, že interferometr NPL TESA není nutné vybavovat sondou pro měření CO_2 .

4.3.7 Vliv ztráty fáze laseru při odrazu od lesklé plochy

Ztráta fáze laseru (phase change on reflection) je způsobena odrazem světla od materiálu s vyšším indexem lomu světla. Dochází tak k posunu vlnové délky paprsku laseru a tudíž nežádoucímu vlivu na měření.

- Vliv rovinnosti plochy referenční desky

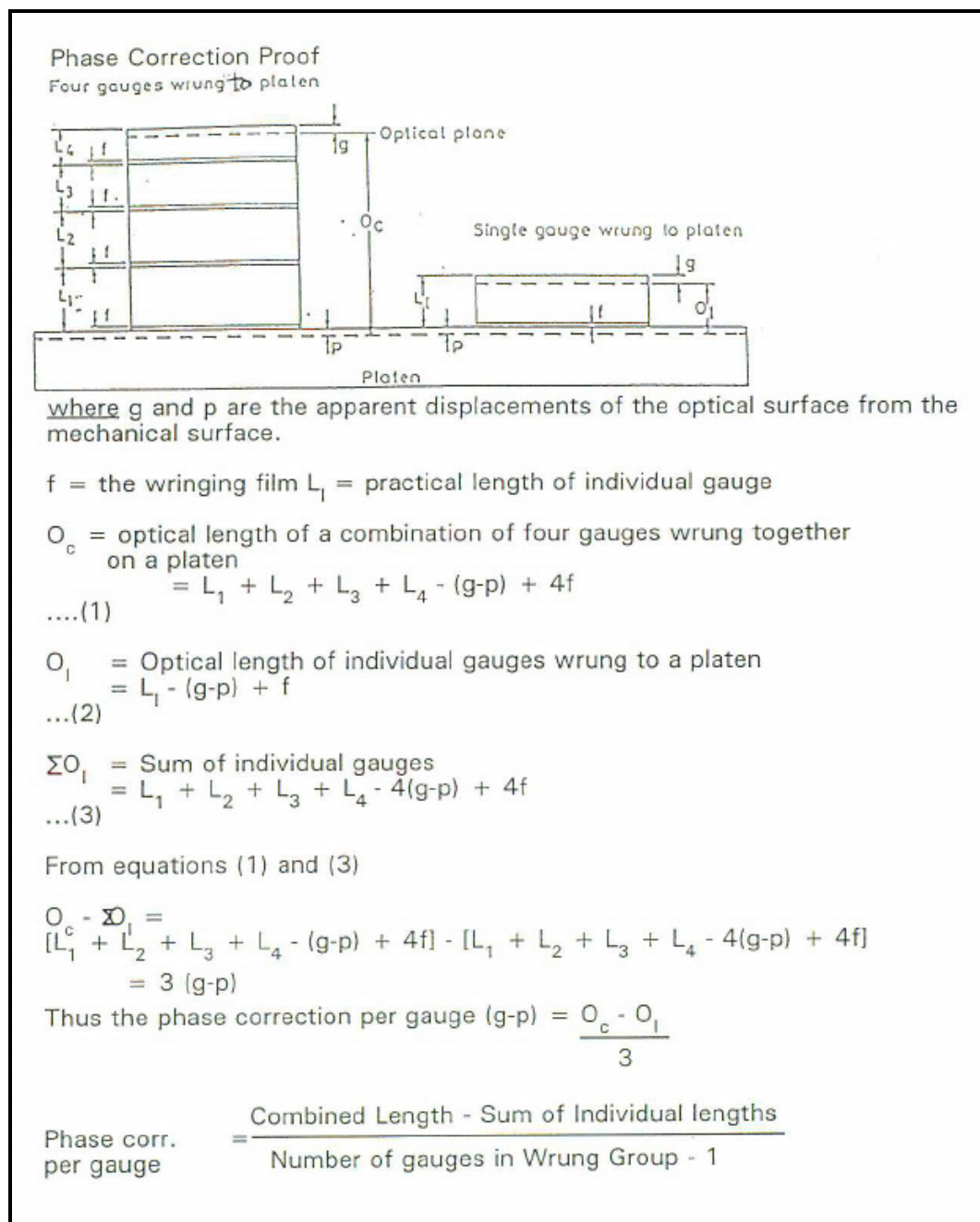
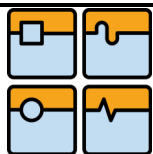
Pro tuto hodnotu předpokládáme rovnoměrné (obdélníkové) rozlišení a dle údajů výrobce nabývá hodnoty $\pm 5,55$ nm. Pro tuto hodnotu předpokládáme rovnoměrné (obdélníkové) rozlišení. Pro tuto hodnotu předpokládáme rovnoměrné (obdélníkové) rozdělení s koeficientem typickým pro daný typ rozdělení $k = \sqrt{3}$. Hodnota standardní nejistoty měření tohoto příspěvku uváděná výrobcem je:

$$U_{SR} = \frac{5,55}{k} = \frac{5,55}{\sqrt{3}} \cong \pm 3,2 \text{ nm} \quad (4.19)$$

- Vliv změny fáze při nasátí měrek

Při nasávání koncových měrek na referenční desku dochází ke změně fáze materiálu měrky. Výpočet potřebné korekce se zjistí z naměřených hodnot jednotlivých koncových měrek (obvykle 4ks) a změřené hodnoty celého „špalíku“ na sebe nasátých měrek. Pro tuto hodnotu předpokládáme rovnoměrné (obdélníkové) rozlišení a dle zkušeností z dlouhodobých měření nabývá hodnoty $\pm 2,44$ nm. Pro tuto hodnotu předpokládáme rovnoměrné (obdélníkové) rozdělení s koeficientem typickým pro daný typ rozdělení $k = \sqrt{3}$. Hodnota standardní nejistoty měření tohoto příspěvku uváděná výrobcem je:

$$U_{PH} = \frac{2,44}{k} = \frac{2,44}{\sqrt{3}} \cong \pm 1,4 \text{ nm} \quad (4.20)$$



Obr. 4.3 Schéma a výpočet korekce vlivu změny fáze koncových měrek
(zdroj: Tesa NPL Handbook)

4.3.8 Tloušťka povrchové vrstvy (při nasátí měřky)

Pro tuto hodnotu předpokládáme rovnoměrné (obdélníkové) rozlišení a dle údajů výrobce interferometru nabývá povrchová vrstva hodnoty v rozmezí $\pm 2,02$ nm. Pro tuto hodnotu předpokládáme rovnoměrné (obdélníkové) rozdělení s koeficientem typickým pro daný typ rozdělení $k = \sqrt{3}$. Hodnota standardní nejistoty měření tohoto příspěvku uváděná výrobcem je:

$$U_{VF} = \frac{2,02}{k} = \frac{2,02}{\sqrt{3}} \cong \pm 1,2 \text{ nm} \quad (4.21)$$

4.3.9 Parametry měřicího přístroje

- Seřízení optiky

Optický systém laserinterferometru byl při modernizaci vyčištěn a seřízen autorizovaným technikem s fy Amtest – TM. Uživatelský přístup k optice přístroje Tesa NPL není umožněn. Byla provedena kontrola úhlového seřízení kolimátoru. Tento postup zajišťuje možnost vzniku odchylek způsobených nastavením optiky laserinterferometru popsanou dle výrobce tímto vztahem:

$$U_{OB1} = \pm 0,01L \text{ nm} \quad (4.22)$$

kde L je jmenovitá délka měřky v mm.

Pro tuto hodnotu předpokládáme rovnoměrné (obdélníkové) rozdělení s koeficientem typickým pro daný typ rozdělení $k = \sqrt{3}$. Hodnota standardní nejistoty měření tohoto příspěvku uváděná výrobcem je:

$$U_{OB} = \frac{U_{OB1}}{k} = \frac{0,01}{\sqrt{3}} \times L \cong \pm 0,006L \text{ nm} \quad (4.23)$$

kde L je jmenovitá délka měřky v mm.

- Zkreslení obrazu interferenčního obrazce vlivem optiky

Vliv možné chyby měření způsobené nepřesností samotných optických prvků interferometru způsobené výrobní nedokonalostí těchto prvků je výrobcem odhadována na hodnotu $\pm 0,02$ interferenčního proužku v obrazci. Tato hodnota je dle podkladů výrobce ekvivalentní délkově hodnotě $\pm 2,14$ nm. Pro tuto hodnotu předpokládáme rovnoměrné (obdélníkové) rozdělení s koeficientem typickým pro daný typ rozdělení $k = \sqrt{3}$. Hodnota standardní nejistoty měření tohoto příspěvku uváděná výrobcem je:

$$U_{vo} = \frac{2,14}{k} = \frac{2,14}{\sqrt{3}} \cong \pm 1,4 \text{ nm} \quad (4.24)$$

- Paralelnost, rovinnost funkčních ploch koncové měřky

Vliv možné chyby měření způsobené nerovnostmi funkčních ploch koncových měrek je odhadována z hodnot pro třídu K koncových měrek dle ČSN EN ISO 3650. Kvalifikovaný odhad této hodnoty odvozený od dlouhodobého měření je $\pm 0,81$ nm. Pro tuto hodnotu předpokládáme rovnoměrné (obdélníkové) rozdělení s koeficientem typickým pro daný typ rozdělení $k = \sqrt{3}$. Hodnota standardní nejistoty měření tohoto příspěvku uváděná výrobcem je:

$$U_{so} = \frac{0,81}{k} = \frac{0,81}{\sqrt{3}} \cong \pm 0,5 \text{ nm} \quad (4.25)$$

- Ostatní
 - *změna atmosférického tlaku během měření*

Z provedených měření v minulých letech se prokázalo, že kolísání hodnot atmosférického tlaku v místě měření nepřesahuje ± 50 mbar. Tato hodnota se dá dle výrobce interferometru přiřadit ke změně objemu ocelové měřky v délkových hodnotách v rozsahu daném tímto vztahem:

$$\Delta_L = \pm 0,01 \times 10^{-6} L \quad (4.26)$$

Což dle údajů výrobce interferometru odpovídá příspěvku k nejistotě délkového měření:

$$U_{AP1} = \pm 0,004L \text{ nm} \quad (4.27)$$

kde L je jmenovitá délka měrky v mm.

Pro tuto hodnotu předpokládáme rovnoměrné (obdélníkové) rozdělení s koeficientem typickým pro daný typ rozdělení $k = \sqrt{3}$. Hodnota standardní nejistoty měření tohoto příspěvku uváděná výrobcem je:

$$U_{AP} = \frac{U_{AP1}}{k} = \frac{0,004}{\sqrt{3}} \times L \cong \pm 0,002L \text{ nm} \quad (4.28)$$

Kde L je jmenovitá délka měrky v mm.

- *vliv gravitační síly na měrek větších jmenovitých rozměrů*

Rozměrová změna koncové měrky (změna vertikálního a horizontálního rozměru) o jmenovité hodnotě 100mm je dle výrobce přístroje udána vztahem popisujícím tuto závislost:

$$U_{GR1} = \pm 0,0004L \text{ nm} \quad (4.29)$$

kde L je jmenovitá délka měrky v mm.

Pro tuto hodnotu předpokládáme rovnoměrné (obdélníkové) rozdělení s koeficientem typickým pro daný typ rozdělení $k = \sqrt{3}$. Hodnota standardní nejistoty měření tohoto příspěvku uváděná výrobcem je:

$$U_{GR} = \frac{U_{GR1}}{k} = \frac{0,0004}{\sqrt{3}} \times L \cong \pm 0,0002L \text{ nm} \quad (4.30)$$

Pro koncové měrky menších jmenovitých délek (do 25 mm) se považuje vliv gravitační síly za zanedbatelný.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 46
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

4.3.10 Stanovení kombinované nejistoty

Pro stanovení kombinované nejistoty všech uvedených příspěvků použijeme vztah, který vychází z Gaussova zákona šíření nejistot – viz vztah 2.4:

$$u_c^2(x) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \text{ nm}$$

4.4 Příklad praktického výpočtu nejistot

4.4.1 Zadání

Pro praktickou ukázkou stanovení nejistoty bylo zvoleno měření ocelové koncové měrky o jmenovitém rozměru 125 mm, evidenční číslo 16109, ze sady o 28 kusech, výrobce Frank. Měření bylo provedeno dle akreditovaného kalibračního postupu 401-PP-D NPL/98.

Bylo provedeno celkem pět měření v souladu s kalibračním postupem, v tabulce naměřených hodnot jsou uvedeny hodnoty středové odchylky od jmenovité hodnoty v souladu s ČSN EN ISO 3650.

Tabulka 3: Naměřené hodnoty v μm

Číslo měření n	1	2	3	4	5
Středová odchylka	-0,195	-0,126	-0,192	-0,125	-0,169

4.4.2 Výpočet výběrové střední hodnoty:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 124,999\,839 \text{ mm} \quad (4.31)$$

4.4.3 Výpočet standardní nejistoty vyhodnocené způsobem A:

$$u_A(x) = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \approx 0,045 \mu\text{m} \quad (4.32)$$

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 1).

4.4.4 Výsledná standardní nejistota typu A rozšířená o koeficient k_s :

$$u_A = u_{(A)}(x) \times k_s = 0,045 \times 1,4 = 0,063 \text{ } \mu\text{m} \quad (4.33)$$

4.4.5 Výpočet příspěvků standardní nejistoty vyhodnocené způsobem B:

A) Vliv frekvence laseru

Výpočet příspěvku k nejistotě měřené veličiny vychází ze vztahu 4.3:

$$u_{LF}(x) = 0,020 L \text{ nm} = 0,020 \times 125 = 2,5 \text{ nm} \quad (4.34)$$

B) Vliv načtení interferenčního obrazce – proužků (počet nebo část proužku)

Hodnota tohoto příspěvku k nejistotě měřené veličiny vychází ze vztahu 4.5:

$$u_{FF}(x) = 1,22 \text{ nm}$$

C) Vliv měření teploty koncové měrky

Výpočet obou příspěvků k nejistotě měřené veličiny vychází ze vztahů 4.6 a 4.8:

- vliv použitého teploměru

$$u_{GT}(x) = 0,029 L \text{ } \mu\text{m} = 0,029 \times 0,125 \cong 0,36 \text{ } \mu\text{m} \quad (4.35)$$

- vliv odporového můstku teploměru

$$u_{RT}(x) = 0,036L \text{ nm} = 0,036 \times 125 = 4,5 \text{ nm} \quad (4.36)$$

D) Vliv rozdílu teplot mezi měrkou a referenční deskou

Výpočet příspěvku k nejistotě měřené veličiny vychází ze vztahu 4.10:

$$u_{TD}(x) = 0,034L \text{ } \mu\text{m} = 0,034 \times 0,125 \cong 0,43 \mu\text{m} \quad (4.37)$$

E) Vliv určení koeficientu délkové roztažnosti

Výpočet příspěvku k nejistotě měřené veličiny vychází ze vztahu 4.11:

$$u_{EC}(x) = 0,003L \text{ } \mu\text{m} = 0,003 \times 0,125 \cong 0,05 \mu\text{m} \quad (4.38)$$

F) Vliv refraktivity vzduchu (index lomu vzduchu) v místě měření

- Vliv nejistoty měření tlaku vzduchu

Výpočet příspěvku k nejistotě měřené veličiny vychází ze vztahu 4.12:

$$u_{PR}(x) = 0,001L \text{ nm} = 0,001 \times 125 = 0,13 \text{ nm} \quad (4.39)$$

- Vliv nejistoty kalibrace vlastního tlakoměru

Výpočet příspěvku k nejistotě měřené veličiny vychází ze vztahu 4.13:

$$u_{PC}(x) = 0,012L \text{ nm} = 0,012 \times 125 = 1,5 \text{ nm} \quad (4.40)$$

- Vliv měření teploty vzduchu

Výpočet příspěvku k nejistotě měřené veličiny vychází ze vztahu 4.14:

$$u_{TR}(x) = 0,005 L \text{ nm} = 0,005 \times 125 \cong 0,63 \text{ nm} \quad (4.41)$$

- Vliv nejistoty kalibrace vlastního teploměru vzduchu

Výpočet příspěvku k nejistotě měřené veličiny vychází ze vztahu 4.15:

$$u_{TC}(x) = 0,007 L \text{ nm} = 0,007 \times 125 \cong 0,88 \text{ nm} \quad (4.42)$$

- Vliv nejistoty měření vlhkosti vzduchu

Výpočet příspěvku k nejistotě měřené veličiny vychází ze vztahu 4.16:

$$u_{RV}(x) = 0,005 L \text{ nm} = 0,005 \times 125 \cong 0,63 \text{ nm} \quad (4.43)$$

- Vliv nejistoty kalibrace vlastního vlhkoměru

Výpočet příspěvku k nejistotě měřené veličiny vychází ze vztahu 4.17:

$$u_{CV}(x) = 0,005 L \text{ nm} = 0,005 \times 125 = 0,63 \text{ nm} \quad (4.44)$$

- Vliv obsahu CO₂ ve vzduchu v místě měření

Výpočet příspěvku k nejistotě měřené veličiny vychází ze vztahu 4.18:

$$u_{CO}(x) = 0,021L \text{ nm} = 0,021 \times 125 = 2,6 \text{ nm} \quad (4.45)$$

G) Vliv ztráty fáze laseru při odrazu od lesklé plochy

- Vliv rovinnosti plochy referenční desky

Hodnota tohoto příspěvku k nejistotě měřené veličiny vychází ze vztahu 4.19:

$$u_{SR}(x) = \pm 3,2 \text{ nm}$$

- Vliv změny fáze při nasátí měrek

Hodnota tohoto příspěvku k nejistotě měřené veličiny vychází ze vztahu 4.20:

$$u_{PH}(x) = \pm 1,4 \text{ nm}$$

H) Tloušťka povrchové vrstvy (při nasátí měřky)

Hodnota tohoto příspěvku k nejistotě měřené veličiny vychází ze vztahu 4.21:

$$u_{VF}(x) = \pm 1,2 \text{ nm}$$

I) Parametry měřicího přístroje

- Seřízení optiky

Výpočet příspěvku k nejistotě měření měřené veličiny vychází ze vztahu 4.23:

$$u_{OB}(x) = 0,006L \text{ nm} = 0,006 \times 125 = 0,75 \text{ nm} \quad (4.46)$$

- Zkreslení obrazu interferenčního obrazce vlivem optiky

Hodnota tohoto příspěvku k nejistotě měřené veličiny vychází ze vztahu 4.24:

$$u_{VO}(x) = \pm 1,4 \text{ nm}$$

- Paralelnost, rovinnost funkčních ploch koncové měrky

Hodnota tohoto příspěvku k nejistotě měřené veličiny vychází ze vztahu 4.25:

$$u_{SO}(x) = \pm 0,5 \text{ nm}$$

- Ostatní
 - *změna atmosférického tlaku během měření*

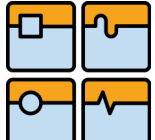
Výpočet příspěvku k nejistotě měřené veličiny vychází ze vztahu 4.28:

$$u_{AP}(x) = 0,002L \text{ nm} = 0,002 \times 125 \cong 0,25 \text{ nm} \quad (4.47)$$

- *vliv gravitační síly na měrek větších jmenovitých rozměrů*

Výpočet příspěvku k nejistotě měřené veličiny vychází ze vztahu 4.30:

$$u_{GR}(x) = 0,0002L \text{ nm} = 0,0002 \times 125 \cong 0,03 \text{ nm} \quad (4.48)$$

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 53
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

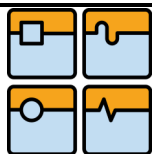
4.4.6 Výpočet celkové standardní nejistoty vyhodnocené způsoby A a B:

Výpočet této kombinované standardní nejistoty $u_c(x)$ je dán kombinací všech jejich dílčích příspěvků (včetně standardní nejistoty A) a vychází ze vztahu Gaussova zákona šíření nejistot měření – viz. vztah 2.4:

$$u_c^2(x) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) = \sum_{i=1}^n u_A^2(x) + u_{LF}^2(x) + u_{FF}^2(x) + u_{GT}^2(x) + \dots + u_{GR}^2(x)$$

Po dosazení do rovnice a provedení výpočtu vychází hodnota standardní kombinované nejistoty:

$$u_c(x) = 0,87 \mu\text{m} \quad (4.49)$$



Tabulka 4: Balance výpočtů příspěvků k nejistotě měření

Označení příspěvku	Odhad	Nejistota	rozšířená	Rozdělení	Koeficient rozšíření (rozdělení)	Koeficient citlivosti	Příspěvek ke kombinov. nejistotě [nm]
u_A	---	0,045	μm	normální	2	1,4	0,63
u_{LF}	0,02L	0,02	L [nm]	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	1	2,50
u_{FF}	2,6 nm	1,73	nm	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,707	1,22
u_{GT}	0,005°C	0,029	L [μm]	normální	2	m/°C	0,36
u_{RT}	0,021L	0,036	L [nm]	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	1	4,50
u_{TD}	0,005°C	0,034	L [μm]	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	m/°C	4,30
u_{EC}	0,3 nm	0,003	L [μm]	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	m/°C	0,05
u_{PR}	0,015 mbar	0,001	L [nm]	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	1	0,13
u_{PC}	0,015 mbar	0,012	L [nm]	normální	2	1	1,50
u_{TR}	0,01°C	0,005	L [nm]	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	1	0,63
u_{TC}	0,005°C	0,007	L [nm]	normální	2	1	0,88
u_{RV}	0,01°C	0,005	L [nm]	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	1	0,63
u_{CV}	0,2°C	0,005	L [nm]	normální	2	1	0,63
u_{CO}	250 ppm	0,021	L [nm]	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	1	2,60
u_{SR}	5,55 nm	3,2	nm	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	1	3,20
u_{PH}	2,44 nm	1,4	nm	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	1	1,40
u_{VF}	2,02 nm	1,2	nm	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	1	1,20
u_{OB}	0,01L	0,006	L [nm]	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	1	0,75
u_{VO}	2,14 nm	1,4	nm	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	1	1,40
u_{SO}	0,81 nm	0,5	nm	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	1	0,50
u_{AP}	0,004L	0,002	L [nm]	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	1	0,25
u_{GR}	0,0004L	0,0002	L [nm]	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	1	0,03
Nejistota kombinovaná						$u_c =$	8,63
							$u_c \approx 0,87 \mu\text{m}$

Přehled označení příspěvků ke standardní kombinované nejistotě použitých v tabulce:

- u_A – standardní nejistota typu A
- u_{LF} – vliv frekvence laseru
- u_{FF} – vliv načtení interferenčního obrazce
- u_{GT} – vliv měření teploty koncové měrky (vliv použitého teploměru)
- u_{RT} – vliv měření teploty koncové měrky (vliv odporového můstku)
- u_{TD} – vliv rozdílu teplot mezi měrkou a referenční deskou
- u_{EC} – vliv rozdílu určení koeficientu délkové roztažnosti
- u_{PR} – vliv nejistoty měření tlaku vzduchu (index lomu)
- u_{PC} – vliv nejistoty kalibrace tlakoměru (index lomu)
- u_{TR} – vliv nejistoty měření teploty vzduchu (index lomu)
- u_{TC} – vliv nejistoty kalibrace teploměru (index lomu)
- u_{RV} – vliv nejistoty měření vlhkosti vzduchu (index lomu)
- u_{CV} – vliv nejistoty kalibrace vlhkoměru (index lomu)
- u_{CO} – vliv obsahu CO_2 ve vzduchu
- u_{SR} – vliv rovinnosti plochy referenční desky (ztráta fáze)
- u_{PH} – vliv změny fáze měrek při nasátí (ztráta fáze)
- u_{VF} – vliv tloušťky povrchové vrstvy při nasátí měrky
- u_{OB} – vliv seřízení optiky interferometru
- u_{EC} – vliv interferenčního obrazce vlivem optiky
- u_{SO} – vliv stavu funkčních ploch koncové měrky
- u_{AP} – vliv změny atmosférického tlaku při měření
- u_{GR} – vliv gravitační síly na koncovou měrku

4.4.7 Výsledná standardní rozšířená nejistota měření:

$$U = u_c(x) \times k = 0,87 \times 2 = 1,74 \mu\text{m} \quad (4.50)$$

kde $k = 2$ je koeficient rozšíření pro normální rozdělení.

5 Zapracování automatického vyhodnocení nejistot do programového vybavení

5.1 Souhrn

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

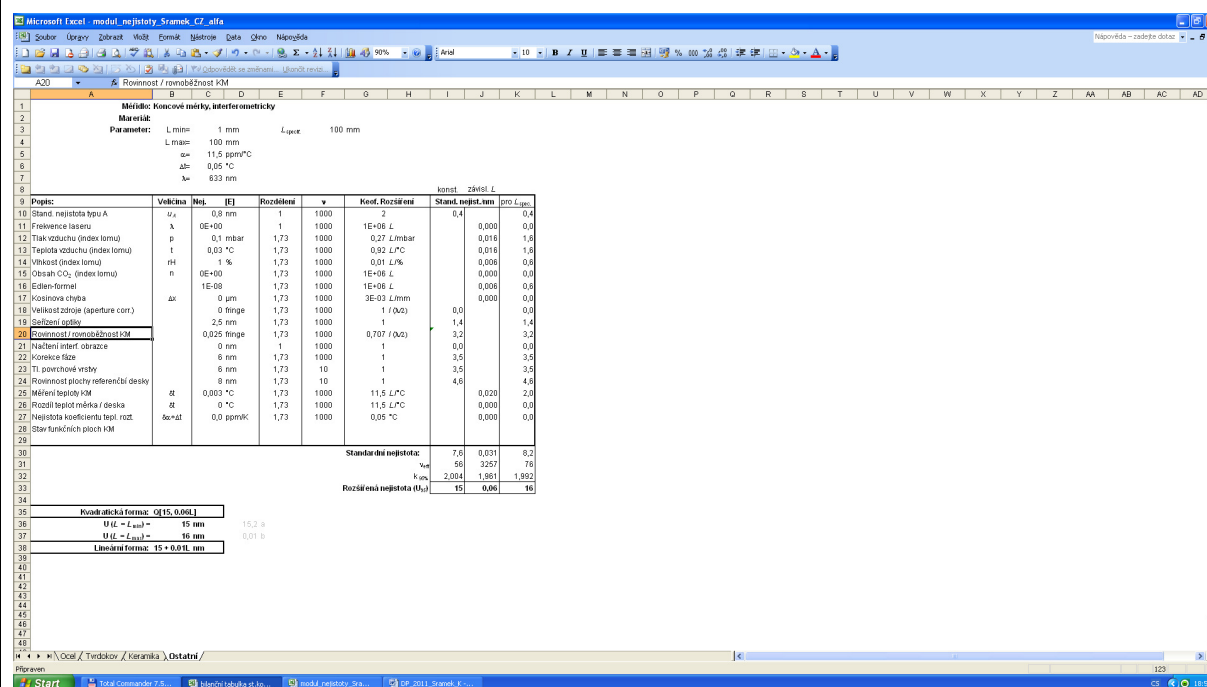
- jednoduchá obsluha;
- minimální náklady na používaný SW a HW;
- jednoduchá možnost editace;
- univerzálnost (možnost použití v LPM Praha);
- možnost přenosu naměřených dat z měřicího SW LabView;
- možnost přenosu výsledků nejistot z modulu do kalibračního protokolu.

Výpočtový modul je vytvořen v souboru aplikace MS Excel. Tento produkt byl vybrán z důvodu jeho masivního rozšíření ve všech Oblastních inspektorátech ČMI a jeho všeobecnou znalost použití. Umožňuje rychlé a přesné zjištění hodnoty nejistoty daného měření. Je dostatečně univerzální, aby mohl být použit pro jiné typy interferometrického měření, než jen na přístroji Tesa NPL. Popřípadě je možné využití modulu po určité úpravě i pro jiná měření délky.

Výhodou je také možnost on-line provozu při vlastním procesu měření – vyhodnocení – výpočet nejistoty – tvorba kalibračního certifikátu. V současné době již níže uvedený soubor funguje v délkových laboratořích ČMI v Liberci a v Brně.

5.2 Výpočtový modul MS Excel pro nejistotu měření na přístroji Tesa NPL

Tento modul umožňuje výpočet nejistoty měření při přímých měření délky koncových měrek na interferometru Tesa NPL, ale i jiných interferometrických měření, za předpokladu splnění podmínky přímého měření. Od modulů vypracovaných v autorově bakalářské práci se liší zejména tím, že se jedná především o zahrnutí vyššího počtu vlivů na nejistotu měření při kalibracích koncových měrek. Modul pro vyhodnocování nejistoty měření na přístroji Tesa NPL navazuje na předešlé příklady výpočtů nejistot (viz. kapitola č.4).



Měřič: Koncové měřky, interferometricky									
Materiál:									
Parameter:	L mm	1 mm	L _{typ} mm	100 mm					
L mm	100	1	L _{typ} mm	100					
α	11,5 ppm/°C								
Δt	0,05 °C								
ΔL	633 nm								
konst. zřetel. L									
Popis:	Velikost	Nej.	[E]	Rozšíření	v	Koef. Rozšíření	Stand. nejst. mm	pro L _{typ}	
10 Stand. nejstota typu A	u _A	0,8 nm	1	1000	2		0,4	0,4	
11 Frekvence laseru	λ	0E+00	1	1000	1E+06 L		0,000	0,0	
12 Tlak vzduchu (index lomu)	p	0,1 mbar	1,73	1000	0,27 L/mbar		0,016	1,6	
13 Teplota vzduchu (index lomu)	t	0,03 °C	1,73	1000	0,92 L/°C		0,016	1,6	
14 Vlhkost (index lomu)	rh	1 %	1,73	1000	0,01 L/%		0,006	0,6	
15 Obsah CO ₂ (index lomu)	n	0E+00	1,73	1000	1E+06 L		0,000	0,0	
16 Eclat-formel	ΔL	1E-08	1,73	1000	1E+06 L		0,006	0,6	
17 Kosinová chyba	ΔL	0 μm	1,73	1000	3E-03 L/mm		0,000	0,0	
18 Velikost zářezy (aperture corr.)	0 fringe	1,73	1000	1 / (Δu)		0,0	0,0		
19 Sčítání odrazů	2,5 nm	1,73	1000	1		1,4	1,4		
20 Rozměry / rozměry / rozměry	0,025 fringe	1,73	1000	0,707 / (Δu)		3,2	3,2		
21 Načtení inter. obrazce	0 nm	1	1000	1		0,0	0,0		
22 Korekce fáze	6 nm	1,73	1000	1		3,5	3,5		
23 TL povrchové vlny	6 nm	1,73	10	1		3,5	3,5		
24 Rovinnost plochy referenční desky	8 nm	1,73	10	1		4,6	4,6		
25 Měření teploty KM	Δt	0,003 °C	1,73	1000	11,5 L/°C		0,020	2,0	
26 Rozdílná teplota měřky / desky	Δt	0 °C	1,73	1000	11,5 L/°C		0,000	0,0	
27 Nejistota koeficientu teplot. rozst.	Δα*Δt	0,0 ppm/°C	1,73	1000	0,05 °C		0,000	0,0	
28 Ostatní funkční plochy KM									
Standardní nejistota:							7,6	0,031	8,2
k _{rel}							96	2,257	76
Rozšířená nejistota (U ₉₅)							15	0,06	15
Provozní formát: 0,15, 0,015 ΔL_{rel} = ΔL_{rel} = 15,2 % U_{rel} = ΔL_{rel} = 15,2 % Lineární formát: 15 ± 0,06 mm									

Obr. 5.1 – Výpočtový modul pro nejistotu délkového měření

Výpočtový modul vytvořený v aplikaci MS Excel je součástí přílohy na datovém nosiči CD, který je součástí vazby diplomové práce.

6 Závěr

Cílem diplomové práce bylo vypracovat podrobnou analýzu nejistot měření při kalibraci koncových měrek na interferometru Tesa NPL. Byl vytvořen model pro odhad standardní kombinované nejistoty pro toto měření, byly kvantifikovány jednotlivé složky standardní nejistoty. Byl také vytvořen funkční modul v MS Excel pro výpočet standardní rozšířené nejistoty v praxi. Diplomová práce také obsahuje příklad výpočtu standardní nejistoty při kalibraci koncové měrky.

Na počátku práce autor obecně prošel problematiku nejistot měření z pohledu terminologie a jejich definic. Dále pak byl popsán použitý měřicí systém interferometru Tesa NPL.

Hlavní náplní vlastní práce podrobná byla analýza nejistot měření na interferometrickém přístroji Tesa NPL, určení podstatných zdrojů nejistot měření, které mají vliv na konečný výsledek měření, ukázka praktického výpočtu nejistoty měření a vytvoření výpočtového modulu pro nejistotu měření při kalibraci koncových měrek.

S velkou pravděpodobností se vytvořený výpočtový modul stane vítaným pomocníkem v každodenní metrologické praxi při každodenní práci na pracovišti ČMI v Liberci. Úspora času, tedy i finančních prostředků bude určitě kladně hodnocena, stejně jako možnost použití na ostatních inspektorátech ČMI.

Diplomová práce může sloužit jako cenný zdroj informací pro kolegy metrology, kteří se s aparátem nejistot délkových měření již dříve seznámili a rovněž jako školící 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 splňuje i nároky na výkonnost současných měřicích přístrojů. Provedená modernizace dále umožňuje aplikaci výpočtu nejistoty měření přímo v každodenní metrologické činnosti.

7 Užitá literatura a zdroje

- [1] Guide to the expression of uncertainty in measurement. International Organization for Standardization. 1993, zpracovaný do ČSN P ENV 13005 Pokyn pro vyjadřování nejistoty měření (GUM) (01 4105);
- [2] EA 4/02 Vyjadřování nejistot měření při kalibracích (Expressions of The Uncertainty of Measurement in Calibration
- [3] Fiala, A. a kol.: Management jakosti s podporou norem ISO 9000:2000. Odborné nakladatelství technické literatury. Praha: Verlag Dashofer, nakladatelství, s.r.o. 2006, svazek 3, kap. 15. ISBN 80-86229-19-X.
- [4] Chudý, V.; Palenčár, R.; Kureková, E.; Halaj, M.; Meranie technických veličín, 1. vydání Bratislava: Vydavateľstvo STU, 1999. 688s. ISBN 80-227-1275-2;
- [5] Vdoleček F.; Technická měření; Studijní opory, VUT Brno, 2002;
- [6] Čech J.; Pernikář J.; Podaný K.: Strojírenská metrologie; 4. vydání, CERM, 2005, ISBN 80-214-3070-2;
- [7] Pernikář J.; Tykal M.: Strojírenská metrologie II; 1. vydání, CERM, 2006, ISBN 80-214-3338-8;
- [8] Šrámek J.: Nejistoty přesných délkových měření, Bakalářská práce, VUT – FSI Brno 2008; vedoucí práce Ing. František Vdoleček, CSc.;
- [10] ČSN EN ISO 17025. Všeobecné požadavky na činnost zkušebních a kalibračních laboratoří. Praha: Český normalizační institut, 2001;
- [12] NPL-TESA Automatic Gauge Block Interferometer Handbook, Tesa Metrology Ltd., Telford U.K. 1994;
- [13] www.cmi.cz oficiální stránky [online], c2011, Český metrologický institut, Brno;
- [14] www.cai.cz oficiální stránky [online], c2011, Český Institut pro akreditaci, o.p.s., Praha;
- [15] www.palstat.cz oficiální stránky [online], c2011, Palstat, s.r.o., Vrchlabí;
- [16] Zahrádka P.: Nejistoty měření [online], c2006, Design Tech: otevřený informační portál – CAQ, dostupné z: www.designtech.cz.
- [17] Machač J.: 3. Nejistoty měření [online], c2011, Vysoká škola Chemicko-Technologická v Praze, dostupné z: http://eso.vscht.cz/cache_data/1396/www.vscht.cz/ufmt/cs/pomucky/machacj/docs/Nejistoty.pdf.

8 Seznam příloh

Příloha č. 1 – Kalibrační list laseru $\lambda = 633 \text{ nm}$;

Příloha č. 2 – Kalibrační list laseru $\lambda = 453 \text{ nm}$;

Příloha č. 3 – Kalibrační list teploměru Pt100;

Příloha č. 4 – Kalibrační list vlhkoměru;

Příloha č. 5 – Kalibrační list tlakoměru;

Příloha č. 6 – Kalibrační list sady koncových měrek;

Příloha č. 7 – Příklad výpočtu měřené délky koncové měrky dle návodu výrobce;

Příloha č. 8 – Přiložené CD;

- Výpočtový modul nejistoty měření při kalibraci koncových měrek;
- Diplomová práce ve formátu .pdf.