



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Bezkontaktní systém pro měření délky koncových měrek
Contact-less System for Gauge Blocks Length Measurement

HABILITAČNÍ PRÁCE

Katedra obrábění a montáže

Autor práce: **Ing. Štěpánka DVOŘÁČKOVÁ, Ph.D.**

Rok: 2016



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Bezkontaktní systém pro měření délky koncových měrek
Contact-less System for Gauge Blocks Length Measurement

HABILITAČNÍ PRÁCE

Rozsah práce a příloh

Počet stran: 160

Počet obrázků: 76

Počet tabulek: 30

Počet příloh: 1

ANOTACE

Předkládaná habilitační práce poskytuje nové informace o možnostech využití principů nízkokoherenční interferometrie pro měření délky koncových měrek.

Hlavním cílem předkládané práce bylo připravit bezkontaktní systém pro zavedení do běžného provozu Českého metrologického institutu k měření délky koncových měrek.

K dosažení cíle bylo nutné zoptimalizovat bezkontaktní systém pro přímé potřeby laboratorního měření, vytvořit kompletní dokumentaci k validaci dané metody měření tj. stanovit nejistotu měření a následně metodiku (kalibrační postup) pro měření na daném přístroji a porovnat nový systém se stávajícími systémy a jejich metodami měření běžně využívaných v Českém metrologickém institutu, Oblastním inspektorátu Liberec.

Nezbytné základní pojmy týkající se řešené problematiky, vztahy a definice jsou uvedeny v teoretické části práce. Do této části práce jsou zahrnuty přehledně informace o interferenci, koncových měrkách a nejistotě měření. Dále jsou zde stručně uvedeny popisy metod a zařízení pro měření délky koncových měrek na pracovišti Českého metrologického institutu, Oblastního inspektorátu Liberec. Jedná se popis metody interferenční prováděné na přístroji TESA NPL A.G.I. 300 a komparační prováděné na přístroji TESA–UPC. Nedílnou součástí teoretické části jsou také informace vztahující se k základnímu popisu měření délky koncových měrek na bezkontaktním systému.

Dosažení cíle je věnována kompletně celá experimentální část práce, která obsahuje informace o optimalizaci systému z hlediska konstrukčního řešení, stanovení nejistoty měření pro daný přístroj a metodu měření, kompletně zpracovanou metodiku pro měření délky koncových měrek na daném přístroji (kalibrační postup). Pro ucelený pohled týkající se zavedení systému je v poslední části řešení práce provedeno porovnání stávajících systémů k měření délky koncových měrek v Českém metrologickém institutu, Oblastním inspektorátu Liberec s bezkontaktním systémem.

Klíčová slova: interference; koncová měrka; nejistota měření; bezkontaktní systém.

ANNOTATION

The submitted habilitation thesis provides the new information about possibilities to utilize principles of the low-coherence interferometry for measurement the gauge block length.

As a main purpose of the habilitation thesis there was preparation of the contact-less system for implementation into the Czech metrology institute common operation for measurement the gauge block length.

To achieve purposes mentioned above there was necessary to optimize contact-less system for the direct needs of the laboratory measurement, to create complete documentation for validation the given measurement method i.e. to determine measurement uncertainty and subsequently methodology (calibration procedure) for its measurement on the given machine and to compare new system with the current systems and their measurement methodologies which are commonly used in the Czech metrology institute, Regional Inspectorate Liberec.

All necessary basic terms those are related to the solving problem, equation and definitions are described in the theoretical part of habilitation thesis. In this part are digestedly summarized information about the interference, gauge blocks and measurement uncertainty. Moreover there are briefly mentioned descriptions of methods and devices for measurement the gauge blocks length in the workplace Czech metrology institute, Regional Inspectorate Liberec. More precisely, there is described both the interference method that is carried out on the device TESA NPL A.G.I. 300 and the comparative method that is done on the device TESA-UPC. As an integral part of the theoretical section there are also information regarding the basic description of the measurement gauge blocks length on the contact-less system.

Completely the whole experimental part is about achieving the aim mentioned before. That is why it contains information about system optimization in light of its design solution, determination the measurement uncertainty for given device and measurement methodology, complete elaborated methodology for measurement the gauge blocks length on the given device (calibration procedure). To have the comprehensive view for the implementation of this system, in the last part of the habilitation thesis is carried out comparison of the current systems for measurement gauge blocks length in the Czech metrology institute, Regional Inspectorate Liberec with this contact-less system.

Key words: interferometry; gauge blocks; measurement uncertainty; contact-less system.

PODĚKOVÁNÍ

Za obětavou pomoc při zpracování této práce děkuji **Ing. Zdeňku Buchtovi, Ph.D., Mgr. Petru Křenovi a Ing. Františku Dvořáčkovi**, mému manželovi.

Za důležité a velmi cenné rady při zpracování této práce děkuji **doc. Ing. Doře Kroisové, Ph.D., prof. Ing. Nikolaju Ganevovi, CSc. a doc. Ing. Martinu Bílkovi, Ph.D.**

Celému kolektivu katedry obrábění a montáže a katedry strojírenské technologie děkuji za veškerou pomoc, kterou mi vždy velmi ochotně poskytli.

OBSAH

1. ÚVOD	1
2. TEORETICKÁ ČÁST	3
2.1 INTERFERENCE	4
2.1.1 Interference světla	4
2.1.1.1 Princip superpozice	4
2.1.1.2 Skládání vlnění a interference	5
2.1.1.3 Koherence vlnění	8
2.1.2 Laserová interferometrie	13
2.1.3 Interferometrie nízké koherence	14
2.1.4 Index lomu vzduchu	15
2.2 KONCOVÉ MĚRKY	18
2.2.1 Názvosloví a definice	18
2.2.2 KM a příslušenství	20
2.2.3 Práce s KM	23
2.2.4 Materiál a délková teplotní roztažnost KM	24
2.2.5 Měření délky KM	26
2.2.6 Deformace KM	30
2.2.7 Rozměrová stabilita	30
2.3 NEJISTOTA MĚŘENÍ	31
2.3.1 Zásady a definice	31
2.3.2 Stanovení nejistot měření pro odhady hodnot vstupních veličin	32
2.3.2.1 Stanovení nejistoty typu A	32
2.3.2.2 Stanovení nejistoty typu B	33
2.3.2.3 Výpočet standardní nejistoty odhadu hodnoty výstupní veličiny	34
2.3.2.4 Rozšířená nejistota měření	36
2.4 SYSTÉMY PRO MĚŘENÍ DÉLKY KM	38
2.4.1 Interferenční systém pro měření délky KM – TESA NPL A.G.I. 300	40
2.4.1.1 Popis systému TESA NPL A.G.I. 300	41
2.4.1.2 Postup měření na systému TESA NPL A.G.I. 300	42
2.4.1.3 Nejistota měření systému TESA NPL A.G.I. 300	44
2.4.2 Komparační systém pro měření délky KM – TESA–UPC	48
2.4.2.1 Popis systému TESA–UPC	50
2.4.2.2 Postup měření na systému TESA–UPC	51
2.4.2.3 Nejistota měření systému TESA–UPC	53
2.5 BEZKONTAKTNÍ SYSTÉM PRO MĚŘENÍ DÉLKY KM	58
2.5.1 Popis bezkontaktního systému	58
2.5.2 Postup měření na bezkontaktním systému	64
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	67
3.1 OPTIMALIZACE STÁVAJÍCÍHO KONSTRUKČNÍHO ZAŘÍZENÍ PRO BEZKONTAKTNÍ MĚŘENÍ DÉLKY KM PRO PŘÍMÉ POTŘEBY ČMI	69

3.1.1 Návrh a implementace metody pro aktivní stabilizaci polohy KM v experimentální sestavě	69
3.1.2 Nové matice fotodetektorů pro detekci interferenčních signálů, včetně úpravy elektroniky pro zpracování signálů	73
3.1.3 Analýza metod pro detekci středu bílých interferenčních proužků, výběr nejvhodnější metody a její implementace do programu pro zpracování výsledků měření	75
3.1.4 Optimalizace algoritmu pro zpracování výsledků měření délky KM	78
3.1.5 Nová konstrukce kolimační jednotky pro NKT (bílý) laser	79
3.1.6 Analýza možnosti využití paralelní optiky	80
3.1.7 Úpravy řídicích programů systému	80
3.1.8 Úpravy mechanických částí podavače KM	81
3.1.9 Návrh a realizace systému pro řízení polohy uložení KM v měřicí sestavě	81
3.2 NEJISTOTA MĚŘENÍ PRO BEZKONTAKTNÍ SYSTÉM	83
3.2.1 Popis stanovení nejistoty měření pro bezkontaktní systém	83
3.2.2 Podmínky měření a příprava KM	84
3.2.3 Stanovení nejistoty měření pro bezkontaktní systém	84
3.2.3.1 Stanovení standardní nejistoty vztahující se ke vstupní veličině X_i získané ze statistické analýzy série pozorování (nejistota typu A)	86
3.2.3.2 Stanovení standardní nejistoty vztahující se ke vstupní veličině X_i jiným způsobem než statistickou analýzou série pozorování (nejistota typu B)	86
3.2.3.3 Kombinovaná standardní nejistota	114
3.2.3.4 Rozšířená nejistota měření	114
3.3 MĚŘENÍ DÉLKY KM BEZKONTAKTNÍM SYSTÉMEM	117
3.3.1 Zařízení a pomůcky pro měření délky KM bezkontaktním systémem	117
3.3.2 Postup měření	118
3.3.2.1 Zapnutí systému	119
3.3.2.2 Kontrola a nastavení systému	120
3.3.2.3 Příprava KM pro měření	123
3.3.2.4 Měření	124
3.3.2.5 Vyhodnocení	127
3.3.3 Nejistota měření	127
3.3.3.1 Příklad výpočtu nejistoty měření pro KM jmenovité délky 50 mm	129
3.4 MEZISYSTÉMOVÉ POROVNÁNÍ STÁVAJÍCÍCH SYSTÉMŮ K MĚŘENÍ DÉLKY KM S BEZKONTAKTNÍM SYSTÉMEM	132
3.4.1 Podmínky měření a příprava KM	132
3.4.2 Porovnání měřících systémů pro kalibrace krátkých KM	133
4. DISKUZE	145
5. ZÁVĚR	153
6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	156
PŘÍLOHA HABILITAČNÍ PRÁCE	160

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Označení důležitých veličin a význam nejpoužívanějších zkratk a symbolů v předkládané habilitační práci.

Zkratky

Označení

Význam

BIPM	Mezinárodního úřadu pro váhy a míry (Bureau International des Poids et Mesures)
CCD	Elektronická součástka používaná pro snímání obrazové informace (Charge–Coupled Device)
CMC	Kalibrační a měřicí schopnost (Calibration and Measurement Capabilities)
ČMI	Český metrologický institut
ČMI OI Liberec	Český metrologický institut, Oblastní inspektorát Liberec
DZ	Dělicí zrcadlo
EA	Evropská spolupráce pro akreditaci (European cooperation for Accreditation)
EURAMET	Sdružení pro spolupráci evropských národních metrologických institutů v oblasti fundamentální metrologie.
GUM	Polský metrologický institut (Główny Urząd Miar)
He–Ne laser	Helium–neonový laser
ILAC	Celosvětové fórum pro rozvoj akreditačních praktik a postupů v oblasti laboratoří
IRMM	Mezinárodní institut pro referenční materiály a měření (Institute for Reference Materials and Measurement)
KCDB	Databáze tzv. nejlepších schopností kalibrace a měření (Key Comparisons Data Base)
KM	Koncová měrka
MATLAB	Interaktivní programové prostředí a skriptovací programovací jazyk (Matrix laboratory)
MZ	Měřicí (pohyblivé) zrcadlo
NIST	Národní institut standardů a technologie (National Institute for Standards and Technology)
NPL	Národní fyzikální laboratoř ve Velké Británii (National Physical Laboratory)
OIML	Mezinárodní organizace pro legální metrologii
PC	Osobní počítač

PTB	Německý metrologický institut (Physikalisch–Technische Bundesanstalt)
RZ	Referenční zrcadlo
RS	Referenční zrcadlo v programovém modulu; referenční plocha/povrch
TUL	Technická univerzita v Liberci
ÚNMZ	Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví

Latinská abeceda

Označení	Rozměr	Význam
a		Poloviční šířka obdélníkového rozdělení možných hodnot vstupní veličiny X_i : $a = (a_+ - a_-)/2$
a_+		Horní mez (horní hranice) vstupní veličiny X_i
a_-		Dolní mez (dolní hranice) vstupní veličiny X_i
c	[m/s]	Rychlost světla; fázová rychlost
c_0	[m/s]	Rychlost světla ve vakuu
c_i		Parciální derivace; koeficient citlivosti: $c_i \equiv \partial f / \partial x_i$
E	[10 ³ MPa]	Modul pružnosti v tahu
E		Intenzita pole
f		Funkční vztah mezi měřenou veličinou Y a vstupními veličinami X_i , na kterých Y závisí a rovněž i mezi odhadem výstupní hodnoty y a odhady vstupních hodnot x_i , na kterých y závisí
f_d	[μm]	Odchylka rovinnosti
H	[%]	Relativní vlhkost
I	[W/m ²]	Optická intenzita
K		Kontrast proužků
k	[μm ⁻¹]	Převrácená hodnota vlnové délky (vlnové číslo); koeficient rozšíření použitý k výpočtu rozšířené nejistoty $U = k \times u_c(y)$ odhadu výstupní hodnoty y
k	[m ⁻¹]	Vlnový vektor
k_p		Koeficient pokrytí použitý k výpočtu rozšířené nejistoty U
L	[m]	Vzdálenost
l	[mm]	Délka KM
l_c	[mm]	Středová délka KM
l_n	[mm]	Jmenovitá délka KM
n		Index lomu; počet statisticky nezávislých pozorování: n
N		Počet vstupních veličin X_i , na kterých měřená veličina Y závisí
p		Pravděpodobnost; konfidenční úroveň: $0 \leq p \leq 1$; atmosférický tlak: p [Pa]

$\mathbf{r}$	[m]	Polohový vektor místa
q		Náhodná veličina popsaná rozdělením pravděpodobnosti
$\bar{q}$		Aritmetický průměr; střední hodnota n navzájem nezávislých pozorování q_k náhodné veličiny q
q_k		K -té nezávislé opakované pozorování q_k náhodné veličiny q
$s^2(\bar{q})$		Výběrový rozptyl středních hodnot $\bar{q}$
T		Detekční čas
t	[°C]	Teplota; čas: t [s]
$t_p(v)$		T-faktor z t-rozdělení pro v stupňů volnosti odpovídající dané pravděpodobnosti p
$t_p(v_{eff})$		T-faktor z t-rozdělení pro v_{eff} stupňů volnosti odpovídající dané pravděpodobnosti p , použité k výpočtu rozšířené nejistoty U_p
U		Rozšířená nejistota měření (rozšířena nejistota odhadu výstupních hodnot y)
U_p		Rozšířená nejistota odhadu výstupní hodnoty y definuje interval $Y=y \pm U_p$ s vysokou konfidenční úrovní p
$u(y)$		Standardní nejistota měření výstupní veličiny
$u(x)$		Standardní nejistota měření vstupní veličiny
$u^2(x_i)$		Odhad rozptylu přiřazený k odhadu vstupu x_i , který odhaduje vstupní veličinu X_i
$u(x_i)$		Standardní nejistota odhadu vstupu x_i , která odhaduje vstupní veličiny X_i , která je rovna kladné hodnotě druhé odmocniny $u^2(x_i)$
$u_c^2(y)$		Kombinovaný rozptyl spojený s výstupním odhadem y
$u_c(y)$		Kombinovaná standardní nejistota odhadu výstupní hodnoty y
$u(A)$		Standardní nejistota odhadu výstupní hodnoty y , určená ze statistické analýzy série pozorování (nejistota typu A)
$u(B)$		Standardní nejistota odhadu výstupní hodnoty y , určená jiným způsobem než statistickou analýzou série pozorování (nejistota typu B)
X		Vstupní veličina, na které měřená veličina Y závisí
x		Odhad hodnoty vstupní veličiny X ; obsah CO ₂ ve vzduchu: x [–]
Y		Výstupní veličina (měřená veličina)
y		Odhad hodnoty výstupní veličiny Y (odhad měřené veličiny Y)

Řecká abeceda

Označení	Rozměr	Význam
α	$\left[\frac{\mu m}{m \times ^\circ C}\right]$	Teplotní součinitel délkové roztažnosti
γ	$[m^{-1}]$	Koeficient zesílení
Γ		Fázové zpoždění
θ		Čas; úhel
λ	$[m]$	Vlnová délka; tepelná vodivost: $\lambda \left[\frac{W}{m \times K}\right]$
λ_0	$[m]$	Vlnová délka elektromagnetické vlny ve vakuu
Λ	$[m]$	Vlnová délka vlnění
μ		Poissonovo číslo
ν		Počet stupňů volnosti (obecně); rozpětí délky KM: ν [mm]
ν_i		Počet stupňů volnosti; efektivních stupňů volnosti standardní nejistoty $u(x_i)$ odhadu vstupní veličiny x_i
ν_{eff}		Počet efektivních stupňů volnosti $u_c(y)$ k získání $t_p(\nu_{eff})$ pro výpočet rozšířené nejistoty U
ν	$[Hz]$	Frekvence
ρ	$\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	Hustota
τ_c	$[s]$	Koherenční doba
τ	$[s]$	Šířka časové funkce
φ		Fáze
ω	$[rad/s]$	Úhlová frekvence

1. ÚVOD

Délka je jedna ze základních fyzikálních veličin. Jednotkou délky je metr. Metr je definován jako délka, kterou urazí světlo ve vakuu za $1/299\,792\,458$ sekundy.

Etalonáž délky je členěna do tří stupňů, a to na primární etalonáž, sekundární etalonáž a pracovní měřidla. Primární etalony jsou získány prostřednictvím vhodného laserového zařízení. Sekundární etalony se odvozují z primárních etalonů interferenční metodou a pomocí sekundárních etalonů se komparují provozní měřidla.

Jako sekundární etalony délky slouží koncové měrky (dále jen KM), které představují nejvyšší stupeň mechanických etalonů délky. KM mají všestranné využití ve strojírenství a to v rámci seřizování řezných nástrojů, k ustavování obrobků při technologiích obrábění a k rozměřování osových vzdáleností. Jejich důležitá funkce je i při porovnávacích měřeních, při nichž se měřicí přístroje KM nastavují na nulu.

Primární i sekundární etalony podléhají povinné kalibraci. Kalibraci hlavních etalonů provádí na žádost uživatele etalonů Český metrologický institut (dále jen ČMI) nebo akreditované kalibrační laboratoře a zahraniční subjekty, které zaručují srovnatelnou metrologickou úroveň např. PTB (Německo), NPL (Velká Británie), GUM (Polsko), NIST (USA), IRMM (EU), atd.. ČMI je jediná organizace, která zabezpečuje jednotnost a přesnost měřidel a měření ve všech oborech vědecké, technické a hospodářské činnosti v České republice. ČMI je tvořeno 13 vnitřními organizačními jednotkami. Jednou z významných organizačních jednotek je Oblastní inspektorát Liberec (dále jen OI Liberec). OI Liberec zajišťuje primární etalonáž rovinného úhlu a délky (vztaženo na KM) na národní a mezinárodní úrovni.

Dle mezinárodní normy ČSN EN ISO 3650 [1] jsou k měření délky (kalibraci) KM využívány dvě základní metody. Jedná se o komparační neboli porovnávací metody. Obě jsou založeny na postupném porovnávání hodnoty délky se známou hodnotou.

První metoda se nazývá interferenční a využívá k měření délky KM laserovou interferometrii. Metoda je založena na porovnání délky se známým etalonem, tj. délkou světelné vlny. Měření délky KM pomocí laserové interferometrie probíhá tak, že se zjišťuje, kolik vlnových délek světla je v délce KM obsaženo. Přibližná délka KM je známa (z jejího označení), proto se určuje jen zlomek, o který délka KM převyšuje celkový počet vlnových délek světla.

Druhá metoda se nazývá komparační a je realizována pomocí mechanického komparátoru. Metoda je založena na porovnávání KM se známým etalonem tj. KM se stejnou jmenovitou délkou, ale vyšší přesností. Měření délky KM komparační metodou se uskutečňuje tak, že se hrotem snímače dotýkáme povrchu KM a zjišťujeme o kolik se jmenovitá délka měřené KM liší od etalonové KM. Přibližná délka měřené i etalonové KM je známa (z jejího označení), proto se určuje jen odchylka mezi nimi.

Zcela novou metodou, která by mohla být využita k měření délky KM na národní i mezinárodní metrologické úrovni je metoda založená na principu nízkokoherentní

interferometrie. Daná metoda je prováděna na automatickém bezkontaktním systému, který byl vyvinut mezi výzkumnou organizací Ústavem přístrojové techniky AV ČR, v.v.i., Brno a firmou MESING, s.r.o. Tento systém nebyl nikdy plně odzkoušen pro přímé metrologické potřeby v rámci měření délky KM.

Habilitační práce popisuje nový systém pro automatické bezkontaktní měření délky KM, proces jeho optimalizace a přípravu pro zavedení do ČMI OI Liberec.

Předkládaná práce reaguje na sílící potřebu automatizace procesu měření délky KM z hlediska národní metrologické laboratoře ČMI. Tato potřeba je reakcí na požadavky výrobců přesného strojírenství, kteří vyžadují rychlou, kvalitní a nepoškozující kalibraci KM.

Hlavním cílem předkládané práce je připravit bezkontaktní systém pro zavedení do běžného provozu ČMI OI Liberec k měření délky KM.

K dosažení vytyčeného cíle je nutné nejprve **zoptimalizovat** nový a dosud nepoužívaný **bezkontaktní systém pro přímé potřeby laboratorního měření**. Dále vytvořit kompletní dokumentaci k validaci metody měření, tzn. **stanovit nejistotu měření** a následně **metodikou (kalibrační postup) pro měření na daném systému**. V neposlední řadě **porovnat systém se stávajícími systémy a jejich metodami měření běžně využívaných v ČMI OI Liberec**.

Pro dosažení plánovaného cíle práce jsou nezbytné teoretické znalosti dané problematiky, které jsou uvedeny v teoretické části této práce.

2. TEORETICKÁ ČÁST

Teoretická část předkládané práce souvisí se současným stavem řešené problematiky. Práce je zaměřena na měření délky KM s využitím principů nízkokoherenční interferometrie.

Podstatné informace k interferenci světla, laserové interferometrii a současným poznatkům s tím spojenými v rámci měření délky KM jsou uvedeny v podkapitole 2.1.

Důležité parametry, vlastnosti a údaje o KM, které jsou nezbytné pro řešení problematiky práce jsou vysvětleny v podkapitole 2.2.

Každá metoda měření délky KM se vyznačuje svojí přesností a nejistotou, která musí být uvedena k výsledku měření. Obecná metodika stanovení nejistoty měření je popsána v podkapitole 2.3. Tato podkapitola je stěžejní pro experimentální část práce a to konkrétně pro podkapitolu 3.2, která vysvětluje, jakým způsobem byla nejistota měření pro bezkontaktní systém určena, z čeho se vycházelo a jak se postupovalo.

Dle mezinárodní normy [1] jsou k měření délky krátkých (0,3 – 100 mm) KM v ČMI OI Liberec využívány dvě základní metody. Jedná se o metodu interferenční a metodu komparační. Interferenční metoda je uskutečňována na systému TESA NPL A.G.I. 300, který využívá k měření délky KM laserovou interferometrii. Systém je navázán na státní etalon prostřednictvím femtosekundového generátoru hřebene optických frekvencí a jodem stabilizovaného He–Ne laseru o vlnové délce 633 nm. Měření na systému TESA NPL A.G.I. 300 vyniká vysokou přesností a nejnižší nejistotou měření v ČR. Systém je používán k měření délky KM (od 0,3 mm do 300 mm) v rámci mezinárodních porovnání. Velkou nevýhodou je značné poškození měřicích ploch KM během měření, vysoké provozní náklady a velká časová náročnost z hlediska změření celé sady KM (1 až 3 měsíce). Druhá metoda se nazývá komparační a je uskutečňována pomocí mechanického komparátoru TESA–UPC. Systém je navázán na státní etalon délky prostřednictvím etalonových KM 1. řádu měřených na systému TESA NPL A.G.I. 300. Systém TESA–UPC vyniká nízkými provozními náklady a nižší časovou náročností (1 až 2 týdny) než je u systému TESA NPL A.G.I. 300. Při měření na systému nedochází k poškození měřicích ploch KM během měření. Nevýhodou je nižší přesnost a vyšší nejistota měření. Každý z výše uvedených systémů je vhodný pro určitou třídu přesnosti KM a zákazníkem požadovanou nejistotu měření. Systémem TESA NPL A.G.I. 300 lze měřit pouze KM s vysokou kvalitou měřicích ploch, třídy přesnosti K až 0. Systémem TESA–UPC lze měřit KM třídy přesnosti K až 2. Popisy obou výše uvedených metod pro měření délky KM a k nim příslušných zařízení na pracovišti ČMI OI Liberec jsou uvedeny v podkapitole 2.4.

Řešením kombinující výhody obou výše popsaných metod realizovaných na systémech TESA NPL A.G.I. 300 a TESA–UPC je nová metoda uskutečňována na automatickém bezkontaktním systému. Bezkontaktní systém vznikl mezi výzkumnou organizací Ústavem přístrojové techniky AV ČR, v.v.i., Brno a firmou MESING, s.r.o.. Základnímu popisu bezkontaktního systému pracujícího na bázi nízkokoherenční interferometrie a metodě měření je věnována podkapitola 2.5.

2.1 INTERFERENCE

Uvedené informace týkající se interference světla v této podkapitole jsou obecně známé [53, 55]. Z hlediska řešení předkládané práce je však vhodné uvést alespoň v nezbytné míře základní informace vztahující se k popisu vybraných jevů a principů týkajících se interference, laserové interferometrie a současným poznatkům s tím spojenými v rámci měření délky KM, pro lepší přehlednost čitatele z hlediska řešené problematiky.

Jeden z **nejpřesnějších způsobů měření délek** je využívání vlastností světelných vln tj. **interference světla**.

Světlo každého zdroje je určeno vlnovou délkou, označenou jako λ . Jestliže je známa λ , můžeme počítat buď kmitočet, tj. počet kmitů za sekundu, nebo vlnočet, tj. počet vln, které připadají na určitou délku. K rozložení světla na jednotlivé složky se používá buď lomu a rozkladu, nebo difrakce světla. Interference nastává, setká-li se v témže bodě několik periodických kmitů, které mají stejné periody a konstantní, na čase nezávislé fázové rozdíly.

Chceme-li zjistit interferenci, musíme použít světlo vycházející z téhož světelného zdroje, které je fyzikálně rozděleno pomocí děliče svazku na dvě světelné vlny. V obou světelných vlnách následně nastává změna fáze současně, takže výsledný interferenční jev je stále stejný. Interferovat mohou takové světelné vlny, které mají původ v jednom zdroji, a ty jsou nazývány koherentní. Rozdělíme-li koherentní světelný svazek ve dva, můžeme každý vést jinou cestou, než je opět spojíme. Tyto dráhy budou obecně různě dlouhé, takže do místa, kde je opět spojujeme, přijdou v různých fázích. Z tohoto posunutí fáze můžeme obráceně usuzovat na dráhový rozdíl svazků a tento dráhový rozdíl vypočítat.

Rozdělení svazků se provádí pomocí děličů, jako jsou zrcadla, polopropustná zrcadla, hranoly, dělicí roviny atd. Tyto děliče rozdělí svazek na dva. Jeden dělič svazek propustí, druhý svazek se od děliče odrazí zpět.

V důsledku interference světla vznikají v oblasti překrytí svazků světlé a tmavé proužky. Světlý proužek odpovídá interferenčnímu maximu a vzniká v místech, kde se koherentní světelná vlnění setkávají se stejnou fází (nastává konstruktivní interference). Tmavý proužek odpovídá interferenčnímu minimu a vzniká v místech, v nichž mají vlnění fázi opačnou (nastává destruktivní interference). Interferenční obrazec v podobě světlých a tmavých proužků využíváme k měření.

2.1.1 Interference světla

2.1.1.1 Princip superpozice

Uvažujme lineární prostředí, tj. takové prostředí, jehož vlastnosti nezávisí na intenzitě světelné vlny, která se tímto prostředím šíří. Toto bude platit za předpokladu, že velikost E intenzity světelné vlny nebude příliš velká, což je v praxi ve většině případů splněno. Za těchto předpokladů bude platit princip superpozice, který říká: *intenzita pole v daném místě prostoru, v němž se nachází několik zdrojů světla, je rovna vektorovému součtu intenzit, které v daném místě vytvářejí jednotlivé zdroje světla navzájem nezávisle* [55].

Matematicky lze princip superpozice vyjádřit, pro případ elektrického pole a k zdrojů světla, ve tvaru [55]:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \sum_{i=1}^{i=k} \mathbf{E}_i(\mathbf{r}, t), \quad (2.1.1 - 1)$$

kde $\mathbf{r}$ je polohový vektor místa, v němž vyšetřujeme pole, t čas, $\mathbf{E}_i(\mathbf{r}, t)$ intenzita světla pocházející od i -tého zdroje světla, $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ intenzitu světla výsledného pole.

V případě silných elektromagnetických polí, vytvořených např. pomocí výkonných laserů je velikost intenzity pole řádově $10^7 - 10^{11}$ V/m což je již srovnatelné s intenzitou pole uvnitř atomů, která je řádově 10^9 V/m (pro polovodiče) až 10^{11} V/m (pro dielektrika). Pro takto silná pole pak již princip superpozice neplatí.

2.1.1.2 Skládání vlnění a interference

Nechť v daném bodě prostoru současně existují dvě libovolné (v obecném případě nemonochromatické) elektromagnetické vlny $\mathbf{E}_1 = \mathbf{E}_1(\mathbf{r}, t)$ a $\mathbf{E}_2 = \mathbf{E}_2(\mathbf{r}, t)$ [55]. Podle principu superpozice pak bude výsledné pole $\mathbf{E} = \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ dáno vztahem:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2. \quad (2.1.1 - 2)$$

Důležitý je *energetický popis pole*, neboť detektory záření nám registrují energii, na ně dopadajícího světelného pole. Pro druhou mocninu E^2 velikosti výsledného pole, která je úměrná energii výsledného pole, pak dostáváme vztah [55]:

$$E^2 = \mathbf{E} \times \mathbf{E} = (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2) \times (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2) = E_1^2 + E_2^2 + 2\mathbf{E}_1\mathbf{E}_2. \quad (2.1.1 - 3)$$

V důsledku setrvačnosti detektorů záření, není možno detekovat okamžitou hodnotu energie na ně dopadajícího elektromagnetického pole, ale *detekujeme vždy nějakou časovou střední hodnotu energie* a to za čas, který závisí na použitém druhu detektoru záření. V případě lidského oka je minimální detekční čas řádově asi 0,1 s, tj. lidské oko není schopno odděleně zaregistrovat dva děje, které za sebou proběhly v kratším intervalu než je 0,1 s. Fotografické materiály mají detekční čas řádově $10^{-2} - 10^{-4}$ s a fotoelektrické detektory mají detekční čas ještě mnohem menší a to řádově asi 10^{-10} s. Avšak i takovýto čas je velmi velký ve srovnání s periodami optických kmitů, kde se střední perioda kmitů ve viditelné oblasti spektra pohybuje kolem 10^{-15} s. Žádný detektor světla neumožňuje měřit v tak krátkých časových intervalech a není tedy možno měřit okamžitou hodnotu intenzity elektrického nebo magnetického pole světelné vlny. Z těchto důvodů se provádí *časové středování* vztahu (2.1.1 - 3). Označíme-li vztah [55]:

$$\langle E^2 \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T E^2 dt, \quad (2.1.1 - 4)$$

jako časovou střední hodnotu veličiny E^2 , kde T značí detekční čas, tj. čas, který potřebuje detektor k registraci na něj dopadajícího signálu, dostáváme pro časovou střední hodnotu vztahu (2.1.1 - 3) následující výraz [55]:

$$\langle E^2 \rangle = \langle E_1^2 \rangle + \langle E_2^2 \rangle + 2 \times \langle \mathbf{E}_1 \mathbf{E}_2 \rangle. \quad (2.1.1 - 5)$$

V případě, že výraz:

$$\langle \mathbf{E}_1 \mathbf{E}_2 \rangle \neq 0,$$

říkáme, že dochází k *interferenci vlnění* (interferenci světla) a výraz $\langle \mathbf{E}_1 \mathbf{E}_2 \rangle$ nazýváme *interferenční člen*. V případě, že interferenční člen je roven nule, tj. $\langle \mathbf{E}_1 \mathbf{E}_2 \rangle = 0$, nedochází k interferenci a platí:

$$\langle E^2 \rangle = \langle E_1^2 \rangle + \langle E_2^2 \rangle. \quad (2.1.1 - 6)$$

Bude-li případ dvou rovinných lineárně polarizovaných harmonických vln, jejichž vektory E_1 a E_2 jsou rovnoběžné a které se šíří v jednom směru je možno použít skalárního popisu:

$$E_1 = E_{01} \times \cos(\omega t + \varphi_1), \quad E_2 = E_{02} \times \cos(\omega t + \varphi_2), \quad (2.1.1 - 7)$$

kde E_{01} a E_{02} jsou amplitudy a φ_1 a φ_2 jsou počáteční fáze těchto vln. Pro výsledné pole potom, podle principu superpozice, platí vztah [55]:

$$E = E_1 + E_2 = E_{01} \times \cos(\omega t + \varphi_1) + E_{02} \times \cos(\omega t + \varphi_2) = E_0 \times \cos(\omega t + \varphi), \quad (2.1.1 - 8)$$

kde jsme označili:

$$E_0^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \times \cos(\varphi_2 - \varphi_1), \quad (2.1.1 - 9)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{E_{01} \sin \varphi_1 + E_{02} \sin \varphi_2}{E_{01} \cos \varphi_1 + E_{02} \cos \varphi_2}.$$

Uvážíme-li, že pro intenzitu vlnění platí:

$$I = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} E_0^2, \quad I_1 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} E_{01}^2, \quad I_2 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} E_{02}^2, \quad (2.1.1 - 10)$$

můžeme vztah pro výslednou intenzitu vlnění psát ve tvaru:

$$I = I_1 + I_2 + 2 \times \sqrt{I_1 I_2} \times \cos(\varphi_2 - \varphi_1). \quad (2.1.1 - 11)$$

Vzhledem k tomu, že fázový rozdíl $(\varphi_2 - \varphi_1)$ ve vztahu (2.1.1 - 11) je konstantní, dochází k interferenci vlnění. *Vlnění, vyhovující podmínce, že jejich fázový rozdíl je konstantní, se nazývají koherentní.*

Zcela analogicky, jako v předcházejícím případě, lze ukázat, že dvě vlnění:

$$E_1 = E_{01}(t) \times \cos[\omega t + \varphi_1(t)], \quad E_2 = E_{02}(t) \times \cos[\omega t + \varphi_2(t)],$$

jsou koherentní, jestliže se jejich amplitudy mění navzájem úměrně, tj.

$$E_{01}(t) = C_1 E_0(t), \quad E_{02}(t) = C_2 E_0(t),$$

kde C_1 a C_2 jsou konstanty a mezi jejich fázemi je konstantní fázový rozdíl tj.

$$\varphi_2(t) - \varphi_1(t) = \text{konst.}$$

Uvažujme-li nyní případ dvou rovinných lineárně polarizovaných harmonických vln, jejichž vektory $\mathbf{E}_1$ a $\mathbf{E}_2$ jsou rovnoběžné, které se však šíří v různých směrech daných

vlnovými vektory $\mathbf{k}_1 = (2\pi/\lambda) \times \mathbf{n}_1$ a $\mathbf{k}_2 = (2\pi/\lambda) \times \mathbf{n}_2$, kde $\mathbf{n}_1$ a $\mathbf{n}_2$ jsou vektory vlnových normál. Bude tedy platit:

$$E_1 = E_{01} \times \cos(\omega t - k_1 r + \delta_1), \quad E_2 = E_{02} \times \cos(\omega t - k_2 r + \delta_2), \quad (2.1.1 - 12)$$

kde δ_1 a δ_2 jsou počáteční fáze. Srovnáním se vztahy (2.1.1 - 7) je vidět, že výsledná intenzita $I(\mathbf{r})$ v místě určeném polohovým vektorem $\mathbf{r}$ bude mít tvar:

$$I(r) = I_1 + I_2 + 2 \times \sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1), \quad (2.1.1 - 13)$$

kde jsme položili:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = (\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{r} + (\delta_2 - \delta_1). \quad (2.1.1 - 14)$$

Určeme si nyní oblasti prostoru, ve kterých je intenzita $I(\mathbf{r})$ konstantní. Jak je ze vztahu (2.1.1 - 14) patrné, bude intenzita $I(\mathbf{r})$ konstantní, bude-li splněna podmínka $\varphi_2 - \varphi_1 = \text{konst.}$ Tuto podmínku můžeme pomocí vztahu (2.1.1 - 14) zapsat ve tvaru:

$$(k_1 - k_2)r + (\delta_2 - \delta_1) = 2\pi m + C, \quad (2.1.1 - 15)$$

kde $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ a C je zvolená konstanta. Maxima intenzity získáme, položíme-li $C = 0$ a minima intenzity získáme pro $C = \pi$. Jak je známo z matematiky, rovnice typu:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{r} + d = 0$$

je vektorovou rovnicí roviny kolmé na vektor $\mathbf{n}$.

Vztah (2.1.1 - 15) nám tedy určuje posloupnost rovin konstantní intenzity a tyto roviny jsou kolmé na vektor $\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2$. Abychom určili vzdálenost dvou těchto rovin, napíšeme vztah (2.1.1 - 15) pro dvě, po sobě následující, hodnoty m tj. pro m a $m+1$, a následně platí:

$$\begin{aligned} (\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{r}_m + (\delta_2 - \delta_1) &= 2\pi m + C, \\ (\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{r}_{m+1} + (\delta_2 - \delta_1) &= 2\pi(m+1) + C. \end{aligned}$$

Odečteme-li nyní od sebe tyto dvě rovnice, dostáváme:

$$(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \cdot (\mathbf{r}_{m+1} - \mathbf{r}_m) = 2\pi. \quad (2.1.1 - 16)$$

Vzdálenost Λ těchto rovin je rovna projekci vektoru $\mathbf{r}_{m+1} - \mathbf{r}_m$ na vektor $\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2$, tedy:

$$\Lambda = \frac{(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \cdot (\mathbf{r}_{m+1} - \mathbf{r}_m)}{|\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2|}.$$

Dále platí:

$$|\mathbf{n}_1 - \mathbf{n}_2|^2 = (\mathbf{n}_1 - \mathbf{n}_2) \cdot (\mathbf{n}_1 - \mathbf{n}_2) = n_1^2 + n_2^2 - 2 \times \mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_2 = 2 \times [1 - \cos(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2)],$$

kde jsme užili vztahu $n_1^2 + n_2^2 = 1$. Označíme-li jako α úhel, který spolu svírají vektory normál $\mathbf{n}_1$ a $\mathbf{n}_2$, potom:

$$|\mathbf{n}_1 - \mathbf{n}_2|^2 = 2 \times [1 - \cos(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2)] = 2 \times (1 - \cos \alpha) = 4 \times \sin^2 \frac{\alpha}{2}.$$

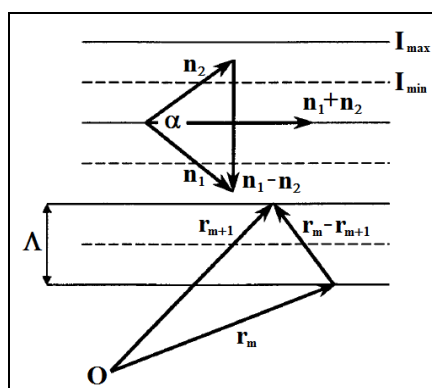
Dosadíme-li sem ze vztahu (2.1.1 - 16) dostáváme:

$$\Lambda = \frac{2\pi}{|\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2|} = \frac{\lambda}{|\mathbf{n}_1 - \mathbf{n}_2|}. \quad (2.1.1 - 17)$$

Ze vztahu (2.1.1 – 17) pak pro vzdálenost Λ rovin konstantní intenzity dostáváme:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2 \times \left| \sin \frac{\alpha}{2} \right|}. \quad (2.1.1 – 18)$$

Na obrázku 2.1.1–1 je uvedena vzdálenost dvou sousedních rovin jako Λ , v nichž je intenzita např. maximální $I_{\max}$ (nebo minimální $I_{\min}$). Prostor, v němž dochází k interferenci vln nazýváme *interferenční pole*. Přenos energie v interferenčním poli probíhá uvnitř periodických vrstev kolmých k vektoru $\mathbf{n}_1 - \mathbf{n}_2$, tj. ve směru vektoru $\mathbf{n}_1 + \mathbf{n}_2$, který má směr osy úhlu α .



Obr. 2.1.1–1 Schéma interferenčního pole [55]

Vložíme-li do *interferenčního pole* detektor záření (např. matnici, fotografickou desku apod.), bude tento detektor registrovat rozdělení intenzity v určitém řezu interferenčního pole což se projeví tzv. *interferenčními proužky*, které nám udávají rozdělení intenzity v daném řezu. Místa, kde je intenzita maximální budou tmavá (tmavé interferenční proužky) a místa, kde bude intenzita minimální budou světlá (světlé interferenční proužky). Vzdálenost dvou sousedních tmavých (nebo světlých) proužků bude záviset na tom, jaký úhel svírá detektor, vložený do interferenčního pole, s osou úhlu α tj. vektorem $\mathbf{n}_1 + \mathbf{n}_2$. Svírá-li normála k ploše detektoru s osou úhlu α úhel β , potom registrované interferenční proužky budou mít vzájemnou vzdálenost:

$$\Lambda_{\beta} = \frac{\Lambda}{\cos \beta},$$

kde Λ je dáno vztahem (2.1.1 – 18).

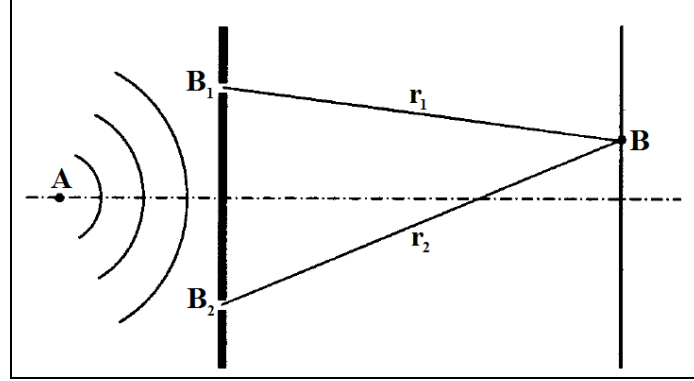
2.1.1.3 Koherence vlnění

Funkce vzájemné koherence

Uvažujme-li situaci znázorněnou na 2.1.1–2. Ze zdroje A vychází vlnění, které dopadá na stínítko se dvěma velmi malými (prakticky bodovými) otvory B_1 a B_2 . Položíme-li si nyní otázku, jaká je vzájemná koherence (vzájemná korelace) vlnění vycházejícího z B_1 a B_2 , které dospěje za určitou dobu do bodu B druhého stínítka. Označme $\mathbf{E}_1$ vlnění v bodě B_1 ,

E_2 vlnění v bodě B_2 a E vlnění v bodě B . Pro jednoduchost budeme předpokládat lineárně polarizované vlnění, což nám umožní použít skalární popis. Označíme-li θ_1 čas, za který vlnění z bodu B_1 dospěje do bodu B , který je ve vzdálenosti r_1 od bodu B_1 a θ_2 čas, za který vlnění z bodu B_2 dospěje do bodu B , který je ve vzdálenosti r_2 od bodu B_2 . Vlnění v bodě B v časovém okamžiku t pak můžeme psát ve tvaru:

$$E(t) = E_1(t - \theta_1) + E_2(t - \theta_2). \quad (2.1.1 - 19)$$



Obr. 2.1.1–2 Vzájemná koherence [55]

Pro intenzitu I v bodě B pak dostáváme:

$$I = \langle [E_1(t - \theta_1) + E_2(t - \theta_2)] \times [E_1(t - \theta_1) + E_2(t - \theta_2)]^* \rangle, \quad (2.1.1 - 20)$$

kde jsme pro jednoduchost užili komplexní symboliku. Označíme-li:

$$I_1 = \langle E_1(t - \theta_1) \times E_1^*(t - \theta_1) \rangle = \langle E_1(t) \times E_1^*(t) \rangle \quad (2.1.1 - 21)$$

$$I_2 = \langle E_2(t - \theta_2) \times E_2^*(t - \theta_2) \rangle = \langle E_2(t) \times E_2^*(t) \rangle$$

kde I_1 je intenzita světla v bodě B při zakrytém otvoru B_2 a I_2 je intenzita světla v bodě B při zakrytém otvoru B_1 . Posunutí počátku času nemá vliv na středování. Označíme-li $\theta = \theta_2 - \theta_1$ a posuneme-li počátek času, potom dostáváme:

$$\begin{aligned} & \langle E_1(t - \theta_1) \times E_2^*(t - \theta_2) + E_1^*(t - \theta_1) \times E_2(t - \theta_2) \rangle = \\ & = \langle E_1(t + \theta) \times E_2^*(t) + E_1^*(t + \theta) \times E_2(t) \rangle = 2 \operatorname{Re} \langle E_1(t + \theta) \times E_2^*(t) \rangle \end{aligned} \quad (2.1.1 - 22)$$

Dosazením (2.1.1 - 21) a (2.1.1 - 22) do (2.1.1 - 20) obdržíme:

$$I = I_1 + I_2 + 2 \operatorname{Re} \langle E_1(t + \theta) \times E_2^*(t) \rangle. \quad (2.1.1 - 23)$$

Jak je z tohoto vztahu patrné, je vzájemná korelace vyšetřovaných světelných vln dána posledním členem tohoto vztahu. Definujme nyní *funkci vzájemné koherence* $\Gamma_{12}(\theta)$ a *komplexní stupeň koherence* $\gamma_{12}(\theta)$ vztahy:

$$\Gamma_{12}(\theta) = \langle E_1(t + \theta) \times E_2^*(t) \rangle, \quad \gamma_{12}(\theta) = \frac{\Gamma_{12}(\theta)}{\sqrt{I_1 I_2}} = \frac{\langle E_1(t + \theta) \times E_2^*(t) \rangle}{\sqrt{I_1 I_2}}. \quad (2.1.1 - 24)$$

Pro *intenzitu světla* v bodě B pak můžeme psát:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \operatorname{Re}[\gamma_{12}(\theta)]. \quad (2.1.1 - 25)$$

Veličina $|\gamma_{12}(\theta)|$ se mění od nuly do jedničky. Je-li $|\gamma_{12}(\theta)| = 0$ potom nedochází k interferenci a o vlnění vycházejícím z otvorů B_1 a B_2 říkáme, že je *nekoherentní*. Je-li $|\gamma_{12}(\theta)| = 1$ potom se jedná o úplnou koherenci a o vlnění vycházejícím z otvorů B_1 a B_2 říkáme, že je *koherentní*. Je-li $0 < |\gamma_{12}(\theta)| < 1$ potom se jedná o částečnou koherenci a o vlnění vycházejícím z otvorů B_1 a B_2 říkáme, že je *nízko koherentní*. Veličina $|\gamma_{12}(\theta)|$ nám tedy charakterizuje *stupeň koherence* vlnění.

Stupeň koherence a kontrast interferenčního pole

Při interferenci světelných vln pozorujeme v interferenčním poli více či méně kontrastní interferenční proužky. Označíme-li $I_{\max}$ jako maximální intenzitu světlého interferenčního proužku a jako $I_{\min}$ minimální intenzitu sousedního tmavého interferenčního proužku, přičemž oba proužky leží v nejbližším okolí bodu B , potom *kontrast proužků* definujeme vztahem:

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}. \quad (2.1.1 - 26)$$

Uvážíme-li, že platí:

$$\operatorname{Re}(\gamma_{12}) = |\gamma_{12}| \times \cos \varphi_{12},$$

kde je φ_{12} značí argument komplexní veličiny $\gamma_{12}(\theta)$ a je dán vztahem:

$$\varphi_{12} = \varphi(\theta) + \frac{2\pi}{\lambda_0} \times (r_2 - r_1),$$

přičemž předpokládáme, že mezi oběma stínítky je homogenní a izotropní prostředí. Veličina $\varphi(\theta)$ nám udává fázový rozdíl mezi vlněním v otvoru B_2 a vlněním v otvoru B_1 , λ_0 je střední vlnová délka vlnění, r_1 je vzdálenost bodu B od bodu B_1 a r_2 je vzdálenost bodu B od bodu B_2 . Vztah (2.1.1 – 25) pak můžeme psát ve tvaru:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma_{12}(\theta)| \times \cos \varphi_{12}.$$

Intenzita nabude maximální hodnoty pro $\cos \varphi_{12} = 1$ a minimální hodnotu pro $\cos \varphi_{12} = -1$.

Tedy:

$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma_{12}(\theta)|, \quad I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma_{12}(\theta)|.$$

Dosazením těchto vztahů do vztahu pro kontrast (2.1.1 – 26) dostáváme:

$$K = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} |\gamma_{12}(\theta)|. \quad (2.1.1 - 27)$$

Jak je ze vztahu (2.1.1 – 27) patrné, je *kontrast interferenčních proužků přímo úměrný modulu stupně koherence*.

Časová koherence

Zvláštním případem je vyšetřování koherenčních vlastností vlnění vycházejícího z jednoho zdroje. Komplexní stupeň koherence $\gamma_{12}(\theta)$ je dán vztahem:

$$\gamma_{11}(\theta) = \frac{\Gamma_{11}(\theta)}{I_1} = \frac{\langle E_1(t+\theta) \times E_1^*(t) \rangle}{I_1}. \quad (2.1.1 - 28)$$

Funkce $\gamma_{11}(\theta)$ nám popisuje korelaci mezi vlněními v jednom bodě prostoru (bodě B) v různé časové okamžiky.

Při výkladu časové koherence je uvažován bodový zdroj světla, jakým je např. atom. Předpokládá se, že atom (zdroj světla) vyzařuje vlnění o střední frekvenci ν_0 po dobu τ . Výsledkem tohoto procesu bude jakoby “ořezaná vlna” (“kousek vlny”), který je nazýván vlnovým pulzem. *Vlnové pulzy, které postupně vysílá atom jsou zcela nahodilé a nejsou navzájem korelovány a nemůže tedy mezi nimi dojít k interferenci.*

Uvažujme-li nyní situaci znázorněnou na obrázku 2.1.1–3. Světlo ze zdroje A dopadá na stínítko s jedním otvorem B_1 . Do bodu B dospěje vlnění jak po dráze $r_1 = B_1B$ tak i po dráze $r_2 + r_3 = B_1CB$, kde se v bodě C odráží od zrcadla Z . Pro dráhový rozdíl mezi oběma vlněními pak platí:

$$\delta r = r_1 - (r_2 + r_3).$$

Je-li c rychlost šíření vlnění, potom doba potřebná k uražení tohoto dráhového rozdílu je:

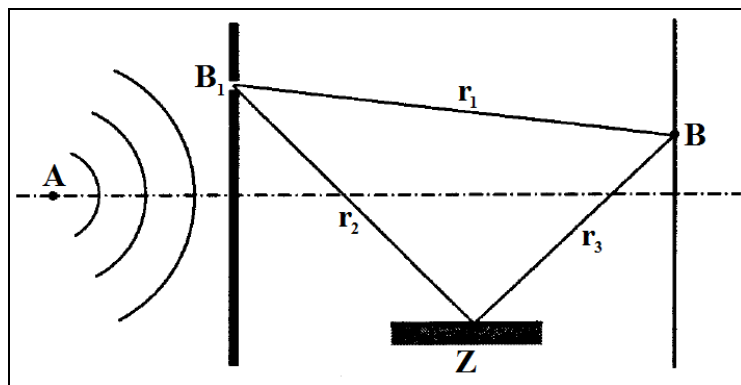
$$\delta t = \frac{\delta r}{c}.$$

Je-li tato doba menší než doba τ , po kterou atom vyzařuje vlnový pulz tj. $\delta t < \tau$, potom se v bodě B setkají dvě části stejného vlnového pulzu, které spolu mohou interferovat. Dochází tedy k *časové koherenci*. V případě, že doba $\delta t > \tau$, potom se v bodě B setkají části dvou různých vlnových pulzů a k interferenci nedochází, neboť, jak již bylo řečeno, mezi dvěma různými vlnovými pulzy není žádná korelace. Parametr τ (délka trvání vlnového pulzu) charakterizuje stupeň časové koherence a nazývá se *koherenčním časem* a značí se symbolem τ_{koh} .

Vzdálenost $l_{koh} = c \times \tau_{koh}$ se nazývá *koherenční délkou* a lze ji vyjádřit ve tvaru:

$$l_{koh} = c \times \tau_{koh} = \frac{c}{\Delta \nu} = \frac{\lambda_0^2}{\Delta \lambda}, \quad (2.1.1 - 29)$$

kde jsme užili vztahu $\lambda = c/\nu$, λ_0 je střední vlnová délka vlnění a $\Delta \lambda$ je spektrální šířka vlnění.



Obr. 2.1.1–3 Vzájemná koherence [55]

Poněkud přesnější výpočet ukazuje, že pro koherenční délku platí:

$$l_{koh} = c \times \tau_{koh} = \frac{\lambda_0^2}{\pi \times \Delta\lambda}.$$

Tento vztah má velký praktický význam, neboť nám říká, že *k dosažení dobrého kontrastu interferenčních proužků je třeba použít takový zdroj světla, jehož koherenční délka bude mnohem větší, než je největší dráhový rozdíl mezi interferujícími vlnami*. Koherenční čas obyčejných (nelaserových) zdrojů světla je řádově 10^{-9} až 10^{-10} s a u laserů je řádově 10^{-2} s. Uvážíme-li, že $c \approx 3 \times 10^8$ m/s, potom je koherenční délka obyčejných zdrojů řádově 0,01 až 0,1 m a u dobrých laserů je řádově 10^6 m a více.

Prostorová koherence

Druhý důležitý případ nastane, bude-li bod B ležet na ose otvorů B_1 a B_2 (obr. 2.1.1–2) a bude tedy platit $r_1 = r_2$. Potom bude $\theta = 0$ a pro komplexní stupeň koherence dostáváme [55]:

$$\gamma_{12}(0) = \frac{\Gamma_{12}(0)}{\sqrt{I_1 I_2}} = \frac{\langle E_1(t) \times E_2^*(t) \rangle}{\sqrt{I_1 I_2}}. \quad (2.1.1 - 30)$$

Funkce $\gamma_{12}(0)$ nám popisuje korelaci mezi vlněními ve dvou různých bodech prostoru (bodech B_1 a B_2) v témže časovém okamžiku. Je-li zdrojem světla kruh o poloměru ρ , potom ve vzdálenosti L od zdroje má pole, v bodech o relativních souřadnicích (x, y) , modul stupně koherence dán vztahem:

$$|\gamma_{12}(0)| = \frac{2J_1(Z)}{Z}, \quad (2.1.1 - 31)$$

kde $J_1(Z)$ je Besselova funkce prvního druhu argumentu Z , pro který platí [55]:

$$|\gamma_{12}(0)| = \frac{2\pi \rho}{\lambda L} \times \sqrt{x^2 + y^2}.$$

Ze vztahu (2.1.1 – 31) je patrné, že pole má prostorovou koherenci v libovolných dvou bodech tím vyšší, čím vzdálenější jsou tyto body od zdroje.

2.1.2 Laserová interferometrie

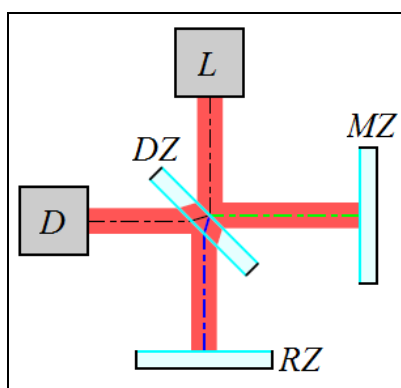
Rozdělení a spojení svazku, které je nezbytné, aby mohlo dojít k interferenci se obvykle provádí v zařízeních, která se nazývají *interferometry*.

Interferometr je optický přístroj, který použitím děliče světla rozdělí vlnu na dvě vlny, které urazí různé vzdálenosti. Použitím zrcadel změní jejich směr tak, aby se použitím druhého (nebo stejného) děliče světla opět spojily, a detekuje intenzitu jejich superpozice.

Níže budou uvedeny dva důležité příklady interferometrů, které úzce souvisejí s řešenou problematikou předkládané práce. Jedná se o *Michelsonův interferometr* (bezkontaktní systém) a *Twyman–Greenův interferometr* (systém TESA NPL A.G.I. 300).

Michelsonův interferometr

Jedním ze základních typů laserových interferometrů využívaný k měření délek je *Michelsonův interferometr* [53]. Svazek světla je děličem rozdělen na dva (jedná se o dvousvazkový interferometr), přičemž každý z nich se odráží od zrcadla (pohyblivé zrcadlo označujeme jako měřící, druhé jako referenční), na děliči se svazky opět spojí a dojde k interferenci, kterou detekujeme. Je-li rozdíl optických drah ve větvích interferometru roven celočíselnému násobku vlnové délky, pak dojde ke konstruktivní interferenci a detekujeme maximum intenzity na výstupu.



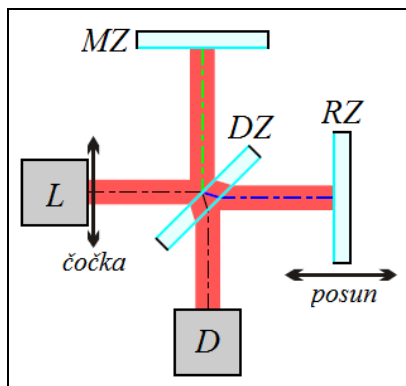
Obr. 2.1.2–1 Schéma Michelsonova interferometru. *L* – zdroj světla (laser), *DZ* – dělič zrcadlo, *RZ* – referenční zrcadlo, *MZ* – měřící (pohyblivé) zrcadlo, *D* – detektor. Jestliže je rozdíl optických drah ve větvích interferometru (zelená a modrá) roven celočíselnému násobku vlnové délky, dojde ke konstruktivní interferenci (intenzita na výstupu interferometru bude maximální), pokud je roven lichému násobku poloviny vlnové délky, dojde k interferenci destruktivní (intenzita na výstupu interferometru bude minimální) [6]

Je-li roven lichému násobku poloviny vlnové délky, pak dojde k destruktivní interferenci a detekujeme minimum intenzity. Schéma a princip Michelsonova interferometru je zobrazeno na obrázku 2.1.2–1.

Twyman–Greenův interferometr

Tento interferometr má nepatrně odlišnou konfiguraci od Michelsonova interferometru. Používá kolimované světlo z bodového zdroje. Jsou-li zrcadla *MZ* a *RZ*

postavená kolmo vůči sobě, dělič postavený v úhlu 45° zajišťuje interferenci. Schéma a princip *Twyman–Greenova* interferometru je zobrazeno na obrázku 2.1.2–2. Pro dosažení interferenčních proužků u *Twyman–Greenova* interferometru je jedno ze zrcadel zpravidla skloněno.



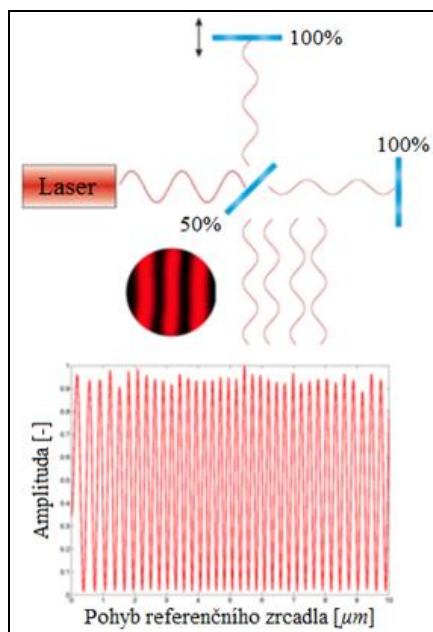
Obr. 2.1.2–2 Schéma *Twyman–Greenova* interferometru. *L* – zdroj světla (laser), *DZ* – dělicí zrcadlo, *RZ* – referenční zrcadlo, *MZ* – měřicí (pohyblivé) zrcadlo, *D* – detektor [6]

2.1.3 Interferometrie nízké koherence

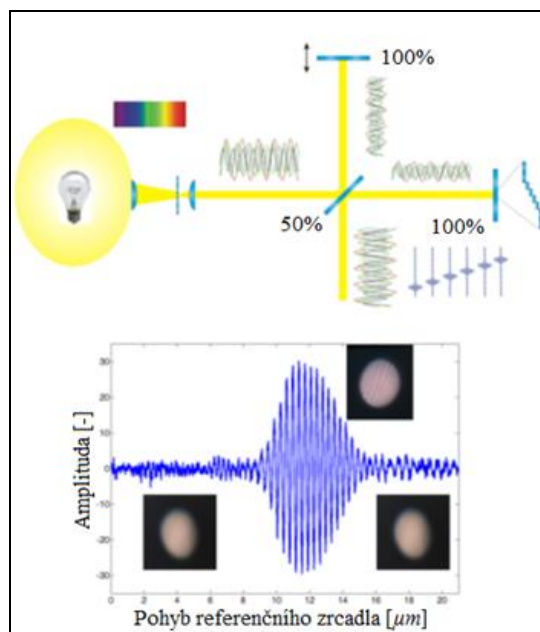
Interferometrie nízké koherence (LCI – low-coherence interferometry) nebo též interferometrie v bílém světle (WLI – white light interferometry) využívá krátké koherenční délky použitého zdroje záření, díky čemuž dochází k interferenci jen při velmi malých rozdílech optických drah. Základní informace a vztahy (zejména pak 2.1.1 – 23 až 25) byly uvedeny výše v podkapitole 2.1.1.

Princip je do značné míry podobný principu klasické laserové interferometrie. Hlavní technický rozdíl je v typu použitého zdroje záření – světla, kdy je v případě interferometrie nízké koherence použit širokospektrální zdroj – nejčastěji nekoherentní (halogenová lampa, xenonová výbojka, vysocesvitivá LED dioda).

K pochopení základního rozdílu mezi principy interferometrie slouží ilustrativní obrázek 2.1.3 – 1. Optická sestava je v obou případech stejná, rozdíl je v použitém zdroji světla. U laserové interferometrie jsou na výstupu interferometru měřitelné interferenční proužky po celou dobu, kdy se referenční zrcadlo pohybuje. Tento princip se využívá pro přesné odměřování změny polohy pohyblivého zrcadla. Naproti tomu u interferometrie nízké koherence jsou interferenční proužky detekovatelné jen v blízkém okolí tzv. vyváženého stavu interferometru. Jedná se o takovou polohu pohyblivého zrcadla, kdy je jeho vzdálenost od děliče svazku stejná jako vzdálenost děliče svazku a pevného zrcadla – rozdíl optických drah v obou větvích interferometru je velmi malý v rozmezí koherenční délky, tj. prakticky nulový. Tento princip je využíván pro indikaci vyváženého stavu. Pokud je dosaženo vyrovnané polohy pohyblivého zrcadla, na výstupu interferometru se objeví značka tj. krátký úsek s interferenčními proužky. Platí, že maximum signálu odpovídá vyváženého stavu.



A – Laserová interferometrie



B – Interferometrie nízké koherence

Obr. 2.1.3 – 1 Rozdíl mezi základními principy interferometrie – laserová interferometrie vs. bílá interferometrie [6]

Základní uspořádání tvoří obvykle Michelsonův interferometr. Měřený předmět se umístí do interferometru místo jednoho ze zrcadel. Druhé zrcadlo se nazývá referenční zrcadlo. Při měření se předmět posouvá podél optické osy. Na výstupu interferometru se zaznamenává intenzita jako funkce podélné souřadnice. Intenzita nabývá maximální hodnoty v okamžiku, kdy je optická délka obou ramen interferometru stejná.

2.1.4 Index lomu vzduchu

Hlavním problémem při interferometrickém měření s extrémním rozlišením je nestálost prostředí, ve kterém měření probíhá. Veličina charakterizující dané prostředí se nazývá *index lomu prostředí/vzduchu*.

Index lomu prostředí je definován vztahem [55]:

$$n = \frac{c}{v}, \quad (2.1.4-1)$$

kde $c = 299792458$ m/s je rychlost světla ve vakuu a $v = v(\lambda)$ je fázová rychlost světla vlnové délky λ v prostředí.

Vzhledem k tomu, že rychlost $v(\lambda)$ závisí na vlnové délce světla, bude i index lomu záviset na vlnové délce světla:

$$n = n(\lambda). \quad (2.1.4-2)$$

Závislosti indexu lomu prostředí na vlnové délce světla se říká *disperze prostředí*. Index lomu definovaný výše uvedeným vztahem se nazývá *absolutní index lomu*.

Praktický význam má však index lomu $n(\lambda)$ vzhledem ke vzduchu [55]:

$$n(\lambda) = \frac{v_0(\lambda)}{v(\lambda)}, \quad (2.1.4-3)$$

kde $v_0(\lambda)$ je fázová rychlost světla vlnové délky λ ve vzduchu.

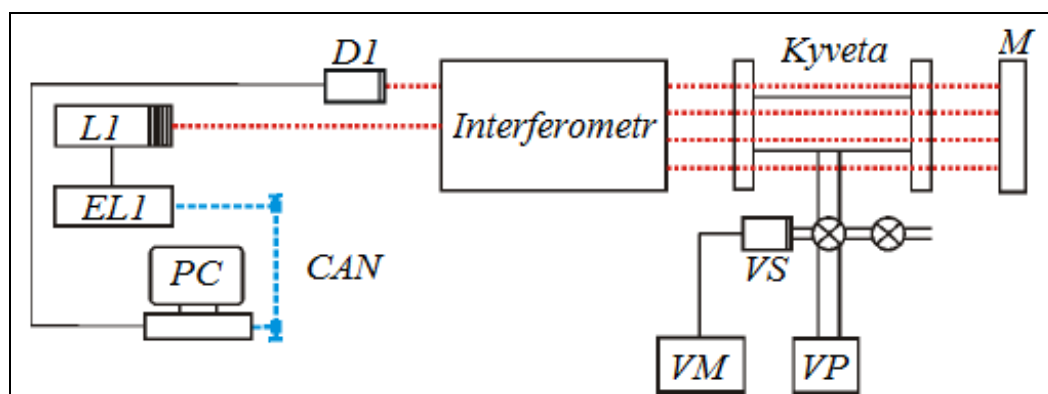
Index lomu materiálů bývá udáván vzhledem ke vzduchu. Index lomu vzduchu závisí na jeho tlaku, teplotě, vlhkosti a dalších veličinách.

Index lomu vzduchu je možné měřit přímými a nepřímými metodami.

Přímé metody měření indexu lomu vzduchu

Přímé metody využívají ke stanovení hodnoty indexu lomu vzduchu srovnání optické dráhy ve vzduchu a ve vakuu [48, 53]. Výhodou přímých metod je přesnost a nevýhodou náročnost měření.

Základní uspořádání přístroje k měření indexu lomu vzduchu tj. laserového refraktometru je na obrázku 2.1.4–1. Základem sestavy je dvoukomorová kyveta. Svazek v referenční větvi laserového interferometru prochází vnitřní komorou kyvety, svazek v měřicí větvi vnější komorou. Na počátku měření je v obou komorách kyvety vzduch, při jeho čerpání z vnitřní části kyvety dochází ke změně optické dráhy referenčního svazku. Přibližně při tlaku 100 Pa se již optická dráha přestává měnit. Hodnotu indexu lomu vzduchu pak stanovíme ze záznamu průběhu interferenčního signálu.



Obr. 2.1.4–1 Schéma laserového refraktometru s čerpanou kyvetou. LI – laser, DI – detektor, M – zrcadlo, VP – vakuová pumpa, VS, VM – měrka tlaku. Z vnitřní komory dvoukomorové kyvety je vyčerpán vzduch, čímž dojde ke změně optické dráhy referenčního svazku interferometru. Ze záznamu interferenčního signálu pak můžeme stanovit hodnotu indexu lomu vzduchu [48]

Nepřímé metody měření indexu lomu vzduchu – Edlénova formule

Nepřímé metody využívají ke stanovení hodnoty indexu lomu vzduchu výpočtu. Výhodou nepřímých metod měření indexu lomu vzduchu je jednoduchost a nevýhodou je naopak nižší přesnost.

Pro výpočet hodnoty indexu lomu vzduchu nepřímo se v praxi používá nejnovější revize Edlénovy formule (z roku 1994) vyjádřené vztahem [19]:

$$(n-1) \times 10^{-6} = 2,87782 \times p \times \frac{1 + p \times (6,01 - 0,0972 \times t) \times 10^{-6}}{1 + 0,003661 \times t} - 6,49 \times H \times (1,00050 + 2,3 \times t + 3,1 \times p) \left(\frac{-532}{t + 273,15} \right) \quad (2.1.4-4)$$

kde n je index lomu vzduchu, p atmosférický tlak [Pa], H relativní vlhkost [%] a t teplota vzduchu [°C].

V současné době se pro nejpresnější laboratorní výpočty používá buď nejnovější revize Edlénovy formule (2.1.4-4), nebo vztahy dle P. E. Ciddora (1996) či Bönsche a Potulskiho (1998) [15]. V rámci řešené problematiky předložené práce bude věnována pozornost vztahu dle Bönsche a Potulskiho.

Modifikovaná Edlénova rovnice podle Bönsch, Potulski je dána vztahem [15]:

$$(n-1) \times 10^8 = \left[8091,37 + \frac{2333983}{130 - (k)^2} + \frac{15518}{38,9 - (k)^2} \right] \times \left[\frac{p}{93214,6} \right] \times \left[\frac{1 + 10^{-8}(0,5953 - 0,009876 \times t) \times p}{(1 + 0,003661 \times t)} \right] \times [1 + 0,5327 \times (x - 0,0004)] - H [8,753 + 0,036588 \times (t)^2] \times [0,037345 - 0,000401 \times (k)^2] \quad (3.2.3-5)$$

kde je n index lomu vzduchu [-], k převrácená hodnota vlnové délky (vlnové číslo) [μm^{-1}], p atmosférický tlak vzduchu [Pa], t teplota vzduchu [°C], H relativní vlhkost vzduchu [%], x obsah CO₂ ve vzduchu [-].

Vztahu (2.1.4-5) bude dále využito v podkapitole 3.2.

Uvedené informace týkající se KM v této kapitole jsou obecně známé [1, 9, 28, 40, 43, 47]. Z hlediska řešení předkládané práce je však vhodné uvést alespoň v nezbytné míře základní informace vztahující se ke KM a práce s nimi.

I když je jednotka délky metr, a realizace metru je přes laserové zařízení, je nevhodné používat primární etalony pro každodenní měření. Jako alternativa je použití tzv. sekundárních etalonů délky – KM, které jsou měřeny primárními etalony.

KM jako etalony délky mají tvar destičky nebo hranolku a jejich velikost je dána vzdáleností dvou protilehlých rovnoběžných ploch. Rovnoběžné plochy destiček nebo hranolků jsou obrobeny s vysokou přesností na délku (u menších na tloušťku), s vysokou rovinností (cca 25 nm) a s hladkým (až dokonalým) povrchem, takže pouhým přiložením přilnou a vytvoří etalon požadovaného rozměru [28].

KM jsou všeobecně uznávány jako základ délkového měření ve strojírenské výrobě. Umožnily ve strojírenství přechod od kusové výroby k racionální výrobě vyměnitelných součástí. KM se vyrábějí s obdélníkovým průřezem 9 x 30 mm pro rozměry do 10 mm, nebo jako hranolky 9 x 35 mm pro rozměry nad 10 mm do 1 000 mm.

2.2.1 Názvosloví a definice

Délka KM l je skutečná vzdálenost měřicí plochy A, měřená v libovolném bodě od plochy B tělesa, k němuž je přilnuta nasunutím druhou měřicí plochou A*, obrázek 2.2.1 – 3.

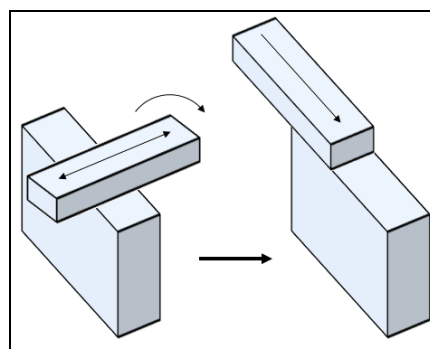
Přilnutím se rozumí vzájemné samovolné spojení KM nasunutých na sebe nebo na ocelovou či skleněnou desku měřicími, dokonale čistými plochami, obrázek 2.2.1 – 1A.

Nasunutím se rozumí samovolné spojení KM pouhým přiložením, tedy pohybem, popř. tlakem obvyklým při nasunování, obrázek 2.2.1 – 1B. Tento druh přímého přilnutí je možný jen u KM se zvlášť dokonalou rovinností a jakostí měřicích ploch.

Nasunutím KM rozumíme postup, kterým se dosáhne jejich přilnutí.



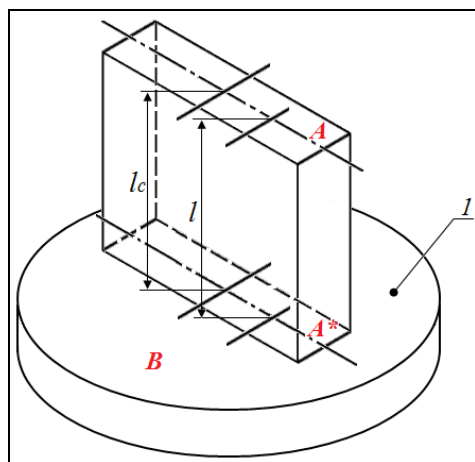
A – Nasunutí KM na sebe



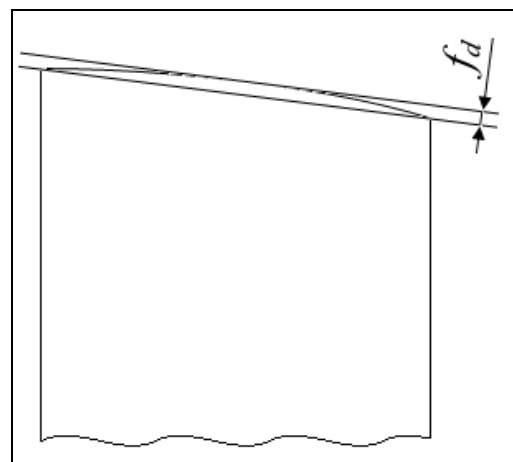
B – Způsoby nasunutí

Obr. 2.2.1 – 1 Přilnutí KM nasunutím [26]

Středová délka KM l_c , je délka kolmice spuštěné ze středu měřicí plochy A na plochu B tělesa, k němuž je KM druhou měřicí plochou A* přilnuta nasunutím, obrázek 2.2.1 – 2A. Tato délka nesmí být ani větší ani menší, než dovolují mezní odchylky.



A – Středová délka l_c a příklad délky l v libovolném bodě měřicí plochy KM, přilnuté na referenční rovinnou desku (1 – referenční rovinná deska)



B – Odchylka rovinnosti f_d

Obr. 2.2.1 – 2 Středová délka a odchylka rovinnosti KM [1]

Odchylka délky v libovolném bodě od jmenovité délky e je dána jako rozdíl $l - l_n$.

Odchylka rovinnosti f_d , je nejmenší vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými plochami, mezi kterými leží všechny body měřicí plochy, obrázek 2.2.1 – 2B. Odchylky rovinnosti jsou uvedeny v tabulce 2.2.1 – 1.

Odchylka rovinnosti nesmí překročit hodnotu $40 \mu\text{m}$ pro jmenovité délky KM do 100 mm . Pro jmenovité délky přes 100 mm do $1\,000 \text{ mm}$ je odchylka rovinnosti rovna $40 \mu\text{m} + 40 \times 10^{-6} \times l_n$. Odchylka rovnoběžnosti nesmí překročit hodnotu $80 \mu\text{m}$ pro jmenovité délky KM do 100 mm . Pro jmenovité délky přes 100 mm do $1\,000 \text{ mm}$ je odchylka rovnoběžnosti rovna $80 \mu\text{m} + 80 \times 10^{-6} \times l_n$.

Tabulka 2.2.1 – 1 Odchylky rovinnosti [1]

Jmenovitá délka $l_n [\text{mm}]$	Odchylky rovinnosti $f_d [\mu\text{m}]$			
	Třída přesnosti			
	K	0	1	2
$0,5 \leq l_n \leq 150$	0,05	0,1	0,15	0,25
$150 \leq l_n \leq 500$	0,1	0,15	0,18	0,25
$500 \leq l_n \leq 1\,000$	0,15	0,18	0,2	0,25

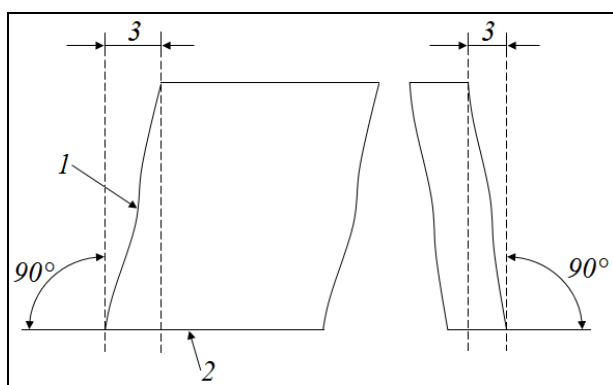
Pro přesnost měření délky KM je důležitá i kolmost bočních ploch navzájem vzhledem k měřicím plochám.

Dovolené odchylky kolmosti bočních ploch KM jsou uvedeny v tabulce 2.2.1 – 2 a vysvětleny na obrázku 2.2.1 – 3A.

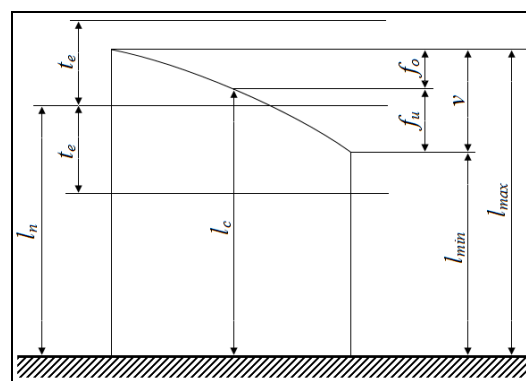
Tabulka 2.2.1 – 2 Odchylky kolmosti [1]

Jmenovitá délka l_n [mm]	Odchylka kolmosti [μm]
$10 \leq l_n \leq 25$	50
$25 \leq l_n \leq 60$	70
$60 \leq l_n \leq 150$	100
$150 \leq l_n \leq 400$	140
$400 \leq l_n \leq 1\,000$	180

Rozpětí délky v je rozdíl mezi největší délkou KM $l_{\max}$ a nejmenší délkou $l_{\min}$. Rozpětí délky je vysvětleno na obrázku 2.2.1 – 3B.



A – Odchylka kolmosti bočních a měřicích ploch; 1 – boční plocha; 2 – měřicí plocha; 3 – odchylka kolmosti. Úhel mezi přilehlými bočními plochami musí být $90^\circ \pm 0^\circ 10'$



B – Jmenovitá délka l_n ; středová délka l_c ; rozpětí délky v s f_o a f_u ; dovolená odchylka t_e pro délku v libovolném bodě pocházející ze jmenovité délky KM

Obr. 2.2.1 – 3 Odchylka kolmosti a rozpětí délky KM [1]

2.2.2 KM a příslušenství

KM se vyrábějí ve jmenovitých délkách stanovených normou [1].

KM se dodávají, buď jednotlivě, nebo v sadách, obrázek 2.2.2 – 1. KM v sadách obsahují různý počet KM odlišných jmenovitých délek tak, aby vyhovovaly různým způsobům použití (laboratornímu, kontrolnímu a dílenskému). Některé sady lze navzájem kombinovat.

U každé sady KM je udáno nejmenší odstupňování, které vyplývá ze skladby KM. Sadu, která nemá požadované jemné odstupňování, lze obvykle podle potřeby rozšířit přibráním doplňkové sady. Tak lze odstupňování některých sad zjemnit na 0,001 mm nebo dokonce na 0,0001 mm a měřicí rozsah zvětšit až na délky 1 nebo 2 metrů. Čím větší je počet KM v sadě, tím menšího počtu KM je třeba na sestavení určité rozměrové kombinace (při srovnávání různých sad se stejným odstupňováním).

Jak bylo již uvedeno, KM se vyrábějí s obdélníkovým průřezem 9 x 30 mm pro rozměry do 10 mm, nebo jako hranolky 9 x 35 mm pro rozměry nad 10 mm do 1 000 mm. Každá KM je označena. Na KM je vyznačena jmenovitá délka, stupeň přesnosti a případně i jméno, nebo značka výrobce.



A – Sada KM značky Mitutoyo 112 ks



B – Jednotlivé KM včetně označení jmenovité délky

Obr. 2.2.2 – 1 Sada KM, označení KM [47]

Podle kvality měřicích ploch a drsnosti povrchu rozdělujeme KM do různých stupňů přesnosti. Jedná se celkem o čtyři třídy přesnosti označených K, 0, 1, 2, z nichž stupeň K je nejpresnější. Liší se velikostí dovolených odchylek středové délky l_c , rovinnosti a rovnoběžnosti.

Potřebná třída přesnosti sady KM se volí podle přesnosti výroby, podle druhu používaných měřidel, rozměrové tolerance a jakosti povrchu měřených předmětů. Přitom se přihlíží i k ceně, která se vzrůstající přesností značně stoupá.

Třídy přesnosti KM se používají k následujícím měřením:

- První třída přesnosti K se požaduje pro etalony a KM, jimiž se udržuje jednotnost délkových měř, dále pro vědecko–výzkumné práce a základní měření v laboratoři.
- Druhá třída přesnosti 0 se volí pro kontrolu a nastavování porovnávacích měřidel a měřicích přístrojů.
- Třetí třída přesnosti 1 se volí pro kontrolu a nastavování pracovních měřidel, měřicích přístrojů a přípravků, pro výrobu přesného nářadí a pro dílenskou kontrolu.
- Čtvrtá třída přesnosti 2 se volí pro výrobu nářadí, seřizování strojů apod.

Příslušenství KM

Pro všestranné využití KM je důležité i příslušenství, které zahrnuje větší soubor pomocného nářadí, zhotoveného s přiměřenou přesností a jakostí funkčních ploch. Mezi nejobvyklejší příslušenství KM patří sada na údržbu KM, skleněná rovinná deska, izolační a čisticí pomůcky, konzervační prostředky a jiné pomůcky.

Sada na údržbu KM obsahuje veškeré potřebné nástroje pro péči a uchovávání KM, obrázek 2.2.2 – 2A.

Skleněná rovinná deska je ve tvaru kotouče, vyráběná v různých velikostech. Deska je určena pro měření rovinnosti a rovnoběžnosti měřicích ploch KM, obrázek 2.2.2 – 2B.

Při měření rovinnosti a rovnoběžnosti se KM měřicí plochou nasune na skleněnou desku. Tenká vzduchová vrstva, která zůstane mezi oběma plochami, vyvolá interferenční obraz ve tvaru proužků, obrázek 2.2.5 – 2. Je-li měřená plocha rovinná, jsou tyto proužky přímé, není-li rovinná, jsou křivé, např. kruhové, jestliže je měřená plocha vypouklá nebo vydutá.



A – Sada příslušenství KM



B – Skleněná rovinná deska

Obr. 2.2.2 – 2 Příslušenství KM [47]

Izolační pomůcky jsou důležité pro přesná měření, jelikož teplota ruky může mít již za velmi krátký časový interval nepříznivý vliv na správnost výsledku. Mezi izolační pomůcky pro malé KM patří pinzety a kleště, pro velké KM držáky a izolační rukavice (kožené nebo látkové), obrázek 2.2.2 – 3B.

Mezi čistící pomůcky náleží vlasový štětec, optické utěrky, vata ap. Omývání KM se provádí v lékařském benzínu. Ke konzervaci KM se používá lékařská vazelína nebo spec. olej.



A – Příslušenství pro odstraňování nečistot a otřepů – keramicko–kysličnickovo–hlinitý kámen



B – Sada na údržbu KM

Obr. 2.2.2 – 3 Izolační a čistící pomůcky pro práci s KM [47]

Další využívané pomůcky při práci s KM jsou speciální jemný brusný kámen (keramicko–kysličnickovo–hlinitý), obrázek 2.2.2 – 3A, pro odstraňování nečistot a otřepů, elektronický teploměr nebo jiné zařízení (pro sledování teploty místnosti při práci s KM), plastové nádoby pro omývání KM, osvětlená lupa se čtyřnásobným zvětšením (pro analýzu

povrchu KM), odmagnetovací přístroj a kameninová nebo litinová deska pro vyrovnání teploty KM.

2.2.3 Práce s KM

Správné měření (nejen laboratorní) s KM vyžaduje, aby se přísně dodržovaly některé zásady. Je nutné dodržet stabilní teplotu, zamezit vlivu nečistot, zabezpečit dostatečnou péči o KM a zamezit jejich poškození.

Předepsaná laboratorní teplota, stanovená normou ČSN EN ISO 1 [52], je 20 °C. Norma stanoví, že předměty, jejichž měřené hodnoty závisí na teplotě, musí mít předepsané rozměry při dané teplotě 20 °C. To znamená, že všechna délková měřidla, u nichž není výslovně předepsána teplota odlišná, mají při teplotě 20 °C odpovídající délku. Měří-li se však za jiné teploty než 20 °C, je zde nebezpečí nesprávného výsledku, který může vzniknout vlivem rozdílné teploty měřidel a nestejného koeficientu teplotní roztažnosti.

Tepelné vlivy působící při měření KM

Průměrná tělesná teplota u člověka se pohybuje v rozmezí 35,8 °C až 37,3 °C. Což je cca o 17 °C vyšší než laboratorní teplota 20 °C. Proto se KM nesmějí při měření držet v ruce, pouze s použitím izolačních pomůcek (pinzet, držáků, rukavic). Kromě teploty těla mohou být příčinou chyb měření také jiné vlivy, jako např. teplo Slunce nebo topných těles, atd..

Čas potřebný k vyrovnání teploty, tj. temperace u KM je cca 12 – 24 hodin při laboratorní teplotě 20 °C. Vyrovnání teploty KM probíhá na kameninové nebo litinové desce.

Nejmenší KM délky 0,5 – 10 mm lze uvést na teplotu místnosti asi za 5 hodiny (pokud ovšem teplota místnosti nekolísá). U větších KM, je-li teplota KM o 5 – 8 °C vyšší než je teplota místnosti, trvá ochlazení několik hodin. Při přesném měření je však ideální nechat vyrovnat teplotu u KM po dobu až 24 hodin (při teplotě 20 °C).

Vliv nečistot a nedostatečná péče s KM

Vysoká čistota je důležitým předpokladem správného měření i trvanlivosti KM. Proto se KM (jednotlivé i sady) musí chránit před prachem, vlhkem, atd.. Nesmějí se vystavovat velkým rozdílům teplot. Musí být vzdáleny od magnetických předmětů. Po realizaci měření se musí jednotlivé KM zakonzervovat potřením vazelíny a uložit. Bez použití ochranných pomůcek může dojít k zrezivění KM a to vlivem kyselého potu, který se dostane na povrch měřicích ploch KM. Rez velmi ohrožuje KM, a proto se KM musí za všech okolností chránit před vlhkostí, potem apod.

K čištění KM se používá čistého lékařského benzínu a k očištění KM do sucha optické utěrky. Velká pozornost musí být věnována zejména tomu, aby KM nespadly na zem, nebo se jiným neopatrným zacházením nepoškodily. KM, u nichž by došlo k poškození, lze jen s velkými obtížemi či vůbec přilnout nasunutím k jakékoliv rovinné desce či k sobě.

Ostřiny či vyvýšeniny, vzniklé poškrábáním měřicích ploch, se odstraňují jemným brusným kamenem.

S čistotou KM úzce souvisí kvalita měření. Čím čistší jsou měřicí plochy KM, tím přesnější je měření délky KM. I nepatrná vrstva (film) konzervantu, která přesto na měřicích plochách zůstane, má velký vliv.

Je také důležité se vyvarovat dotyku měřicích ploch prsty, které zanechávají stopy (tzv. otisky prstů), a způsobují poškození měřicích ploch KM korozi a nepřesné měření.

2.2.4 Materiál a délková teplotní roztažnost KM

Na materiál KM jsou kladeny vysoké požadavky. Materiál by měl být rozměrově stálý, s vysokou tvrdostí, odolností proti otěru a korozi. Dále by měl mít malý koeficient teplotní délkové roztažnosti, schopnost přilnout nasunutím a také dobrou obrobiteľnosť, zejména v rámci dokončovacích technologií.

Sledovanou vlastností je u KM rozměrová stálost materiálu, která rozhoduje o kvalitě KM jako etalonu délky.

Norma [1] uvádí, že KM musí být vyrobeny z kvalitní oceli nebo z jiného materiálu rozměrově stálého, s odolností proti otěru a se schopností přilnout nasunutím k povrchu.

První KM byly vyrobeny 1897 z kalené oceli s povrchovou úpravou lapováním. Tyto ocelové KM měli v dané době značnou výhodu a to, že většina průmyslově vyráběných výrobků byla rovněž ze stejného materiálu tj. z oceli. Nemusela zde tudíž být řešena problematika teplotní délkové roztažnosti mezi dvěma materiály. Ocelová KM měla shodný koeficient teplotní délkové roztažnosti jako měřená součást. Největším problémem u ocelových KM byla a stále je vyžadovaná rozměrová stálost materiálu. Na tuto vlastnost byl a je zaměřen celý technologický pochod výroby KM, který obsahuje množství operací a úkonů, jimiž se odstraňují povrchová napětí vzniklá obráběním a tepelným zpracováním.

Dle normy [1] by měla být tvrdost měřicích ploch KM dle Vickerse ne méně než 800 HV 0,5. Teplotní součinitel délkové roztažnosti KM by měl být v rozsahu teplot od 10 °C do 30 °C – $11,5 \pm 1,0 \left[\frac{\mu m}{m \cdot ^\circ C} \right]$.

V současné době je nejpoužívanějším materiálem na výrobu KM nástrojová ocel 19 422. Ocel 19 422 (EK) disponuje obsahem asi 1,4 % C (uhlíku), asi 1,6 % Cr (chromu) a malým obsahem V (vanadu). Velký obsah uhlíku zvyšuje trvanlivost oceli proti otěru a obsah chromu spolu s uhlíkem zvyšuje tvrdost. Nevýhodou oceli je vysoký teplotní součinitel délkové roztažnosti cca $10,8 \left[\frac{\mu m}{m \cdot ^\circ C} \right]$, nízká tvrdost (náchylnost k poškození měřicích povrchů tj. škrábance, rýhy), malá odolnost proti korozi (nutné používat při práci s KM rukavice a po skončení práce provést konzervaci).

Dalšími materiály používanými na výrobu KM jsou tvrdokov a keramika.

Do skupiny tvrdokovu patří karbid wolframu a karbid chromu. Karbid wolframu je známý díky jeho výjimečné tvrdosti a odolnosti proti abrazivnímu či erozivnímu opotřebení. Měřicí plochy KM jsou stejně kvalitní jako u oceli včetně rozměrové stálosti, která je srovnatelná. KM z karbidu wolframu vynikají nízkou hodnotou součinitele teplotní délkové roztažnosti α – cca o polovinu nižší než u oceli, avšak nevýhodou je vyšší hustota materiálu,

kteřá způsobuje poměrně výraznou hmotnost KM oproti ocelovým KM (cca 1x vyšší). Vedle karbidu wolframu se používá i karbid chromu, jako vhodný materiál na výrobu KM. Karbid chromu má srovnatelnou hodnotou součinitele teplotní délkové roztažnosti jako ocel a zhruba i stejnou hustotu. KM z karbidů se staly populárními v dílenských podmínkách pro jejich vysokou tvrdost a odolnost proti abrazivnímu či erozivnímu opotřebení.

Do skupiny keramiky patří cervit. Cervit je materiál navržený tak, aby měl téměř nulový koeficient teplotní délkové roztažnosti. Tato vlastnost by cervit činila jako velmi vhodný pro výrobu KM. Bohužel nevýhodou tohoto materiálu je jeho menší tvrdost než u oceli a vysoká křehkost. Zatímco ocelové KM se mohou volným pádem poškodit (s nutností povrchové úpravy a dodatečné kalibrace), cervitové KM mají tendenci prasknout/zlomit se a jsou již neopravitelné. Bohužel díky těmto negativním vlastnostem tj. nízká tvrdost a vysoká křehkost, není příliš vhodný tento materiál pro výrobu KM.

Dalšími materiály je oxid zirkoničitý a nitrid křemičitý. Oxid zirkoničitý (ZrO_2) vyniká vysokou pevností a lomovou houževnatostí při normální teplotě. Mechanické vlastnosti tohoto materiálu pro výrobu KM vynikají nižším teplotním součinitelem délkové roztažnosti cca $9,3 \left[\frac{\mu m}{m \times ^\circ C} \right]$, což je cca o 20% nižší než u oceli. Nevýhodou oxidu zirkoničitého je velmi nízká odolnost proti teplotním rázům vzhledem k vysoké teplotní roztažnosti a nízké tepelné vodivosti.

Nitrid křemičitý (Si_3N_4) vyniká svými výbornými mechanickými a termofyzikálními vlastnostmi. Pro uplatnění nitridu křemičitého pro výrobu KM mají především rozhodující význam jeho nízká hustota ve srovnání s ocelí, extrémně nízký teplotní součinitel délkové roztažnosti cca $2 \left[\frac{\mu m}{m \times ^\circ C} \right]$, vysoký stupeň tvrdosti, malý koeficient tření, vysoká odolnost proti korozi, vysoká rezistence proti náhlé změně teploty ve srovnání s jinými typy keramiky a některé tribologické vlastnosti, jako například zvýšená odolnost proti stykové únavě. Nitrid křemičitý má však velkou nevýhodu jako vhodný materiál pro výrobu KM a to vysokou křehkost.

Níže v tabulce 2.2.4 – 1 jsou uvedeny pro přehlednost vybrané materiálové vlastnosti používaných materiálů k výrobě KM [47].

Tabulka 2.2.4 – 1 Materiálové vlastnosti KM

Materiálové vlastnosti	Materiál			
	Ocel	Tvrdokov (karbid wolframu)	Keramika	
			oxid zirkoničitý (ZrO_2)	nitrid křemičitý (Si_3N_4)
Tvrdost podle Vickerse (ČSN 42 0374)	800	1750 – 1850	1350	1500
Teplotní součinitel délkové roztahnosti $\alpha \left[\frac{\mu m}{m \times ^\circ C} \right]$	$10,8 \pm 0,5$	$5,8 \pm 0,5$	$9,3 \pm 0,5$	2
Modul pružnosti v tahu E [10^3 MPa]	205 000	600 000	200 000	284 000

Materiálové vlastnosti	Ocel	Tvrdokov (karbid wolframu)	Keramika	
			oxid zirkoničitý (ZrO ₂)	nitrid křemičitý (Si ₃ N ₄)
Poissonovo číslo μ [–]	0,3	0,2	0,2	0,3
Hustota ρ $\left[\frac{g}{cm^3} \right]$	7,8	15,8	5,7	3,2
Tepelná vodivost λ $\left[\frac{W}{m \times K} \right]$	47,0	84,0	2,9	16,7

2.2.5 Měření délky KM

Měřeným parametrem je středová délka KM l_c . Dle normy ČSN EN ISO 3650 [1] jsou k měření délky KM využívány dvě základní metody. Obě jsou založeny na postupném porovnávání hodnoty délky se známou hodnotou.

První metoda se nazývá *interferenční* a využívá k měření délky KM laserovou interferometrii. Měření je prováděno na přístroji zvaném interferometr. Metoda je založena na porovnání délky se známým etalonem, tj. délkou světelné vlny. Měření délky KM pomocí laserové interferometrie probíhá tak, že se zjišťuje, kolik vlnových délek světla je v délce KM obsaženo. Přibližná délka KM je známa, proto se určuje jen zlomek, o který délka KM převyšuje celkový počet vlnových délek světla.

Při měření délky interferenční metodou poskytuje nasunutá KM na referenční desku interferenční obraz z jasných bílých a výrazných černých proužků (proužek bílý, vedle něho výrazný černý proužek, pak opět bílý proužek atd.). Tyto proužky jsou opticky porovnávány s proužky utvářenými stejným způsobem na referenční desce se známou rovinností, na kterou jsou KM přilnuty nasunutím. Interferenční metodou se zjišťuje počet celých proužků a zlomků, o které je tmavý proužek na měřené KM posunut vůči tmavému proužku na referenční rovině desce. Měřicí jednotkou jsou vzdálenosti proužku, které přísluší délce půlvlny světla $\lambda/2$. Zjištěné vzdálenosti proužků $\lambda/2$ udávají rozdíl mezi KM a referenční rovinnou plochou. Tato metoda je velmi závislá na vlastnostech přilnutí nasunutím KM na referenční rovinou desku. KM musí dokonale přilnout. Nepřilnutí k desce může být způsobeno rýhami (škrábanci) na měřicích plochách KM nebo ploše referenční rovinné desky, částicemi prachu mezi KM a deskou atd..

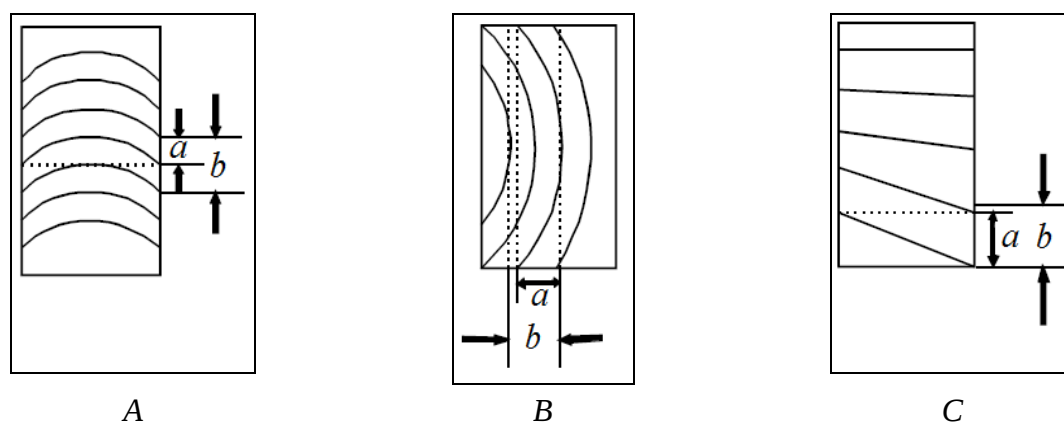
Druhá metoda se nazývá *komparační* a je prováděna pomocí mechanického komparátoru. Metoda je založena na porovnávání KM se známým etalonem tj. KM se stejnou jmenovitou délkou, ale vyšší přesností. Měření délky KM komparační metodou probíhá tak, že se hrotem snímače dotýkáme povrchu KM a zjišťujeme o kolik se jmenovitá délka měřené KM liší od etalonové KM. Přibližná délka měřené i etalonové KM je známa, proto se určuje jen odchylka mezi KM.

S měřením délky KM souvisí i měření rovinnosti a rovnoběžnosti, které charakterizují geometrii povrchu měřené KM [43].

Měření rovinnosti KM

Při měření délky KM pomocí interferometru je důležitá referenční deska, na kterou jsou KM nasunuty. Referenční deska musí splňovat dva základní požadavky. První požadavek se týká velikosti referenční desky – její velikost musí pokrýt celý povrch KM, zejména od průměru 70 mm a větší. Druhým požadavkem je dostatečná rovinnost plochy desky. Rovinnost desky by měla být taková, aby každé zakřivení mohlo být považováno za zakřivení KM. Odchylka rovinnosti by měla být do 25 nm na průměr 70 mm referenční rovinné desky [40, 43].

Obrázky 2.2.5 – 1A a B znázorňují typický obraz interferenčních proužků. Úhel mezi referenční rovinnou deskou a KM je nastaven tak, že 4 až 5 proužků se nachází po celé šířce povrchu KM, jak je na obrázku 2.2.5 – 1A [43]. Nebo 2 až 3 proužky, které se nacházejí po celé délce čelních hran měřicích ploch KM, jako na obrázku 2.2.8 – 1 B.



Obr. 2.2.5 – 1 Princip přilnutí KM nasunutím, typické obrazy interferenčních proužků používané pro měření rovinnosti KM pomocí interferometru [43]

Tyto obrazy interferenčních proužků mohou být interpretovány jako „obrysové mapy“. Průběh těchto proužků je měřítkem jakosti měřené plochy. Z průběhu zakřivení proužků lze určit tvar a zakřivení měřené plochy.

Dokonalá rovinná plocha vykazuje přímé, rovnoběžné světlé a tmavé proužky o stejné rozteči. Nedokonalá plocha vytváří proužky zakřivené nebo nepravidelné [43].

Zakřivení nebo nepravidelnost proužků je měřítkem rovinnosti. Zakřivení proužku = a/b .

Například zakřivení proužku, a/b je asi 0,2 na obrázku 2.2.5 – 1 A a 0,6 na obrázku 2.2.5 – 1 B. Zakřivení nebo nepravidelnost proužků se z obrazu určí jako zlomek vzdálenosti proužků. Vzdálenost interferenčních proužků odpovídá polovině vlnové délky použitého světla tj. $\lambda/2$ [43].

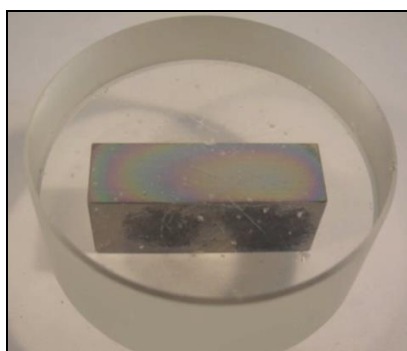
Pro výpočet odchylky rovinnosti f_d KM je důležitý zdroj použitého záření a jeho vlnová délka. Jako monochromatické světlo je používáno zelené o vlnové délce 520–565 nm.

Výpočet odchylky rovinnosti f_d je pro obrázek 2.2.5 – 1 A rovna $0,2 \times (\lambda/2)$, což odpovídá cca 50 nm. U obrázku 2.2.5 – 1 B je rovna cca 150 nm. Nedokonalá plocha

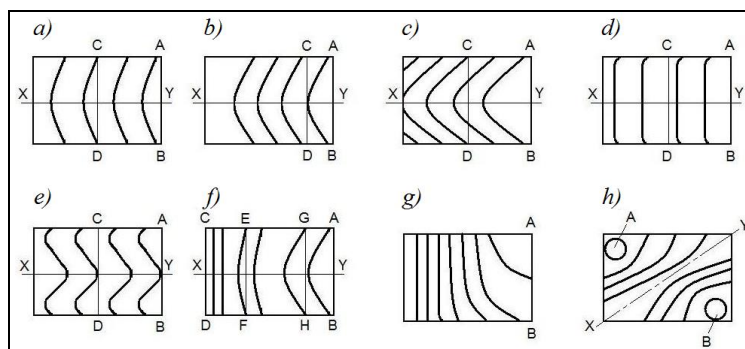
KM tj. zakřivení proužků je také znázorněna na obrázku 2.2.5 – 1 C, kde f_d je rovna 75 nm (pro zakřivení proužku 0,3).

Měření rovinnosti KM *pomocí mechanického komparátoru* je založeno na tom, že se střídavě měří etalonová a měřená KM v jasné definovaných měřicích bodech, obrázek 2.4.2 – 7 v podkapitole 2.4.2. Jedná se o body v blízkosti čtyř hran měřicí plochy KM ve vzdálenosti asi 1,5 mm od okrajů měřicích ploch.

K měření rovinnosti měřicích ploch KM může být také využito jen skleněné rovinné desky jak je zobrazeno na obrázku 2.2.2 – 2B, jako vhodné pomůcky (jedná se o zastaralý způsob, ale stále využívaný). Měřicí plochy KM i skleněné desky musí být pečlivě vyčištěny. KM se přiloží na měřicí plochu skleněné desky a lehkým tlakem se posune stranou. Mezi stykovými plochami KM i desky se vytvoří nosný vzduchový klín. Na skleněné desce lze pak pozorovat interferenční jevy tj. vytvoření obrazu interferenčních proužků, obrázek 2.2.5 – 2A.



A – Reálná nedokonalá plocha KM



B – Měření rovinnosti skleněnou rovinnou deskou; a, b, c – vypouklé plochy; d – rovinná plocha se sraženými okraji, e – plocha s vystupujícími pásy na okrajích; f – plocha na levé straně rovinná a směrem doprava se vzrůstající vypouklostí; g – plocha s nízkým pravým dolním rohem; h – plocha se dvěma body dotyku v rozích s prohlubeninou mezi nimi

Obr. 2.2.5 – 2 Nedokonalá plocha KM [43]

Dokonalá rovinná plocha vykazuje jednotnou šedou barvu (jakékoli světlé nebo barevné plochy indikují nedokonalou plochu) s proužky přímými, rovnoběžnými a o stejné rozteči.

Nedokonalá plocha vytváří proužky zakřivené nebo nepravidelné, obrázek 2.2.5 – 2A a B. Z obrazu interferenčních proužků lze určit velikost nepravidelností měřené plochy jako u výše uvedené metody měření rovinnosti. Zakřivení nebo nepravidelnost proužků se z obrazu na skleněné desce určí jako zlomek vzdálenosti proužků. Vzdálenost interferenčních proužků odpovídá polovině vlnové délky světla. Z průběhu zakřivení proužků lze určit tvar a zakřivení měřené plochy. Nejčastější nerovnosti ploch KM jsou vydutost nebo vypouklost; určí se posouzením zakřivení proužků vzhledem k čáře dotyku kontrolované KM a referenční rovinné desky/skleněné desky (tj. k místu, odkud byla KM tlakem posouvána). Vypouklé

plochy vytvářejí interferenční proužky zakřivené směrem k čáře dotyku. Vyduuté plochy vytvářejí interferenční proužky zakřivené směrem od čáry dotyku.

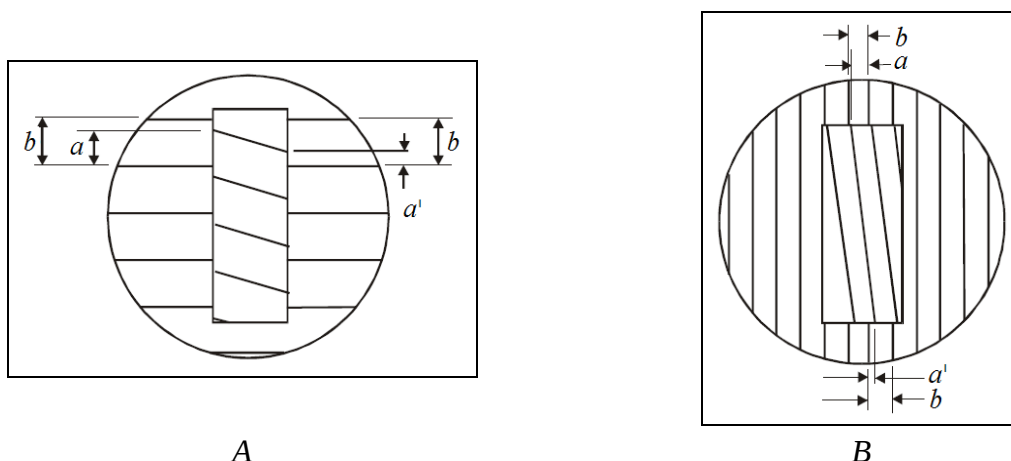
Měření rovnoběžnosti KM

Při měření délky KM *pomocí interferometru* jsou KM přilnuty nasunutím k referenční rovině desce. Obrázek 2.2.5 – 3 znázorňuje typický obraz interferenčních proužků. Úhel mezi referenční deskou a KM je nastaven tak, aby byly proužky orientovány napříč šířkou nebo po celé délce hran měřicích ploch KM. Nerovnoběžnost mezi dvěma plochami je indikována sklonem proužků KM vůči proužkům referenční desky. Kdyby měřicí plochy KM byly přesně rovnoběžné, interferenční proužky by na sebe navazovaly a byly paralelní.

Pokud vykazují interferenční proužky sklon tzn. jsou navzájem skloněny, nejsou měřicí plochy KM zcela rovnoběžné. Rovnoběžnost přes celou šířku KM je znázorněna na obrázku 2.2.5 – 3A, kde:

$$\text{Sklon} = (a/b) - (a'/b) = 0,8 - 0,3 = 0,5.$$

Rozdíl odečtený na interferenčním obraze je 0,5 proužku.



Obr. 2.2.5 – 3 Typické obrazy referenčních proužků pro měření rovnoběžnosti KM pomocí interferometrie [43]

Rovnoběžnost po celé délce KM je znázorněna na obrázku 2.2.5 – 3A a dána vztahem:

$$\text{sklon} = (a/b) + (a')/b = 0,8 + 0,3 = 1,1.$$

Rozdíl odečtený na interferenčním obraze je následně 1,1 proužku.

U obrázku 2.2.5 – 3A dochází k odčítání proužků a u obrázku 2.2.5 – 3B k sčítání. Důvod plyne z interferenčního obrazce. U obrázku 2.2.5 – 3A proužek na KM zůstává uvnitř dvou sousedních proužků na referenční rovině desce, kdežto u obrázku 2.2.5 – 3B proužek na KM zasahuje do vedlejšího sousedního páru proužků.

Měření rovnoběžnosti KM *pomocí mechanického komparátoru* probíhá zároveň s měřením rovinnosti.

Skleněné rovinné desky, jejichž použití bylo již popsáno při měření rovinnosti měřicích ploch KM, lze použít i na měření rovnoběžnosti měřicích ploch KM. Postup je totožný. Pokud interferenční obraz vykazuje skloněné proužky napříč šířkou KM, KM bude vykazovat odchylku rovnoběžnosti.

2.2.6 Deformace KM

Během měření délky KM dochází ke vzniku deformace, vlivem způsobu metody měření.

U měření délky KM pomocí interferometrie je základem přilnutí KM k referenční rovinné desce. Nasunutí je realizováno pod určitým působením vnějšího tlaku vyvolaného rukou/prsty. Při tomto způsobu měření dochází zejména k plastické deformaci povrchu KM tj. povrchové nerovnosti (drobné výstupky) se deformují, vznikají rýhy a škrábance. V kontaktu jsou dvě reálná tělesa bez maziva, a jejich kontakt je zprostředkován především na výstupcích povrchových nerovnostech.

Měření délky KM pomocí mechanického komparátoru vyžaduje zase velmi jemné stlačení KM mezi dva měřicí dotyky – 2 hroty snímače. Při tomto způsobu měření dochází pouze k pružné deformaci.

2.2.7 Rozměrová stabilita

Rozměrová stabilita je pojem, který souvisí s časem. Charakterizuje významnou vlastnost materiálu a to, že daný materiál je schopen udržet si původní rozměry v čase. Rozměrová stabilita je důležitá pro KM z hlediska jejich správné funkce v průběhu času.

Požadavky na rozměrovou stabilitu jsou stanoveny v normě [1], jako nejvyšší dovolená změna délky KM za rok.

Uvedené odchylky v tabulce 2.2.7 – 1 platí pro KM, které nebyly vystaveny extrémním teplotám, vibracím, nárazům a magnetickému poli nebo extrémnímu mechanickému namáhání.

Tabulka 2.2.7 – 1 Rozměrová stabilita

Třída	Nejvyšší dovolená změna délka za rok
K	$\pm(0,02 \mu\text{m} + 0,25 \times 10^{-6} \times l_n)$
0	
1	$\pm(0,05 \mu\text{m} + 0,5 \times 10^{-6} \times l_n)$
2	

Uvedené informace týkající se nejistoty měření v této podkapitole jsou klíčové pro kapitolu 3 – podkapitolu 3.2.

O terminologii související s nejistotami měření a o postupech odhadu, stanovení a uvádění nejistot měření pojednává dokument EA 4/02 [45], dále Sborníky technické harmonizace 2012 [49] a 2005 [50] vydané Úřadem pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ).

2.3.1 Zásady a definice

Nejistota měření je definována jako: „**parametr přidružený k výsledku měření, který charakterizuje rozptýlení hodnot, jež by mohly být důvodně přisuzovány k měřené veličině**“ [45].

Jako měřené veličiny jsou označovány ty blíže určené veličiny, které jsou předmětem měření. Při kalibracích se obvykle pracuje pouze s jednou měřenou veličinou, resp. jednou výstupní veličinou Y závislou na určitém počtu vstupních veličin X_i ($i = 1, 2, \dots, N$) dle funkční závislosti:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N). \quad (2.3.1-1)$$

Funkce f reprezentuje postup měření a metodu stanovení. Popisuje, jak jsou hodnoty výstupní veličiny Y stanovovány z hodnot vstupních veličin X_i . Ve většině případů se jedná jednat o analytickou funkci. Může se ale jednat i o skupinu funkcí zahrnující korekce a korekční faktory systematických vlivů, a tím o komplikovanější vztah mezi výstupní veličinou a vstupními veličinami, který není zapsán jako jedna explicitní funkce. Dále může být funkce f určena experimentálně, numericky v podobě vyhodnocovaného počítačového algoritmu nebo se může jednat o kombinaci všech výše uvedených možností.

Množinu vstupních veličin X_i lze rozdělit do dvou základních kategorií dle způsobu, jakým byla stanovena jejich hodnota a nejistota s touto hodnotou spojená:

1. Veličiny, u nichž byl odhad a s ním spojená nejistota přímo určena na základě provedení měření. Tyto hodnoty mohou být stanoveny např. na základě jednoho pozorování, opakovaného pozorování nebo odborného úsudku na základě zkušenosti. Dále mohou zahrnovat jak korekce na odečítání přístroje, tak korekce na ovlivňující veličiny jako jsou teplota prostředí, atmosférický tlak nebo vlhkost.
2. Veličiny, u nichž byl pro dané měření odhad hodnoty a s ním spojená nejistota převzata z externích zdrojů, jako je tomu v případě veličin vztahujících se ke kalibrovaným měřicím etalonům, certifikovaným referenčním materiálům nebo referenčním údajům převzatým z příruček.

Odhad hodnoty měřené veličiny Y , tj. odhad hodnoty výstupní veličiny označený jako y , se stanoví dle vztahu (2.3.1-1) po dosazení vstupních odhadů x_i za hodnoty vstupních veličin:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N). \quad (2.3.1-2)$$

Zároveň se předpokládá, že odhady hodnot vstupních veličin jsou nejlepšími odhady, které byly korigovány pro všechny vlivy významné pro model měření. Pokud tomu tak není, musí se do modelu zavést nezbytné korekce v podobě samostatných vstupních veličin.

Pro vyjádření míry rozptylu hodnot náhodné veličiny se používá rozptyl jejího rozdělení hodnot, resp. jeho kladná druhá odmocnina, označovaná jako směrodatná odchylka.

Standardní nejistotou měření $u(y)$, vztahující se k odhadu hodnoty výsledné veličiny nebo výsledku měření y , je směrodatná odchylka měřené veličiny Y . Tato hodnota se stanoví z odhadů x_i hodnot vstupních veličin X_i a jim příslušejících standardních nejistot $u(x_i)$.

Standardní nejistota náležící určitému odhadu má stejný rozměr jako tento odhad.

2.3.2 Stanovení nejistot měření pro odhady hodnot vstupních veličin

Nejistota měření vztahující se k odhadu hodnot vstupních veličin se stanoví postupem pro stanovení *nejistoty typu A* nebo postupem pro stanovení *nejistoty typu B*.

Postup pro stanovení *nejistoty typu A* je založen na stanovení nejistoty statistickou analýzou série pozorování. V tomto případě je standardní nejistota výběrovou směrodatnou odchylkou průměru vycházející z výpočtu nebo příslušné regresní analýzy.

Postup pro stanovení *standardní nejistoty typu B* je založen na stanovení nejistoty jiným způsobem než statistickým vyhodnocením série pozorování. V tomto případě vychází stanovení standardní nejistoty z jiné odborné znalosti (např. z kalibračních listů/kalibračních certifikátů, publikovaných zpráv o nejistotách spojených s fyzikálními konstantami).

2.3.2.1 Stanovení nejistoty typu A

Postup pro stanovení *nejistoty typu A* lze použít tehdy, pokud bylo za stejných podmínek provedeno několik nezávislých pozorování vstupních veličin. Pokud je měření prováděno s dostatečným rozlišením, bude pozorován rozptyl získaných hodnot.

Označíme-li opakovaně naměřenou vstupní veličinu X_i jako veličinu Q . Odhad q hodnoty veličiny Q , na základě n statisticky nezávislých pozorování ($n > 1$), je dán aritmetickou střední hodnotou nebo průměrem individuálních pozorovaných hodnot q_j ($j = 1, 2, \dots, n$) q :

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j \quad (2.3.2-1)$$

Nejistota měření spojená s odhadem q se stanoví jedním z níže uvedených postupů. Odhad rozptylu pravděpodobnostního rozdělení hodnot je výběrový rozptyl $s^2(q)$ hodnot q_j , který je stanoven dle vztahu:

$$s^2(q) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2. \quad (2.3.2-2)$$

Kladná odmocnina takto stanoveného rozptylu je označována jako výběrová směrodatná odchylka.

Nejlepší odhad rozptylu aritmetického průměru $\bar{q}$ je výběrový rozptyl aritmetického průměru stanovený dle vztahu:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q)}{n}. \quad (2.3.2-3)$$

Jeho (kladná) druhá odmocnina je pak označována jako výběrová směrodatná odchylka průměru. Standardní nejistota $u(\bar{q})$ odhadu vstupu $\bar{q}$ je pak rovna výše uvedené výběrové směrodatné odchylce průměru:

$$u(\bar{q}) = s(\bar{q}). \quad (2.3.2-4)$$

Pro měření, která jsou dobře popsána a statisticky vyhodnocována, může být k dispozici kombinovaný odhad rozptylu nebo odhad rozptylu z velkého množství měření s_p^2 lépe charakterizující rozptyl hodnot, než odhad standardní odchylky stanovený z omezeného počtu pozorování. Pokud je v takovémto případě hodnota vstupní veličiny Q určena jako aritmetický průměr q malého počtu n nezávislých pozorování, lze odhad rozptylu aritmetického průměru stanovit dle vztahu:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s_p^2}{n}. \quad (2.3.2-5)$$

Standardní nejistota je pak z této hodnoty odvozena dle vztahu 2.3.2-5.

2.3.2.2 Stanovení nejistoty typu B

Postup pro stanovení standardní nejistoty typu B je založen na stanovení nejistoty vztahující se k odhadu x_i vstupní veličiny X_i jiným způsobem než statistickou analýzou série pozorování. Příslušná standardní nejistota $u(x_i)$ je určena odborným úsudkem na základě všech dostupných informací o možné variabilitě veličiny X_i .

Nejistoty náležící do této kategorie mohou být odvozeny na základě údajů z dříve provedených měření, zkušenosti s chováním a vlastnostmi příslušných materiálů a zařízení nebo jejich obecné znalosti, údajů výrobce, údajů uváděných v kalibračních listech nebo jiných certifikátech a nejistot referenčních údajů převzatých z příruček.

Náležité použití všech relevantních informací pro stanovení nejistoty typu B vyžaduje důkladné pochopení problematiky vycházející ze zkušenosti a obecné znalosti nejistot související s příslušným měřením. Jedná se o odbornost, které lze dosáhnout praxí.

Správné použití postupu pro stanovení standardní nejistoty typu B může vést k hodnotě nejistoty stejně spolehlivé jako v případě užití postupu pro stanovení *nejistoty typu A*, a to zejména v případech, kdy je *nejistota typu A* stanovena z relativně malého počtu statisticky nezávislých pozorování ($n > 5$).

Musí být rozlišovány následující případy:

1. Pokud je pro veličinu X_i známá pouze jedna hodnota, jako např. jedna naměřená hodnota, výsledná hodnota z předchozích měření, referenční hodnota z literatury nebo korekční hodnota, použije se tato hodnota za odhad x_i . Standardní nejistota $u(x_i)$ náležící k této hodnotě x_i musí být převzata ze stejného zdroje. Není-li to možné, musí

být nejistota vypočtena z důvěryhodných údajů. Pokud nelze zvýšit počet pozorování, musí být zvážena jiná metoda pro odhad nejistoty uvedený v následujícím bodě.

2. Pokud lze na základě teorie nebo zkušenosti předpokládat pro veličinu X_i určité pravděpodobnostní rozdělení, je třeba použít za odhad x_i příslušnou očekávanou hodnotu a za příslušnou standardní nejistotu $u(x_i)$ odmocninu rozptylu tohoto rozdělení.
3. Pokud lze pro hodnoty veličiny X_i odhadnout pouze horní a dolní limit a_+ a a_- (např. údaj výrobce pro měřicí zařízení, rozmezí teplot, zaokrouhlovací chyby nebo chyby vznikající zkracováním při automatické redukci dat), je třeba použít pro popis její variability pravděpodobnostní rozdělení s konstantní pravděpodobnostní hustotou mezi těmito limity (rovnoměrné rozdělení). Dle výše uvedeného případu to vede na vztah:

$$x_i = \frac{1}{2}(a_+ + a_-), \quad (2.3.2-6)$$

pro hodnoty a

$$x_i = \frac{1}{2}(a_+ + a_-) \quad (2.3.2-7)$$

pro druhou mocninu standardní nejistoty. Pokud rozdíl mezi limitními hodnotami označíme jako $2a$, lze vztah (2.3.2-7) upravit na tvar:

$$u^2(x_i) = \frac{1}{3}a^2. \quad (2.3.2-8)$$

Použití rovnoměrného rozdělení představuje přiměřené statistické vyjádření nedostatečné znalosti vstupní veličiny X_i , pokud o ní nejsou známy jiné informace, než jsou limity její variability. Pokud ale víme, že pravděpodobnost výskytu hodnot veličiny v okolí středu intervalu hodnot je vyšší než pravděpodobnost výskytu hodnot v krajích intervalu, může být vhodnější použití trojúhelníkového nebo normálního rozdělení.

2.3.2.3 Výpočet standardní nejistoty odhadu hodnoty výstupní veličiny

Pro nekorelované vstupní veličiny je druhá mocnina standardní nejistoty odhadu y hodnoty výstupní veličiny definována vztahem:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y). \quad (2.3.2-9)$$

Veličina $u_i(y)$ ($i = 1, 2, \dots, N$) je příspěvkem ke standardní nejistotě odhadu y výstupní veličiny vyplývající ze standardní nejistoty odhadu x_i vstupní veličiny:

$$u_i(y) = c_i u(x_i), \quad (2.3.2-10)$$

kde c_i je koeficient citlivosti odpovídající odhadu hodnoty x_i vstupní veličiny, tj. hodnota parciální derivace modelové funkce f dle vstupní veličiny X_i pro odhad její vstupní hodnoty x_i :

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial X_i} \bigg|_{X_1=x_1, \dots, X_N=x_N}. \quad (2.3.2-11)$$

Koeficient citlivosti c_i popisuje, do jaké míry je odhad výstupní hodnoty y ovlivňován změnami v odhadu vstupní veličiny X_i . Jeho hodnota může být stanovena z rovnice funkce f

dle vztahu (2.3.2–11) nebo pomocí numerických metod, tj. výpočtem změny hodnoty odhadu y výstupní veličiny vzhledem k odpovídající změně odhadu x_i vstupní veličiny v rozmezí $+u(x_i)$ a $-u(x_i)$.

Jako hodnota koeficientu c_i se vezme výsledná změna v hodnotě y dělená $2u(x_i)$. V některých případech může být vhodnější nalézt změnu hodnoty y experimentálně opakováním měření např. v rozsahu $x_i \pm u(x_i)$.

I když je $u(x_i)$ vždy kladné, příspěvek $u_i(y)$ dle vztahu (2.3.2–10) může být podle znaménka koeficientu citlivosti c_i kladný nebo záporný.

Pokud je funkce f definována jako součet nebo rozdíl vstupních veličin X_i :

$$f(X_1, X_2, \dots, X_N) = \sum_{i=1}^N p_i X_i, \quad (2.3.2-12)$$

je, odhad hodnoty výstupní veličiny viz vztah (2.3.1–2) dán součtem či rozdílem odpovídajících odhadů hodnot vstupních veličin:

$$y = \sum_{i=1}^N p_i x_i, \quad (2.3.2-13)$$

protože hodnoty koeficientů citlivosti jsou rovny p_i a vztah (2.3.2–9) přechází na tvar:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N p_i^2 u^2(x_i). \quad (2.3.2-14)$$

Pokud je funkce f definována jako součin nebo podíl vstupních veličin X_i :

$$f(X_1, X_2, \dots, X_N) = c \prod_{i=1}^N X_i^{p_i}, \quad (2.3.2-15)$$

je odhad hodnoty výstupní veličiny dán odpovídajícím součinem či podílem odhadů hodnot vstupních veličin:

$$y = c \prod_{i=1}^N X_i^{p_i}. \quad (2.3.2-16)$$

V tomto případě jsou koeficienty citlivosti rovny $p_i y/x_i$ a pokud jsou použity relativní standardní nejistoty $w(y) = u(y)/|y|$ a $w(x_i) = u(x_i)/|x_i|$ je možné ze vztahu (2.3.2–9) odvodit vztah analogický vztahu (2.3.2–14):

$$w^2(y) = \sum_{i=1}^N p_i^2 w^2(x_i). \quad (2.3.2-17)$$

Pokud jsou dvě vstupní veličiny X_i a X_k do určité míry korelované, tj. jestliže jsou na sobě určitým způsobem závislé, musí se jako jeden z příspěvků k nejistotě brát v úvahu i jejich korelační rozptyl.

Schopnost vzít do úvahy vliv korelací závisí na znalostech průběhu měření a odhadu vzájemné závislosti vstupních veličin. Obecně je nutné respektovat fakt, že zanedbání vzájemných závislostí mezi vstupními veličinami může vést k nesprávnému stanovení standardní nejistoty měřené veličiny.

Korelační rozptyl odpovídající odhadům dvou vstupních veličin X_i a X_k může být považován za nulový nebo zanedbatelný v případech, kdy:

1. Vstupní veličiny X_i a X_k jsou nezávislé, např. proto, že byly opakovaně, ale ne současně zjišťovány v různých nezávislých experimentech nebo protože představují výsledné hodnoty nezávisle prováděných různých vyhodnocení.
2. Jedna ze vstupních veličin X_i a X_k může být považována za konstantu.
3. Analýza neposkytne informace ukazující přítomnost korelace mezi vstupními veličinami X_i a X_k .

V některých případech se lze vyvarovat korelací mezi veličinami vhodným výběrem funkce f modelující postup měření.

Analýza nejistot pro určité měření má obsahovat seznam všech zdrojů nejistot spolu s jejich standardními nejistotami měření a způsoby jejich odhadu. Všechny veličiny by měly být označeny buď fyzikálním symbolem veličiny X_i nebo krátkým identifikátorem. Pro všechny musí být uveden nejméně odhad jejich hodnoty x_i , jemu odpovídající nejistota měření $u(x_i)$, koeficient citlivosti c_i a různě velký příspěvek k nejistotě $u_i(y)$. Výše uvedené vychází přímo z dokumentu EA – 4/02 [45].

2.3.2.4 Rozšířená nejistota měření

Kalibrační laboratoře musí uvádět rozšířenou nejistotu měření U , stanovenou vynásobením standardní nejistoty $u(y)$ odhadu výstupní veličiny y koeficientem rozšíření k :

$$U = k \times u(y). \quad (2.3.2-18)$$

V případech, kdy lze usuzovat na normální (Gaussovo) rozdělení měřené veličiny a kdy standardní nejistota odhadu výstupní veličiny je stanovena s dostatečnou spolehlivostí, je používáno standardního koeficientu rozšíření $k = 2$. Takto stanovená rozšířená nejistota odpovídá pravděpodobnosti pokrytí asi 95%.

Spolehlivost standardní nejistoty přiřazené k odhadu hodnoty výstupní veličiny je určena jejími efektivními stupni volnosti.

Kritérium spolehlivosti je vždy splněno tehdy, když žádný z příspěvků nejistoty, určený dle postupu pro nejistotu typu A, není stanoven z méně než deseti opakovaných pozorování.

Pokud není jedna z těchto podmínek splněna (normalita či dostatečná spolehlivost), může vést použití standardního koeficientu rozšíření $k = 2$ k rozšířené hodnotě nejistoty odpovídající pravděpodobnosti pokrytí menší než 95%. V těchto případech je pak nutné použít jiné postupy tak, aby bylo zajištěno, že uvedená rozšířená nejistota odpovídá stejné pravděpodobnosti pokrytí jako ve standardním případě. Použití přibližně shodné pravděpodobnosti pokrytí je nezbytné v těch případech, kdy se porovnávají dva výsledky měření stejné veličiny, tj. např. při vyhodnocování mezilaboratorních porovnání nebo při rozhodování o shodě se zadanou specifikací.

V případech, kdy je možné předpokládat normální rozdělení, je možné, že stanovení standardní nejistoty odhadu výstupní veličiny není dostatečně spolehlivé. Pokud v takovém případě není možné zvýšit počet opakovaných měření n nebo místo postupu pro stanovení

nejistoty typu A, který vede k nízké spolehlivosti standardní nejistoty. Použít postup pro stanovení *nejistoty typu B*.

Ve zbývajících případech, kdy nelze použít předpokladu normálního rozdělení, je nutné stanovit hodnotu koeficientu rozšíření s ohledem na skutečný tvar rozdělení odhadů hodnot výstupní veličiny tak, aby jeho hodnota odpovídala pravděpodobnosti pokrytí asi 95%.

2.4 SYSTÉMY PRO MĚŘENÍ DÉLKY KM

Popisy metod pro měření délky KM a k nim příslušných zařízení, které jsou využívány k měření délky KM na pracovišti ČMI OI Liberec jsou uvedeny v této podkapitole.

Dle mezinárodní normy [1] jsou k měření délky krátkých (0,3 – 100 mm) KM v ČMI OI Liberec využívány dvě základní metody. Jedná se o metodu interferenční a metodu komparační. Interferenční metoda měření je uskutečňována na systému TESA NPL A.G.I. 300, který využívá k měření délky KM laserovou interferometrii. Komparační metoda měření je prováděna pomocí mechanického komparátoru TESA–UPC. Měřeným parametrem je středová délka KM l_c (podkapitola 2.2.1). Středová délka je délka kolmice spuštěné ze středu měřicí plochy KM na: a) plochu referenční desky, k níž je KM druhou měřicí plochou přilnuta nasunutím – při interferenčním měření, b) k druhé měřicí ploše KM – při komparačním měření.

Příprava KM před vlastním měřením délky

V rámci laboratorního měření musí být dodrženy základní zásady týkající se práce s KM. Předepsaná laboratorní teplota je $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (interferenční měření) a $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (komparační měření) a standardní atmosférický tlak 101 325 Pa. Při měření KM nesmí dojít k přímému kontaktu KM s pokožkou ruky, k manipulaci s KM dochází pouze s použitím rukavic, pinzet a držáků.

Před vlastním měření je realizováno očištění KM od konzervantu pomocí čistého lékařského benzínu a optické utěrky (utření do sucha KM). Velká pozornost musí být věnována zejména tomu, aby KM nespadly na zem, nebo se jiným neopatrným zacházením nepoškodily. KM, u nichž by došlo k poškození, lze jen s velkými obtížemi či vůbec přilnout nasunutím k jakékoliv rovinné desce či k sobě navzájem. V rámci čištění se také kontroluje KM z hlediska povrchového poškození měřicích ploch. Z měření jsou vyloučeny KM, které mají na měřicích plochách nápadné shluky čar a rýh nebo hrubě poškozený povrch, případně korozi. Nepatrné ostřiny či vyvýšeniny, vzniklé poškrábáním měřicích ploch, se mohou odstranit jemným brusným kamenem.

Součástí příprav před měřením je také kontrola měřicího přístroje, z hlediska kompletnosti a funkčnosti.

Nejdůležitější přípravnou fází před vlastním měřením je temperace KM. Jedná se o čas potřebný k vyrovnaní teploty u KM před vlastním měřením. Při laboratorní teplotě $20 \pm 0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ je to cca 12 až 24 hodin.

Vyrovnaní teploty KM probíhá na: a) referenční desce (ocelové) k níž je KM přilnuta nasunutím – při interferenčním měření, b) kameninové desce – při komparačním měření.

Při měření délky KM musí být dodržována tzv. metodika měření (kalibrační postup), která obsahuje souhrn činností nezbytných při měření délky KM a slouží jako návod pro práci zaměstnanců/laborantů v kalibrační laboratoři. Metodika je pro každou metodu měření rozdílná. Dále se rozlišuje metodika měření pro: a) KM do 100 mm jmenovité délky a b) KM nad 100 mm. Rozdílnost obou postupů je v poloze KM při kalibraci. KM se jmenovitou délkou do 100 mm a včetně jsou uloženy do svislé polohy s měřicími plochami ve vodorovné

poloze. KM se jmenovitou délkou nad 100 mm jsou uloženy při kalibraci do vodorovné polohy.

Metoda měření délky KM závisí na:

1. **Třídě přesnosti.** Přesnost KM je dána přesností vzájemných vzdáleností měřicích ploch a drsnosti povrchu těchto ploch. Normou ČSN EN ISO 3650 jsou pro KM stanoveny čtyři třídy přesnosti: K, 0, 1, 2. KM, které slouží jako etalony – první stupeň přesnosti K se měří pomocí interferometrie (interferenční komparátory s rozlišením v řádu nm), ostatní KM – druhý stupeň přesnosti 0 až 2 se měří pomocí mechanického komparátoru (komparační délkoměr s indukčnostními snímači s rozlišením v setinách μm). (Pomocí interferometrie lze měřit i KM třídy přesnosti 0, ale normou [1] je doporučeno měřit jen KM přesnosti K.)
2. **Řádu KM** (rozdělení do řádů, je realizováno dle požadované nejistoty měření KM určené zákazníkem). Zavedení tzv. řádu souvisí s vnitřním systémem měření délky KM v ČMI – systém navázání měřidel na státní etalon viz. tabulka 2.4 – 1.

Tabulka č. 2.4 – 1 – Navázání KM na státní etalon (schéma návaznosti KM)

Primární etalon – státní etalon (uchovává ČMI, Laboratoře primární metrologie, Praha) Primární etalonáž délky je zajišťována státním etalonem délky (sestava), který je tvořen: femtosekundovým generátorem hřebene optických frekvencí, jodem stabilizovanými lasery 633 nm, 543 nm a 532 nm, acetylénem stabilizovaným laserem 1542 nm, interferometrickým komparátorem IK–1 a interferometrem pro dlouhé KM IDKM.
↑
Sekundární etalon – interferenční komparátor TESA NPL A.G.I. 300 (ČMI OI Liberec) (Interferenční komparátor TESA NPL A.G.I. 300 je navázán na státní etalon prostřednictvím femtosekundového generátoru hřebene optických frekvencí a jodu stabilizovaného He–Ne laseru – 633 nm.)
↑
Etalonová KM – 1. řádu (měřena na interferenčním komparátoru TESA NPL A.G.I. 300 a porovnávána s etalonem, kterým je délka světelné vlny, jodem stabilizovaného He–Ne laseru – 633 a 543 nm, interferenčního komparátoru TESA NPL A.G.I. 300.)
↑
Etalonová KM – 2. řádu (měřena na mechanickém komparátoru TESA–UPC a porovnávána s etalonem, kterým je KM 1. řádu)
↑
Etalonová KM – 3. řádu (měřena na mechanickém komparátoru TESA–UPC a porovnávána s etalonem, kterým je KM 2. řádu)
↑
Etalonová KM – 4. řádu (měřena na mechanickém komparátoru TESA–UPC a porovnávána s etalonem, kterým je KM 3. řádu)
↑
Etalonová KM – 5. řádu (měřena na mechanickém komparátoru TESA–UPC a porovnávána s etalonem, kterým je KM 4. řádu)

2.4.1 Interferenční systém pro měření délky KM – TESA NPL A.G.I. 300

Pro měření KM využitím interference světla se používá v laboratoři ČMI OI Liberec interferenční komparátor TESA NPL A.G.I. 300, obrázek 2.4.1 – 1 (k měření KM od 0,3 do 300 mm).

Jedná se o nejrozšířenější měřicí systém, kterým je vybavena většina národních metrologických institutů vyspělých zemí. V ČMI je dvoulaserový interferenční komparátor TESA NPL A.G.I. 300, typu NPL, který byl vyvinut v národní metrologické laboratoři Velké Británie NPL (National Physical Laboratory). *(V době, kdy byl do ČMI instalován tj. rok 1994, byl teprve patnáctým vyrobeným přístrojem.)*

Na systému NPL TESA A.G.I. 300 je zajišťována nejpřesnější sekundární etalonáž délky. Primární etalonáž délky je zajišťována státním etalonem délky (sestava), který je tvořen: femtosekundovým generátorem hřebene optických frekvencí, jodem stabilizovanými lasery 633 nm, 543 nm a 532 nm, acetylénem stabilizovaným laserem 1542 nm, interferometrickým komparátorem IK-1 a interferometrem pro dlouhé KM IDKM.

Systém TESA NPL A.G.I. 300 je navázán na státní etalon prostřednictvím femtosekundového generátoru hřebene optických frekvencí a jodem stabilizovaného He-Ne laseru – 633 nm.

Na TESA NPL A.G.I. 300 je realizováno měření délky KM o rozměrech 0,3 mm až 300 mm s nejmenší nejistotou měření v České republice.



Obr. 2.4.1 – 1 TESA NPL A.G.I. 300

Systém je používán k měření délky KM v rámci mezinárodních porovnání organizovaných jak v rámci EURAMETu, tak i celosvětově. Velikost nejistoty měření U , která je pro ČMI uznána jako CMC (kalibrační a měřicí schopnost) v BIPM databázi KCDB (Key Comparisons Data Base) [51], je:

$$U = \sqrt{20^2 + (0,2 \times l_n)^2} \text{ nm},$$

kde je l_n jmenovitá délka KM udaná v milimetrech.

Rozlišení přístroje je 1 nm.

2.4.1.1 Popis systému TESA NPL A.G.I. 300

Uspořádání TESA NPL A.G.I. 300 je schematicky naznačeno na obrázku 2.4.1 – 2, včetně principu měření.

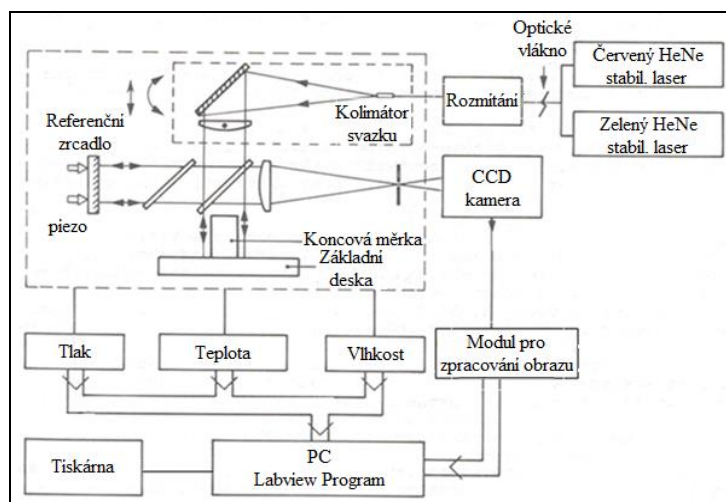
Jedná se o Twyman – Greenův interferometr s CCD kamerou jako detektorem (pro snímání interferenčního obrazce) s programovým měřicím systémem.

Základem systému jsou dva lasery jako zdroj koherentního světelného záření. Jedná se o helium – neonové (He–Ne) stabilizované lasery se známou vlnovou délkou: a) červený o vlnové délce 633 nm a b) zelený o vlnové délce 543 nm.

Měřicí část přístroje je složena ze tří hlavních částí: laserů, vlastní optické části interferometru a vyhodnocovacího systému.

Koherentní světlo laserů je navázáno (přechod světla z volného prostředí (vzduchu) do prostředí optického vlákna (sklo) do optických vláken. Pomocí vláknového děliče je spojeno do jednoho svazku, který následně prochází rozmitáním (plastový element, který je schopný oscilovat, při frekvencích budícího signálu v řádu stovek MHz, a měnit vlastnosti prostředí pro daný svazek), potlačujícím koherenční zrnitost svazku. Dále je spojnovou čočkou transformován na svazek paralelní o průměru cca 45 mm. Takto vzniklý primární svazek laserového záření je rozdělen polopropustným zrcadlem na dvě části. Měřicí svazek prochází kompenzační deskou a odráží se od referenčního zrcadla na výstupu interferometru. Referenční svazek prochází polopropustným zrcadlem k referenční desce, na které je přilnuta nasunutím měřená KM. Referenční svazek je pak odražen zčásti od měřicího povrchu KM a z části od referenční desky, na které je KM přilnuta. Vzhledem k tomu, že se světlo od KM a referenční desky odráží v různé vzdálenosti od děliče svazku, vzniká mezi oběma částmi referenčního svazku odpovídající fázový rozdíl. Referenční svazek pak interferuje se svazkem měřicím na výstupu interferometru a vzniklá interferenční struktura je snímána CCD kamerou a následně zpracována řídicím programem měřicího systému.

Optická část interferometru je doplněna řadou snímačů pro monitorování teplot různých částí systému, za účelem korekce teplotních dilatací v průběhu měření tlaku a vlhkosti.



Obr. 2.4.1 – 2 Měřicí systém TESA NPL A.G.I. 300

Veškeré snímané hodnoty a interferenční obraz jsou dále zpracovány pomocí měřicího softwaru a je vyhodnocena délka měřené KM.

V rámci systému lze změřit postupně (jednotlivě) délku až pro 12 kusů KM v rozsahu délek 0,3 mm až 300 mm.

Měřicí systém TESA NPL A.G.I. 300 s kamerou CCD se vyznačují univerzálností, relativní rychlostí měření a přesností.

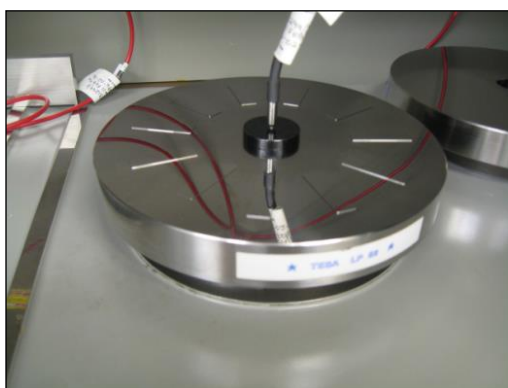
2.4.1.2 Postup měření na systému TESA NPL A.G.I. 300

Základní příprava KM před vlastním měřením délky je uvedena v úvodní části podkapitoly 2.4.

Realizace měření délky KM je u interferenční metody silně závislá na vlastnostech přilnutí nasunutím KM na referenční desku. KM musí dokonale přilnout. Nepřilnutí k desce bývá způsobeno rýhami (škrábanci) na měřicích plochách KM nebo ploše základní rovinné desky, částicemi prachu mezi KM a deskou atd. Povrch referenční desky je lapován tak, aby úchylka rovinnosti celé plochy desky byla maximálně 25 nm (na vyhraněné ploše o velikosti 40 x 40 mm). Referenční deska musí být před nasunutím KM důkladně omyta lékařským benzínem, poté čistým lihem a vyleštěna optickou utěrkou.

Před nasunutím KM na referenční desku je nanесeno malé množství (kapka) speciální emulze na samotnou desku. Tato kapalina usnadňuje přilnavost KM (používá se zejména pro ocelové KM). Po nanесení kapaliny se povrch desky opět vyleští optickou utěrkou a započne proces nasouvání tj. přilnutí nasunutím KM.

Do ruky se uchopí KM mezi palec a ukazovák a položí se na začátek desky. KM se posouvá dopředu volným rovnoměrným pohybem, přičemž se na KM tlačí. Když KM dosedne celou plochou na rovinnou desku, přilne k ní a je nasunuta – nelze ji oddělit od desky nadzdvihnutím, ale pouze posunutím. Při nasouvání malých (tenkých) KM je třeba zvýšené pozornosti, aby se KM nezkřivila/neprohnuly. Na referenční desku lze umístit (teoreticky) maximálně 12 KM (obr. 2.4.1 – 3A), obvykle se podaří při praktické realizaci nasouvání max. 10.



A – Nasunutá KM na referenční desku



B – Referenční deska s KM v komoře

2.4.1 – 3 Referenční deska s KM

Po správném nasunutí KM na referenční desku se deska vloží do systému resp. do uzavřené měřicí komory – místa měření délky KM, ve kterém dojde k vyrovnání teploty KM a desky (hovoříme o dosažení teplotní rovnováhy blížící se k 20 °C mezi deskou a KM. Teplotní rozdíl mezi skutečnou a předepsanou laboratorní teplotou KM a desky je dokorigován dle teplotního součinitele délkové roztažnosti obou prvků, kterou udává výrobce).

Komora, obsahuje mimo referenční desku s KM (obrázek 2.4.1 – 3B) i různé druhy senzorů. Jedná se o senzory pro měření tlaku, teploty, vlhkosti a obsahu CO₂ ve vzduchu. Senzory zaznamenávají hodnoty sledovaných parametrů. Hodnoty jsou dále využívány k výpočtu korekcí z hlediska podmínek měření, tak i pro výpočet indexu lomu vzduchu v místě měření. Hodnotu indexu lomu vzduchu je nutné znát pro korekci vlnové délky laserů pro aktuální podmínky měření. V oddělené části komory je umístěna optická část interferometru včetně CCD kamery, která snímá interferenční obraz povrchu KM a referenční desky. Optická část je zaměřena na jedno měřicí místo, kde snímá povrch o velikosti cca 50 mm, přičemž referenční deskou umí přístroj natáčet tak, aby bylo možné ustavení jednotlivých KM vždy do správné pozice pro měření.

Po umístění desky s KM do měřicí komory je komora uzavřena a je předběžně zkontrolován interferenční obrazec (obraz interferenčních proužků) jednotlivých nasunutých KM. Referenční deskou je postupně otáčeno, aby byla vždy samotná KM v místě snímání optiky. Povrch KM a desky, včetně interferenčního obrazce, je snímán pomocí CCD kamery a zobrazován na monitoru PC s programovým měřicím systémem. Na monitoru PC je možné vidět interferenční proužky, které by měly být rovné a rovnoběžné. Pokud interferenční proužky vykazují zakřivení, znamená to, že KM není na desku správně nasunuta nebo je poškozena (ostré rýhy, škrábance, atd.). V uvedeném případě je nutné nasunout KM opětovně na referenční desku (pokud by tak nebylo učiněno, nebylo by realizováno systémem měření délky KM). Tímto způsobem se kontrolují všechny KM nasunuté na referenční desce před zahájením měření.

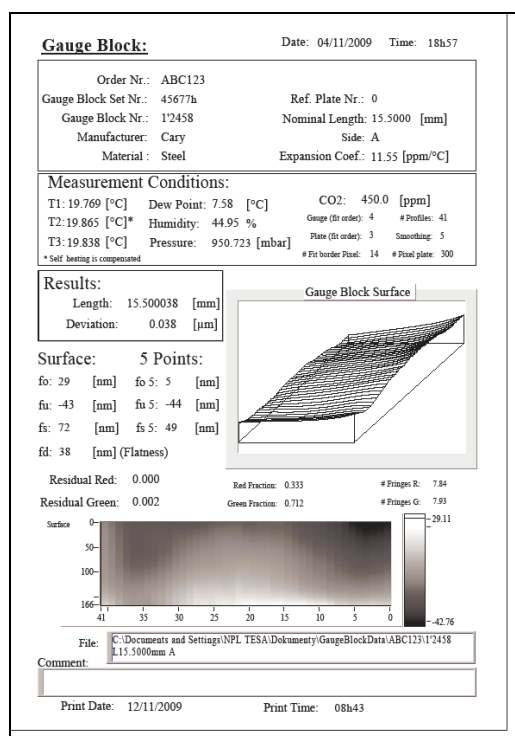
Nedílnou součástí přípravných činností před zahájením vlastního procesu měření délky KM je nutné zadat do programového měřicího systému potřebná data, týkající se základních údajů o měřených KM (nominální rozměry KM, výrobce, materiál, teplotní součinitel délkové roztažnosti atd.), včetně spuštění laserů, které musí být frekvenčně stabilizovány a uzamčeny.

Po vyrovnání teploty KM a referenční desky na laboratorní teplotu přibližně 20 °C je zahájeno vlastní měření délky KM. Měření je realizováno dle nastavení programového měřicího systému, přičemž vlastní měření probíhá při stabilizované teplotě 20 °C ± 0,2 °C. Každá měřená KM je nasunuta na referenční desku a je natočena do místa měření. Následuje přepnutí na červený He–Ne laser o vlnové délce $\lambda_1 = 633$ nm a pomocí potenciometrů dochází k seřízení optiky tak, aby byly interferenční proužky v požadované poloze a hustotě. Poté je skenován povrch KM. Zároveň je měřena teplota, tlak, vlhkost a koncentrace CO₂ v měřicí komoře. Následně dochází k přepnutí na zelený He–Ne laser o vlnové délce $\lambda_2 = 543$ nm a opět pomocí potenciometrů dochází k seřízení optiky tak, aby byly interferenční proužky v požadované poloze a hustotě. Následně je skenován povrch KM a pak řídicí program

měřicího systému provede sérii výpočtů, vyhodnotí index lomu vzduchu, spočítá odchylku středové délky a rovinnosti se započítáním korekcí k referenční teplotě měření. Dále je určen rozdíl hodnot naměřených červeným a zeleným He–Ne laserem, který je v ideálním případě nulový.

Stejným způsobem jsou měřeny všechny KM nasunuté na referenční desku z jedné i druhé strany měřicích ploch KM (a dále i všech KM v sadě). Sada KM je měřena na stejné referenční desce. Požadovaným stavem je, aby hodnoty naměřených odchylek středové délky KM na jedné straně měřené plochy a na straně druhé, nebyly rozdílné. Z každého měření je výstupem hodnota středová délka KM v mm uvedená v tzv. protokolu měření, obrázek 2.4.1 – 4. Protokol měření obsahuje v úvodu základní údaje o měřených KM (nominální rozměry KM, výrobce, materiál, teplotní součinitel délkové roztažnosti atd.), dále pak informace o podmínkách měření, naměřených odchylkách délky KM, včetně základních informací o povrchu KM – 3D obraz, rovinnost KM.

Pokud jsou měřeny KM přesnosti K (bez jakéhokoliv poškození měřicích ploch), jsou rozdíly hodnot naměřených odchylek středové délky KM na jedné i druhé straně měřených ploch obvykle do 10 nm. U KM přesnosti 0, s částečným opotřebením měřicích ploch, mohou být rozdíly mnohem vyšší. Je důležité upozornit, že KM, která je silně opotřebena – i přestože spadá do přesnosti K či 0 – nelze nasunout na referenční desku nebo jen s velkými těžkostmi.



Obr. 2.4.1 – 4 Výsledný protokol měření jedné ze stran KM

2.4.1.3 Nejistota měření systému TESA NPL A.G.I. 300

Měřeným parametrem je středová délka KM l_c .

Metodika stanovení nejistoty měření je dána mezinárodní normou ČSN EN ISO 3650 [1] a dokumentem [45].

Matematický model

Vztah mezi středovou délkou KM a vstupními veličinami, na kterých délka KM závisí, lze vyjádřit matematickým vztahem. Vztah pro měření délky KM pomocí systému TESA NPL A.G.I. 300 je:

$$l_c = \left[\left(x \times \frac{\lambda_v}{2 \times n_{vzd}} \right) + F \times \frac{\lambda_v}{2 \times n_{vzd}} \right] / (1 - \alpha \times \delta t), \quad (2.4.1 - 1)$$

kde je l_c středová délka měřené KM při laboratorní teplotě 20 °C, α hodnota teplotního součinitele délkové roztažnosti měřené KM, $\delta t = (t - t_m)$, t teplota měřené KM, t_m referenční teplota 20 °C, x počet celých polovin vlnových délek laseru, které jsou obsaženy v měřené délce KM, F zlomková část vlny, λ_v vlnová délka laseru ve vakuu, n_{vzd} index lomu vzduchu v místě měření.

Seznam zdrojů nejistot

Zdroje nejistot jsou u interferenčního měření rozděleny do dvou kategorií. První kategorii tvoří zdroje, u kterých byla standardní nejistota získána ze statistické analýzy řady měření (stanovení nejistoty typu A). Do této kategorie spadá pouze jeden zdroj a to rozptyl měřené hodnoty délky KM. Jeho hodnota však není samostatně uvedená, ale je součástí zdroje s názvem „nepřesné nasunutí KM na referenční desku“.

Druhou kategorii tvoří zdroje, kde standardní nejistota byla určena jinými metodami než statistickou analýzou (stanovení nejistoty typu B). Tato kategorie obsahuje 19 zdrojů nejistot. Tyto zdroje jsou rozděleny na relativní a konstantní.

Relativní složku standardní nejistoty tvoří: vlnová délka laseru, atmosférický tlak, teplota vzduchu, relativní vlhkost vzduchu, obsah CO₂, Edlénova rovnice, nastavení optické části (z kosinové chyby), velikost zdroje, teplota KM, rozdíl teploty mezi KM a referenční deskou a nepřesnost teplotního součinitele délkové roztažnosti KM.

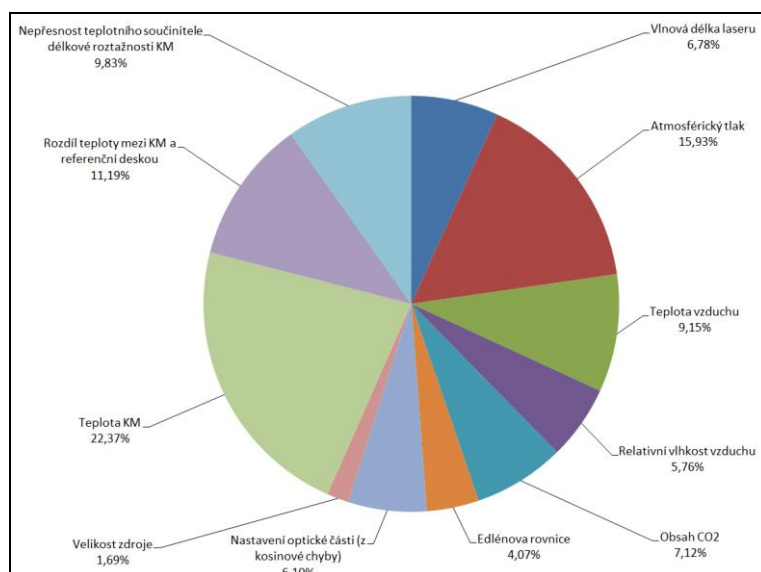
Konstantní složku standardní nejistoty tvoří: systematická chyba odčítání proužků, rovinnost a rovnoběžnost KM v měřeném profilu, přesnost určení posunutí proužků, nepřesnost změny fáze laseru, nepřesné nasunutí KM na referenční desku, rozdíl drsnosti povrchu v jednotlivých částech měřicího povrchu KM a referenční desky, rozdíl velikosti přilnutí KM na referenční desku a rozdíl délky KM měřené na jedné a druhé měřicí ploše KM.

Tabulka 2.4.1 – 1A a B obsahuje seznam všech 19 zdrojů nejistot spolu s jejich nejistotami měření $u(x_i)$, koeficienty citlivosti c_i a různě velkými příspěvky k nejistotě $u_i(l)$.

Výsledné hodnoty nejistot z tabulek 2.4.1 – 1A a 1B jsou zpřehledněny v kruhovém grafu na obrázku 2.4.1 – 6A a 6B. Plocha kruhu představuje celý soubor zdrojů nejistot. Jeho jednotlivé části – výseče znázorňují velikost příspěvku zdroje k nejistotě systému TESA NPL A.G.I. 300.

Tabulka 2.4.1 – 1A – Přehled složek standardní nejistoty – relativní složka

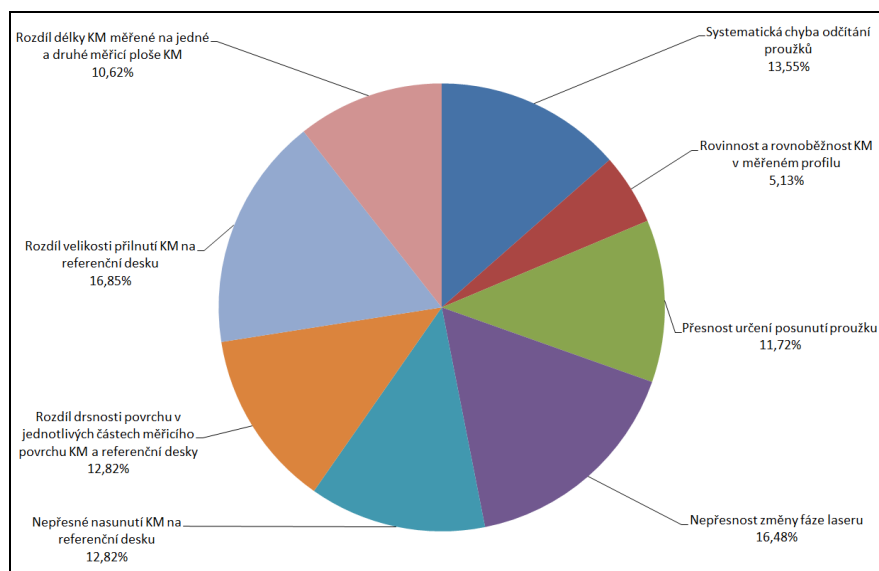
Relativní složka standardní nejistoty					
		$u(x_i)$	Počet stupňů volnosti ν	$c_i \equiv \partial f / \partial x_i$	$u_i(l)$ $\left[\frac{nm}{mm} \right] \times l_n$
u_λ	Vlnová délka laseru	$2 \times 10^{-8} \text{ nm}$	1000	$10^6 \frac{1}{\text{mm}} \times l_n$	0,020
u_p	Atmosférický tlak	$\frac{0,3}{\sqrt{3}} \text{ mbar}$	1000	$0,27 \frac{\text{nm}}{\text{mbar} \times \text{mm}} \times l_n$	0,047
u_{tv}	Teplota vzduchu	$\frac{0,05}{\sqrt{3}} \text{ }^\circ\text{C}$	1000	$0,92 \frac{\text{nm}}{^\circ\text{C} \times \text{mm}} \times l_n$	0,027
u_{rH}	Relativní vlhkost vzduchu	$\frac{3}{\sqrt{3}} \%$	1000	$0,01 \frac{\text{nm}}{\% \times \text{mm}} \times l_n$	0,017
u_{CO_2}	Obsah CO ₂	$\frac{250}{\sqrt{3}} \text{ ppm}$	1000	$1,42 \times 10^{-4} \frac{\text{nm}}{\text{ppm} \times \text{mm}} \times l_n$	0,021
u_n	Edlénova rovnice	$\frac{2 \times 10^{-8}}{\sqrt{3}}$	1000	$1 \times 10^6 \frac{\text{nm}}{\text{mm}} \times l_n$	0,012
u_{cos}	Nastavení optické části (z kosinové chyby)	$\frac{3 \times 10^{-8}}{\sqrt{3}} \text{ nm}$	1000	$1 \times 10^6 \frac{1}{\text{mm}} \times l_n$	0,018
u_x	Velikost zdroje	$\frac{3}{\sqrt{3}} \mu\text{m}$	1000	$3 \times 10^{-3} \frac{\text{nm}}{\mu\text{m} \times \text{mm}} \times l_n$	0,005
u_t	Teplota KM	$\frac{0,01}{\sqrt{3}} \text{ }^\circ\text{C}$	1000	$11,5 \frac{\text{nm}}{^\circ\text{C} \times \text{mm}} \times l_n$	0,066
δ_{md}	Rozdíl teploty mezi KM a referenční deskou	$\frac{0,005}{\sqrt{3}} \text{ }^\circ\text{C}$	1000	$11,5 \frac{\text{nm}}{^\circ\text{C} \times \text{mm}} \times l_n$	0,033
u_{td}	Nepřesnost teplotního součinitele délkové roztažnosti KM	$\frac{1}{\sqrt{3}} \text{ ppm/}^\circ\text{C}$	1000	$0,05 \text{ }^\circ\text{C} \times l_n$	0,029
Kombinovaná standardní nejistota $u_c(l)$					0,104
Počet efektivních stupňů volnosti $\nu_{eff}(l)$					4353
Koeficient rozšíření k pro $P = 95\%$					1,961



Obr. 2.4.1 – 6A Grafická ilustrace významu příspěvku zdrojů k nejistotě $u_c(l)$ – relativní složky

Tabulka 2.4.1 – 1B – Přehled složek standardní nejistoty – konstantní složka

Konstantní složka standardní nejistoty					
		$u(x_i)$	Počet stupňů volnosti ν	$c_i \equiv \partial f / \partial x_i$	$u_i(l)$ [nm]
δ_{opt}	Systematická chyba odčítání proužků	$\frac{0,02}{\sqrt{3}}$ počet proužků	1000	316,5 nm	3,7
δ_{rov}	Rovinnost a rovnoběžnost KM v měřeném profilu	$\frac{2,5}{\sqrt{3}}$ nm	1000	1	1,4
δ_{fr}	Přesnost určení posunutí proužku	$\frac{0,025}{\sqrt{3}}$ počet proužků	1000	$0,707 \times 316,5$ nm	3,2
δ_{kor}	Nepřesnost změny fáze laseru	4,5 nm	1000	1	4,5
δ_{fi}	Nepřesné nasunutí KM na referenční desku	$\frac{6}{\sqrt{3}}$ nm	1000	1	3,5
δ_{rg}	Rozdíl drsnosti povrchu v jednotlivých částech měřicího povrchu KM a referenční desky	$\frac{6}{\sqrt{3}}$ nm	10	1	3,5
δ_F	Rozdíl velikosti přilnutí KM na referenční desku	$\frac{8}{\sqrt{3}}$ nm	10	1	4,6
δ_{AB}	Rozdíl délky KM měřené na jedné a druhé měřicí ploše KM	$\frac{5}{\sqrt{3}}$ nm	1000	1	2,9
Kombinovaná standardní nejistota $u_c(l)$					10
Počet efektivních stupňů volnosti $\nu_{eff}(l)$					164
Koeficient rozšíření k pro $P = 95\%$					1,975



Obr. 2.4.1 – 6B Grafická ilustrace významu příspěvku zdrojů k nejistotě $u_c(l)$ – konstantní složky

Kombinovaná standardní nejistota

Kombinovaná standardní nejistota $u_c(l)$ má konstantní hodnotu 10,0 nm s počtem efektivních stupňů volnosti 164 a relativní hodnotu $0,104 \times l_n$ s 4353mi efektivními stupni

volnosti. Je požadováno získat rozšířenou nejistotu $U_{95} = k_{95} \times u_c(l_n)$, která poskytuje interval s konfidenční úrovní přibližně 95%.

Rozšířená nejistota

K získání požadované rozšířené nejistoty je důležitá jak konstantní, tak relativní hodnota kombinované standardní nejistoty, včetně efektivních stupňů volnosti.

Počet efektivních stupňů volnosti (v případě potřeby se hodnota zaokrouhluje k nejbližšímu menšímu celému číslu) pro konstantní část $\nu_{eff}(l) = 164$ – poté z tabulky 1 v příloze 1 následuje stanovení $t_{95}(164) = 1,975$ a $U_{95} = t_{95}(164) \times u_c(l)$.

Číselná hodnota rozšířené nejistoty $U = k \times u_c$ je dána kombinovanou standardní nejistotou, která odpovídá pro konstantní část $u_c = 10,0$ (nm) a koeficientem rozšíření $k = 1,975$, jehož hodnota spočívá na t-rozdělení pro $\nu = 164$ stupňů volnosti a určuje interval s odhadnutou konfidenční úrovní 95 %.

Odpovídající konstantní rozšířená nejistota je tedy $U_{konstantni} = 1,975 \times 10,0 = 19,75$, zaokrouhleně 20 (nm).

Počet efektivních stupňů volnosti pro relativní část $\nu_{eff}(l) = 4353$ – poté z tabulky 1 v příloze 1 následuje stanovení $t_{95}(4353) = 1,961$ a $U_{95} = t_{95}(4353) \times u_c(l) \times l_n$.

Číselná hodnota rozšířené nejistoty pro relativní část je dána kombinovanou standardní nejistotou $u_c = 0,104 \times l_n$ (nm) a koeficientem rozšíření $k = 1,961$, jehož hodnota spočívá na t-rozdělení pro $\nu = 4353$ stupňů volnosti a určuje interval s odhadnutou konfidenční úrovní 95 %.

Odpovídající relativní rozšířená nejistota je tedy $U_{relativni} = 1,961 \times 0,104 \times l_n = 0,203 \times l_n$, zaokrouhleně $0,2 \times l_n$ (nm). Tato relativní hodnota kombinované standardní nejistoty je závislá na délce KM.

Rozšířená nejistota měření má následně tvar:

$$U = \sqrt{20^2 + (0,20 \times l_n)^2} \text{ nm},$$

kde l_n je jmenovitá délka měřky dosazená v milimetrech.

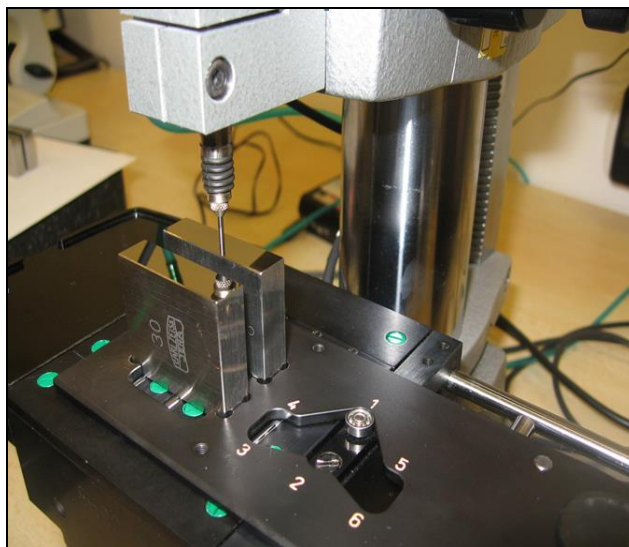
2.4.2 Komparační systém pro měření délky KM – TESA–UPC

Měření délky KM pomocí komparačního systému je založeno na porovnání měřené KM s etalonovou KM, která má stejnou jmenovitou délku.

Etalonová KM, která je užita jako normál (standard) musí být také prověřena, tj. porovnána s etalonem vyšší přesnosti (navázána na přesnější etalon délky – etalon s nižší nejistotou měření). Tzn., pokud máme etalonovou KM 2. sekundárního řádu (z hlediska přesnosti měření), musí být porovnána (navázána) na etalonovou KM 1. řádu, tabulka 2.4 – 1.

Měření délky KM formou porovnávání patří mezi nejrozšířenější metody měření.

Pro měření délky KM formou porovnávání se používá v laboratoři ČMI OI Liberec mechanický komparátor s indukčnostními snímači TESA–UPC, obrázek 2.4.2 – 1 (k měření KM do 100 mm). Přístroj byl navržen a vyvíjen švýcarskou společností TESA SA (společnost patří mezi přední světové výrobce špičkových měřicích přístrojů, techniky a systémů).



Obr. 2.4.2 – 1 TESA–UPC – měření délky KM formou porovnávání

Na mechanickém komparátoru TESA–UPC je zajišťována sekundární etalonáž délky – měření délky KM, které jsou používány jako etalony či měřidla pro dílenskou kontrolu ve strojírenských tuzemských i zahraničních podnicích (stupeň přesnosti K – 2). Na daném přístroji je realizováno měření délky KM o rozměrech 0,3 mm až 100 mm.

Velikost nejistoty měření U , která je pro ČMI uznána jako CMC (kalibrační a měřicí schopnost) v databázi KCDB [51], je:

$$U = \sqrt{50^2 + (0,5 \times l_n)^2} \text{ nm},$$

kde l_n je jmenovitá délka KM udaná v milimetrech.

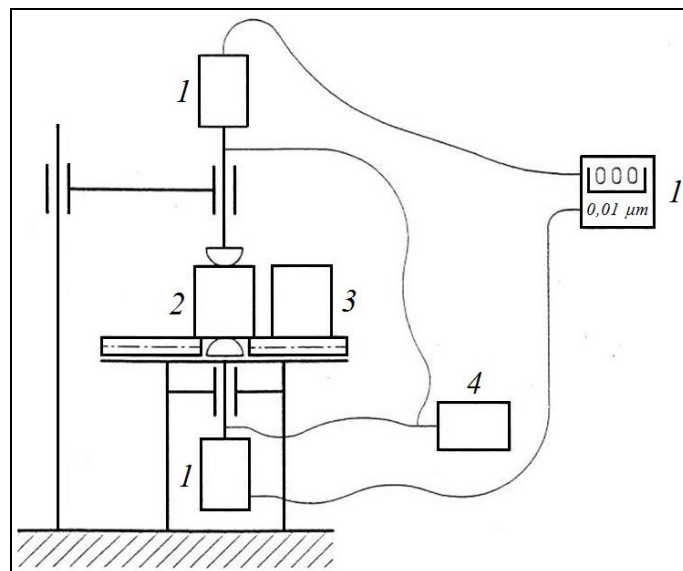
Rozlišení přístroje je 10 nm.



Obr. 2.4.2 – 2 TESA–UPC – sestava

2.4.2.1 Popis systému TESA–UPC

Uspořádání mechanického komparátoru TESA–UPC je schématicky naznačeno na obrázku 2.4.2 – 3. Jedná se o mechanický komparátor s indukčnostními snímači a programovým měřicím systémem.



Obr. 2.4.2 – 3 Obecné schéma mechanického komparátoru a jeho komponent:

1 – elektrický indikátoru délky s vysokým rozlišením (obvykle $0,01 \mu\text{m}$), 2 – etalonová KM, 3 – měřená KM, 4 – zvedací zařízení, měřicí stůl, kam se umísťují KM [1]

Měřicí sestava se skládá ze stabilního měřicího stolu (zajišťujícího přesné polohování KM při měření délky), elektrického indikátoru délky s vysokým rozlišením (elektronický komparační délkoměr s indukčnostními snímači), zvedacího zařízení, PC sestavy s programovým měřicím systémem.

Základem komparátoru je stabilní podstavec, na němž je pohyblivě uložen měřicí stůl, který zajišťuje přesné polohování KM při měření; jeho horní plocha je drážkovaná, kalená a lapovaná, takže po ní lze KM snadno posouvat, aby bylo možno snímači (horní a spodní) obsáhnout celou měřicí plochu KM. Měřicí stůl je stabilní, aby se dalo realizovat měření v setinách μm .

Klíčovou součástí měřicí sestavy je dvojice snímačů pro diferenciální měření délky KM (snímače umístěnými proti sobě horní a spodní, obrázek 2.4.2 – 4. Spodní snímač je použit zejména kvůli KM o rozměrech do 2,5 mm, kde se předpokládá, že se mohou KM částečně prohýbat. Horní snímač obvykle působí na měrku silou 1 N a spodní silou 0,63 N. Nižší síla u spodního snímače je proto, aby KM byla během měření usazena na měřicím stole komparátoru a nebyla přitlačnou silou nadzvednuta. Toto se týká zejména velmi krátkých KM s nižší hmotností.

Konce snímačů jsou ukončeny hroty tzv. dotyky, které mají kulovitou plochu o průměru cca 1 mm.

K odstavování snímačů je použita vakuová vývěva, která po sešlápnutí pedálu odsaje vzduch z vnitřního prostoru snímačů a hadiček, dotyky se odstaví od měřeného povrchu a KM se přesune do další měřicí pozice.

Pro snadnou manipulaci s KM během procesu měření slouží tzv. šablona, do které se vkládají etalonová a měřená KM. Šablona slouží jako přípravek pro ustavení a manipulaci s KM na měřicím stole. Šablona je kalená s přesnými výřezy pro umístění etalonové a měřené KM, obrázek 2.4.2 – 4.

Vliv tepla těla se vylučuje zasklenou stěnou kolem přístroje, obrázek 2.4.2 – 5.



Obr. 2.4.2 – 4 TESA–UPC – dotyky a šablona

Programový měřicí systém – software při měření automaticky odečítá naměřené hodnoty, provádí jejich zpracování, výpočet výsledků, automaticky vypisuje protokoly a archivuje všechny naměřené hodnoty.



Obr. 2.4.2 – 5 TESA–UPC – izolační stěna

2.4.2.2 Postup měření na systému TESA–UPC

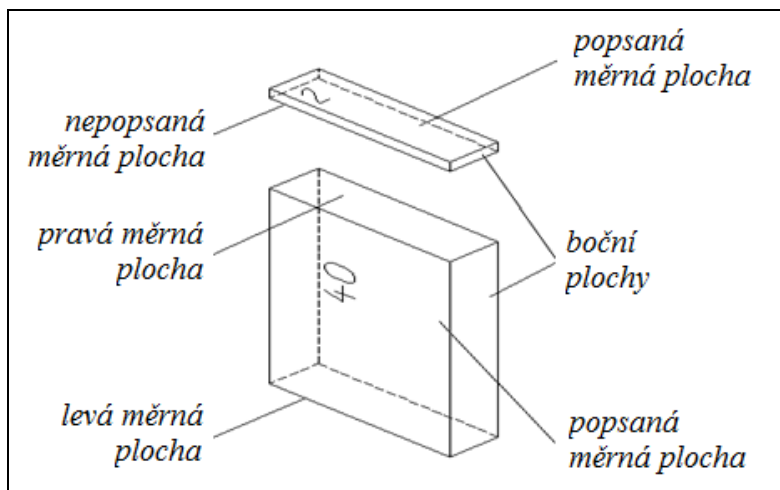
Základní příprava KM před vlastním měřením délky je uvedena v úvodní části podkapitoly 2.4. V rámci tohoto měření musí být opět dodržovány přísné laboratorní zásady. Jedná se především o dodržení zásad týkající se teploty při měření, vlivu nečistot, atd.

Nutností je použití ochranných pomůcek – KM se nesmí při měření držet v ruce, pouze s použitím izolačních pomůcek (pinzet, držáků, rukavic) – musí být vyloučen vliv tepla ruky.

Nejdůležitější přípravnou fází před vlastním měřením je stejně jako u interferenční metody, temperace KM. Při měření délky KM pomocí mechanického komparátoru se jedná o čas potřebný k vyrovnání teploty u etalonové a měřené KM před vlastním měřením při laboratorní teplotě 20 °C. Vyrovnání teplot KM probíhá na kameninové desce cca 12 – 24 hodin (po 12 hodinové temperaci je možné již realizovat měření). Před realizací temperace musí být kameninová deska důkladně omyta (očistěna) lékařským benzínem a poté čistým lihem – to se týká i přístrojového vybavení (měřicí dotyky, šablona).

Před zahájením vlastního procesu měření délky KM se zadají do programového měřicího systému potřebná data týkající se základních údajů o měřených KM (nominální rozměry KM, výrobce, materiál, teplotní součinitel délkové roztažnosti atd.).

Na měřicí stůl se vloží do šablon/výřezů etalonová i měřená KM, obrázek 2.4.2 – 1. Z hlediska polohy by měla být KM položena tak, aby ležela levou měrnou plochou na měřicím stole (u KM do 5,5 mm nepopsanou lapovanou plochou), obrázek 2.4.2 – 6.

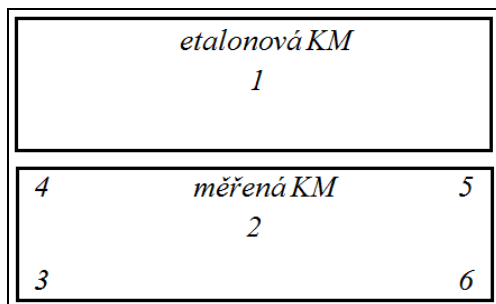


Obr. 2.4.2 – 6 Poloha KM na měřicím stole

Šablona s umístěnou etalonovou KM se nastaví tak, aby měřicí dotyky komparátoru ležely těsně nad středem její měřicí plochy (měření odchylky středové délky KM). Po nastavení šablony na středový bod se nechají obě KM ještě jednou temperovat, včetně temperace měřicích dotyků a to po dobu 1 až 60 min. (v závislosti na délce KM).

Po uplynutí temperovací doby (dosažení teplotní rovnováhy na 20 °C mezi etalonovou, měřenou KM a měřicími dotyky) je zahájeno vlastní měření délky KM. Měření je realizováno dle nastavení programového měřicího systému, přičemž vlastní měření probíhá při stabilizované teplotě v laboratoři 20 °C ± 0,3 °C s pomocí laboranta. Spustí se dotyk (horní i spodní) na střed měřicí plochy etalonové KM a nastaví se „nulový bod“ (nominální hodnota) „pro porovnání“ (velikost etalonové KM známe). Poté jsou dotyky indukčních snímačů odstaveny od měřicího povrchu etalonové KM a do místa měření je pohybem šablony přemístěna KM měřená. Dotyky jsou opět uvolněny a je odečtena hodnota na měřené KM – změří se odchylka středové délky měřené KM a postupně odchylky v blízkosti čtyř

rohů ve vzdálenosti asi 1,5 mm od přilehlých bočních ploch pro zjištění rovnoběžnosti a rovinnosti, obrázek 2.4.2 – 7.



Obr. 2.4.2 – 7 Měřicí body na KM

Rozdíl mezi hodnotou etalonové KM a měřené KM je reálný rozdílem délek obou porovnávaných KM.

Měření se provede dle obrázku 2.4.2 – 7 – postupně v bodech 1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 2 – 1. Tato série měření se opakuje 6x. Měření délky KM 2. sekundárního řádu provádí nezávisle 2 laboranti (každý vykoná 6 sérií měření). Kalibraci KM 3., 4. a 5. sekundárního řádu vykoná 1 laborant (6 sérií měření). (U KM 3. až 5. řádu se měří jen odchylka středové délky.)

Odchylka rovinnosti a rovnoběžnosti se měří vždy u KM 2. sekundárního řádu a u nových jednotlivých KM nebo sad. Naměřené hodnoty se programovým měřicím systémem přístroje TESA UPC zaznamenávají (z průměrných hodnot sledovaných parametrů se určí kladný nebo záporný rozdíl měřené KM vůči etalonové) a vyhodnotí dle ČSN EN ISO 3650.

Jednotlivé KM nebo sada KM se dle naměřených hodnot požadovaných parametrů (odchylka středové délky KM, rozpětí délky, použitý etalon, podmínky v laboratoři při vlastním měření délky KM, podle kvality měřicích ploch, drsnosti povrchu a nejistoty měření) následně dle požadovaného vyhodnocení zařadí do příslušného stupně přesnosti (K, 0, 1, 2).

2.4.2.3 Nejistota měření systému TESA–UPC

Měřeným parametrem je středová délka KM l_c .

Metodika stanovení nejistoty měření je dána mezinárodní normou ČSN EN ISO 3650 [1] a dokumentem [45].

Matematický model

Vztah mezi středovou délkou KM a vstupními veličinami, na kterých délka KM závisí, lze vyjádřit matematickým vztahem. Vztah pro měření délky KM pomocí systému TESA–UPC je:

$$l_c \cong L_S + \delta L_D + \delta L + \delta L_C - l_n (\alpha \delta + (\alpha_e - \alpha_x)(20^\circ\text{C} - (t_x + t_e)/2)) - \delta L_V, \quad (2.4.2 - 1)$$

kde je l_c délka měřené KM při laboratorní teplotě 20°C , L_S délka etalonové KM při laboratorní teplotě 20°C , δL_D změna délky etalonové KM od „poslední“ kalibrace vlivem

driftu, δL zjištěný rozdíl délky mezi měřenou a etalonovou KM, δL_C korekce na nelinearitu a trvalou odchylku mechanického komparátoru, l_n jmenovitá délka KM, α průměrná hodnota teplotního součinitele délkové roztažnosti etalonové a měřené KM, δt teplotní rozdíl mezi etalonovou a měřenou KM, $\delta \alpha$ rozdíl teplotních součinitelů délkové roztažnosti materiálu etalonové a měřené KM, Δt odchylka 20°C od průměrné teploty KM, δL_V korekce na nestředový kontakt měřicích ploch KM, a dále platí pro $\delta t = (t_x - t_e)$ a $\alpha = (\alpha_x + \alpha_e) / 2$, kde je t_x teplota měřené KM, t_e teplota etalonové KM, α_x teplotní součinitel délkové roztažnosti měřené KM a α_e teplotní součinitel délkové roztažnosti etalonové KM.

Seznam zdrojů nejistot

Zdroje nejistot jsou jako u interferenčního měření rozděleny do dvou kategorií. První kategorii tvoří zdroje, u kterých byla standardní nejistota získána ze statistické analýzy řady měření (stanovení nejistoty typu A). Do této kategorie spadá pouze jeden zdroj a to „střední chyba průměru měřených odchylek mezi etalonovou a měřenou KM“. Hodnota daného zdroje je určena dle [1, 45].

Druhou kategorii tvoří zdroje, kde standardní nejistota byla určena jinými metodami než statistickou analýzou (stanovení nejistoty typu B) [1, 45]. Tato kategorie obsahuje 7 zdrojů nejistot. Tyto zdroje jsou rozděleny na relativní a konstantní.

Relativní složku standardní nejistoty tvoří: nejistota etalonu KM, odchylka teploty mezi etalonovou a měřenou KM, odchylka teploty KM od 20°C, rozdíl teplotního součinitele délkové roztažnosti materiálů etalonové a měřené KM.

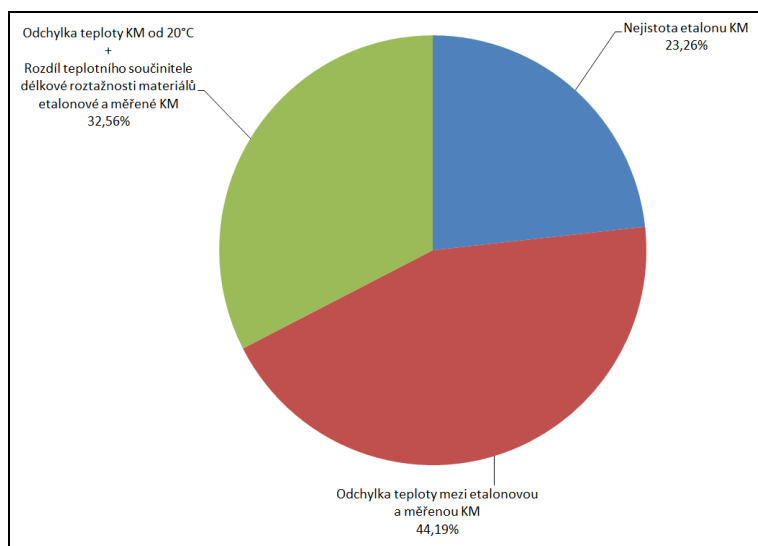
Konstantní složku standardní nejistoty tvoří: střední chyba průměru měřených odchylek mezi etalonovou a měřenou KM, drift etalonové KM, vliv mechanického komparátoru a nestředový kontakt měřicích ploch mechanického komparátoru.

Tabulka 2.4.2 – 1A a B obsahuje seznam všech 8mi zdrojů nejistot spolu s jejich nejistotami měření $u(x_i)$, koeficienty citlivosti c_i a různě velkými příspěvky k nejistotě $u_i(l)$.

Výsledné hodnoty nejistot z tabulky 2.4.2 – 1A a 1B jsou zpřehledněny v kruhovém grafu na obrázku 2.4.2 – 8A a 8B. Plocha kruhu představuje celý soubor zdrojů nejistot. Jeho jednotlivé části – výseče znázorňují velikost příspěvku zdroje k nejistotě systému TESA–UPC.

Tabulka 2.4.2 – 1A – Přehled složek standardní nejistoty – relativní složka

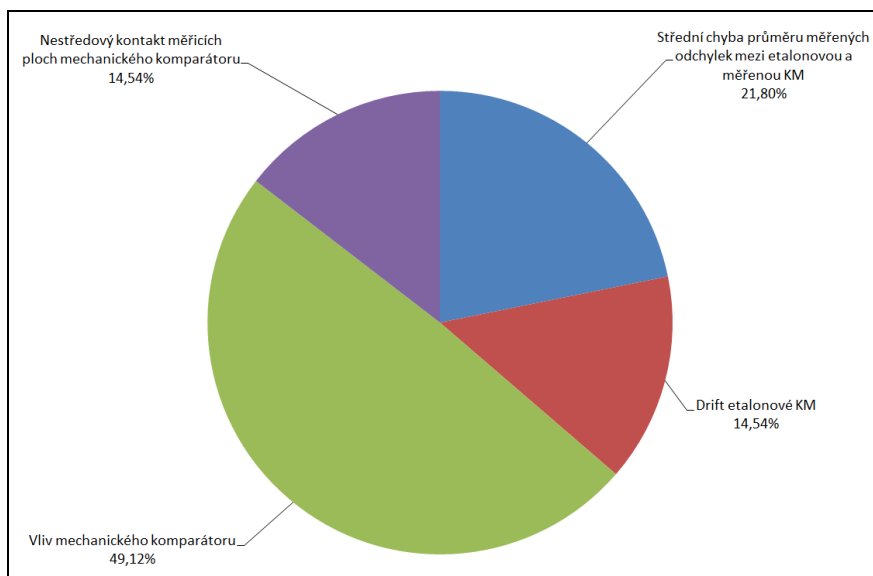
Relativní složka standardní nejistoty					
		$u(x_i)$	Počet stupňů volnosti	$c_i \equiv \partial f / \partial x_i$	$u_i(l)$ $\left[\frac{nm}{mm}\right] \times l_n$
u_{LSr}	Nejistota etalonu KM	$0,1 \frac{nm}{mm} \times l_n$	100	1	0,1
$u_{\delta t}$	Odchylka teploty mezi etalonovou a měřenou KM	$\frac{0,028}{\sqrt{3}} \text{ } ^\circ\text{C}$	1000	$11,5 \frac{nm}{^\circ\text{C} \times mm} \times l_n$	0,19
$u_{\Delta t}$	Odchylka teploty KM od 20°C	$u_{\Delta t} = \frac{2 \text{ ppm}}{\sqrt{6} \times ^\circ\text{C}} \times \frac{0,3^\circ\text{C}}{\sqrt{3}}$	1000	$1 \frac{nm}{ppm \times mm} \times l_n$	0,14
$u_{\delta \alpha}$	Rozdíl teplotního součinitele délkové roztažnosti materiálů etalonové a měřené KM				
Kombinovaná standardní nejistota $u_c(l)$					0,254
Počet efektivních stupňů volnosti $\nu_{eff}(l)$					1607
Koeficient rozšíření k pro $P = 95\%$					1,961



Obr. 2.4.2 – 8A Grafická ilustrace významu příspěvku zdrojů k nejistotě $u_i(l)$ – relativní složky

Tabulka 2.4.2 – 1B – Přehled složek standardní nejistoty – konstantní složka

Konstantní složka standardní nejistoty					
		$u(x_i)$	Počet stupňů volnosti	$c_i \equiv \partial f / \partial x_i$	$u_i(l)$ [nm]
u_A	Střední chyba průměru měřených odchylek mezi etalonovou a měřenou KM	$\frac{30}{\sqrt{12}} \text{ nm}$	11	1	8,7
$u_{\delta LD}$	Drift etalonové KM	$\frac{10}{\sqrt{3}} \text{ nm}$	10	1	5,8
$u_{\delta LC}$	Vliv mechanického komparátoru	$\frac{34}{\sqrt{3}} \text{ nm}$	1000	1	19,6
$u_{\delta LV}$	Nestředový kontakt měřících ploch mechanického komparátoru	$\frac{10}{\sqrt{3}} \text{ nm}$	10	1	5,8
Kombinovaná standardní nejistota $u_c(l)$					25,1
Počet efektivních stupňů volnosti $\nu_{eff}(l)$					504
Koeficient rozšíření k pro $P = 95\%$					1,965



Obr. 2.4.2 – 8A Grafická ilustrace významu příspěvku zdrojů k nejistotě $u_i(l)$ – konstantní složky

Kombinovaná standardní nejistota

Kombinovaná standardní nejistota $u_c(l)$ má konstantní hodnotu 25 nm s počtem efektivních stupňů volnosti 504 a relativní hodnotu $0,25 \times l_n$ s 1607mi efektivními stupni volnosti. Je požadováno získat rozšířenou nejistotu $U_{95} = k_{95} \times u_c(l)$, která poskytuje interval s konfidenční úrovní přibližně 95%.

Rozšířená nejistota

K získání požadované rozšířené nejistoty je důležitá jak konstantní, tak relativní hodnota kombinované standardní nejistoty včetně efektivních stupňů volnosti.

Počet efektivních stupňů volnosti je pro konstantní část $\nu_{eff}(l_n) = 504$ – poté z tabulky 1 v příloze 1 následuje stanovení $t_{95}(504) = 1,965$ a $U_{95} = t_{95}(504) \times u_c(l)$.

Číselná hodnota rozšířené nejistoty odpovídá pro konstantní část $u_c = 25,1$ (nm) násobené koeficientem rozšíření $k = 1,965$, jehož hodnota spočívá na t-rozdělení pro $\nu = 504$ stupňů volnosti a určuje interval s odhadnutou konfidenční úrovní 95 %.

Odpovídající konstantní rozšířená nejistota je $U_{konstantní} = 1,965 \times 25,1 = 49,24$, zaokrouhleně nahoru 50 (nm).

Počet efektivních stupňů volnosti pro relativní část $\nu_{eff}(l_n) = 1607$ – poté z tabulky 1 v příloze 1 následuje stanovení $t_{95}(1607) = 1,961$ a $U_{95} = t_{95}(1607) \times u_c(l) \times l_n$.

Číselná hodnota rozšířené nejistoty pro relativní část je dána $u_c = 0,254 \times l_n$ (nm) a koeficientem rozšíření $k = 1,961$, jehož hodnota spočívá na t-rozdělení pro $\nu = 1607$ stupňů volnosti a určuje interval s odhadnutou konfidenční úrovní 95 %.

Odpovídající relativní rozšířená nejistota je $U_{relativni} = 1,961 \times 0,254 \times l_n = 0,499 \times l_n$, zaokrouhleně $0,50 \times l_n$ (nm). Tato relativní hodnota kombinované standardní nejistoty je závislá na délce KM.

Rozšířená nejistota měření má následně tvar:

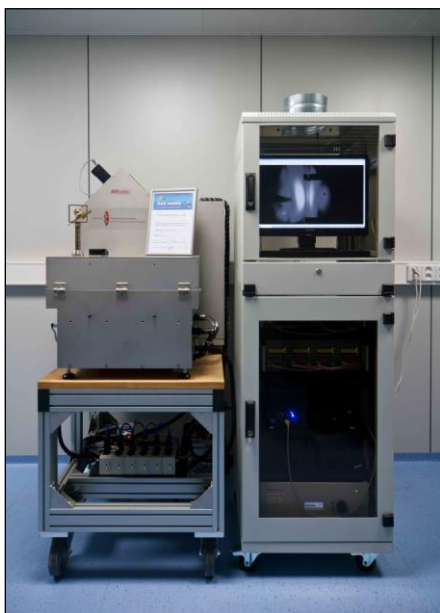
$$U = \sqrt{50^2 + (0,5 \times l_n)^2} \text{ nm},$$

kde l_n je jmenovitá délka měrky dosazená v milimetrech.

2.5 BEZKONTAKTNÍ SYSTÉM PRO MĚŘENÍ DÉLKY KM

Řešením kombinující výhody popsaných metod měření délky KM v ČMI OI Liberec uvedených v podkapitole 2.4 je nová metoda uskutečňována na automatickém bezkontaktním systému. Popis metody měření a k ní příslušného zařízení je uvedeno v této podkapitole.

Měřicí systém kombinuje laserovou interferometrii a interferometrii nízké koherence. Popisovaný bezkontaktní systém je unikátní přístrojové zařízení pro měření délky KM, které vzniklo ve spolupráci s výzkumnou organizací Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v.v.i., Brno a firmou MESING, s.r.o. během let 2006 – 2011, obrázek 2.5 – 1.



Obr. 2.5 – 1 Bezkontaktní systém pro měření délky KM [54]

Unikátnost tohoto systému spočívá ve způsobu optického odměřování délky KM, kdy je při využití kombinace laserové interferometrie a interferometrie nízké koherence získána absolutní hodnota délky KM jako výsledek jednokrokového bezkontaktního měření, probíhajícího bez nutnosti jakékoli další manipulace s KM, nebo nutností porovnání výsledku měření s hodnotou referenční.

2.5.1 Popis bezkontaktního systému

Bezkontaktní systém je měřicí přístroj využívající obousměrný interferometr s bílým světlem, který svým uspořádáním umožňuje bezkontaktní absolutní měření délky KM bez nutnosti použití referenční desky (na kterou jsou KM nasunuty), jak je tomu u systému NPL TESA, popsaném v podkapitole 2.4.1.

V případě bezkontaktního systému je KM měřena opticky z obou stran, přičemž část měřicího svazku prochází i kolem KM a takto vzniklý interferenční signál pak tvoří referenční rovinu měřicího systému.

Bezkontaktní systém je navázán na státní etalon délky, prostřednictvím stabilizovaného He–Ne laseru. Lze na něm zajišťovat sekundární etalonáž délky.

Pro zajištění plně automatické kalibrace celých sad KM byl navržený optický měřicí systém, doplněn o automatický podavač KM, který je schopný pojmout až 126 kusů KM.

Celý měřicí proces je zbaven potenciálních negativních vlivů laboranta, jehož role je redukována na prosté založení KM do vyhrazených pozic v podavači a spuštění automatického měřicího cyklu.

Přístroj je unikátním zařízením k měření délky KM v ČR.

Sestava popisovaného systému je uvedeno na obrázku 2.5.1 – 1.



Obr. 2.5.1 – 1 Bezkontaktní systém pro měření délky KM – detail sestavy [54]

V popisovaném systému je jako širokospektrální zdroj světla použit pulzní pikosekundový laser, generující širokospektrální bílé kontinuum. Pikosekundový laser je především použit z důvodu lepších prostorových optických vlastností svazku vystupujícího z jednomodového optického vlákna a tím lepšího kontrastu interferenčního signálu, ve srovnání s vysocesvítivou LED diodou, která byla v měřicím systému rovněž testována.

Schematické znázornění měřicí sestavy je spolu s naznačením principu měření zachyceno na obrázku 2.5.1 – 2 a 2.5.1 – 3.

Popisovaný měřicí systém kombinuje Michelsonův interferometr a Dowellův interferometr, přičemž Dowellův interferometr je umístěn v referenční větvi Michelsonova interferometru.

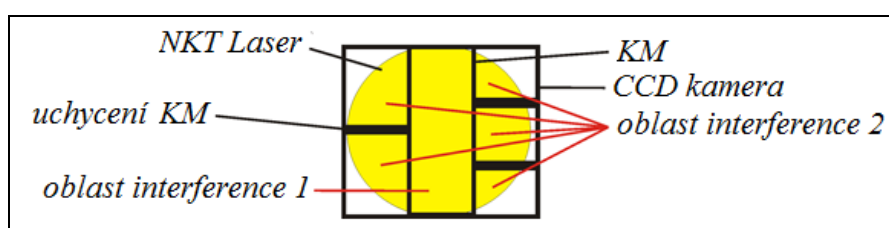
Svazek bílého (širokospektrálního) světla ze zdroje je rozdělen polopropustným zrcadlem č. 1 na dvě části. Vzniklý měřicí svazek Michelsonova interferometru prochází dvojicí kompenzačních desek a odráží se od referenční plochy RS. Referenční svazek Michelsonova interferometru představuje primární svazek pro Dowellův interferometr.

adekvátní konfiguraci sestavy se zrcadlem, umístěným v poloze P1. Pro měření délky KM představuje poloha P1, resp. P1' referenční pozici, danou konfigurací experimentální sestavy.

Informaci o vzájemné vzdálenosti měřicích poloh P1', P2' a P3' dává měření pomocí záření plynového He–Ne laseru využívající principu klasické laserové interferometrie. Svazek z He–Ne laseru je s bílým světlem kombinován pomocí vláknové optiky na vstupu měřicí sestavy. Na obrázku 2.5.1 – 4 je schematicky znázorněn obraz zaznamenávaný kamerou na výstupu měřicí sestavy.

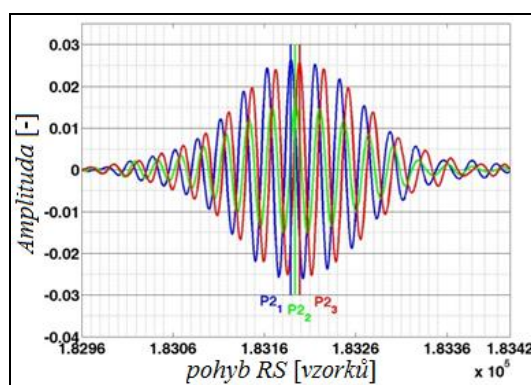
Pro ilustraci principu měření je na obrázku Obr. 2.5.1 – 6 uveden příklad výsledku měření KM, zachycující výše zmíněné tři polohy s interferencí bílého světla. Délka KM je pak stanovena podle rovnice:

$$L = |P1' - P2'| + |P1' - P3'|.$$

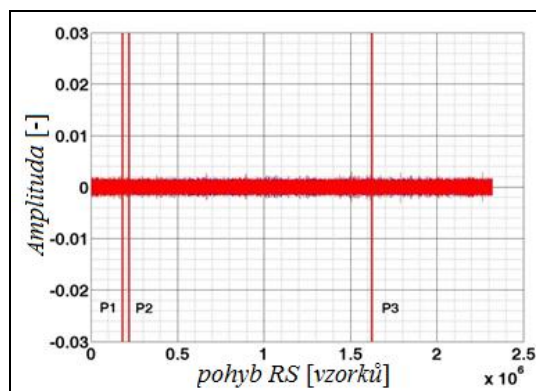


Obr. 2.5.1 – 4 Schematické znázornění obrazu, zaznamenávaného kamerou na výstupu měřicí sestavy. Oblast interference 1 je platná pro polohy P2' a P3', oblast interference 2 pak pro polohu P1' [54]

Stejný záznam při detailnější analýze dávající informaci o rozdílných pozicích centrálního bodu interferenčního signálu v rámci jedné hrany měřicí plochy KM (obr. 2.5.1 – 5), potenciálně umožňuje i analýzu povrchu měřicích ploch KM, vedoucí k odhalení případných defektů (škrábance, rýhy, atd.).



Obr. 2.5.1 – 5 Detailní náhled na signály zaznamenané v měřicí pozici P2, umožňující analýzu povrchu KM [54]



Obr. 2.5.1 – 6 Příklad výsledku měření [54]

Popsaná optická sestava byla realizována pomocí třípalcové optiky (skleněné desky o průměru 3 palce, tj. 76,2 mm), umožňující použití svazku o průměru 35 mm, umožňujícího měření celé měřicí plochy KM.

Samotná KM je v době měření umístěna na tříbodovém držáku (obr. 2.5.2 – 3), jehož poloha je pomocí piezošroubů před každým měřením automaticky nastavena tak, aby bylo dosaženo maximálního kontrastu interferenčních proužků. Obdobně je tomu i v případě držáku referenční plochy RS, umístěném na motorizovaném posuvu. I zde se využívá zabudovaných piezošroubů pro online korekci nežádoucích náklonů referenční plochy v průběhu měření.

Optická sestava je doplněna snímači pro monitorování teplot různých částí systému za účelem korekce teplotních dilatací v průběhu měření a systémem pro měření indexu lomu vzduchu, nezbytným pro odměřování vzdáleností laserovým interferometrem s rozlišením v řádu jednotek nanometrů.

Jak už bylo uvedeno v úvodu, pro popsáný systém byl také navržen a vyroben automatický podavač, schopný pojmout až 126 kusů KM v rozsahu délek 0,3 mm až 100 mm.

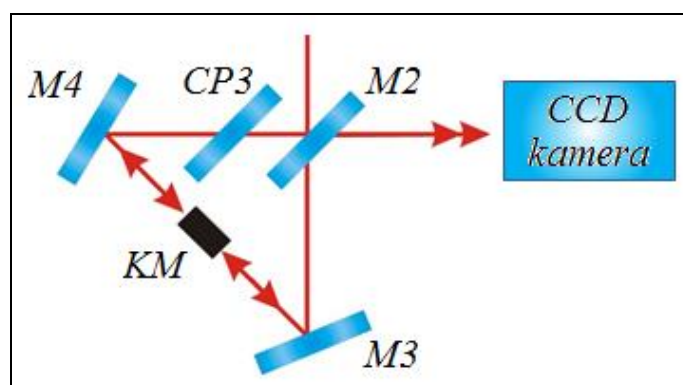


Obr. 2.5.1 – 7 Podavač

Významným prvkem systému je tzv. *trojúhelník* (Dowellův interferometr) – náhrada pevného zrcadla, na jehož vstupu je dělič svazku (Mirror 2), obrázek 2.5.1 – 8. Ten rozdělí vstupní dělicí svazek na dvě poloviny, z nichž každá projde trojúhelníkem v jednom

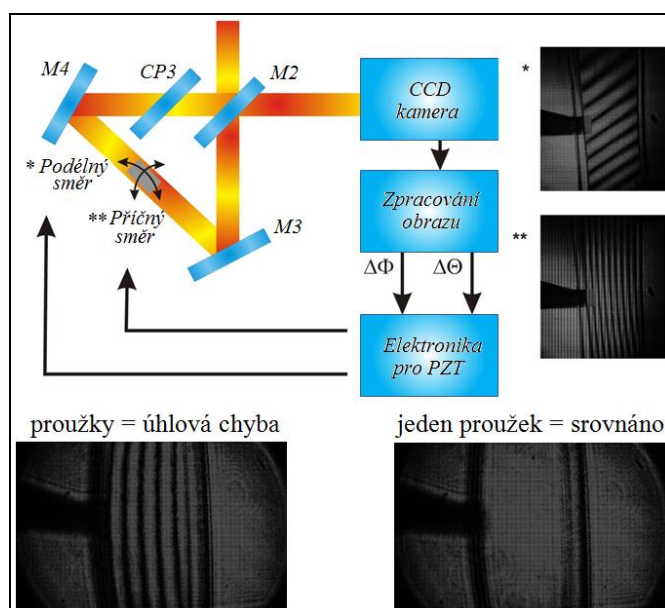
z možných směrů. Na výstupu se obě poloviny světla z trojúhelníku zase sejdou a šíří se částečně mimo sestavu a částečně zpět do sestavy.

Výstup trojúhelníku byl nevyužit. Bylo navrženo umístit na daný výstup CCD kameru, obrázek 2.5.1 – 8. CCD kamera monitoruje interferenční strukturu (proužky), které vzniknou interferencí odrazů od měřicích ploch KM. Pokud je osa KM shodná s osou svazku, odrazy míří přesně tam, odkud světlo přišlo a v místě, kde je CCD kamera se svazky potkají pod vzájemným úhlem 0° = vznikne jednolitý signál, jen jeden interferenční proužek.



Obr. 2.5.1 – 8 Zjednodušené schéma s odrazy od KM – pro korekci úhlové odchylky mezi osou KM a osou měřicího svazku; zavedení CCD kamery [54]

Úhlová odchylka mezi osou KM a osou měřicího svazku pak znamená nenulový úhel mezi svazky v místě, kde jsou vidět interferenční proužky. Perioda proužků je funkcí úhlu, pod kterým se svazky potkávají. Z počtu a tvaru interferenčních proužků lze určit, jak je potřeba pohybovat s KM (změnit napětí na piezo elementech v držáku KM), aby se úhlová chyba odstranila, obrázek 2.5.1 – 9.



Obr. 2.5.1 – 9 Monitoring interferenční struktury (proužků), které vzniknou interferencí odrazů od měřicích ploch KM [6, 54]

2.5.2 Postup měření na bezkontaktním systému

Základní příprava KM před vlastním měřením délky je uvedena v úvodní části podkapitoly 2.4 – u všech popsanych systémů měření délky KM je stejná. Jedná se o dodržení zásad týkající se teploty při měření, vlivu nečistot, atd.. Nutností je použití ochranných pomůcek – KM se nesmějí při měření držet v rukou, pouze s použitím izolačních pomůcek (pinzet, držáků, rukavic), obrázek. 2.5.2 – 1.



Obr. 2.5.2 – 1 Vkládání KM do systému [54]

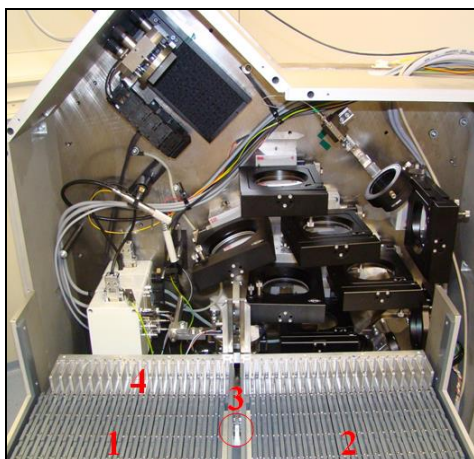
Realizace měření délky KM je u bezkontaktního systému jiná než u interferenční metody realizované na přístroji TESA NPL A.G.I. 300 .

Kvalita měření není závislá na vlastnostech přilnutí nasunutím KM na referenční desku (jak je tomu u interferenčního zařízení NPL TESA), ale vychází pouze z principu interferometrického odměřování, kdy je výsledek měření ovlivněn kvalitou jednotlivých komponentů optické sestavy, vlastnostmi zdroje záření, mírou kompenzace atmosférických vlivů a použitými detekčními technikami.

S využitím kombinace laserové interferometrie a interferometrie nízké koherence je získána hodnota délky KM jako výsledek plně automatického bezkontaktního měření, bez opotřebení KM (interferenční systém NPL TESA) a bez nutnosti porovnání výsledku měření se známým etalonem, který má stejnou jmenovitou délku (komparační systém TESA–UPC).

V rámci měřicího procesu laborant pouze vkládá KM do vstupního a vykládá změřené KM z výstupního zásobníku, obrázek 2.5.2 – 2.

KM jsou naskládány do jednotlivých segmentů vstupního zásobníku. Šířka segmentu je optimalizována na šířku KM a jeho délka je uzpůsobena pro vložení KM o podélném rozměru 35 mm (pro rozměr KM 9 x 30 mm pro rozměry do 10 mm, nebo 9 x 35 mm pro rozměry nad 10 mm do 1 000 mm).



Obr. 2.5.2 – 2 Vstupní zásobník – 1, výstupní zásobník – 2, unašeč – 3, hřeben – 4 [54]

Po naskládání KM do vstupního zásobníku se kryt podavače KM uzavře a započne přípravná fáze před vlastním měřením – temperace KM (dosažení teplotní rovnováhy 20°C mezi systémem a KM). Vyrovnání teplot probíhá cca 12 – 24 hodin (po 12 hodinové temperaci je možné již realizovat měření).

Před realizací temperace by měly být jednotlivé segmenty vstupního zásobníku a KM omyty (očistěny) lékařským benzínem a poté čistým lihem.

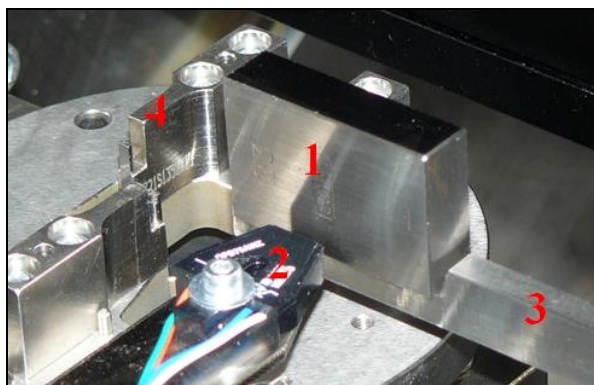
Před zahájením vlastního procesu měření délky KM se zadají do programového měřicího systému potřebná data týkající se základních údajů o měřených KM (nominální rozměry KM, výrobce, materiál, teplotní součinitel délkové roztažnosti atd.).

Po vyrovnání teploty KM v systému je zahájeno vlastní měření délky KM. Měření je realizováno dle nastavení programového měřicího systému, přičemž vlastní měření probíhá při stabilizované teplotě $20\text{ °C} \pm 0,3\text{ °C}$.

Sérií pohybů podavače je první řada KM (a po jejím proměření i každá další) přesunuta na pozici měřicího řádku, do tzv. hřebene, a poté jsou KM v měřicím řádku jedna po druhé přesouvány na unašeč, obrázek 2.5.2 – 2.

Unašeč slouží pro transport KM z podavače na 3 bodový držák KM v optické sestavě. Pro zajištění správného umístění KM v optické sestavě je vyhodnocován signál z optické závory, obrázek 2.5.2 – 3. Z průběhu signálu (intenzita snímačem generovaného záření) odraženého od unašeče a od KM, se stanoví aktuální poloha KM na unašeči a to vzhledem k měřicí straně unašeče (zpětná kontrola, zda je KM umístěna na unašeči). Zjištěná hodnota pak určí polohu, do které motor s unašečem (včetně KM) najede, a to s opakovatelností větší než 0,1 mm.

V optické sestavě je KM umístěna na trojici bodových podpěr, které jsou součástí masivního ocelového držáku KM – 3 bodový držák. Tento držák je úhlově seřiditelný šrouby (hrubé manuální seřízení při nastavování sestavy) se zabudovanými piezo elementy (pro jemnou korekci odchylky úhlu osy KM od osy měřicího svazku).



Obr. 2.5.2 – 3 KM – 1, optická závora – 2, unašeč – 3, držák KM – 4

Po umístění KM do držáku je realizována optimalizace polohy KM vůči ose měřicího svazku, na niž navazuje vlastní měření délky KM.

Vyhodnocené signály jsou ukládány do paměti PC k dalšímu zpracování. Po realizaci měření délky je KM vyjmuta automaticky zpět do zásobníku a specializovaný podavač KM uloží do výstupního zásobníku.

Tento systém měření je následně aplikován na další KM uložené ve vstupním zásobníku. Metodou step-by-step jsou postupně vkládány jednotlivě KM do měřicí komory optické soustavy. Vše probíhá pod dozorem automatického řízení, tj. počítače PC, který monitoruje celý průběh měření délky KM.

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část předkládané práce přináší informace o procesu přípravy bezkontaktního systému pro zavedení do běžného provozu ČMI OI Liberec k měření délky KM.

Příprava pro zavedení měřicího systému do ČMI byla realizována v několika etapách.

První etapa byla zaměřena na optimalizaci systému. Tato etapa v sobě zahrnovala velmi úzkou spolupráci mezi Ústavem přístrojové techniky AV ČR, v.v.i., Brno (dále jen ÚPT Brno) a firmou MESING, s.r.o. v oblasti optimalizačních návrhů a úprav jednotlivých komponentů a dále pak spolupráci mezi ČMI a Technickou univerzitou v Liberci (dále jen TUL) v rámci testování navržených opatření. Tato spolupráce vedla k dosažení požadované funkčnosti systému pro specifické potřeby ČMI.

Optimalizace systému probíhala po dobu 2 let. Nejprve byl systém umístěn do laboratorních prostor ČMI OI Liberec, kde byla ve spolupráci s TUL ověřována jeho funkčnost pro měření délky KM. Následně byly na základě zjištěných nedostatků během měření specifikovány požadavky k optimalizaci systému ÚPT Brno a firmě MESING. Obě instituce ve vzájemné spolupráci navrhly vhodná řešení k zadaným požadavkům. Poté bylo provedeno ověření navrženého řešení ze strany ČMI a TUL. Opakovaně byl tento způsob aplikován až do úplného odstranění nedostatků, které významnou měrou narušovaly funkčnost systému pro zadané měření délky KM. **Popis optimalizačních změn je obsahem podkapitoly 3.1.**

Podmínkou pro zavedení bezkontaktního systému do ČMI, jako další metody měření délky KM, bylo stanovit nejistotu měření. Stanovení nejistoty měření tvořilo druhou etapu, která byla nejnáročnější ze všech etap realizovaných v rámci uvedení systému do reálného provozu měření v ČMI. Komplexní rozbor všech možných zdrojů, které mohou přispívat k výsledné nejistotě měření na daném přístroji byl zpracováván více než 1,5 roku. Během této doby byl prováděn opakovaný postup skládající se z návrhu možného zdroje a jeho následného ověření v praxi – tedy zjištění významnosti zdroje na nejistotu měření opakovaným měřením. V rámci této etapy byla provedena komplexní hloubková analýza měřicího systému s cílem nalézt významné zdroje k nejistotě a stanovit výslednou nejistotu měření pro daný systém. **Stanovení nejistoty měření k bezkontaktnímu systému tvoří podkapitulu 3.2.**

Třetí etapa souvisela s přípravou metodiky pro kalibraci KM na daném přístroji tj. **vytvoření kalibračního postupu, který je obsahem podkapitoly 3.3.**

Výstupem této etapy je připravená kompletní dokumentace k validaci dané metody měření. Připravené dokumenty budou po validaci zavedeny do systému oběhu řízené dokumentace ČMI.

Závěrečná etapa uvádí celkové porovnání stávajících systémů používaných v ČMI ke kalibraci KM s bezkontaktním systémem. Toto **mezisystémové porovnání je uvedeno v podkapitole 3.4.**

Jelikož v rámci jednotlivých etap byla provedena velká řada měření na bezkontaktním systému, ale i na stávajících systémech v ČMI (TESA NPL A.G.I. 300, TESA–UPC), byly stanoveny základní podmínky měření včetně přípravy KM.

Měřeným parametrem byla středová délka KM l_c . Středová délka je délka kolmice spuštěné ze středu jedné měřicí plochy KM k druhé měřicí ploše KM.

Pro experimentální měření byly použity ocelové (patří mezi nejpoužívanější) KM od výrobce Mitutoyo, třídy přesnosti K. Základní technické a fyzikální vlastnosti KM jsou uvedeny v tabulce 3 – 1. Jednalo se o KM ze sad KM o 122 ks.

Tabulka 3 – 1 Základní fyzikální a technické vlastnosti KM

Technické vlastnosti	
Typ	ocelové
Výrobce	Mitutoyo
Rozsah	0,5 – 100 mm
Třída přesnosti	K
Fyzikální vlastnosti	
Teplotní součinitel délkové roztažnosti – α	11,5 $\left[\frac{\mu\text{m}}{\text{m} \times ^\circ\text{C}} \right]$
Tvrdost podle Vickerse (ČSN 42 0374)	800

Podmínky měření

Systém klimatizace v laboratořích ČMI dokáže regulovat teplotu na $20 \pm 0,2$ °C v laboratoři, kde je umístěn přístroj TESA NPL A.G.I. 300.

V laboratořích, kde je umístěn přístroj TESA–UPC a bezkontaktní systém je regulace teploty $20 \pm 0,3$ °C. Hodnota $\pm 0,2$ či $0,3$ °C udává maximální odchylku teploty v laboratoři.

Kompletní informace o přístroji TESA NPL A.G.I. 300 (a metodě měření) jsou uvedeny v podkapitole 2.4.1.

Informace o přístroji TESA–UPC (a metodě měření) jsou uvedeny v podkapitole 2.4.2.

Kompletní informace o bezkontaktním systému jsou uvedeny v podkapitole 2.5.

Příprava KM

KM byly očištěny v digestoři od konzervační vrstvy umytím v lékařském benzínu a vyleštěním lapovanými ploch optickou utěrkou. Provedla se vizuální kontrola měřicích ploch KM. Dále byly KM umyty načisto pomocí vaty a lékařského benzínu a uloženy k temperaci na kameninovou nebo ocelovou desku (TESA NPL A.G.I. 300, TESA–UPC) nebo vloženy přímo do základacího roštu měřicího přístroje (bezkontaktní systém).

V rámci laboratorního měření byly dodrženy základní zásady týkající se práce s KM.

Předepsaná laboratorní teplota byla 20 °C $\pm$ $0,2$ °C (TESA NPL A.G.I. 300) a 20 °C $\pm$ $0,3$ °C (bezkontaktní systém a TESA–UPC) a standardní atmosférický tlak $101\,325$ Pa. Při měření KM nedošlo k přímému kontaktu KM s pokožkou ruky, k manipulaci s KM docházelo pouze s použitím rukavic a pinzet.

3.1 OPTIMALIZACE STÁVAJÍCÍHO KONSTRUKČNÍHO ZAŘÍZENÍ PRO BEZKONTAKTNÍ MĚŘENÍ DÉLKY KM PRO PŘÍMÉ POTŘEBY ČMI

V této podkapitole budou popsány optimalizační práce, které byly provedené v sestavě bezkontaktního systému pro měření délky KM.

3.1.1 Návrh a implementace metody pro aktivní stabilizaci polohy KM v experimentální sestavě

Zařízení pro bezkontaktní kalibraci KM je v zásadě tvořeno dvěma autonomními systémy. Jedním z nich je optická sestava pro měření délky KM, druhým z nich potom velkokapacitní automatický podavač KM, jehož úkolem je vložené KM postupně transportovat na měřicí pozici v optické sestavě, kde je každá z těchto KM změřena a transportována zpět do podavače KM. Jako součást propojení zmíněné dvojice systémů v jeden funkční celek byl navržen a sestaven algoritmus pro optimalizaci polohy KM v měřicím systému. Z hlediska přesnosti měření délky KM je důležité, aby byla osa KM rovnoběžná s osou měřicího svazku, čímž je minimalizovaná kosinová chyba měření délky KM. Právě zajištění souososti měřené KM a měřicího optického svazku je hlavním úkolem navrženého algoritmu.

Optická sestava je schematicky znázorněna na obrázku 3.1.1 – 2. Pro možnost získání informace o poloze KM v optické sestavě, bylo původní uspořádání doplněno o CCD kameru, umístěnou na dosud nevyužitém výstupu Dowelova interferometru (trojúhelníku v měřicí větvi Michelsonova interferometru). Instalovaná kamera snímá obraz interferenční struktury, vzniklé jednak interferencí protiběžných svazků, procházejících Dowelovým interferometrem (toto platí pro část obrazu mimo KM) a jednak interferencí odrazů optických svazků od měřicích ploch KM (toto platí pro část obrazu, odpovídající měřené KM).

Z hlediska struktury interferenčního obrazce, vzniklého interferencí dvojice světelných svazků, obecně platí, že perioda interferenčních proužků je funkcí úhlu, který tyto svazky svírají, a je dána vztahem 3.1.1–1:

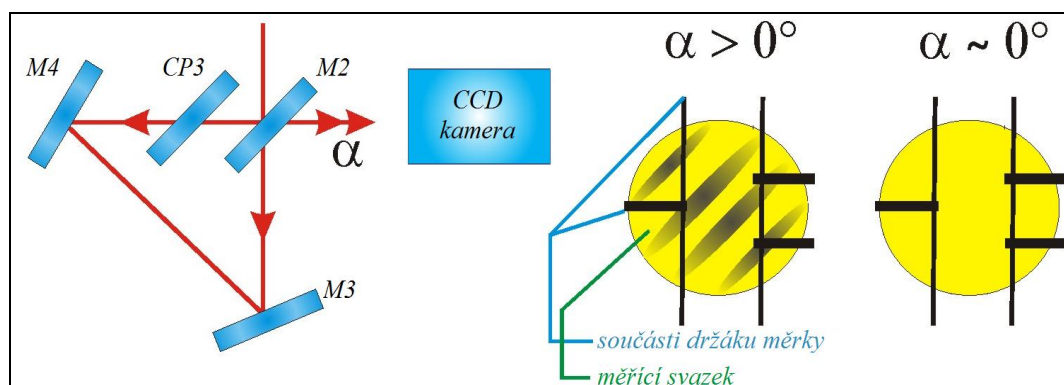
$$P = \frac{\lambda}{2 \times \sin(\alpha)} \quad (3.1.1-1)$$

kde P je perioda interferenčních proužků, λ je vlnová délka interferujícího záření a α je vzájemný úhel interferujících svazků.

Je-li tedy známa perioda interferenčních proužků, lze jednoduchým způsobem vypočítat úhel, který příslušné svazky svírají a tuto informaci použít jako vstup pro regulační smyčku, mající za úkol vzájemný úhel interferujících svazků minimalizovat. Implementaci popsaného přístupu do algoritmu pro optimalizaci polohy KM v měřicím systému znázorňuje obrázek 3.1.1 – 1, princip činnosti algoritmu pak obrázek 3.1.1 – 3.

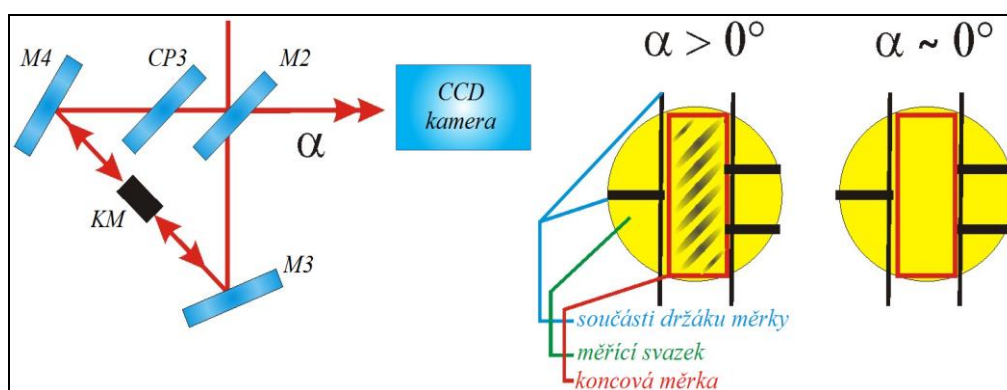
Na obrázku 3.1.1 – 1 je zachycen stav, kdy v Dowelově interferometru není vložená KM. V tomto případě je interferenční obrazec tvořen interferencí dvojice protiběžných svazků, procházejících Dowelovým interferometrem. Tento stav je sledován zejména ve fázi

základního seřizování optické sestavy, přičemž cílem je vždy dosažení minimálního vzájemného úhlu interferujících svazků, reprezentovaného jediným interferenčním proužkem v interferenčním obrazci.



Obr. 3.1.1 – 1 Schematické znázornění svazků v Dowelově interferometru bez vložené KM. Perioda interferenčních proužků odpovídá úhlu α , který interferující svazky svírají [54]

Na obrázku 3.1.1 – 2 je zachycen stav, kdy je do správně seřízeného Dowelova interferometru podavačem vložena KM. V této fázi lze interferenční strukturu rozdělit na oblast mimo KM, kde interferují protiběžné svazky procházející Dowelovým interferometrem a na oblast odpovídající KM, kde dochází k interferenci dvojice svazků, které reprezentují dvojici odrazů od měřících ploch KM. Pokud jde o interferenční strukturu mimo KM, jedná se o tentýž stav, jaký je popsán na obrázku 3.1.1 – 1 a reálně slouží především pro kontrolu správnosti nastavení vlastní optické sestavy. Interferenční struktura v oblasti odpovídající KM pak dává informaci o tom, jaký je vzájemný úhel svazků odražených od KM.



Obr. 3.1.1 – 2 Schematické znázornění svazků v Dowelově interferometru s vloženou koncovou měrkou. Perioda interferenčních proužků odpovídá úhlu α , který svírají svazky, odražené se od měřících ploch KM a interferující na výstupu interferometru [54]

S ohledem na nastavení vlastního interferometru lze za ideální stav považovat případ, kdy je svazek od měřících ploch KM odražený přímo ve směru svazku dopadajícího a interferenční struktura v oblasti KM je pak stejná jako v oblasti mimo KM, tedy kdy opět dostáváme jediný interferenční proužek.

V případě znázorněném na obrázku 3.1.1 – 2 je z počtu interferenčních proužků patrné, že odražené svazky svírají nenulový úhel. Po aplikaci algoritmu pak v tomto případě lze dosáhnout stavu, kdy je vzájemný úhel blízký nule a interferenční obrazec tvoří jediný interferenční proužek, jak je znázorněno opět na obrázku 3.1.1 – 2.

Princip činnosti algoritmu je znázorněn na obrázku 3.1.1 – 3 a lze jej rozdělit do následujících fází:

1. Pořízení snímku interferenční struktury.

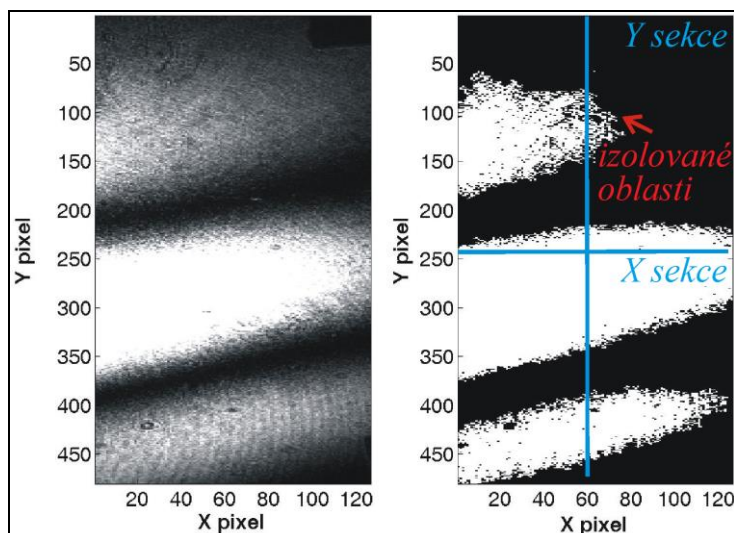
Pro pořízení snímku interferenční struktury je v systému instalována CCD kamera bez objektivu, který je nahrazen dvojicí spojných čoček, přizpůsobujících průměr měřicího svazku rozměrům snímacího čipu kamery. Expoziční parametry lze nastavit softwarově a nastavení měnit kdykoli během měření, ovšem s ohledem na konstantní intenzitu záření laserů a stabilně vysokou odraznost povrchů KM zůstává tato možnost zpravidla nevyužita. Samotné pořízení snímku se děje v okamžiku povelu řídicího programu, jehož čelní panel je pro ilustraci zachycen na obrázku 3.1 – 6.

2. Zpracování obrazu s cílem identifikovat počet a tvar interferenčních proužků.

Vlastní zpracování pořízeného snímku je zahájeno krokem, který pomocí vyčíslení úrovně intenzity záření v jednotlivých částech snímku určí, zda proběhlo pořízení snímku korektně a zda je snímek vhodný pro další zpracování. V případě, že tomu tak není, proběhne automaticky sejmutí nového snímku. Pokud je snímek vyhodnocen jako vyhovující pro další zpracování, proběhne uživatelsky nastavitelná úprava kontrastu snímku a provede se výřez části obrazu v okolí středu KM. Interferenční obrazec z této oblasti je pak podroben analýze počtu interferenčních proužků. Aktuálně jsou v algoritmu volitelné dva přístupy.

Prvním z nich je intenzitní prahování snímku, kdy je nejprve vypočtena průměrná hodnota intenzity snímku a tento snímek, uložený původně v odstínech šedi, je převedený na černobílý podle klíče, kdy se černým stává každý bod obrazu s intenzitou nižší než vypočtený průměr a bílým bodem se stává každý bod obrazu s intenzitou vyšší než vypočtený průměr. Následně je v několika řezech v příčném i podélném směru proveden součet bílých oblastí, jejichž plocha je větší než 100 pixelů (toto opatření brání falešné detekci proužků). Graficky je tento algoritmus popsán na obrázku 3.1.1 – 3.

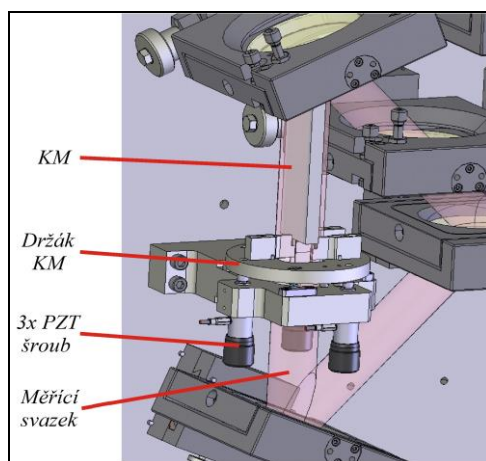
Druhým z možných přístupů je využití Fourierovy transformace, kdy je pro definované řezy v podélném a příčném směru proveden přepočet intenzitního profilu proužků na spektrum, jehož maximální hodnota přímo odpovídá počtu proužků (intenzitních maxim) v analyzovaném obrazu. Ve srovnání s prvním přístupem, pracujícím pouze s intenzitou obrazu je tento přístup spolehlivější v případě detekce většího (typicky více než 5) množství proužků v obrazu, na druhou stranu občas vykazuje chybné hodnoty v případě komplikovanějšího tvaru interferenčních proužků. Z toho důvodu umožňuje řídicí program i kombinaci obou přístupů, vedoucí ke zvýšení spolehlivosti detekce počtu interferenčních proužků.



Obr. 3.1.1 – 3 Zpracování obrazu metodou prahování intenzity snímku [54]

3. Regulační zásah vedoucí k minimalizaci počtu interferenčních proužků.

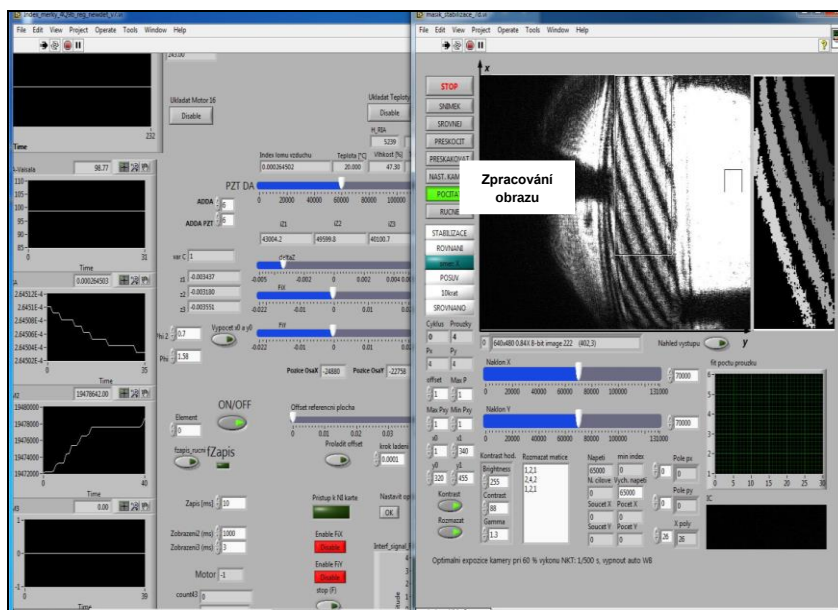
Výsledkem výše popsané analýzy interferenční struktury je zjištěný počet interferenčních proužků v příčném a podélném řezu části obrazu, odpovídajícího měřené KM. Pokud je tento zjištěný počet vyšší než stanovený limit (v ideálním případě větší než 1, v reálném případě vyšší než 3), aktivuje se část algoritmu upravující polohu KM vůči ose měřicího svazku. Použitý držák KM umožňuje změnu náklonu KM samostatně v podélném i příčném směru, přičemž korekce náklonu KM probíhá v závislosti na tom, v jakém z těchto dvou směrů byl zjištěn vyšší počet interferenčních proužků. Držák KM je zobrazen na obrázku 3.1.1 – 4.



Obr. 3.1.1 – 4 Držák KM uvnitř interferometru [54]

Z konstrukčního hlediska se jedná o třibodový podpěrný systém KM, který díky trojici integrovaných šroubů s vestavěnými piezo elementy (PZT) umožňuje manuální i elektronické polohování. Manuální polohování je pak použito pro hrubou korekci náklonu KM, zpravidla pouze v souvislosti s nastavením či korekcí nastavení vlastní optické sestavy. Elektronické polohování je naopak využíváno v průběhu vlastního

měření pro zde popisovanou jemnou korekci úhlové odchylky osy KM od osy měřicího svazku.



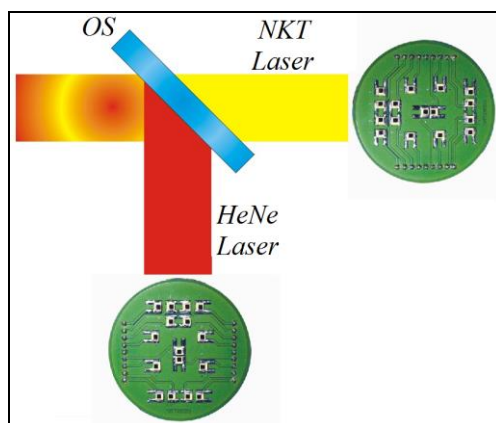
Obr. 3.1.1 – 5 Náhled čelního panelu řídicího programu pro optimalizaci polohy KM v měřícím systému (vpravo) a pro sběr dat o teplotě jednotlivých částí systému, indexu lomu vzduchu a pro korekci náklonu referenčního zrcadla (vlevo)

Řetězec elektronického polohování je tvořen DA kartou s výstupním rozsahem napětí (0 – 10) V, propojenou s napěťovým zesilovačem, který výstupní napětí DA karty zesílí v rozsahu (0 – 135) V. Toto napětí je přivedeno na příslušný PZT element a umožňuje regulovat jeho délku v rozsahu 0 – 15 μm . Korekce úhlové odchylky potom probíhá tak, že je v určeném směru (příčném nebo podélném, podle zjištěného počtu interferenčních proužků) ve zvolených krocích proladen celý pracovní rozsah odpovídajícího PZT elementu. V každém kroku ladění je provedeno výše popsané zpracování obrazu a výsledkem je tak křivka nesoucí informaci o počtu interferenčních proužků pro celý polohovací rozsah držáku. Algoritmus pak nastaví napětí na daném PZT elementu tak, aby odpovídalo zjištěné poloze s minimem interferenčních proužků. V případě, kdy je dosažený počet interferenčních proužků vyšší než požadovaná hodnota, následuje další polohovací cyklus a to vždy pro opačný směr, než tomu bylo v předchozím případě. Počet cyklů je softwarově omezený, po vyčerpání zvoleného počtu kroků je nastavena nejlepší zjištěná hodnota a algoritmus je ukončen. Náhled čelního panelu řídicího programu je na obrázku 3.1.1 – 5.

3.1.2 Nové matice fotodetektorů pro detekci interferenčních signálů, včetně úpravy elektroniky pro zpracování signálů

Byl realizován návrh dvojice 16. bodových detekčních jednotek (jeden pro stabilizovaný He–Ne laser druhý pro pulzní pikosekundový laser – viz obrázek 3.1.2 – 1) pro detekci interferenčních signálů na výstupu interferometru a to včetně návrhu modulů

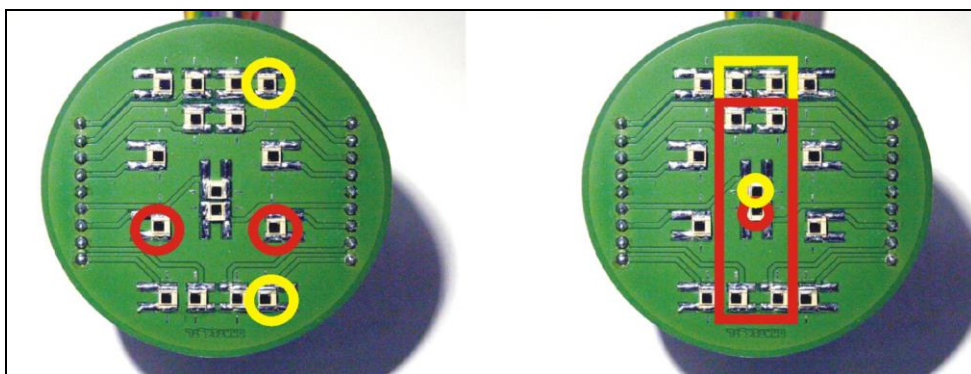
s nízkošumovými zesilovači pro úpravu detekovaného signálu pro další zpracování. Detekční jednotky jsou navrženy tak, aby umožňovaly pětibodové měření (střed a čtveřice bodů v rozích KM) jak KM s podélným rozměrem 30 mm, tak KM s podélným rozměrem 35 mm, jak je vyznačeno na obrázku 3.1.2 – 2. Detektory mimo oblast KM jsou potom určeny pro záznam interferenčního signálu referenční polohy systému P1, respektive pro záznam interferenčního signálu monitorující pohyb měřicího zrcadla interferometru.



Obr. 3.1.2 – 1 Detekční jednotky [54]

Původní výsledky měření byly často znehodnoceny šumem, který byl způsoben fázovými nespojitostmi v okrajových polohách matice fotodetektorů. Tento jev byl způsobený nízkou intenzitou záření v okrajové části měřicího svazku.

S ohledem na reálnou nemožnost zvýšení jak intenzity záření ve svazku, tak zisku kaskády zesilovačů za fotodetektory bylo přikročeno k přesunu okrajových detektorů blíže ke středu svazku. Za tímto účelem byly navrženy a vyrobeny nové matice fotodetektorů, u kterých poloha detektorů v prostoru mimo měrku zohledňuje reálnou intenzitu záření a schopnost kaskády zesilovačů zesílit detekovaný signál pro další zpracování. Přiblížením okrajových detektorů středu svazku se zmíněný problém podařilo ve značné míře eliminovat.



Obr. 3.1.2 – 2 Vyznačení funkce jednotlivých fotodetektorů – vlevo vyznačen příklad kombinace fotodetektorů pro stanovení referenčního bodu měření P1, vpravo oblast fotodetektorů pro měření bodů P2 a P3 v případě měrky s podélnou délkou 30 mm (červeně) a 35 mm (žlutě) [54]

3.1.3 Analýza metod pro detekci středu bílých interferenčních proužků, výběr nejvhodnější metody a její implementace do programu pro zpracování výsledků měření

V rámci vývoje algoritmu pro zpracování výsledků měření a stanovení délky KM bylo významně pokročeno v oblasti analýzy signálů, které jsou výsledkem interference širokospektrálního optického záření na výstupu interferometru (tzv. bílé proužky, měřicí pozice P1, P2 a P3).

Z hlediska optimalizace algoritmu pro zpracování výsledků měření byla u bezkontaktního systému provedena komplexní analýza celkem pěti metod pro spolehlivou a přesnou detekci středu bílého interferenčního proužku.

Metody detekce středu bílého proužku [38]:

1. Metoda těžiště proužku.

Metoda těžiště proužku vychází ze skutečnosti, že plochu pod křivkou změřeného interferenčního signálu lze spočítat a rozdělit na dvě poloviny. Na dělicí bod se pak lze dívat jako na těžiště interferenčního signálu, kdy je plocha pod křivkou napravo i nalevo od takového bodu (těžiště) stejná. Použitý algoritmus počítá střed bílého interferenčního proužku (těžiště) jako vážený průměr poloh maxim (popř. i minim) interferenčního signálu, přičemž vahou je jejich intenzita.

2. Metoda korelační.

Metoda korelační vychází ze znalostí parametrů zdroje širokospektrálního záření, na jejichž základě lze vytvořit teoretický model interferenčního signálu. Tento modelový signál se známou polohou středového bodu je pak s využitím korelační funkce porovnáván se signálem změřeným a na základě výsledku této analýzy je určen středový bod změřeného signálu.

3. Metoda fitování proužku.

Metoda fitování proužku vychází z úvahy, že bílý interferenční proužek je možné v okolí jeho středu proložit křivkou, definovanou jako funkce kosinus modulovaná polynomem (pokles intenzity od středu proužku k okraji). Za střed bílého interferenčního proužku pak můžeme označit buď maximum fitované polynomiální obálky nebo maximum kosinu, které je maximum obálky nejbližší.

4. Metoda analýzy ve frekvenční oblasti (FDA).

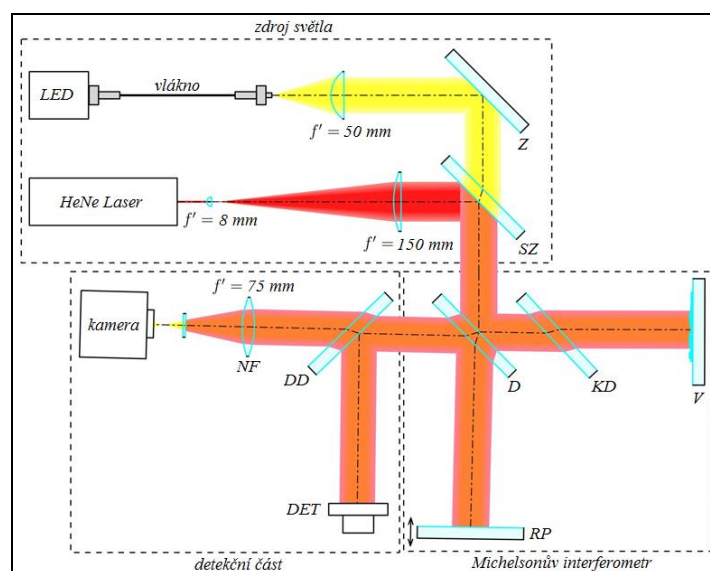
Metoda analýzy ve frekvenční oblasti vychází z toho, že změřený interferenční signál je nejprve zpracován pomocí Fourierovy transformace (FFT), čímž je získáno amplitudové a fázové spektrum signálu. Vlastní určení středu interferenčního signálu vychází ze skutečnosti, že průběh fáze signálu je v blízkém okolí maxima amplitudového spektra spojitý, lze jej proložit přímkou a směrnici této přímky pak využít pro výpočet středu signálu.

5. Metoda maxima obálky.

Obálkou bílého interferenčního signálu se rozumí křivka, kterou lze proložit lokální maxima interferenčního signálu tak, aby byl zachycen trend změny jeho amplitudy.

Určení maxima takto vzniklé křivky je vedle hledání absolutního maxima změřeného interferenčního signálu jednou z nejjednodušších metod, kterou lze pro identifikaci středu bílého interferenčního signálu použít.

Vybrané metody byly analyzovány jak z hlediska jejich vlivu na celkovou přesnost měření, tak z hlediska odolnosti vůči disperzi a v neposlední řadě i z hlediska jejich výpočetní náročnosti.



Obr. 3.1.3 – 1 Experimentální sestava Michelsonova interferometru použitá pro srovnávací analýzu metod pro detekci středu bílého interferenčního proužku [54]

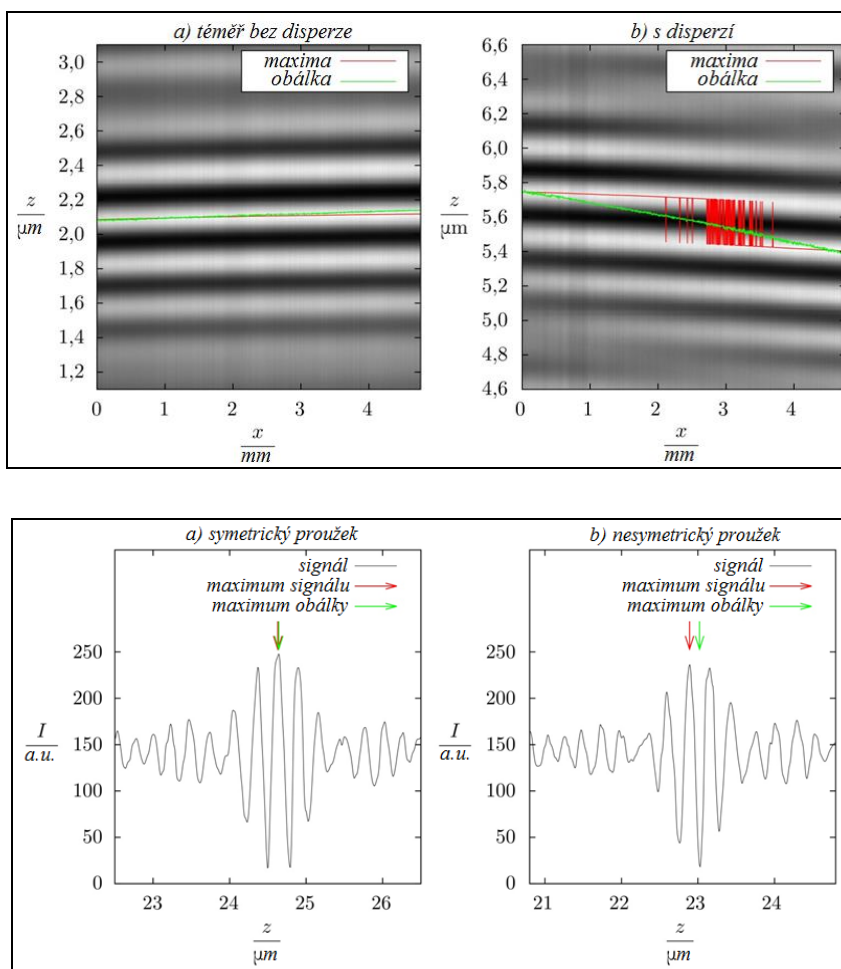
Všechny testované algoritmy byly naprogramovány v prostředí MATLAB a pro účely jejich vzájemného srovnání byla navržena experimentální sestava Michelsonova interferometru, která je uvedena na obrázku 3.1.3 – 1, na níž bylo provedeno experimentální měření pro různá nastavení interferometru tak, aby byla přesnost a odolnost vůči disperzi spolehlivě zjištěna (optimální versus neoptimální nastavení kompenzační desky, měření profilu referenční nerovinné struktury, atd.).

Původně byla využívána u systému pro detekci středu bílých interferenčních proužků tzv. korelační metoda. Jak bylo zmíněno výše, tato metoda je založená na porovnání naměřeného signálu a signálu modelového, ve kterém známe polohu středu bílého interferenčního proužku. Poloha středu bílého interferenčního proužku v naměřeném signálu se určí buď pomocí polohy maxima vzájemné korelace obou signálů – pak je výpočet možné provést přímo s naměřeným a modelovým signálem, popř. s absolutní hodnotou střídavé složky obou signálů, nebo pomocí polohy maxima a minima, což může být vhodnější v případě, kdy bílý interferenční proužek má dvě maxima s podobnou intenzitou. Pro použití korelační metody u systému byl vytvořen model bílého interferenčního proužku, jehož volba do značné míry ovlivňovala přesnost detekce.

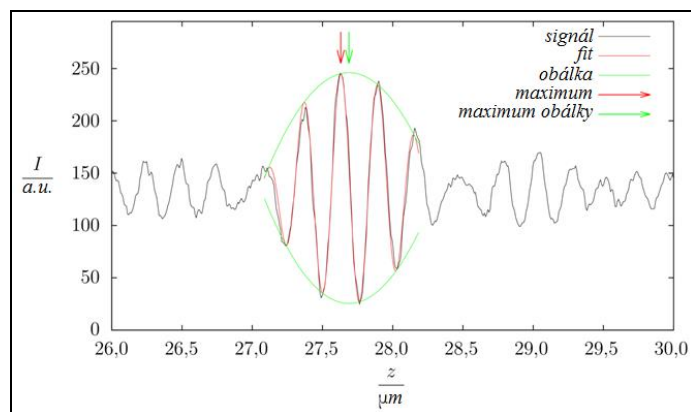
Z provedeného srovnání výše uvedených metod detekce středu bílého interferenčního proužku vyplynulo, že v případě interferometru optimálně kompenzovaného na disperzi, je z hlediska přesnosti detekce nejvhodnější metoda korelační a metoda fitování proužku, detekujeme-li maximum signálu, které je nejbližší maximu obálky.

Stávající metoda u systému (korelační) je však výpočetně náročnější a její rozlišení je navíc omezeno vzorkovací vzdáleností. Je-li v interferometru použita klínová kompenzační deska, v případě jejího neoptimálního nastavení dochází k tomu, že metody detekující v signálu maximum vyhodnotí rovinný povrch jako schody. Proti tomuto jevu byla velmi odolná metoda fitování proužku s detekcí maxima obálky signálu. Metoda fitování proužku detekuje rovinný povrch jako rovinu i v případě neoptimálního nastavení klínové kompenzační desky – což pro daný systém představuje podstatnou výhodu.

V rámci optimalizace algoritmu pro zpracování výsledků měření byla do systému zavedena metoda fitování proužku pro spolehlivou a přesnou detekci středu bílého interferenčního proužku. Metoda je zřehledněna na obrázku 3.1.3 – 2A a B.



Obr. 3.1.3 – 2A Vliv disperze na bílý interferenční proužek. Signál se vlivem disperze stává nesymetrickým a při zpracování je třeba využívat metody pracující s obálkou tohoto signálu, ne s jeho prostým maximem [38, 54]



Obr. 3.1.3 – 2B Metoda fitování proužku, která je ve verzi detekující maximum obálky fitovaného signálu aktuálně využita v popisovaném měřicím systému [38, 54]

3.1.4 Optimalizace algoritmu pro zpracování výsledků měření délky KM

Vedle analýzy metod pro určení středu bílého interferenčního proužku, popsané v podkapitole 3.1.3, byl samostatně vyvíjen vlastní algoritmus pro určení délky měřené KM.

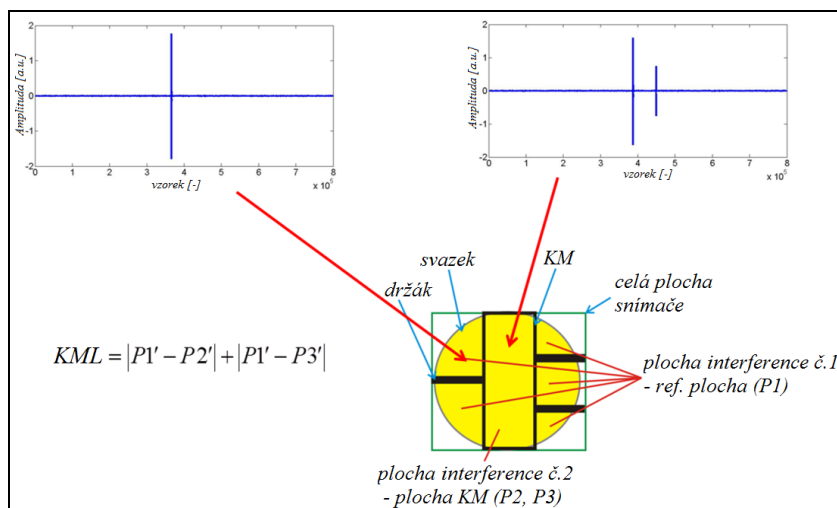
Jedním z cílů bylo fázově spojitě zpracování signálu z laserových interferometrů (tzv. „laserových pravítek“). Snahou byla automatizace „rozhodovacího kroku“ na počátku měření, kdy je třeba rozhodnout, zda jsou dané signály ve fázové shodě $< 2\pi$. Tato skutečnost jednak ukazuje na vhodné sesouhlasení měřicích svazků před vlastním měřením a současně garantuje použitelnost získaného výsledku.

Klíčovou částí algoritmu pro zpracování výsledků měření délky KM je vhodná interpretace naměřených hodnot, označovaných v popisu měřicího systému jako měřicí polohy P1, P2 a P3. Jejich význam připomíná obrázek 3.1.4 – 1, přičemž měřicí poloha P1 je měřena fotodetektory umístěnými mimo oblast měřky (v celém záznamu je pouze jediný bílý interferenční proužek) a měřicí polohy P2 a P3 jsou měřeny fotodetektory umístěnými v oblasti KM – v záznamu je dvojice bílých interferenčních proužků, odpovídajících rovnovážnému stavu interferometru při odrazu měřicího svazku postupně od obou měřicích ploch KM.

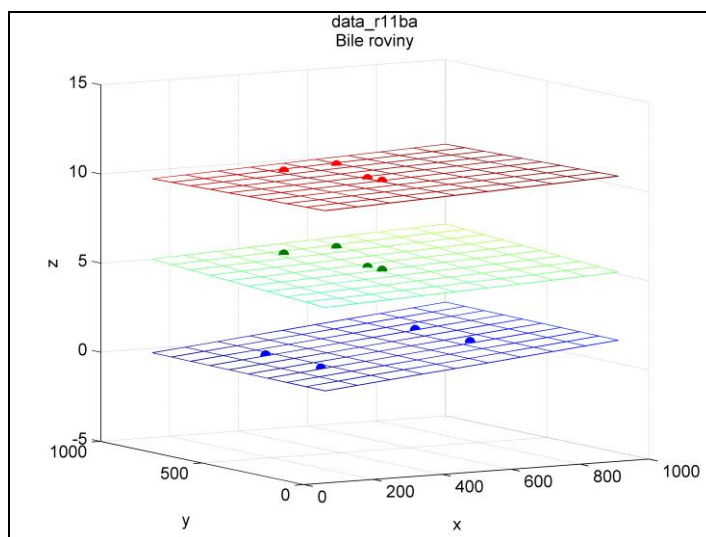
Přestože byla z hlediska teoretického popisu řeč vždy jen o jediné měřicí pozici P1, P2 respektive P3, v reálném záznamu jsou při vícebodovém měření též měřicí pozice zjištěny odchylky mezi jednotlivými body. Tyto odchylky jsou zapříčiněny jednak neideální vlnoplochou svazku („řez“ měřicího svazku není ideální rovina, ale rovina deformovaná v důsledku například neideální rovinnosti optických komponent) a samozřejmě i neideální paralelitou a rovinností měřicích ploch KM.

Z tohoto důvodu bylo potřeba k měřeným hodnotám přistoupit nikoli jako k prosté trojici bodů, ale v každé měřicí poloze jako k souboru bodů, jimiž je třeba vhodně proložit rovinu a měřicí polohu pro výpočet délky KM vhodně dopočítat.

Právě vhodné proložení rovin a spolehlivé vyřazení chybně detekovaných měřicích bodů je základem přesného stanovení délky KM. Proložení rovin změřenými body ilustruje obrázek 3.1.4 – 2.



Obr. 3.1.4 – 1 Ukázka měřených signálů P1 (mimo oblast KM, v celém záznamu pouze jeden bílý interferenční proužek) a P2 a P3 (v oblasti KM, v celém záznamu je dvojice bílých interferenčních proužků, odpovídajících rovnovážnému stavu interferometru při odrazu měřicího svazku postupně od obou měřicích ploch KM) [54]

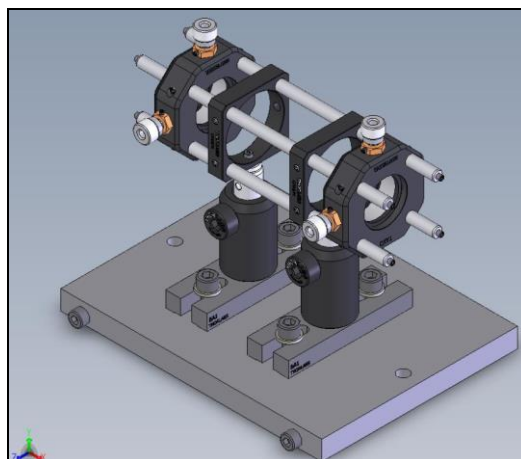


Obr. 3.1.4 – 2 Ukázka proložení rovin změřenými body v měřicích polohách P1 (modrá), P2 (zelená) a P3 (červená) [54]

3.1.5 Nová konstrukce kolimační jednotky pro NKT (bílý) laser

Pro zvýšení spolehlivosti optické sestavy byla optimalizovaná kolimační jednotka, zajišťující navázání širokospektrálního záření NKT laseru do optického vlákna na vstupu experimentální sestavy. Jednotka je nově konstruována v podobě klecového uspořádání s využitím komponentů Thorlabs (obr. 3.1.5 – 1).

Změna uspořádání vede ke zvýšení mechanické stability kolimační jednotky, která je v přímém vztahu s dlouhodobou stabilitou spektra širokopásmového měřicího svazku.



Obr. 3.1.5 – 1 3D model kolimační jednotky [54]

3.1.6 Analýza možnosti využití paralelní optiky

Při realizaci optimalizace systému a jeho experimentální sestavy byly použity klínové nepolarizující děliče laserového svazku a odpovídající kompenzační elementy. Důvodem pro použití klínových optických komponentů bylo především potlačení nežádoucích odrazů měřicího svazku na nereflexních (tzv. zadních) stranách děličů svazku, potažmo i na odpovídajících plochách kompenzačních elementů.

Velkou nevýhodou použití klínových optických komponentů, byla však vysoká náročnost optimálního nastavení experimentální sestavy. Klínové komponenty ve srovnání s rovinnými rozšiřují nároky na nastavení o dva stupně volnosti, jmenovitě o natočení elementu kolem středu a jeho příčný posun vůči ose svazku.

Na základě zkušeností s reálnými úrovněmi signálů na výstupu experimentální sestavy byla experimentálně ověřena možnost použití rovinných optických elementů. Cílem bylo významně zjednodušit proces nastavení experimentální sestavy při zachování vysoké úrovně kontrastu detekovaných signálů.

Nejprve byly realizovány experimenty při použití rovinných optických elementů s antireflexními vrstvami, které prokázaly, že vliv zpětných odrazů na rovinných optických komponentech s ohledem na měřený signál není významný, zhoršení poměru signál/šum ani jiná forma nežádoucích efektů nebyly měřením zjištěny.

Dále byla prověřena možnost použití rovinných optických elementů bez antireflexních vrstev. Důvodem bylo odstranění nejistoty měření ve vzájemném fázovém posunu jednotlivých složek spektra měřicího svazku vzniklým průchodem svazku dielektrickou antireflexní vrstvou.

Z výsledků experimentů vyplynulo, že i tato varianta je při vhodném nastavení roviny polarizace záření He–Ne dobře použitelná.

3.1.7 Úpravy řídicích programů systému

V rámci optimalizace vznikl řídicí program pro aktivní stabilizaci polohy KM v systému, jehož algoritmus je detailně popsán v podkapitole 3.1.1.

Nově byla realizována implementace algoritmu pro detekci polohy KM na unašeči a pro její řízené uložení na předem určené místo v měřicí sestavě, popsaná v podkapitole 3.1.9.

Optimalizace systému se dále týkala doplnění funkcí, ochran, indikací provozních či kolizních stavů atd. na základě praktických zkušeností při reálných měření sérií KM.

3.1.8 Úpravy mechanických částí podavače KM

Provedené série experimentálních měření KM prověřily mimo jiné i konstrukci automatického podavače KM.

Vedle drobných seřizovacích zásahů bylo přistoupeno i k výrobě nového mechanického dílu – unašeče KM. Původní díl byl nahrazen dílem novým s vhodnější povrchovou úpravou, zajišťující lepší stabilitu KM při transportu (byl odstraněn nežádoucí příčný náklon způsobený mechanickou konstrukcí původního unašeče).

Dále byly nově vyrobeny protikusy uložení PZT šroubů v držáku KM. Nově vyrobené díly zajišťují bezvúlový styk kuliček PZT šroubů a části podavače, na niž dosedá měřená KM.

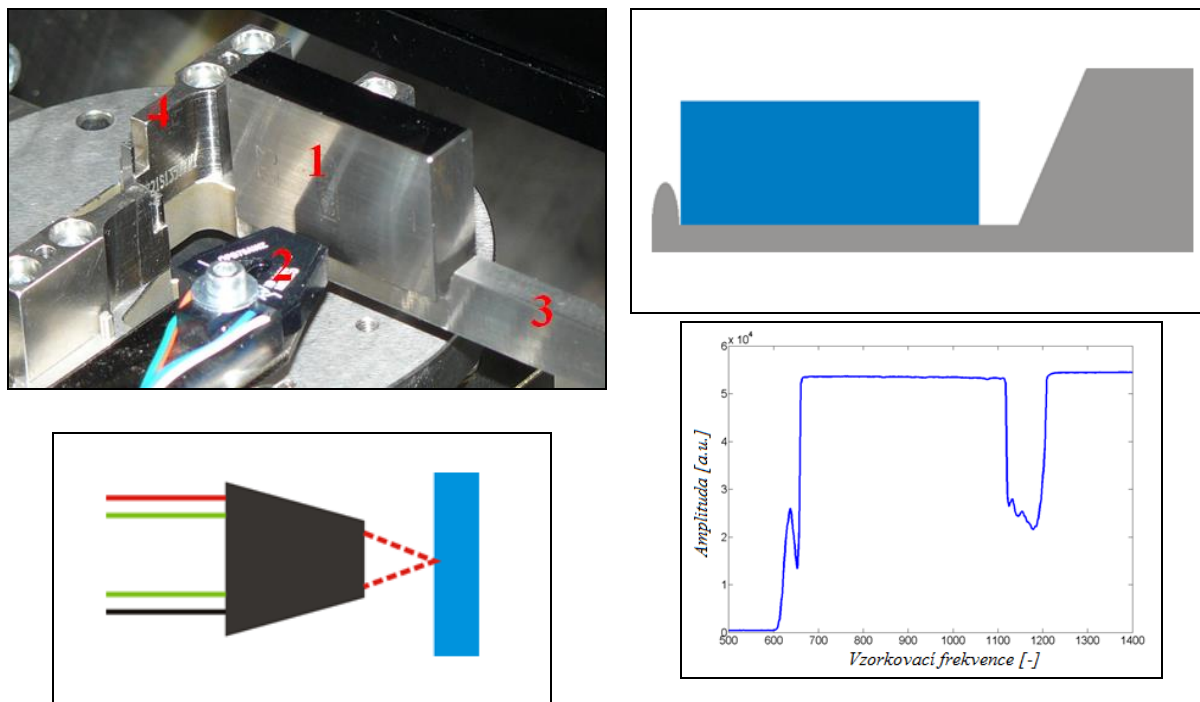
Výsledným efektem je pak vyšší celková robustnost držáku KM ve srovnání s jeho předchozí verzí.

3.1.9 Návrh a realizace systému pro řízení polohy uložení KM v měřicí sestavě

Z hlediska opakovatelnosti měření délky KM je jednou ze základních podmínek schopnost automatického podavače založit měřenou KM co nejpřesněji na určené místo v optické sestavě. V původním návrhu systému bylo počítáno se zakládáním KM do optické sestavy pouze na základě údaje o aktuální poloze příslušného motoru, získané prostřednictvím integrovaného enkodéru. Toto řešení se v praxi bohužel ukázalo jako nedostatečné a to především z důvodu přítomnosti mechanických vůlí v konstrukci pohonu unašeče KM a ve specifických případech pak i z důvodu prokluzu spojkových systémů při zakládání KM do měřicí sestavy. Hlavním problémem v zakládání KM na určenou polohu byla skutečnost, že jednotlivé pozice v zásobníku podavače jsou optimalizovány pro rozměr KM 9 x 35 mm. V případě KM s rozměr KM 9 x 30 mm dochází v průběhu posuvu KM v podavači k jejich posuvu ve vymezeném prostoru a to v řádu jednotek milimetrů. Po usazení na unašeč pak může být kratší (9 x 30 mm) KM posunuta až o 5 mm vůči předpokládané (ideální) poloze. Daná situace pak znamená, že i v bezvúlovém mechanickém systému je polohování KM na určenou pozici pouze z údaje o aktuální poloze motoru nedostatečné.

Tento problém byl vyřešen rozšířením původního systému o optický snímač polohy KM na unašeči, transportujícím KM do optické sestavy. Optický snímač a jeho umístění je zachyceno na obrázku 3.1.9 – 1. Použitý optický snímač představuje kombinaci zdroje záření a fotodetektoru, který zaznamenává míru zdrojem vyzářeného světla, odraženého od objektu před snímačem. Signál z fotodetektoru je prostřednictvím komunikační karty předáván přes sběrnici CAD do počítače a zpracován řídicím softwarem tak, jak je naznačeno na obrázku 3.1.9 – 1. Ze získaného signálu je určena vzájemná vzdálenost unašeče a měřicích ploch KM. Na základě zjištěné vzdálenosti je aktualizována cílová pozice pro dojezd unašeče tak, aby respektovala aktuální polohu KM a aby bylo zajištěno její uložení na určené místo v optické

sestavě. Experimentálně bylo ověřeno, že takto řešený polohovací systém zajistí opakovatelnost uložení KM menší než 0,1 mm.



Obr. 3.1.9 – 1 KM – 1, optická závora – 2, unašeč – 3, držák KM – 4 KM; Obrázek zachycuje reálné umístění optického snímače (vlevo nahoře) a schematiky pak i jeho funkci (vlevo dole).

V pravé části obrázku je pak schematiky zakreslena možná poloha KM na unašeči a odpovídající signál, získaný z optického snímače, který umožňuje jednoznačně detekovat vzdálenost čela unašeče a měřicí plochy transportované KM [54]

3.2 NEJISTOTA MĚŘENÍ PRO BEZKONTAKTNÍ SYSTÉM

Předpokladem pro zavedení a fungování nového systému pro měření délky KM pro přímé potřeby ČMI je nejen jeho správné nastavení, ale i určení nejistoty, která musí být vždy uvedena k výsledku měření.

Tato podkapitola vysvětluje, jakým způsobem byla nejistota určena, z čeho se vycházelo a jak se postupovalo při stanovení hodnot k jednotlivým zdrojům nejistot, ke kombinované standardní nejistotě a výsledné rozšířené nejistotě měření pro daný systém. Podkapitola navazuje přímo na podkapitolu 2.3 Nejistoty měření.

Při sestavování nejistoty měření se postupovalo v souladu s dokumenty [1], [4], [5], [40], [45], [49], [50].

3.2.1 Popis stanovení nejistoty měření pro bezkontaktní systém

Aby mohla být stanovena nejistota pro daný systém, bylo nutné realizovat řadu experimentů včetně simulací podmínek měření (extrémní podmínky).

Experimenty na měřicím systému byly prováděny nejprve v laboratorních prostorách a podmínkách ÚPT Brno a posléze v ČMI OI Liberec. Simulační experimenty byly realizovány na TUL. Cílem simulací bylo zjistit výsledky pro různá vstupní data, která mohou vzniknout při práci se systémem.

Vyhodnocení dosažených výsledků z realizovaných experimentů bylo provedeno s ohledem na teoretické poznatky v předchozích kapitolách na TUL (zejména pak v kapitole 2.3 Nejistota měření).

Smyslem realizace experimentů bylo co nejpresněji stanovit výslednou nejistotu měření pro daný systém.

Metodika výpočtu nejistoty měření pro bezkontaktní systém

Následující body představují metodický návod, jak postupovat při výpočtu nejistoty měření pro měřicí systém:

1. Byla matematicky vyjádřena závislost měřené veličiny (výstupní veličiny – délky KM) Y na vstupních veličinách X_i ve tvaru daném vztahem (2.3.1–1).
2. Byly identifikovány a provedeny všechny významné korekce.
3. Byl sestaven seznam všech zdrojů nejistot v podobě analýzy nejistot.
4. V souladu s podkapitolou 2.3.2.1 této práce byla stanovena standardní nejistota $u(q)$ pro opakovaně měřenou veličinu – stanovení nejistoty typu A.
5. Pro jednu hodnotu (jako byly např. výsledky z předchozích měření, hodnoty převzaté z literatury), bylo použito hodnot standardní nejistoty z téhož zdroje nebo byla vypočtena z údajů dle podkapitoly 2.3.2.2 Stanovení nejistoty typu B – bod 1. Pokud nebyly k dispozici žádné údaje, ze kterých by bylo možné hodnotu nejistoty odvodit, vyjádřila se hodnota nejistoty $u(x_i)$ na základě odborné zkušenosti.
6. Pokud byly známy pouze horní a dolní meze hodnot, byly vypočteny standardní nejistoty $u(x_i)$ dle podkapitoly 2.3.2.2 Stanovení nejistoty typu B – bod 2.

7. Pro každou vstupní veličinu X_i byl vypočten pomocí vztahů (2.3.2–10) a (2.3.2–11) její příspěvek $u_i(y)$ k nejistotě výstupní veličiny stanovené z hodnot vstupních veličin. Druhá mocnina standardní nejistoty $u(y)$ byla stanovena jako součet druhých mocnin příspěvků od jednotlivých vstupních veličin dle vztahu (2.3.2–9).
8. Rozšířená nejistota U byla vypočtena vynásobením standardní nejistoty $u(y)$ odhadu výstupní veličiny koeficientem rozšíření k , který byl stanoven v souladu s podkapitolou 2.3.2.4 této práce.

3.2.2 Podmínky měření a příprava KM

Informace o podmínkách měření a přípravě KM jsou uvedeny v kapitole 3. Experimentální část.

V měřicím systému je využíváno k měření teploty 4 teploměrů s odporovými čidly PT 100. Dva patří mezi významné (označené dále v textu teploměr/1 a teploměr/2), přispívající k výsledné nejistotě měření – jsou používány k měření teploty indexu lomu vzduchu a KM. Dva nepatří mezi významné, nepřispívají k výsledné nejistotě měření – jsou umístěny na litinové desce a slouží pouze k monitorování teploty na desce, resp. slouží ke kontrole, zda nedošlo k překročení stanovených limitních podmínek.

3.2.3 Stanovení nejistoty měření pro bezkontaktní systém

Matematický model

Matematický model, vyjadřuje vztah mezi měřenou veličinou – středovou délkou KM a vstupními veličinami, na které délka KM závisí.

Měřená středová délka KM je tedy funkcí všech veličin, které mohou přispívat významnou složkou nejistoty k výsledku měření. Matematicky lze tuto závislost vyjádřit vztahem:

$$l_c = [(x_{12} + F_{12}) + (x_{13} + F_{13})] \cdot \frac{\lambda_v}{2 \cdot n_{vzd}} \cdot (1 + \alpha \cdot \delta t), \quad (3.2.3-1)$$

kde je l_c středová délka měřené KM při laboratorní teplotě 20 °C, α hodnota teplotního součinitele délkové roztažnosti měřené KM, $\delta t = (t - t_m)$, t teplota měřené KM, t_m referenční teplota 20 °C, x_{12} a x_{13} počet celých polovin vlnových délek laseru mezi měřicími body P1, P2 a P1, P3, F_{12} a F_{13} zlomková část vlny mezi měřicími body P1, P2 a P1, P3, λ_v vlnová délka laseru ve vakuu, n_{vzd} index lomu vzduchu v místě měření.

Seznam zdrojů nejistot

Seznam zdrojů nejistot, které přispívají k výsledné nejistotě měření bezkontaktního systému, vycházel z experimentálních měření na měřicím systému, z významných publikací [10, 11, 13, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 26, 30, 31, 32, 34, 39], praktických zkušeností v oblasti interferenčního měření a práce s lasery.

Zdroje nejistot byly rozděleny do dvou základních kategorií – zdroje, u kterých byla standardní nejistota získána ze statistické analýzy řady měření a zdroje, kde standardní nejistota byla určena jinými metodami než statistickou analýzou.

První kategorie obsahuje pouze jeden zdroj. Jedná se o rozptyl měřené hodnoty délky KM. Jeho hodnota byla určena podle podkapitoly 2.3 – 2.3.2.1 Stanovení nejistoty typu A.

Druhá kategorie obsahuje 9 podkategorií. Jedná se o zdroje, u kterých byla hodnota standardní nejistoty určena dle podkapitoly 2.3 – 2.3.2.2 Stanovení nejistoty typu B. Tyto zdroje byly rozděleny následovně:

1. Vlnová délka laseru za podmínek měření.
 - a) Vlivy působící na hodnotu vlnové délky laseru za podmínek měření.
 - Vliv atmosférického tlaku na vlnovou délku laseru.
 - Vliv teploty na vlnovou délku laseru.
 - Vliv relativní vlhkosti na vlnovou délku laseru.
 - Vliv koncentrace CO_2 na vlnovou délku laseru.
 - b) Vliv způsobu výpočtu vlnové délky dle Edlénovy rovnice.
2. Velikost zdroje.
3. Aberace optické soustavy.
4. Rovinnost a rovnoběžnost měřené plochy KM.
5. Určení středu bílého interferenčního proužku.
6. Určení zlomku červeného proužku.
7. Korekce změny fáze laseru.
8. Kosinova chyba.
 - a) Pevně umístěná polopropustná zrcadla ve vzdálenosti 400 mm.
 - b) Úhlová chyba vložení KM do sestavy.
 - c) Divergence svazku.
9. Vliv teploty.
 - a) Korekce délky KM vzhledem k 20 °C.
 - b) Vliv změny teploty na základní litinovou desku – posun optických komponent.
 - c) Vliv změny teploty na základní litinovou desku – posun mechanických komponent.
 - d) Vliv nejistoty teplotního součinitele délkové roztažnosti KM.

Pro každý zdroj byla příslušná standardní nejistota $u(x_i)$ určena na základě všech dostupných informací (hodnoty převzaté z literatury, výsledky z předchozích měření, hodnoty z kalibračních listů komponent, atd.) o možné variabilitě veličiny X_i .

Výsledná standardní nejistota hodnoty výstupní veličiny $u_i(y)$ byla stanovena ze standardní nejistoty vstupní veličiny $u(x_i)$, dané vztahem:

$$u_i(y) = u(x_i) \times c_i, \quad (3.2.3-2)$$

kde c_i je koeficient citlivosti odpovídající hodnoty x_i vstupní veličiny.

Koeficienty citlivosti uvedené dále v textu vysvětlují, jak se výstupní veličina (délka KM) mění v závislosti na změnách příslušných hodnot vstupní veličiny $u(x_i)$. Hodnoty koeficientů citlivosti byly stanoveny experimentálně nebo převzaty z literatury.

Hodnoty výsledných standardních nejistot a citlivostních koeficientů byly určeny tak, aby mohla být dosazována jmenovitá délka KM l_n do vztahu pro výpočet kombinované nejistoty (3.2.3 – 16) v milimetrech a výsledná hodnota rozšířené nejistoty měření byla

v nanometrech, např. koeficient citlivosti c_{l2} převádí výslednou hodnotu délky na nm, při zadání teploty vzduchu ve °C a jmenovité délky KM l_n v mm.

3.2.3.1 Stanovení standardní nejistoty vztahující se ke vstupní veličině X_i získané ze statistické analýzy série pozorování (nejistota typu A)

1. Rozptyl měřené hodnoty délky KM $u(A)$

V rámci hodnocení standardní nejistoty typu A bylo navrženo provést $n = 10$ nezávislých opakovaných měření délky KM (jedná se o opakované měření v rámci umístění KM do měřicí polohy). Pokud bude výběrová směrodatná odchylka $s(A)$ z opakovaných měření v intervalu do $s(A_{max})=35 \text{ nm}$, je započítaná do nejistoty měření tato hodnota. Hodnota $s(A_{max})$ je maximální hodnota, která byla určena na základě dlouhodobého experimentálního měření v rámci zavedení bezkontaktního systému do ČMI. V případě, že bude tato hodnota překročena, měření délky KM bude opakováno – opět 10 měření. Hodnota výběrové směrodatné odchylky musí být v daném intervalu. Výpočet výběrové směrodatné odchylky se řídí dle vztahu (2.3.5), kapitola 2.3.

Výsledná standardní nejistota měřené délky KM $u(A)$ byla určena ze vztahu:

$$u_A(l) = u(A) \times c_A,$$

kde $u(A)$ je standardní nejistota měřené délky KM a c_A koeficient citlivosti odpovídající měřené délce KM.

Veličina $u(A)$ vyplývá z výběrové směrodatné odchylky $s(A_{max})=35 \text{ nm}$, stanovené na základě dlouhodobého měření délky KM a počtu opakovaných měření $n=10$:

$$u(A) = \frac{35 \text{ nm}}{\sqrt{10}}.$$

Navržení 10ti nezávislých opakovaných měření délky KM vychází z testování bezkontaktního systému v laboratorních podmínkách ČMI. Výsledky bylo prokázáno, že při realizaci 10ti nezávislých opakovaných měření délky KM, dochází k zachycení více méně všech vlivů, které na měření délky KM působí.

Hodnota c_A byla rovna hodnotě 1.

Výsledná standardní nejistota měřené délky KM (rozptyl měřené hodnoty délky KM) je:

$$u_A(l) = \frac{35 \text{ nm}}{\sqrt{10}} \times 1 = 11,068 \text{ nm}.$$

3.2.3.2 Stanovení standardní nejistoty vztahující se ke vstupní veličině X_i jiným způsobem než statistickou analýzou série pozorování (nejistota typu B)

1. Vlnová délka laseru za podmínek měření (λ)

Výsledná standardní nejistota vlnové délky laseru $u_\lambda(l)$ byla určena ze vztahu (3.2.3–2):

$$u_\lambda(l) = u(\lambda) \times c_\lambda,$$

kde $u(\lambda)$ je standardní nejistota vlnové délky laseru a c_λ koeficient citlivosti odpovídající vlnové délce laseru.

Veličina $u(\lambda)$ vyplývá z nejistoty vlnové délky laseru (červený He–Ne stabilizovaný laser s vlnovou délkou 633 nm) $U_\lambda = 2 \times 10^{-5} \text{ nm}$ převzaté z kalibračního listu a koeficientu rozšíření $k = 2$:

$$u(\lambda) = \frac{U_\lambda}{k} = \frac{2 \times 10^{-5} \text{ nm}}{2} = 1 \times 10^{-5} \text{ nm}.$$

Hodnota c_λ byla vypočtena jako podíl počtu vln, které jsou obsaženy na 1 mm délky, stanovené dle:

$$\frac{1 \text{ mm}}{633 \text{ nm}} = \frac{1000000 \text{ nm}}{633 \text{ nm}} = 1579,80 \frac{\text{vln}}{\text{mm}} \approx 1580 \frac{\text{vln}}{\text{mm}} = 1580 \frac{1}{\text{mm}} \quad (3.2.3-3)$$

a jmenovité délky KM l_n v mm:

$$c_\lambda = 1580 \frac{1}{\text{mm}} \times l_n.$$

Výsledná standardní nejistota vlnové délky laseru je:

$$u_\lambda(l) = 1 \times 10^{-5} \text{ nm} \times 1580 \frac{1}{\text{mm}} \times l_n = 0,016 \frac{\text{nm}}{\text{mm}} \times l_n.$$

a) Vlivy působící na hodnotu vlnové délky laseru za podmínek měření

V rámci interferenčního měření je nutné znát s maximální přesností hodnotu indexu lomu vzduchu a to z důvodu, že se vlnová délka laseru mění s jeho hodnotou. Index lomu vzduchu je definován vztahem (2.1.4–3) v podkapitole 2.1 – 2.1.4.

Index lomu vzduchu je možné stanovit pomocí dvou obecných postupů, které jsou uvedeny v podkapitole 2.1.4. První je nepřímý založený na měření parametrů atmosféry a následném výpočtu dle tzv. Edlénových formulí. Druhý postup využívá přímého měření indexu pomocí refraktometru.

V případě bezkontaktního měřicího systému byl index lomu vzduchu stanoven dle prvního uvedeného postupu – nepřímo s využitím modifikované Edlénovy rovnice (2.1.4–5) podle Bönsche a Potulského [15] a znalostí laboratorních podmínek měření (teplota t , atmosférický tlak p , relativní vlhkost H a koncentrace oxidu uhličitého CO_2 x).

Byla vytvořena metodika pro stanovení hodnoty indexu lomu vzduchu. Cílem metodiky bylo zjišťování o kolik se mění hodnota indexu lomu vzduchu při změně podmínek prostředí (změna teploty t , atmosférického tlaku p , relativní vlhkosti H a koncentraci oxidu uhličitého – CO_2 x). Metodika byla založena na simulaci podmínek prostředí při měření délky KM v laboratorních podmínkách při změně jednoho sledovaného parametru např. atmosférického tlaku a zachování hodnot ostatních parametrů – teplota, relativní vlhkost a koncentrace CO_2 . V rámci simulace bylo vždy dosazeno 10 po sobě jdoucích hodnot sledovaného parametru.

Vliv atmosférického tlaku na vlnovou délku laseru

Výpočet hodnoty indexu lomu vzduchu při změně atmosférického tlaku vychází z výše uvedené metodiky na simulaci podmínek prostředí při měření délky KM v laboratorních podmínkách. Z vypočtených hodnot uvedených v tabulce 3.2.3 – 2 bylo zjištěno, že hodnota indexu lomu vzduchu se mění o $2,684 \times 10^{-8}/10 \text{ Pa}$, respektive $2,684 \times 10^{-9}/\text{Pa}$.

Změna hodnoty vlnové délky laseru $\Delta\lambda_p$ při změně atmosférického tlaku o 1 Pa byla stanovena dle vztahu:

$$\Delta\lambda_p = \lambda_0 \times 2,684 \times 10^{-9} \frac{nm}{Pa} = 1,699 \times 10^{-6} \frac{nm}{Pa}, \quad (3.2.3-6)$$

kde je λ_0 vlnová délka laseru ve vakuu (633 nm).

Pro výpočet změny hodnoty indexu lomu vzduchu při změně atmosférického tlaku se vycházelo ze základní hodnoty $p = 101325$ Pa. Hodnoty byly postupně po 10 Pa navyšovány (vycházelo se ze zkušeností při laboratorních interferenčních měření).

Změna indexu lomu vzduchu při postupné změně atmosférického tlaku po 10 Pa byla zaznamenána do tabulky 3.2.3 – 1.

Tabulka 3.2.3 – 1 Změna indexu lomu vzduchu při postupné změně atmosférického tlaku

Počet měření	Atmosférický tlak [Pa]	Index n [–]	Změna indexu [–]
1	101325	1,000271365	
2	101335	1,000271392	$-2,68351 \times 10^{-8}$
3	101345	1,000271418	$-2,68352 \times 10^{-8}$
4	101355	1,000271445	$-2,68352 \times 10^{-8}$
5	101365	1,000271472	$-2,68352 \times 10^{-8}$
6	101375	1,000271499	$-2,68352 \times 10^{-8}$
7	101385	1,000271526	$-2,68352 \times 10^{-8}$
8	101395	1,000271553	$-2,68352 \times 10^{-8}$
9	101405	1,000271579	$-2,68352 \times 10^{-8}$
10	101415	1,000271606	$-2,68352 \times 10^{-8}$

Jako referenční podmínky byly použity: vlnová délka laseru $\lambda = 633$ nm, relativní vlhkost $H = 50$ %, atmosférický tlak vzduchu $p = 101325$ Pa, teplota prostředí $t = 20$ °C, koncentrace CO_2 $x = 500$ ppm.

Změna hodnoty indexu lomu vzduchu vzniklá při změně atmosférického tlaku ovlivní hodnotu vlnové délky laseru a tím výslednou hodnotu změřené středové délky KM. Hodnota změřené délky KM je tedy závislá na změně atmosférického tlaku. Proto byl k danému příspěvku zaveden koeficient citlivosti – c_p .

Hodnota c_p byla vypočtena jako součin hodnoty $\Delta\lambda_p$ stanovené dle vztahu (3.2.3–4), počtu vln, které jsou obsaženy na 1 mm délky a jmenovité délky KM l_n , stanovené dle vztahu (3.2.3–3):

$$c_p = \Delta\lambda_p \frac{nm}{Pa} \times \frac{1580}{mm} \times l_n = 2,684 \times 10^{-3} \frac{nm}{Pa \times mm} \times l_n. \quad (3.2.3-5)$$

V měřicím systému je využíváno k měření atmosférického tlaku tlakoměru s označením Vaisala PTU 303 od renomovaného finského výrobce Vaisala. Uvedený tlakoměr přispívá k nejistotě hodnoty výstupní veličiny (délky KM) třemi vlivy, tj. svým rozlišením, chybou a nejistotou měření.

Rozlišení tlakoměru – Vaisala PTU 303 (r_p)

Výsledná standardní nejistota rozlišení použitého tlakoměru $u_{rp}(l)$ byla určena ze vztahu:

$$u_{rp}(l) = u(r_p) \times c_p,$$

kde $u(r_p)$ je standardní nejistota rozlišení tlakoměru a c_p koeficient citlivosti odpovídající atmosférickému tlaku vzduchu.

Veličina $u(r_p)$ vyplývá z rozlišení tlakoměru $R_p = 10 \text{ Pa}$ (dané přístrojem) a koeficientu rozšíření $k = \sqrt{3}$:

$$u(r_p) = \frac{R_p}{k} = \frac{10 \text{ Pa}}{\sqrt{3}}.$$

Koeficient citlivosti c_p byl stanoven dle vztahu (3.2.3–5).

Výsledná standardní nejistota rozlišení tlakoměru Vaisala PTU 303 je:

$$u_{rp}(l) = \frac{10 \text{ Pa}}{\sqrt{3}} \times 2,684 \times 10^{-3} \frac{\text{nm}}{\text{Pa} \times \text{mm}} \times l_n = 0,016 \frac{\text{nm}}{\text{mm}} \times l_n.$$

Chyba tlakoměru – Vaisala PTU 303 (e_p)

Výsledná standardní nejistota chyby použitého tlakoměru $u_{ep}(l)$ byla určena ze vztahu:

$$u_{ep}(l) = u(e_p) \times c_p,$$

kde $u(e_p)$ je standardní nejistota chyby tlakoměru a c_p koeficient citlivosti odpovídající atmosférickému tlaku vzduchu.

Veličina $u(e_p)$ vyplývá z chyby tlakoměru $E_p = 12 \text{ Pa}$ převzaté z kalibračního listu a koeficientu rozšíření $k = \sqrt{3}$:

$$u(e_p) = \frac{E_p}{k} = \frac{12 \text{ Pa}}{\sqrt{3}}.$$

Koeficient citlivosti c_p byl stanoven dle vztahu (3.2.3–5).

Výsledná standardní nejistota chyby tlakoměru Vaisala PTU 303 je:

$$u_{ep}(l) = \frac{12 \text{ Pa}}{\sqrt{3}} \times 2,684 \times 10^{-3} \frac{\text{nm}}{\text{Pa} \times \text{mm}} \times l_n = 0,019 \frac{\text{nm}}{\text{mm}} \times l_n.$$

Nejistota měření tlakoměru – Vaisala PTU 303 (n_p)

Výsledná standardní nejistota použitého tlakoměru $u_{np}(l)$ byla určena ze vztahu:

$$u_{np}(l) = u(n_p) \times c_p,$$

kde $u(n_p)$ je standardní nejistota tlakoměru a c_p koeficient citlivosti odpovídající atmosférickému tlaku vzduchu.

Veličina $u(n_p)$ vyplývá z nejistoty tlakoměru $U_{np} = 20 \text{ Pa}$ převzaté z kalibračního listu a koeficientu rozšíření $k = 2$:

$$u(n_p) = \frac{U_{np}}{k} = 10 \text{ Pa}.$$

Koeficient citlivosti c_p byl stanoven dle vztahu (3.2.3–5).

Výsledná standardní nejistota tlakoměru Vaisala PTU 303 je:

$$u_{np}(l) = 10 \text{ Pa} \times 2,684 \times 10^{-3} \frac{\text{nm}}{\text{Pa} \times \text{mm}} \times l_n = 0,027 \frac{\text{nm}}{\text{mm}} \times l_n.$$

Vypočtené hodnoty jednotlivých standardních nejistot, kterými přispívá tlakoměr Vaisala PTU 303 k nejistotě výstupní veličiny – délky KM, jsou uvedeny pro přehlednost v tabulce 3.2.3 – 2.

Tabulka 3.2.3 – 2 Vypočtené hodnoty standardních nejistot – tlakoměr Vaisala PTU 303

Veličina	Příspěvek k nejistotě $u_i(l)$
Rozlišení tlakoměru – Vaisala PTU 303 – r_p	$u_{rp}(l)=0,016\frac{nm}{mm} \times l_n$
Chyba tlakoměru – Vaisala PTU 303 – e_p	$u_{ep}(l)=0,019\frac{nm}{mm} \times l_n$
Nejistota měření tlakoměru – Vaisala PTU 303 – n_p	$u_{np}(l)=0,027\frac{nm}{mm} \times l_n$

Vliv teploty na vlnovou délku laseru

Výpočet hodnoty indexu lomu vzduchu při změně teploty vychází z výše uvedené metodiky na simulaci podmínek prostředí při měření délky KM v laboratorních podmínkách. Z vypočtených hodnot uvedených v tabulce 3.2.3 – 3 bylo zjištěno, že hodnota indexu lomu vzduchu se mění o $9,55 \times 10^{-9}/0,01 \text{ } ^\circ\text{C}$, respektive $9,55 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$.

Změna hodnoty vlnové délky laseru $\Delta\lambda_t$ při změně teploty o $1 \text{ } ^\circ\text{C}$ byla stanovena dle vztahu:

$$\Delta\lambda_t = \lambda_0 \times 9,55 \times 10^{-7} \frac{nm}{^\circ\text{C}} = 1,699 \times 10^{-6} \frac{nm}{^\circ\text{C}}, \quad (3.2.3-6)$$

kde je λ_0 vlnová délka laseru ve vakuu (633 nm).

Pro výpočet změny hodnoty indexu lomu vzduchu při změně teploty se vycházelo od základní hodnoty $t = 20,00 \text{ } ^\circ\text{C}$. Hodnoty byly postupně po $0,01 \text{ } ^\circ\text{C}$ navyšovány (vycházelo se ze zkušeností při laboratorních interferenčních měření).

Změna indexu lomu vzduchu při postupné změně teploty po $0,01 \text{ } ^\circ\text{C}$ byla zaznamenána do tabulky 3.2.3 – 3.

Tabulka 3.2.3 – 3 Změna indexu lomu vzduchu při postupné změně teploty

Počet měření	Teplota [$^\circ\text{C}$]	Index n [–]	Změna indexu [–]
1	20,00	1,000271365	
2	20,01	1,000271355	$9,55197 \times 10^{-9}$
3	20,02	1,000271346	$9,55146 \times 10^{-9}$
4	20,03	1,000271336	$9,55096 \times 10^{-9}$
5	20,04	1,000271327	$9,55045 \times 10^{-9}$
6	20,05	1,000271317	$9,54994 \times 10^{-9}$
7	20,06	1,000271307	$9,54944 \times 10^{-9}$
8	20,07	1,000271298	$9,54893 \times 10^{-9}$
9	20,08	1,000271288	$9,54843 \times 10^{-9}$
10	20,09	1,000271279	$9,54792 \times 10^{-9}$

Jako referenční podmínky byly použity: vlnová délka laseru $\lambda = 633 \text{ nm}$, relativní vlhkost $H = 50 \%$, atmosférický tlak vzduchu $p = 101325 \text{ Pa}$, teplota prostředí $t = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, koncentrace CO_2 $x = 500 \text{ ppm}$.

Změna hodnoty indexu lomu vzduchu vzniklá při změně teploty ovlivní hodnotu vlnové délky laseru a tím výslednou hodnotu změřené středové délky KM. Hodnota změřené délky KM je tedy závislá na změně teploty. Proto byl k danému příspěvku zaveden koeficient citlivosti – c_t .

Hodnota c_t byla vypočtena jako součin hodnoty $\Delta\lambda_t$ stanovené dle vztahu (3.2.3–6), počtu vln, které jsou obsaženy na 1 mm délky a jmenovité délky KM l_n , stanovené dle vztahu (3.2.3–3):

$$c_t = \Delta\lambda_t \frac{\text{nm}}{^{\circ}\text{C}} \times \frac{1580}{\text{mm}} \times l_n = 0,955 \frac{\text{nm}}{^{\circ}\text{C} \times \text{mm}} \times l_n. \quad (3.2.3-7)$$

V měřicím systému je využíváno k měření teploty teploměru s odporovými čidly PT 100 – č.1, dále značeno teploměr/1. Uvedený teploměr/1 přispívá k nejistotě hodnoty výstupní veličiny – délky KM třemi vlivy, tj. svým rozlišením, chybou a nejistotou měření.

Rozlišení teploměru/1 (r_t)

Výsledná standardní nejistota rozlišení použitého teploměru $u_{rt}(l)$ byla určena ze vztahu:

$$u_{rt}(l) = u(r_t) \times c_t,$$

kde $u(r_t)$ je standardní nejistota rozlišení teploměru a c_t koeficient citlivosti odpovídající teplotě vzduchu.

Veličina $u(r_t)$ vyplývá z rozlišení teploměru $R_t = 0,001 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (dané přístrojem) a koeficientu rozšíření $k = \sqrt{3}$:

$$u(r_t) = \frac{R_t}{k} = \frac{0,001^{\circ}\text{C}}{\sqrt{3}}.$$

Koeficient citlivosti c_t byl stanoven dle vztahu (3.2.3–7).

Výsledná standardní nejistota rozlišení teploměru je:

$$u_{rt}(l) = \frac{0,001^{\circ}\text{C}}{\sqrt{3}} \times 0,955 \frac{\text{nm}}{^{\circ}\text{C} \times \text{mm}} \times l_n = 0,001 \frac{\text{nm}}{\text{mm}} \times l_n.$$

Chyba teploměru/1 (e_t)

Výsledná standardní nejistota chyby použitého teploměru $u_{et}(l)$ byla určena ze vztahu:

$$u_{et}(l) = u(e_t) \times c_t,$$

kde $u(e_t)$ je standardní nejistota chyby teploměru a c_t koeficient citlivosti odpovídající teplotě vzduchu.

Veličina $u(e_t)$ vyplývá z chyby teploměru $E_t = 0,02 \text{ }^{\circ}\text{C}$ převzaté z kalibračního listu a koeficientu rozšíření $k = \sqrt{3}$:

$$u(e_t) = \frac{E_t}{k} = \frac{0,02^{\circ}\text{C}}{\sqrt{3}}.$$

Koeficient citlivosti c_t byl stanoven dle vztahu (3.2.3–7).

Výsledná standardní nejistota chyby teploměru je:

$$u_{et}(l) = \frac{0,02 \text{ }^{\circ}\text{C}}{\sqrt{3}} \times 0,955 \frac{\text{nm}}{^{\circ}\text{C} \times \text{mm}} \times l_n = 0,017 \frac{\text{nm}}{\text{mm}} \times l_n.$$

Nejistota teploměru/1 (n_t)

Výsledná standardní nejistota použitého teploměru $u_{nt}(l)$ byla určena ze vztahu:

$$u_{nt}(l) = u(n_t) \times c_t,$$

kde $u(n_t)$ je standardní nejistota teploměru a c_t koeficient citlivosti odpovídající teplotě vzduchu.

Veličina $u(n_t)$ vyplývá z nejistoty teploměru $U_{nt} = 0,02 \text{ }^{\circ}\text{C}$ převzaté z kalibračního listu a koeficientu rozšíření $k = 2$:

$$u(n_t) = \frac{U_{nt}}{k} = 0,01 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Koeficient citlivosti c_t byl stanoven dle vztahu (3.2.3–7).

Výsledná standardní nejistota teploměru je:

$$u_{nt}(l) = 0,01 \text{ }^{\circ}\text{C} \times 0,955 \frac{\text{nm}}{^{\circ}\text{C} \times \text{mm}} \times l_n = 0,010 \frac{\text{nm}}{\text{mm}} \times l_n.$$

Vypočtené hodnoty jednotlivých standardních nejistot, kterými přispívá teploměr/1 k nejistotě výstupní veličiny – délky KM, jsou uvedeny pro přehlednost v tabulce 3.2.3 – 4.

Tabulka 3.2.3 – 4 Vypočtené hodnoty standardních nejistot – teploměr/1

Veličina	Příspěvek k nejistotě $u_i(l)$
Rozlišení teploměru/1 – r_t	$u_{rt}(l) = 0,001 \frac{\text{nm}}{\text{mm}} \times l_n$
Chyba teploměru/1 – e_t	$u_{et}(l) = 0,017 \frac{\text{nm}}{\text{mm}} \times l_n$
Nejistota teploměru/1 – n_t	$u_{nt}(l) = 0,010 \frac{\text{nm}}{\text{mm}} \times l_n$

Vliv relativní vlhkosti na vlnovou délku laseru

Relativní vlhkost vzduchu není veličina, která by měla významný vliv na index lomu vzduchu – její důležitost je znatelná až při vysokých teplotách (více než $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$), kdy vzduch dokáže pojmout více vodní páry.

Výpočet hodnoty indexu lomu vzduchu při změně relativní vlhkosti vychází z výše uvedené metodiky na simulaci podmínek prostředí při měření délky KM v laboratorních podmínkách. Z vypočtených hodnot uvedených v tabulce 3.2.3 – 5 bylo zjištěno, že hodnota indexu lomu vzduchu se mění o $8,658 \times 10^{-9} \%$ při změně hodnoty relativní vlhkosti o 1 %.

Změna hodnoty vlnové délky laseru $\Delta\lambda_H$ při změně relativní vlhkosti o 1 % byla stanovena dle vztahu:

$$\Delta\lambda_H = \lambda_0 \times 8,658 \times 10^{-9} \frac{\text{nm}}{\%} = 5,481 \times 10^{-6} \frac{\text{nm}}{\%}, \quad (3.2.3-8)$$

kde je λ_0 vlnová délka laseru ve vakuu (633 nm).

Pro výpočet změny hodnoty indexu lomu vzduchu při změně relativní vlhkosti se vycházelo ze základní hodnoty $H = 50 \%$. Hodnoty byly postupně po 1 % navyšovány (vycházelo se ze zkušeností při laboratorních interferenčních měření).

Změna indexu lomu vzduchu při postupné změně relativní vlhkosti po 1 % byla zaznamenána do tabulky 3.2.3 – 5.

Jako referenční podmínky byly použity: vlnová délka laseru $\lambda = 633 \text{ nm}$, relativní vlhkost $H = 50 \%$, atmosférický tlak vzduchu $p = 101325 \text{ Pa}$, teplota prostředí $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, koncentrace CO_2 $x = 500 \text{ ppm}$.

Tabulka 3.2.3 – 5 Změna indexu lomu vzduchu při postupné změně relativní vlhkosti

Počet měření	Relativní vlhkost [%]	Index n [–]	Změna indexu [–]
1	50	1,000271365	
2	51	1,000271356	$8,6575 \times 10^{-9}$
3	52	1,000271347	$8,6575 \times 10^{-9}$
4	53	1,000271339	$8,6575 \times 10^{-9}$
5	54	1,00027133	$8,6575 \times 10^{-9}$
6	55	1,000271321	$8,6575 \times 10^{-9}$
7	56	1,000271313	$8,6575 \times 10^{-9}$
8	57	1,000271304	$8,6575 \times 10^{-9}$
9	58	1,000271296	$8,6575 \times 10^{-9}$
10	59	1,000271287	$8,6575 \times 10^{-9}$

Změna hodnoty indexu lomu vzduchu vzniklá při změně relativní vlhkosti ovlivní hodnotu vlnové délky laseru a tím výslednou hodnotu změřené středové délky KM. Hodnota změřené délky KM je tedy závislá na změně vlhkosti. Proto byl k danému příspěvku zaveden koeficient citlivosti – c_H .

Hodnota c_H byla vypočtena jako součin hodnoty $\Delta\lambda_H$ stanovené dle vztahu (3.2.3–8), počtu vln, které jsou obsaženy na 1 mm délky a jmenovité délky KM l_n , stanovené dle vztahu (3.2.3–3):

$$c_H = \Delta\lambda_H \frac{\text{nm}}{\%} \times \frac{1580}{\text{mm}} \times l_n = 8,659 \times 10^{-3} \frac{\text{nm}}{\% \times \text{mm}} \times l_n. \quad (3.2.3-9)$$

V měřicím systému je využíváno k měření relativní vlhkosti vlhkoměru – Vaisala PTU 303 s čidlem vlhkosti Humicap 180. Uvedený vlhkoměr přispívá k nejistotě hodnoty výstupní veličiny – délky KM třemi vlivy, tj. svým rozlišením, chybou a nejistotou měření.

Rozlišení vlhkoměru – Vaisala PTU 303 s čidlem vlhkosti Humicap 180 (r_H)

Výsledná standardní nejistota rozlišení použitého vlhkoměru $u_{rt}(l)$ byla určena ze vztahu:

$$u_{rH}(l) = u(r_H) \times c_H,$$

kde $u(r_H)$ je standardní nejistota rozlišení vlhkoměru a c_H koeficient citlivosti odpovídající relativní vlhkosti vzduchu.

Veličina $u(r_H)$ vyplývá z rozlišení vlhkoměru $R_H=0,1 \%$ (dané přístrojem) a koeficientu rozšíření $k = \sqrt{3}$:

$$u(r_H) = \frac{R_H}{k} = \frac{0,1 \%}{\sqrt{3}}.$$

Koeficient citlivosti c_H byl stanoven dle vztahu (3.2.3–9).

Výsledná standardní nejistota rozlišení vlhkoměru je:

$$u_{rH}(l) = \frac{0,1 \%}{\sqrt{3}} \times 8,659 \times 10^{-3} \frac{nm}{\% \times mm} \times l_n = 0,001 \frac{nm}{mm} \times l_n.$$

Chyba vlhkoměru – Vaisala PTU 303 s čidlem vlhkosti Humicap 180 (e_H)

Výsledná standardní nejistota chyby použitého vlhkoměru $u_{eH}(l)$ byla určena ze vztahu:

$$u_{eH}(l) = u(e_H) \times c_H,$$

kde $u(e_H)$ je standardní nejistota chyby vlhkoměru a c_H koeficient citlivosti odpovídající relativní vlhkosti vzduchu.

Veličina $u(e_H)$ vyplývá z chyby vlhkoměru $E_H=0,5 \%$ převzaté z kalibračního listu a koeficientu rozšíření $k = \sqrt{3}$:

$$u(e_H) = \frac{E_H}{k} = \frac{0,5 \%}{\sqrt{3}}.$$

Koeficient citlivosti c_H byl stanoven dle vztahu (3.2.3–9).

Výsledná standardní nejistota chyby vlhkoměru je:

$$u_{eH}(l) = \frac{0,5 \%}{\sqrt{3}} \times 8,659 \times 10^{-3} \frac{nm}{\% \times mm} \times l_n = 0,003 \frac{nm}{mm} \times l_n.$$

Nejistota měření vlhkoměru – Vaisala PTU 303 s čidlem vlhkosti Humicap 180 (n_H)

Výsledná standardní nejistota použitého vlhkoměru $u_{nH}(l)$ byla určena ze vztahu:

$$u_{nH}(l) = u(n_H) \times c_H,$$

kde $u(n_H)$ je standardní nejistota vlhkoměru a c_H koeficient citlivosti odpovídající relativní vlhkosti vzduchu.

Veličina $u(n_H)$ vyplývá z nejistoty vlhkoměru $U_{nH} = 2 \%$ převzaté z kalibračního listu a koeficientu rozšíření $k = 2$:

$$u(n_H) = \frac{U_{nH}}{k} = 1 \%.$$

Koeficient citlivosti c_H byl stanoven dle vztahu (3.2.3–9).

Výsledná standardní nejistota vlhkoměru je:

$$u_{nH}(l) = 1 \% \times 8,659 \times 10^{-3} \frac{nm}{\% \times mm} \times l_n = 0,009 \frac{nm}{mm} \times l_n.$$

Vypočtené hodnoty jednotlivých standardních nejistot, kterými přispívá vlhkoměr Vaisala PTU 303 s čidlem vlhkosti Humicap 180 k nejistotě výstupní veličiny – délky KM, jsou uvedeny pro přehlednost v tabulce 3.2.3 – 6.

Tabulka 3.2.3 – 6 Vypočtené hodnoty standardních nejistot – vlhkoměr Vaisala PTU 303 s čidlem vlhkosti Humicap 180

Veličina	Příspěvek k nejistotě $u_i(l)$
Rozlišení vlhkoměru – Vaisala PTU 303 s čidlem vlhkosti Humicap 180 – r_H	$u_{rH}(l) = 0,001 \frac{nm}{mm} \times l_n$
Chyba vlhkoměru – Vaisala PTU 303 s čidlem vlhkosti Humicap 180 – e_H	$u_{eH}(l) = 0,003 \frac{nm}{mm} \times l_n$
Nejistota měření vlhkoměru – Vaisala PTU 303 s čidlem vlhkosti Humicap 180 – n_H	$u_{nH}(l) = 0,009 \frac{nm}{mm} \times l_n$

Vliv koncentrace CO_2 na vlnovou délku laseru

Edlénova formule uvažuje o koncentraci oxidu uhličitého, jakožto plynu s poměrně velkou fluktuací a vlivem na index lomu vzduchu (koncentrace CO_2 se zvyšuje např. při dýchání).

Výpočet hodnoty indexu lomu vzduchu při změně koncentrace CO_2 vychází z výše uvedené metodiky na simulaci podmínek prostředí při měření délky KM v laboratorních podmínkách. Z vypočtených hodnot uvedených v tabulce 3.2.3 – 7 bylo zjištěno, že hodnota indexu lomu vzduchu se mění o $1,448 \times 10^{-9}/10$ ppm, resp. $1,448 \times 10^{-10}/ppm$ při změně hodnoty koncentrace CO_2 o 1 ppm.

Změna hodnoty vlnové délky laseru $\Delta\lambda_x$ při změně hodnoty koncentrace CO_2 o 1 ppm byla stanovena dle vztahu:

$$\Delta\lambda_x = \lambda_0 \times 1,448 \times 10^{-10} \frac{nm}{ppm} = 9,166 \times 10^{-8} \frac{nm}{ppm} \quad (3.2.3-10)$$

kde je λ_0 vlnová délka laseru ve vakuu (633 nm).

Pro výpočet změny hodnoty indexu lomu vzduchu při změně koncentrace CO_2 se vycházelo od základní hodnoty $x = 500$ ppm. Hodnoty byly postupně po 10 ppm navyšovány (vycházelo se ze zkušeností při laboratorních interferenčních měření).

Tabulka 3.2.3 – 7 Změna indexu lomu vzduchu při postupné změně koncentrace CO_2

Počet měření	Koncentrace CO_2 [ppm]	Index n [–]	Změna indexu [–]
1	500	1,000271365	
2	510	1,000271366	$-1,44779 \times 10^{-9}$
3	520	1,000271368	$-1,44779 \times 10^{-9}$
4	530	1,000271369	$-1,44779 \times 10^{-9}$
5	540	1,000271371	$-1,44779 \times 10^{-9}$
6	550	1,000271372	$-1,44779 \times 10^{-9}$
7	560	1,000271373	$-1,44779 \times 10^{-9}$
8	570	1,000271375	$-1,44779 \times 10^{-9}$
9	580	1,000271376	$-1,44779 \times 10^{-9}$
10	590	1,000271378	$-1,44779 \times 10^{-9}$

Změna indexu lomu vzduchu při postupné změně koncentrace CO₂ po 10 ppm byla zaznamenána do tabulky 3.2.3 – 7.

Jako referenční podmínky byly použity: vlnová délka laseru $\lambda = 633$ nm, relativní vlhkost $H = 50$ %, atmosférický tlak vzduchu $p = 101325$ Pa, teplota prostředí $t = 20$ °C, koncentrace CO₂ $x = 500$ ppm.

Změna hodnoty indexu lomu vzduchu vzniklá při změně koncentrace CO₂ ovlivní hodnotu vlnové délky laseru a tím výslednou hodnotu změřené středové délky KM. Hodnota změřené délky KM je tedy závislá na změně koncentrace CO₂. Proto byl k danému příspěvku zaveden koeficient citlivosti – c_x .

Hodnota c_x byla vypočtena jako součin hodnoty $\Delta\lambda_x$ stanovené dle vztahu (3.2.3–10) počtu vln, které jsou obsaženy na 1 mm délky a jmenovité délky KM l_n , stanovené dle vztahu (3.2.3–3):

$$c_x = \Delta\lambda_x \frac{\text{nm}}{\text{ppm}} \times \frac{1580}{\text{mm}} \times l_n = 1,448 \times 10^{-4} \frac{\text{nm}}{\text{ppm} \times \text{mm}} \times l_n. \quad (3.2.3-11)$$

V měřicím systému je využíváno k měření koncentrace CO₂ ve vzduchu převodníku koncentrace CO₂ – Vaisala GM70. Uvedený převodník přispívá k nejistotě hodnoty výstupní veličiny – délky KM třemi vlivy, tj. svým rozlišením, chybou a nejistotou měření.

Rozlišení převodníku koncentrace CO₂ – Vaisala GM70 (r_x)

Výsledná standardní nejistota rozlišení použitého převodníku koncentrace CO₂ $u_{rx}(l)$ byla určena ze vztahu:

$$u_{rx}(l) = u(r_x) \times c_x,$$

kde $u(r_x)$ je standardní nejistota rozlišení převodníku a c_x koeficient citlivosti odpovídající koncentraci CO₂ ve vzduchu.

Veličina $u(r_x)$ vyplývá z rozlišení převodníku $R_x = 10$ ppm (dané přístrojem) a koeficientu rozšíření $k = \sqrt{3}$:

$$u(r_x) = \frac{R_x}{k} = \frac{10 \text{ ppm}}{\sqrt{3}}.$$

Koeficient citlivosti c_x byl stanoven dle vztahu (3.2.3–11).

Výsledná standardní nejistota rozlišení převodníku koncentrace CO₂ je:

$$u_{rx}(l) = \frac{10 \text{ ppm}}{\sqrt{3}} \times 1,448 \times 10^{-4} \frac{\text{nm}}{\text{ppm} \times \text{mm}} \times l_n = 0,001 \frac{\text{nm}}{\text{mm}} \times l_n.$$

Chyba převodníku koncentrace CO₂ – Vaisala GM70 (e_x)

Výsledná standardní nejistota chyby použitého převodníku koncentrace CO₂ $u_{ex}(l)$ byla určena ze vztahu:

$$u_{ex}(l) = u(e_x) \times c_x,$$

kde $u(e_x)$ je standardní nejistota chyby převodníku koncentrace CO₂ a c_x koeficient citlivosti odpovídající koncentraci CO₂ ve vzduchu.

Veličina $u(e_x)$ vyplývá z chyby převodníku koncentrace CO₂ $E_x = 20$ ppm převzaté z kalibračního listu a koeficientu rozšíření $k = \sqrt{3}$:

$$u(e_x) = \frac{E_x}{k} = \frac{20 \text{ ppm}}{\sqrt{3}}.$$

Koeficient citlivosti c_x byl stanoven dle vztahu (3.2.3–13).

Výsledná standardní nejistota chyby převodníku koncentrace CO_2 je:

$$u_{ex}(l) = \frac{20 \text{ ppm}}{\sqrt{3}} \times 1,448 \times 10^{-4} \frac{\text{nm}}{\text{ppm} \times \text{mm}} \times l_n = 0,002 \frac{\text{nm}}{\text{mm}} \times l_n.$$

Nejistota měření převodníku koncentrace CO_2 – Vaisala GM70 (n_x)

Výsledná standardní nejistota použitého převodníku koncentrace CO_2 $u_{nx}(l)$ byla určena ze vztahu:

$$u_{nx}(l) = u(n_x) \times c_x,$$

kde $u(n_x)$ je standardní nejistota převodníku koncentrace CO_2 a c_x koeficient citlivosti odpovídající koncentraci CO_2 ve vzduchu.

Veličina $u(n_x)$ vyplývá z nejistoty převodníku koncentrace CO_2 $U_{nx} = 100 \text{ ppm}$ převzaté z kalibračního listu a koeficientu rozšíření $k = 2$:

$$u(n_x) = \frac{U_{nx}}{k} = 50 \text{ ppm}.$$

Koeficient citlivosti c_x byl stanoven dle vztahu (3.2.3–11).

Výsledná standardní nejistota převodníku koncentrace CO_2 je:

$$u_{nx}(l) = 50 \text{ ppm} \times 1,448 \times 10^{-4} \frac{\text{nm}}{\text{ppm} \times \text{mm}} \times l_n = 0,007 \frac{\text{nm}}{\text{mm}} \times l_n.$$

Vypočtené hodnoty jednotlivých standardních nejistot, kterými přispívá převodník koncentrace CO_2 – Vaisala GM70 k nejistotě výstupní veličiny – délky KM, jsou uvedeny pro přehlednost v tabulce 3.2.3 – 8

Tabulka 3.2.3 – 8 Vypočtené hodnoty standardních nejistot – převodník koncentrace CO_2 – Vaisala GM70

Veličina	Příspěvek k nejistotě $u_i(l)$
Rozlišení převodníku koncentrace CO_2 – Vaisala GM70 – r_x	$u_{rx}(l) = 0,001 \frac{\text{nm}}{\text{mm}} \times l_n$
Chyba převodníku koncentrace CO_2 – Vaisala GM70 – e_x	$u_{ex}(l) = 0,002 \frac{\text{nm}}{\text{mm}} \times l_n$
Nejistota měření převodníku koncentrace CO_2 – Vaisala GM70 – n_x	$u_{nx}(l) = 0,007 \frac{\text{nm}}{\text{mm}} \times l_n$

b) Vliv způsobu výpočtu vlnové délky dle Edlénovy rovnice (E)

Mezi výsledky výpočtu indexu lomu vzduchu získané použitím různých formulací Edlénovy rovnice, uvedených v podkapitole 2.1 – 2.1.4, jsou minimální rozdíly. Rozdílnost je všeobecně dána hodnotou $\Delta_n = 2 \times 10^{-8}$, což potvrzuje několik uznávaných studií i vlastní výpočty ÚPT a ČMI.

Výsledná standardní nejistota výpočtu vlnové délky dle Edlénovy rovnice $u_E(l)$ byla určena ze vztahu:

$$u_E(l) = u(E) \times c_E,$$

kde $u(E)$ je standardní nejistota výpočtu vlnové délky dle Edlénovy rovnice a c_E koeficient citlivosti odpovídající výpočtu vlnové délky dle Edlénovy rovnice.

Veličina $u(E)$ vyplývá z nejistoty rozdílnosti výpočtu vlnové délky dle Edlénovy rovnice $\Delta E = 2 \times 10^{-8}$ převzaté z mezinárodních porovnání a významných publikací vztahující se k dané problematice [15, 19] a koeficientu rozšíření $k = \sqrt{3}$:

$$u(E) = \frac{\Delta E}{k} = \frac{2 \times 10^{-8}}{\sqrt{3}}.$$

Hodnota c_E byla stanovena dle:

$$c_E = 1 \times 10^{\frac{6nm}{mm}} \times l_n.$$

Výsledná standardní nejistota výpočtu vlnové délky dle Edlénovy rovnice je:

$$u_n(l) = \frac{2 \times 10^{-8}}{\sqrt{3}} \times 1 \times 10^{\frac{6nm}{mm}} \times l_n = 0,012 \frac{nm}{mm} \times l_n.$$

2. Velikost zdroje (S)

Zdrojem laserového záření je jednofrekvenční stabilizovaný He–Ne laser. Z laserového zdroje vychází záření o malém průměru svazku, které je nutné rozšířit a kolimovat, tak aby výsledný svazek pokrýval celou plochu měřicích ploch KM.

K tomuto účelu je použit kolimátor, který vytváří z bodového zdroje kolimovaný svazek potřebného průměru.

Ideálním stavem pro kolimaci laserového svazku vstupujícího do měřicího systému je bodový zdroj, tzn. nerozptýlené záření. U měřicího systému je používáno optické vlákno pro vedení laserového svazku od zdroje do systému.

Pro neideálně kolimovaný svazek byla vypočtena výsledná standardní nejistota velikosti zdroje $u_S(l)$ ze vztahu:

$$u_S(l) = u(s) \times c_S,$$

kde $u(s)$ je standardní nejistota velikosti zdroje a c_S koeficient citlivosti odpovídající velikosti zdroje.

Veličina $u(s)$ vyplývá ze skutečné plochy svazku $S = 7 \mu m$ stanovené na základě experimentálních měření a koeficientu rozšíření $k = \sqrt{3}$:

$$u(s) = \frac{s}{k} = \frac{7 \mu m}{\sqrt{3}}.$$

Koeficient citlivosti c_S byl stanoven na základě praktických zkušeností v oblasti interferenčního měření a práce s lasery:

$$c_S = 3 \times 10^{-3} \frac{nm}{\mu m \times mm} \times l_n.$$

Výsledná standardní nejistota velikosti zdroje je:

$$u_i(l) = \frac{7 \mu m}{\sqrt{3}} \times 3 \times 10^{-3} \frac{nm}{\mu m \times mm} \times l_n = 0,012 \frac{nm}{mm} \times l_n.$$

3. Aberace optické soustavy (o)

Jedná se o vliv aberací optické soustavy interferometru a pomocných optických prvků na nejistotu měření délky KM v měřicím systému.

Mezi optické prvky v měřicím systému patří čočka AC254–15–A–ML, zrcadla a částečně odražející zrcadla.

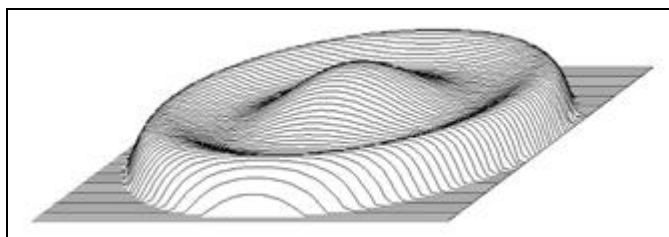
Při určení vlnové aberace při průchodu svazku čočkou AC254–15–A–ML (obrázek 3.2.3 – 1) se vycházelo z parametrů dodaných výrobcem čočky.

Potřebnými parametry pro výpočet aberace čočky AC254–15–A–ML byly:

- index lomu skla BK7 $n_s = 1,51852 [-]$,
- index lomu vzduchu $n_v = 1,00028 [-]$,
- střední vlnová délka $\lambda_s = 7,5 \times 10^{-7} m$.

Aberace čočky AC254–15–A–ML byla vypočtena dle vztahu:

$$E_c = (0,0955 \times \lambda_s) \times (n_s - n_v) = 3,71 \times 10^{-8} m.$$



Obr. 3.2.3 – 1 Deformace vlnoplochy při průchodu světla čočkou

Zrcadlo odráží laserový svazek. Částečně odražející zrcadlo rozděluje dopadající laserový svazek na odražený svazek a na svazek procházející.

Pro stanovení aberace zrcadel a částečně odražejících zrcadel se vycházelo z hodnot, které byly reálně naměřeny ve střední části plochy zrcadel – oblast, která je skutečně využívána pro měření délky KM v měřicím systému.

V měřicím systému jsou použita zrcadla a částečně odražející zrcadla o průměru $d = 75 mm$.

Výrobce zrcadel udává pro uvedený průměr každého zrcadla využitého v měřicím systému hodnotu rovinnosti $\frac{\lambda}{15}$.

Laserový svazek reálně využívá ke svému odrazu i průchodu pouze střední část zrcadla. Na danou část byla zaměřena pozornost a v rámci experimentálního měření bylo zjištěno, že rovinnost zrcadel je v dané oblasti $\frac{\lambda}{40}$.

Potřebné parametry pro výpočet zrcadel a částečně odražejících zrcadel byly:

- index lomu skla BK7 $n_s = 1,51852 [-]$,
- index lomu vzduchu $n_v = 1,00028 [-]$,
- rovinnost plochy zrcadel $r = \frac{6,33 \times 10^{-7} m}{40} = 1,58 \times 10^{-8} m$.

Aberace zrcadel byla následně určena dle vztahu:

$$E_z = r \times (n_s - n_v) = 8,2 \times 10^{-9} m.$$

V porovnání s měřením délky KM pomocí interferenčního komparátoru TESA NPL A.G.I. 300 je optická soustava bezkontaktního systému mnohem komplikovanější a během

jednoho měření musí projít laserový svazek celkem 18 krát přes rozhraní mezi 2mi prostředími – vzduch x sklo a jednou přes čočku AC254–15–A–ML.

Následně je tedy teoretická aberace optické soustavy daná vztahem:

$$E_{zt} = (18 \times E_z) + E_c = 1,85 \times 10^{-7} \text{ m}. \quad (3.2.3-12)$$

Výsledná standardní nejistota aberace optiky (čočka AC254–15–A–ML, zrcadla a částečně odrážející zrcadla) $u_o(l)$ byla určena ze vztahu:

$$u_o(l) = u(o) \times c_o,$$

kde $u(o)$ je standardní nejistota aberace optiky a c_o koeficient citlivosti odpovídající chybě optiky.

Veličina $u(o)$ vyplývá z teoretické aberace optiky $E_{zt} = 1,85 \times 10^{-7} \text{ m}$ stanovené dle vztahu (3.2.3–12) a koeficientu rozšíření $k = \sqrt{3}$:

$$u(o) = \frac{E_{zt}}{k} = \frac{1,85 \times 10^{-7} \text{ m}}{\sqrt{3}}.$$

Koeficient citlivosti c_o byl stanoven dle:

$$c_o = 1 \times 10^9 \frac{\text{nm}}{\text{mm}}.$$

Výsledná standardní nejistota aberace optiky (čočka AC254–15–A–ML, zrcadla a částečně odrážející zrcadla) je:

$$u_o(l) = \frac{1,85 \times 10^{-7} \text{ m}}{\sqrt{3}} \times 1 \times 10^9 \frac{\text{nm}}{\text{mm}} = 106,8 \text{ nm}.$$

Uvedený výsledek standardní nejistoty aberace optiky (čočka AC254–15–A–ML, zrcadla a částečně odrážející zrcadla) $u_o(l) = 106,8 \text{ nm}$ zohledňuje nejhorší možnou variantu – všechna použitá zrcadla (zrcadla a částečně odrážející zrcadla) a čočka v měřicím systému zkreslují stejným směrem a vždy na hraně maximální možné aberace. V reálném stavu toto není pravděpodobné.

K určení **reálné aberace optiky** (čočka AC254–15–A–ML, zrcadla a částečně odrážející zrcadla), byla navržena metodika, která spočívala v analýze interferenčního obrazce bez vložených KM do měřicího systému. Jednalo se o prověření rovinnosti a rovnoběžnosti interferenčních proužků. Pokud jsou proužky rovné a rovnoběžné, tak je aberace optické soustavy nulová. Jestliže však dochází k zakřivení proužků, je zde prokázán znatelný vliv optiky. Velikost vlivu optiky je dána velikostí zakřivení interferenčních proužků.

Daná metodika byla aplikována na bezkontaktním systému a pro porovnání i na interferenčním komparátoru TESA NPL A.G.I. 300. Z výsledných interferenčních obrazců z měřicího bezkontaktního systému byla stanovena deformace interferenčního obrazce červeného laseru $E_o = 0,1$ proužku.

Výsledná standardní nejistota reálné aberace optiky (čočka AC254–15–A–ML, zrcadla a částečně odrážející zrcadla) $u_o(l)$ byla určena ze vztahu:

$$u_o(l) = u(o) \times c_o,$$

kde $u(o)$ je standardní nejistota aberace optiky a c_o koeficient citlivosti odpovídající chybě optiky.

Veličina $u(o)$ vyplývá z reálné aberace optiky $E_o = 0,1$ proužku stanovené dle experimentálních měření a koeficientu rozšíření $k = \sqrt{3}$:

$$u(o) = \frac{E_o}{k} = \frac{0,1 \text{ proužku}}{\sqrt{3}}.$$

Koeficient citlivosti c_o byl stanoven dle:

$$c_o = \frac{\lambda}{2} = 316,5 \frac{\text{nm}}{\text{proužku}},$$

kde λ je hodnota vlnové délky 633 nm.

Výsledná standardní nejistota aberace optiky (čočka AC254–15–A–ML, zrcadla a částečně odražející zrcadla) je:

$$u_o(l) = \frac{0,1 \text{ proužku}}{\sqrt{3}} \times 316,5 \frac{\text{nm}}{\text{proužku}} = 18,3 \text{ nm}.$$

Výsledná hodnota standardní nejistoty aberace optiky $u_o(l)$ není závislá na jmenovité délce KM – patří mezi konstantní složky výsledné nejistoty měření bezkontaktního systému.

4. Rovinnost a rovnoběžnost měřené plochy KM (f)

Během měření je snímána velikost plochy na měřicích plochách KM o průměru cca $d = 1,5 \text{ mm}$. Dle normy [1] by principiálně měla být určována hodnota v bodě.

Avšak z metod měření délky pomocí interferenčního komparátoru a mechanického komparátoru vyplývá, že ve skutečnosti není zaznamenávána hodnota délky KM v měřeném bodě, ale na ploše o průměru cca $d = (0,5 - 1,5) \text{ mm}$. V případě měření délky pomocí mechanického komparátoru to vychází z plochy měřicích doteků. V případě interferenčního komparátoru daná plocha měření eliminuje možnou chybu, která by mohla nastat v případě, že by zvolený bod byl zrovna nejvyšším/nejnižším výčnělkem způsobený např. rýhou na měřicí ploše KM.

Hodnota pro rovinnost a rovnoběžnost měřené plochy KM byla stanovena na základě dlouhodobého měření délky KM (pomocí interferenčního komparátoru a mechanického komparátoru), s třídou přesnosti K – 2, v ČMI.

Výsledná standardní nejistota pro rovinnost a rovnoběžnost měřené plochy KM $u_f(l)$ byla určena ze vztahu:

$$u_f(l) = u(f) \times c_f,$$

kde $u(f)$ je standardní nejistota pro rovinnost a rovnoběžnost měřené plochy KM a c_f koeficient citlivosti odpovídající rovinnosti a rovnoběžnosti měřené plochy KM.

Veličina $u(f)$ vyplývá z nejistoty rovinnosti a rovnoběžnosti měřené plochy KM $E_f = 3 \text{ nm}$, která byla stanovena na základě dlouhodobých zkušeností při interferenčním měření délky KM v ČMI a koeficientu rozšíření $k = \sqrt{3}$:

$$u(f) = \frac{E_f}{k} = \frac{3 \text{ nm}}{\sqrt{3}}.$$

Koeficient citlivosti c_f byl roven hodnotě 1.

Výsledná standardní nejistota vlnové délky laseru je:

$$U_f(l) = \frac{3 \text{ nm}}{\sqrt{3}} \times 1 = 1,7 \text{ nm}.$$

5. Určení středu bílého interferenčního proužku (w)

Základní úlohou v interferometrii nízké koherence je, při použití Michelsonova interferometru, najít takovou polohu měřicího zrcadla, při které jsou optické dráhy v obou větvích interferometru stejné. Tedy nalézt střed bílého interferenčního proužku.

Nalezení středu interferenčního proužku závisí na zvolené metodě, která analyzuje intenzitu na výstupu interferometru v závislosti na poloze měřicího zrcadla, na rychlosti pohybu měřicího zrcadla, poměru signálu vůči šumu a též na nastavení kompenzační desky. Je-li interferometr optimálně kompenzovaný na disperzi (jedná se o případ, kdy rozdíl optických drah v jeho větvích nezávisí na vlnové délce), pak je bílý interferenční proužek symetrický. Vlivem disperze (např. při neoptimálním nastavení kompenzační desky, nedokonalosti optických komponent nebo jsou-li materiály zrcadel ve větvích interferometru různé) dochází k jeho asymetrii, maximum obálky signálu je odlišné od maxima intenzity. Různé metody pak mohou za střed bílého interferenčního proužku označit jeho různou část.

V rámci optimalizace (podkapitola 3.1.3 Analýza metod pro detekci středu bílých interferenčních proužků, výběr nejvhodnější metody a její implementace do programu pro zpracování výsledků měření) byla vybrána metoda fitování proužku. Výsledná standardní nejistota určení středu bílého interferenčního proužku $u_w(l)$ je tedy vázána přímo na danou metodu.

Výsledná standardní nejistota určení středu bílého interferenčního proužku $u_w(l)$ byla určena ze vztahu:

$$u_w(l) = u(w) \times c_w,$$

kde $u(w)$ je standardní nejistota určení středu bílého interferenčního proužku a c_w koeficient citlivosti odpovídající určení středu bílého interferenčního proužku.

Veličina $u(w)$ vyplývá z nejistoty určení středu bílého interferenčního proužku $W=3$ nm stanovené experimentálním měřením v rámci výběru vhodné metody pro nalezení středu interferenčního proužku (podkapitola 3.1.3) a koeficientu rozšíření $k = \sqrt{3}$:

$$u(w) = \frac{W}{k} = \frac{3 \text{ nm}}{\sqrt{3}}.$$

Nejistota určení středu bílého interferenčního proužku $W=3$ nm byla vypočtena jako součin nejistoty $W=1$ nm na měřicí plochu a počet měřicích ploch v systému tj. 3 měřicí plochy (P1, P2, a P3):

$$W = 1 \text{ nm} \times 3 = 3 \text{ nm}.$$

Koeficient citlivosti c_w byl roven hodnotě 1.

Výsledná standardní nejistota určení středu bílého interferenčního proužku je:

$$u_w(l) = \frac{3 \text{ nm}}{\sqrt{3}} \times 1 = 1,7 \text{ nm}.$$

6. Určení zlomku červeného interferenčního proužku (r)

Určení zlomku červeného interferenčního proužku se týká použité detekční jednotky (rozpoznání interferenčních signálů na výstupu interferometru) a vlastností měřicí sestavy. Reálně využívané rozlišení A/D převodníku v detekční jednotce měřicího systému je 2^8 , tj. 256 úrovní (počet úrovní mezi maximem a minimem detekovaného signálu).

Výsledná standardní nejistota určení zlomku červeného interferenčního proužku $u_r(l)$ byla určena ze vztahu:

$$u_r(l) = u(r) \times c_r,$$

kde $u(r)$ je standardní nejistota určení zlomku červeného interferenčního proužku a c_r koeficient citlivosti odpovídající určení zlomku červeného interferenčního proužku.

Veličina $u(r)$ vyplývá z nejistoty určení zlomku červeného interferenčního proužku $R = 0,01172$ proužku stanovené experimentálním měřením a koeficientu rozšíření $k = \sqrt{3}$:

$$u(r) = \frac{R}{k} = \frac{0,01172 \text{ proužku}}{\sqrt{3}}.$$

Nejistota určení zlomku červeného interferenčního proužku $R = 0,01172$ proužku byla vypočtena jako podíl počtu měřicích ploch v systému tj. 3 (P1, P2, a P3) a rozlišení A/D převodníku:

$$R = \frac{3}{256} = 0,01172 \text{ proužku}.$$

Koeficient citlivosti c_r byl stanoven dle:

$$c_r = \frac{\lambda}{2} = 316,5 \frac{\text{nm}}{\text{proužku}},$$

kde λ je hodnota vlnové délky 633 nm.

Výsledná standardní nejistota určení středu bílého interferenčního proužku je:

$$u_r(l) = \frac{0,01172 \text{ proužku}}{\sqrt{3}} \times 316,5 \frac{\text{nm}}{\text{proužku}} = 2,1 \text{ nm}.$$

7. Korekce změny fáze laseru (δ_{kor})

Problematika souvisí s dopadem laserového světla na měřicí plochu KM a jeho následným odrazem. Jedná se o jeden z nejobtížnější zjištěných vlivů působících na výslednou nejistotu měření systému. Při odrazu světla od plochy KM dojde k posunu fáze a laserový svazek se dostane pod povrch KM. Velikost tohoto posunu je dána druhem materiálu, kvalitou povrchu (drsností) materiálu a působením dalších vlivů.

K určení korekce změny fáze laseru, byla navržena metodika (využívá se také u interferenčního komparátoru TESA NPL A.G.I. 300), která spočívala v porovnání hodnot středové délky vytvořeného sloupce z nasunutých KM na sebe vůči součtu naměřených hodnot středové délky jednotlivých KM, dle ve vztahu (3.2.3–15). Pro korekci změny fáze laseru byly vybrány vždy 4 KM z měřené sady KM (předpokládá se stejný materiál a povrchová úprava), u kterých již byla změřena středová délka. Vybrané KM byly vzájemně nasunuty na sebe (vytvoření sloupce z KM), a jako jednotný sloupec byla změřena jeho středová délka. Sloupec byl měřen v měřicím systému stejně, jako samostatná KM.

Z naměřených hodnot sloupce z KM a naměřených hodnot odchylek jednotlivých KM z předchozích měření, byla vypočítána tzv. korekce změny fáze laseru podle vztahu:

$$\Delta l_{kor} = \frac{l_{sloupce} - l_{součet KM}}{N-1}, \quad (3.2.3-13)$$

kde je $l_{sloupce}$ odchylka středové délky sloupce z KM, $l_{součet KM}$ součet odchylek středové délky jednotlivých KM, N počet KM tvořících sloupec.

Výsledná standardní nejistota korekce změny fáze laseru $u_{\delta_{kor}}(l)$ byla určena ze vztahu:

$$u_{\delta_{kor}}(l) = u(\delta_{kor}) \times c_{\delta_{kor}},$$

kde $u(\delta_{kor})$ je standardní nejistota korekce změny fáze laseru a $c_{\delta_{kor}}$ koeficient citlivosti odpovídající korekci změny fáze laseru.

Veličina $u(\delta_{kor})$ vyplývá z nejistoty korekce změny fáze laseru $\Delta l_{kor} = 20 \text{ nm}$ stanovené dle vztahu (3.2.3–13) z realizovaných exper. měření a koeficientu rozšíření $k = 2$:

$$u(\delta_{kor}) = \frac{\Delta l_{kor}}{k} = \frac{20 \text{ nm}}{2}.$$

Koeficient citlivosti $c_{\delta_{kor}}$ byl roven hodnotě 1.

Výsledná standardní nejistota korekce změny fáze laseru je:

$$u_{\delta_{kor}}(l) = \frac{20 \text{ nm}}{2} \times 1 = 10 \text{ nm}.$$

8. Kosinova chyba

Kosinova chyba vzniká špatným nastavením směru laserového svazku. Odklonem svazku o určitý úhel od osy měření, která znamená skutečnou vzdálenost, dochází k nežádoucí odchylce. Kosinova chyba je označení pro nežádoucí odchylku měřené délky od délky skutečné, vzniklou v důsledku odklonu osy měřicího optického svazku od osy měření. Měřený objekt se tak jeví delší než ve skutečnosti je, přičemž toto prodloužení je dané právě úhlem, který svírají osa měřicího svazku a předpokládaná osa měření (osa měřeného objektu).

a) Pevně umístěná polopropustná zrcadla ve vzdálenosti 400 mm ($kos1$)

V případě ideálně seřízené optické sestavy bez vložené KM interferuje měřicí a referenční svazek na výstupu optické sestavy tak, že nejsou v rámci průměru světelného svazku (50 mm) pozorovatelné interferenční proužky (výsledný interferenční obrazec je bez proužků). Svazky svírají vzájemný úhel 0° . Pokud dojde k odklonu jednoho z svazků, jsou již viditelné na interferenčním obrazci proužky. Optická sestava není ideálně seřízená tzn. vzniká úhlová chyba mezi svazky. Přičemž mezní stav, který je obsluha systému schopna detekovat jako úhlovou chybu nastavení sestavy – jsou 2 a více proužků viditelných na interferenčním obrazci.

Výsledná standardní nejistota kosinovy chyby pro délku $l_1 = 400 \text{ mm}$ $u_{kos1}(l)$ byla určena ze vztahu:

$$u_{kos1}(l) = u(kos1) \times c_{kos1},$$

kde $u(kos1)$ je standardní nejistota kosinovy chyby pro délku $l_1 = 400 \text{ mm}$ a c_{kos1} koeficient citlivosti odpovídající kosinově chybě pro délku $l_1 = 400 \text{ mm}$.

Veličina $u(kos1)$ vyplývá z nejistoty kosinovy chyby pro délku $l_1 = 400 \text{ mm}$ $E_{kos1} = 3,21 \times 10^{-2} \text{ nm}$ vypočtené dle:

$$E_{kos1} = l_1 \times (1 - \cos \beta_1) = 3,21 \times 10^{-11} \text{ m} = 3,21 \times 10^{-2} \text{ nm}$$

a koeficientu rozšíření $k = \sqrt{3}$:

$$u(kos1) = \frac{E_{kos1}}{k} = \frac{3,21 \times 10^{-2}}{\sqrt{3}} \text{ nm}.$$

Úhel vychýlení β_1 byl stanoven dle:

$$\beta_1 = \arcsin \frac{\lambda}{2 \times p_1} = \arcsin \frac{6,33 \times 10^{-7} \text{ m}}{2 \times 0,025 \text{ m}} = 1,27 \times 10^{-5} \text{ rad},$$

kde p_1 je perioda pro dva proužky $p_1 = \frac{50}{2} = 25 \text{ mm}$, při průměru laserového svazku 50 mm a λ vlnová délka laseru ve vzduchu.

Koeficient citlivosti c_{kos1} pro délku $l_1 = 400 \text{ mm}$ byl roven hodnotě 1.

Výsledná standardní nejistota kosinovy chyby pro délku $l_1 = 400 \text{ mm}$ je:

$$u_{kos1}(l) = \frac{3,21 \times 10^{-2} \text{ m}}{\sqrt{3}} \times 1 = 0,02 \text{ nm}.$$

b) Úhlová chyba vložení KM do sestavy (kos2)

V případě ideálně seřazené optické sestavy s vloženou KM jdou stejným směrem dvojice odražených svazků (svírají vzájemný úhel 0°) od měřicích ploch KM. Výsledný interferenční obrazec vykazuje jediný proužek. Pokud dojde k odklonu jednoho ze svazků jsou již viditelné na interferenčním obrazci 2 a více proužků tzn. sestava není ideálně seřazená, KM je vychýlená. Vzniká chyba vlivem špatného uložení KM do sestavy. V tomto případě je KM rovnána pomocí držáku v podélném i příčném směru s cílem dosáhnout jednoho viditelného proužku na interferenčním obrazci.

Výsledná standardní nejistota kosinovy chyby pro délku $l_2 = 100 \text{ mm}$ $u_{kos2}(l)$ byla určena ze vztahu:

$$u_{kos2}(l) = u(kos2) \times c_{kos2},$$

kde $u(kos2)$ je standardní nejistota kosinovy chyby pro délku $l_2 = 100 \text{ mm}$ a c_{kos2} koeficient citlivosti odpovídající kosinově chybě pro délku $l_2 = 100 \text{ mm}$.

Veličina $u(kos2)$ vyplývá z nejistoty kosinovy chyby pro délku $l_2 = 100 \text{ mm}$ $E_{kos2} = 1,65 \times 10^{-2} \text{ nm}$ a koeficientu rozšíření $k = \sqrt{3}$:

$$u(kos2) = \frac{E_{kos2}}{k} = \frac{1,65 \times 10^{-2} \text{ nm}}{\sqrt{3}}.$$

Pro stanovení nejistoty kosinovy chyby E_{kos2} pro délku $l_2 = 100 \text{ mm}$ se vycházelo z periody proužků a úhlu vychýlení. Perioda proužků se vztahuje k rozměrům KM – v příčném směru $\frac{9 \text{ mm}}{2}$, v podélném $\frac{35 \text{ mm}}{2}$.

KM je vložena v trojúhelníku. Její natočení vůči ose o úhel β znamená na výstupu z trojúhelníku úhlovou chybu mezi odrazy 4 krát β . Pro periodu proužků potom platí, že $p = \frac{\lambda}{2 \times \sin(4\beta)}$. V tomto případě je perioda pro dva proužky v příčném směru $p_{2a} = 4,5 \text{ mm}$ a podélném směru $p_{2b} = 17,5 \text{ mm}$.

Úhel vychýlení svazku v závislosti na vlnové délce $\lambda = 633 \text{ nm}$ je vypočten ze vztahu:

$$\beta = \frac{\arcsin \frac{\lambda}{2 \times p}}{4}.$$

Pro příčný směr platí:

$$\beta_{2a} = \frac{\arcsin \frac{\lambda}{2 \times p_{2a}}}{4} = \frac{\arcsin \frac{6,33 \times 10^{-7} \text{ m}}{2 \times 0,00450 \text{ m}}}{4} = 1,76 \times 10^{-5} \text{ rad}$$

a pro podélný směr:

$$\beta_{2b} = \frac{\arcsin \frac{\lambda}{2 \times p_{2b}}}{4} = \frac{\arcsin \frac{6,33 \times 10^{-7} \text{ m}}{2 \times 0,01750 \text{ m}}}{4} = 4,52 \times 10^{-6} \text{ rad.}$$

Následně nejistota kosinovy chyby E_{kos2} pro délku $l_2 = 100 \text{ mm}$ byla vypočtena ze vztahu:

$$E_{kos2} = E_{kos2a} + E_{kos2b} = l_2 \times (1 - \cos \beta_{2a}) + l_2 \times (1 - \cos \beta_{2b}) = 1,55 \times 10^{-11} \text{ m} + 1,02 \times 10^{-12} \text{ m} = 1,55 \times 10^{-2} \text{ nm} + 1,02 \times 10^{-3} \text{ nm} = 1,65 \times 10^{-2} \text{ nm.}$$

Koeficient citlivosti c_{kos2} byl roven hodnotě 1.

Výsledná standardní nejistota kosinovy chyby pro délku $l_2 = 100 \text{ mm}$ je:

$$u_{kos2}(l) = \frac{1,65 \times 10^{-2} \text{ nm}}{\sqrt{3}} \times 1 = 0,01 \text{ nm.}$$

c) Divergence svazku (kos31, kos32)

Vzdálenost od výstupu sestavy k měřicí ploše KM je dána délkou 500 mm (vzdálenost k první měřicí ploše KM) a hodnotou jmenovité délky KM (vzdálenost k druhé měřicí ploše KM).

Experimentálně bylo změřeno, že svazek na vzdálenost 500 mm + jmenovitá délka KM diverguje (tzn. vzrůstá jeho poloměr) o 0,1 mm. Tato hodnota odpovídá hodnotě 0,0002 rad.

Kosinova chyba z hlediska divergence svazku byla vypočtena zvlášť pro délku od výstupu sestavy k první měřicí ploše KM tj. 500 mm E_{kos31} a zvlášť pro jmenovitou délku KM E_{kos32} dle následujících vztahů:

$$E_{kos31} = l_0 \times (1 - \cos \beta_3) \text{ a } E_{kos32} = l_3 \times (1 - \cos \beta_3),$$

kde l_0 je vzdálenost od výstupu sestavy k měřicí ploše KM, tj. $l_0 = 500 \text{ mm}$, l_3 je jmenovitá délka KM a β_3 je hodnota divergence svazku a odpovídá hodnotě $\beta_3 = 0,0002 \text{ rad}$

Výsledná standardní nejistota kosinovy chyby pro délku $l_0 = 500 \text{ mm}$ (vzdálenost od výstupu sestavy k první měřicí ploše KM) $u_{kos31}(l)$ byla určena ze vztahu:

$$u_{kos31}(l) = u(kos31) \times c_{kos31},$$

kde $u(kos31)$ je standardní nejistota kosinovy chyby pro délku $l_0 = 500 \text{ mm}$ a c_{kos31} koeficient citlivosti odpovídající kosinově chybě pro délku $l_0 = 500 \text{ mm}$.

Veličina $u(kos31)$ vyplývá z nejistoty kosinovy chyby pro délku $l_0 = 500 \text{ mm}$ $E_{kos31} = 1 \times 10^{-8} \text{ m} = 10 \text{ nm}$ a koeficientu rozšíření $k = \sqrt{3}$:

$$u(kos31) = \frac{E_{kos31}}{k} = \frac{10 \text{ nm}}{\sqrt{3}}.$$

Koeficient citlivosti c_{kos31} byl roven hodnotě 1.

Výsledná standardní nejistota kosinovy chyby pro délku $l_0 = 500 \text{ mm}$ je:

$$u_{kos31}(l) = \frac{10 \text{ nm}}{\sqrt{3}} \times 1 = 5,8 \text{ nm.}$$

Výsledná standardní nejistota kosinovy chyby pro jmenovitou délku KM (vzdálenost od první měřicí plochy k druhé měřicí ploše KM) $u_{kos32}(l)$ byla určena ze vztahu:

$$u_{kos32}(l) = u(kos32) \times c_{kos32},$$

kde $u(kos32)$ je standardní nejistota kosinovy chyby pro jmenovitou délku KM v mm a c_{kos32} koeficient citlivosti odpovídající kosinové chybě pro jmenovitou délku KM v mm .

Veličina $u(kos32)$ vyplývá z nejistoty kosinovy chyby pro jmenovitou délku KM $E_{kos32} = 2 \times 10^{-11} \frac{m}{mm} = 2 \times 10^{-2} \frac{nm}{mm}$ a koeficientu rozšíření $k = \sqrt{3}$:

$$u(kos32) = \frac{E_{kos32}}{k} = \frac{2 \times 10^{-2} \frac{nm}{mm}}{\sqrt{3}}.$$

Koeficient citlivosti c_{kos32} byl roven hodnotě jmenovité délky KM l_n .

Výsledná standardní nejistota kosinovy chyby pro jmenovitou délku KM je:

$$u_{kos32}(l) = \frac{2 \times 10^{-2} \frac{nm}{mm}}{\sqrt{3}} \times l_n = 0,012 \frac{nm}{mm} \times l_n.$$

9. Vliv teploty

Vzhledem k tomu, že měření délky KM obvykle neprobíhá přesně při teplotě 20 °C, musí být výsledek měření k této teplotě korigován, při zohlednění teplotního součinitele délkové roztažnosti materiálu, ze kterého je vyrobena KM a mechanické komponenty v systému.

a) Korekce délky KM vzhledem k 20 °C

Změna délky KM v závislosti na teplotě vzduchu při měření je přepočítávána dle známého vztahu pro teplotní délkovou roztažnost:

$$\Delta l = \alpha \times l_0 \times \Delta t,$$

kde je Δl změna délky KM, α teplotní součinitel délkové roztažnosti KM, l_0 výchozí délka KM, Δt rozdíl teplot.

Pro ocelové KM je teplotní součinitel délkové roztažnosti KM roven $\alpha = 11,5 \frac{\mu m}{m \times ^\circ C}$ ($\frac{ppm}{^\circ C}$), pro KM keramické $\alpha = 9,5 \frac{\mu m}{m \times ^\circ C}$ a pro KM z karbidu wolframu $\alpha = 5,5 \frac{\mu m}{m \times ^\circ C}$.

V rámci výpočtu standardní nejistoty korekce délky KM vzhledem k 20 °C byl použit teplotní součinitel délkové roztažnosti pro ocelové KM $\alpha = 11,5 \frac{\mu m}{m \times ^\circ C}$. Důvodem použití bylo, že KM z oceli patří mezi nejběžněji kalibrované KM a dále teplotní součinitel délkové roztažnosti pro ocel vykazuje nejvyšší hodnotu roztažnosti materiálu – takže je ve výpočtu počítáno s nejhorší možnou variantou.

Pro přepočet změny délky KM v závislosti na teplotě vzduchu a teplotního součinitele délkové roztažnosti pro ocelové KM byl zaveden koeficient citlivosti označený jako c_{t2} , vyjádřený vztahem:

$$c_{t2} = 11,5 \frac{nm}{^\circ C \times mm} \times l_n. \quad (3.2.3-14)$$

V měřicím systému je využíváno k měření teploty KM v závislosti na teplotě vzduchu teploměru (teploměr s odporovými čidly PT 100) – č.2, dále značeno teploměr/2.

Uvedený teploměr/2 přispívá k nejistotě hodnoty výstupní veličiny – délky KM třemi vlivy, tj. svým rozlišením, chybou a nejistotou měření.

Rozlišení teploměru/2 (r_{t2})

Výsledná standardní nejistota rozlišení použitého teploměru $u_{rt2}(l)$ byla určena ze vztahu:

$$u_{rt2}(l) = u(r_{t2}) \times c_{t2},$$

kde $u(r_{t2})$ je standardní nejistota rozlišení teploměru a c_t koeficient citlivosti odpovídající teplotě vzduchu.

Veličina $u(r_{t2})$ vyplývá z rozlišení teploměru $R_{t2} = 0,001 \text{ } ^\circ\text{C}$ (dané přístrojem) a koeficientu rozšíření $k = \sqrt{3}$:

$$u(r_{t2}) = \frac{R_{t2}}{k} = \frac{0,001^\circ\text{C}}{\sqrt{3}}.$$

Koeficient citlivosti c_{t2} byl stanoven dle vztahu (3.2.3–14).

Výsledná standardní nejistota rozlišení teploměru je:

$$u_{rt2}(l) = \frac{0,001^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} \times 11,5 \frac{\text{nm}}{^\circ\text{C} \times \text{mm}} \times l_n = 0,007 \frac{\text{nm}}{\text{mm}} \times l_n.$$

Chyba teploměru/2 a přesnost měření teploty KM (e_{t2})

Výsledná standardní nejistota chyby použitého teploměru $u_{et}(l)$ byla určena ze vztahu:

$$u_{et2}(l) = u(e_{t2}) \times c_{t2},$$

kde $u(e_{t2})$ je standardní nejistota chyby teploměru a c_{t2} koeficient citlivosti odpovídající teplotě vzduchu.

Veličina $u(e_{t2})$ vyplývá z chyby teploměru $E_{t2} = 0,025 \text{ } ^\circ\text{C}$ převzaté z kalibračního listu a koeficientu rozšíření $k = \sqrt{3}$:

$$u(e_{t2}) = \frac{E_{t2}}{k} = \frac{0,025^\circ\text{C}}{\sqrt{3}}.$$

Hodnota E_{t2} byla vypočtena součtem dvou hodnot a to chyby použitého teploměru E_{te2} a chyby teplotního vyrovnání mezi teploměrem a KM E_{tKM} , tj. $E_{t2} = E_{te2} + E_{tKM}$. Hodnota chyby použitého teploměru byla převzata z kalibračního listu $E_{te2} = 0,005 \text{ } ^\circ\text{C}$. Chyba teplotního vyrovnání mezi teploměrem a KM byla určena z doby temperace KM v měřicím systému $E_{tKM} = 0,02 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Koeficient citlivosti c_{t2} byl stanoven dle vztahu (3.2.3–14).

Výsledná standardní nejistota chyby teploměru je:

$$u_{et2}(l) = \frac{0,025^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} \times 11,5 \frac{\text{nm}}{^\circ\text{C} \times \text{mm}} \times l_n = 0,166 \frac{\text{nm}}{\text{mm}} \times l_n.$$

Nejistota teploměru/2 (n_{t2})

Výsledná standardní nejistota použitého teploměru $u_{nt2}(l)$ byla určena ze vztahu:

$$u_{nt2}(l) = u(n_{t2}) \times c_{t2},$$

kde $u(n_{t2})$ je standardní nejistota teploměru a c_{t2} koeficient citlivosti odpovídající teplotě vzduchu.

Veličina $u(n_{t2})$ vyplývá z nejistoty teploměru $U_{nt2} = 0,01 \text{ } ^\circ\text{C}$ převzaté z kalibračního listu a koeficientu rozšíření $k = 2$:

$$u(n_{t2}) = \frac{U_{nt2}}{k} = \frac{0,01}{2} \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Koeficient citlivosti c_{t2} byl stanoven dle vztahu (3.2.3–14).

Výsledná standardní nejistota teploměru je:

$$u_{nt2}(l) = \frac{0,01}{2} \text{ } ^\circ\text{C} \times 11,5 \frac{\text{nm}}{^\circ\text{C} \times \text{mm}} \times l_n = 0,058 \frac{\text{nm}}{\text{mm}} \times l_n.$$

Vypočtené hodnoty jednotlivých standardních nejistot, kterými přispívá teploměr/2 k nejistotě výstupní veličiny – délky KM, jsou uvedeny pro přehlednost v tabulce 3.2.3 – 9.

Tabulka 3.2.3 – 9 Vypočtené hodnoty standardních nejistot – teploměr/2

Veličina	Příspěvek k nejistotě $u_i(l)$
Rozlišení teploměru/2 – r_{t2}	$u_{rt}(l) = 0,007 \frac{\text{nm}}{\text{mm}} \times l_n$
Chyba teploměru/2 a přesnost měření teploty KM – e_{t2}	$u_{et}(l) = 0,166 \frac{\text{nm}}{\text{mm}} \times l_n$
Nejistota teploměru/2 – n_{t2}	$u_{nt}(l) = 0,058 \frac{\text{nm}}{\text{mm}} \times l_n$

b) Vliv změny teploty na základní litinovou desku – posun optických komponent (d_t)

Optické komponenty jsou umístěny na základní litinové desce ve vzdálenosti 400 mm od sebe. Pokud by došlo, vlivem změny teploty k roztažení litinové desky o určitou délku během měření, důsledkem by byl posun zrcadel od sebe. Zrcadla jsou důležité komponenty, které vedou svazek laseru směrem ke KM. V důsledku jejich posunu vlivem roztažení litinové desky, by bylo měření zatíženo systematickou chybou v kolmém směru k měřicím plochám KM.

Výsledná standardní nejistota teplotní změny základní desky (posun optických komponent) $u_{dt}(l)$ byla určena ze vztahu:

$$u_{dt}(l) = u(d_t) \times c_{dt},$$

kde $u(d_t)$ je standardní nejistota teplotní změny základní litinové desky (posun optických komponent) a c_{dt} koeficient citlivosti odpovídající teplotní změně základní desky.

Veličina $u(d_t)$ vyplývá z nejistoty teplotní stálosti měřicího systému $D_t = 0,003 \text{ } ^\circ\text{C}$ experimentálně stanovené a koeficientu rozšíření $k = \sqrt{3}$:

$$u(d_t) = \frac{D_t}{k} = \frac{0,003 \text{ } ^\circ\text{C}}{\sqrt{3}}.$$

Teplotní součinitel délkové roztažnosti pro litinu je dán hodnotou $\alpha = 12,3 \frac{\text{ppm}}{^\circ\text{C}}$.

Koeficient citlivosti c_{dt} byl stanoven dle:

$$c_{dt} = 12,3 \frac{\text{ppm}}{^\circ\text{C}} \times 400 \text{ mm} = 4920 \frac{\text{nm}}{^\circ\text{C}}.$$

Výsledná standardní nejistota teplotní změny základní desky (posun optických komponent) je:

$$u_{dt}(l) = \frac{0,003 \text{ } ^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} \times 4920 \frac{\text{nm}}{^\circ\text{C}} = 8,5 \text{ nm}.$$

c) Vliv změny teploty na základní litinovou desku – posun mechanických komponent (d_{t2})

Vlivem roztažení litinové desky, způsobené změnou teploty vzduchu, může dojít také k posunu mechanického ocelového držáku KM a posuvu zrcadel na vzdálenost snímané dráhy 100 mm (maximální měřená délka).

Výsledná standardní nejistota teplotní změny základní desky (posun mechanických komponent) $u_{dt2}(l)$ byla určena ze vztahu:

$$u_{dt2}(l) = u(d_{t2}) \times c_{dt2},$$

kde $u(d_{t2})$ je standardní nejistota teplotní změny základní litinové desky (posun mechanických komponent) a c_{dt2} koeficient citlivosti odpovídající teplotní změně základní desky.

Veličina $u(d_{t2})$ vyplývá z nejistoty teplotní stálosti měřicího systému $D_t = 0,003 \text{ } ^\circ\text{C}$ experimentálně stanovené a koeficientu rozšíření $k = \sqrt{3}$:

$$u(d_{t2}) = \frac{D_t}{k} = \frac{0,003 \text{ } ^\circ\text{C}}{\sqrt{3}}.$$

Teplotní součinitel délkové roztažnosti pro ocel je dán hodnotou $\alpha = 11,5 \frac{\text{ppm}}{^\circ\text{C}}$.

Koeficient citlivosti c_{dt2} byl stanoven dle:

$$c_{dt2} = 11,5 \frac{\text{ppm}}{^\circ\text{C}} \times 100\text{mm} = 1150 \frac{\text{nm}}{^\circ\text{C}}.$$

Výsledná standardní nejistota teplotní změny základní desky (posun mechanických komponent) je:

$$u_{dt2}(l) = \frac{0,003 \text{ } ^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} \times 1150 \frac{\text{nm}}{^\circ\text{C}} = 2,0 \text{ nm}.$$

d) Teplotní součinitele délkové roztažnosti KM (δ_α)

Výsledná standardní nejistota teplotního součinitele délkové roztažnosti KM $u_{\delta\alpha}(l)$ byla určena ze vztahu:

$$u_{\delta\alpha}(l) = u(\delta_\alpha) \times c_{\delta\alpha},$$

kde $u(\delta_\alpha)$ je standardní nejistota teplotního součinitele délkové roztažnosti KM a $c_{\delta\alpha}$ koeficient citlivosti odpovídající teplotnímu součiniteli délkové roztažnosti.

Veličina $u(\delta_\alpha)$ vyplývá z nejistoty teplotního součinitele délkové roztažnosti KM $E_\alpha = 1 \frac{\text{ppm}}{^\circ\text{C}}$ převzaté z kalibračních listů KM (vychází z normy [1]) a koeficientu rozšíření $k = \sqrt{3}$:

$$u(\delta_\alpha) = \frac{E_\alpha}{k} = \frac{1 \frac{\text{ppm}}{^\circ\text{C}}}{\sqrt{3}}.$$

Systém klimatizace v laboratoři ČMI, kde je měřicí systém uložen, dokáže regulovat teplotu na $20 \pm 0,3 \text{ } ^\circ\text{C}$. Hodnota $\pm 0,3 \text{ } ^\circ\text{C}$ udává maximální odchylku teploty v laboratoři.

Koeficient citlivosti $c_{\delta\alpha}$ vychází z maximální možné odchylky teploty v laboratořích ČMI jmenovité délky KM l_n :

$$c_{\delta\alpha} = 0,3 \text{ } ^\circ\text{C} \times l_n.$$

Výsledná standardní nejistota teplotního součinitele délkové roztažnosti KM je:

$$u_{\delta\alpha}(l) = \frac{1 \frac{\text{ppm}}{^\circ\text{C}}}{\sqrt{3}} \times 0,3 \text{ } ^\circ\text{C} \times l_n = 0,173 \frac{\text{nm}}{\text{mm}} \times l_n.$$

Vypočtené hodnoty výsledných standardních nejistot, které přispívají k nejistotě měření systému, jsou uvedeny pro přehlednost v tabulce 3.2.3 – 10. Tabulka je rozdělena na dvě části – na část relativních a konstantních složek standardní nejistoty. Relativní složky se mění s jmenovitou délkou KM. Konstantní složky se nemění.

Tabulka obsahuje seznam všech zdrojů nejistot spolu s jejich nejistotami měření $u(x_i)$, koeficienty citlivosti c_i a různě velkými příspěvky k nejistotě $u_i(y)$.

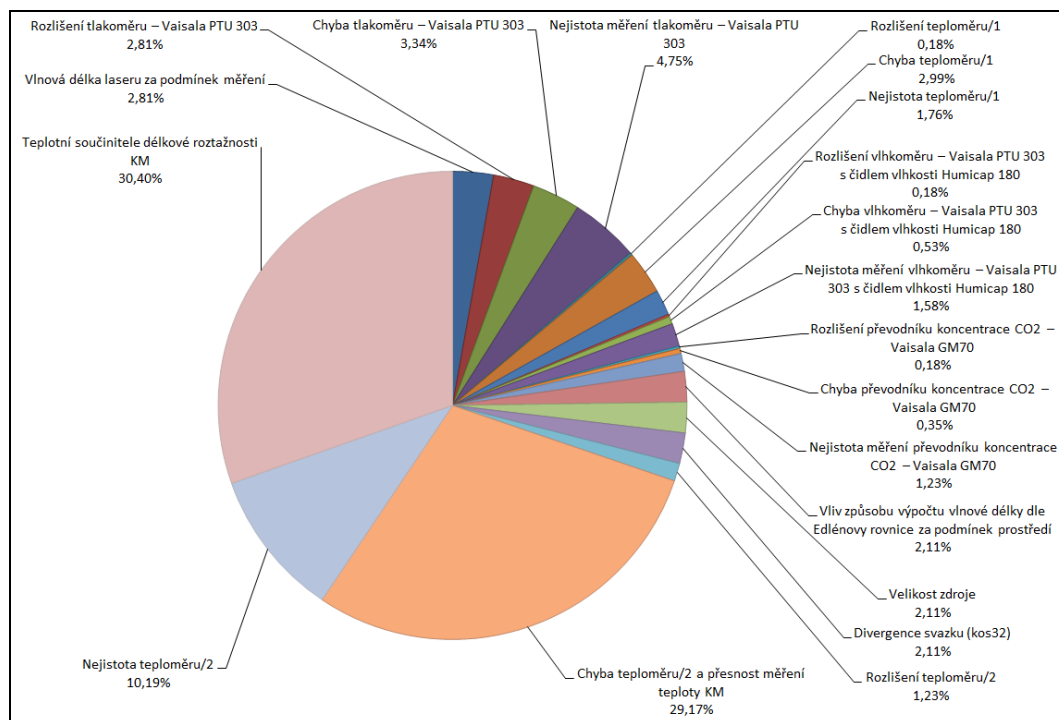
Výsledné hodnoty nejistot z tabulky 3.2.3 – 10 jsou zpřehledněny v kruhovém grafu 3.2.3 – 2A a 2B. Plocha kruhu představuje celý soubor zdrojů nejistot. Jeho jednotlivé části – výseče znázorňují velikost příspěvku zdroje k nejistotě systému.

Tabulka 3.2.3 – 10 – Přehled složek standardní nejistoty

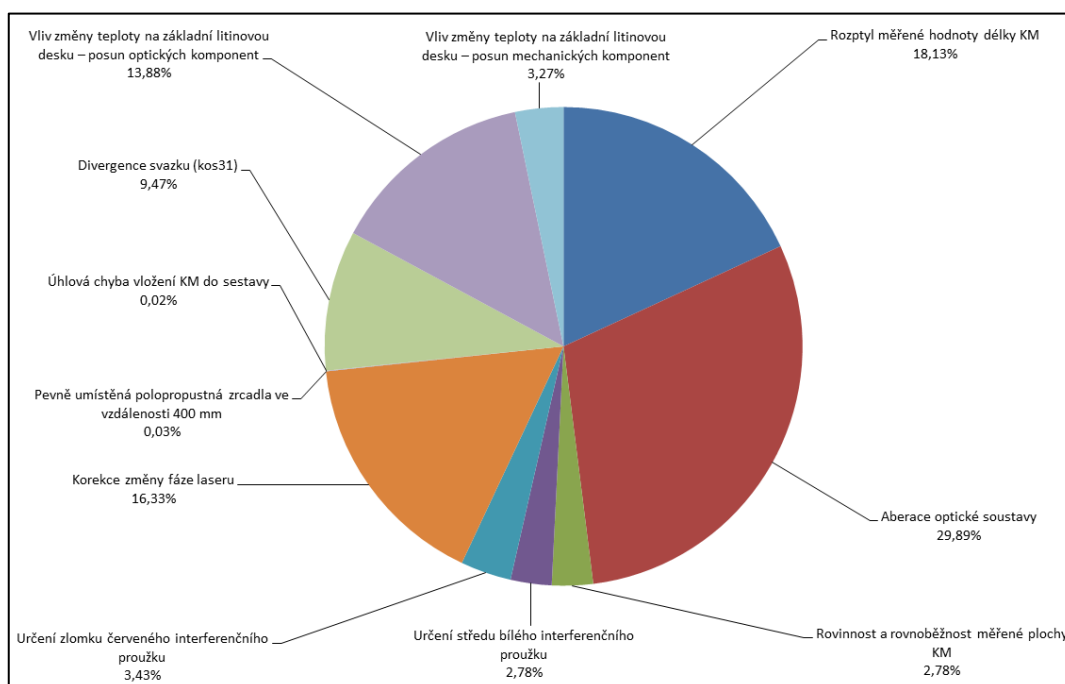
Relativní složka standardní nejistoty	$u(x_i)$	$c_i \equiv \partial f / \partial x_i$	$u_i(l)$ $\left[\frac{nm}{mm} \right] \times l_n$
Vlnová délka laseru za podmínek měření			
Vlnová délka laseru za podmínek měření	$1 \times 10^{-5} \text{ nm}$	$1580 \frac{nm}{mm} \times l_n$	0,016
<i>Vlivy působící na hodnotu vlnové délky laseru za podmínek měření</i>			
<i>Atmosférický tlak</i>			
Rozlišení tlakoměru – Vaisala PTU 303	$\frac{10 \text{ Pa}}{\sqrt{3}}$	$2,684 \times 10^{-3} \frac{nm}{Pa \times mm} \times l_n$	0,016
Chyba tlakoměru – Vaisala PTU 303	$\frac{12 \text{ Pa}}{\sqrt{3}}$	$2,684 \times 10^{-3} \frac{nm}{Pa \times mm} \times l_n$	0,019
Nejistota měření tlakoměru – Vaisala PTU 303	10 Pa	$2,684 \times 10^{-3} \frac{nm}{Pa \times mm} \times l_n$	0,027
<i>Teplota</i>			
Rozlišení teploměru /1	$\frac{0,001 \text{ }^{\circ}\text{C}}{\sqrt{3}}$	$0,955 \frac{nm}{^{\circ}\text{C} \times mm} \times l_n$	0,001
Chyba teploměru /1	$\frac{0,02 \text{ }^{\circ}\text{C}}{\sqrt{3}}$	$0,955 \frac{nm}{^{\circ}\text{C} \times mm} \times l_n$	0,017
Nejistota teploměru /1	0,01 $^{\circ}\text{C}$	$0,955 \frac{nm}{^{\circ}\text{C} \times mm} \times l_n$	0,010
<i>Relativní vlhkost</i>			
Rozlišení vlhkoměru – Vaisala PTU 303 s čidlem vlhkosti Humicap 180	$\frac{0,1 \%}{\sqrt{3}}$	$8,659 \times 10^{-3} \frac{nm}{\% \times mm} \times l_n$	0,001
Chyba vlhkoměru – Vaisala PTU 303 s čidlem vlhkosti Humicap 180	$\frac{0,5 \%}{\sqrt{3}}$	$8,659 \times 10^{-3} \frac{nm}{\% \times mm} \times l_n$	0,003
Nejistota měření vlhkoměru – Vaisala PTU 303 s čidlem vlhkosti Humicap 180	1 %	$8,659 \times 10^{-3} \frac{nm}{\% \times mm} \times l_n$	0,009
<i>Vliv koncentrace CO₂ na vlnovou délku laseru</i>			
Rozlišení převodníku koncentrace CO ₂ – Vaisala GM70	$\frac{10 \text{ ppm}}{\sqrt{3}}$	$1,448 \times 10^{-4} \frac{nm}{ppm \times mm} \times l_n$	0,001
Chyba převodníku koncentrace CO ₂ – Vaisala GM70	$\frac{20 \text{ ppm}}{\sqrt{3}}$	$1,448 \times 10^{-4} \frac{nm}{ppm \times mm} \times l_n$	0,002
Nejistota měření převodníku koncentrace CO ₂ – Vaisala GM70	50 ppm	$1,448 \times 10^{-4} \frac{nm}{ppm \times mm} \times l_n$	0,007
<i>Vliv způsobu výpočtu vlnové délky dle Edlénovy rovnice za podmínek prostředí</i>			
Vliv způsobu výpočtu vlnové délky dle Edlénovy rovnice za podmínek prostředí	$\frac{2 \times 10^{-8}}{\sqrt{3}}$	$1 \times 10^6 \frac{nm}{mm} \times l_n$	0,012
Velikost zdroje			
Velikost zdroje	$\frac{7 \mu m}{\sqrt{3}}$	$3 \times 10^{-3} \frac{nm}{\mu m \times mm} \times l_n$	0,012

Relativní složka standardní nejistoty	$u(x_i)$	$c_i \equiv \partial f / \partial x_i$	$u_i(l)$ $\left[\frac{nm}{mm}\right] \times l_n$
Kosinova chyba			
<i>Divergence svazku</i>			
Divergence svazku (kos32)	$\frac{2 \times 10^{-2} \frac{nm}{mm}}{\sqrt{3}}$	l_n	0,012
Vliv teploty			
<i>Korekce délky KM vzhledem k 20 °C</i>			
Rozlišení teploměru/2	$\frac{0,001 \text{ °C}}{\sqrt{3}}$	$11,5 \frac{nm}{\text{°C} \times mm} \times l_n$	0,007
Chyba teploměru/2 a přesnost měření teploty KM	$\frac{0,025 \text{ °C}}{\sqrt{3}}$	$11,5 \frac{nm}{\text{°C} \times mm} \times l_n$	0,166
Nejistota teploměru/2	$\frac{0,01 \text{ °C}}{2}$	$11,5 \frac{nm}{\text{°C} \times mm} \times l_n$	0,058
<i>Teplotní součinitele délkové roztažnosti KM</i>			
Teplotní součinitel délkové roztažnosti KM	$\frac{1 \frac{ppm}{\text{°C}}}{\sqrt{3}}$	$0,3 \text{ °C} \times l_n$	0,173
Konstantní složka standardní nejistoty	$u(x_i)$	$c_i \equiv \partial f / \partial x_i$	$u_i(l)$ [nm]
Nejistota měřené délky KM			
Rozptyl měřené hodnoty délky KM	$\frac{35 \text{ nm}}{\sqrt{10}}$	1	11,1
Aberace optické soustavy			
Aberace optické soustavy	$\frac{0,1 \text{ proužku}}{\sqrt{3}}$	316,5 nm	18,3
Rovinnost a rovnoběžnost měřené plochy KM			
Rovinnost a rovnoběžnost měřené plochy KM	$\frac{3 \text{ nm}}{\sqrt{3}}$	1	1,7
Určení středu bílého interferenčního proužku			
Určení středu bílého interferenčního proužku	$\frac{3 \text{ nm}}{\sqrt{3}}$	1	1,7
Určení zlomku červeného interferenčního proužku			
Určení zlomku červeného interferenčního proužku	$\frac{0,01172 \text{ proužku}}{\sqrt{3}}$	316,5 nm	2,1
Korekce změny fáze laseru			
Korekce změny fáze laseru	$\frac{20 \text{ nm}}{2}$	1	10
Kosinova chyba			
<i>Pevně umístěná polopropustná zrcadla ve vzdálenosti 400 mm</i>			
Pevně umístěná polopropustná zrcadla ve vzdálenosti 400 mm	$\frac{3,21 \times 10^{-2} \text{ nm}}{\sqrt{3}}$	1	0,02
<i>Úhlová chyba vložení KM do sestavy</i>			
Úhlová chyba vložení KM do sestavy	$\frac{1,65 \times 10^{-2} \text{ nm}}{\sqrt{3}}$	1	0,01
<i>Divergence svazku</i>			
Divergence svazku (kos31)	$\frac{10 \text{ nm}}{\sqrt{3}}$	1	5,8
Vliv teploty			
<i>Vliv změny teploty na základní litinovou desku – posun optických komponent</i>			
Vliv změny teploty na základní litinovou desku – posun optických komponent	$\frac{0,003 \text{ °C}}{\sqrt{3}}$	$4920 \frac{nm}{\text{°C}}$	8,5
<i>Vliv změny teploty na základní litinovou desku – posun mechanických komponent</i>			
Vliv změny teploty na základní litinovou desku – posun mechanických komponent	$\frac{0,003 \text{ °C}}{\sqrt{3}}$	$1150 \frac{nm}{\text{°C}}$	2,0

Z tabulky 3.2.3 – 10 a zejména z kruhového grafu 3.2.3 – 2A a 2B je zřejmé, že mezi významné zdroje, které svým příspěvkem nejvíce přispívají k výsledné nejistotě měření za relativní složky patří teplotní součinitel délkové roztažnosti KM a chyba teploměru/2 a přesnost měření teploty KM. Za konstantní složky je to aberace optické soustavy a korekce změny fáze laseru.



Obr. 3.2.3 – 2A Grafická ilustrace významu příspěvku zdrojů k nejistotě $u_r(l)$ – relativní složky



Obr. 3.2.3 – 2B Grafická ilustrace významu příspěvku zdrojů k nejistotě $u_r(l)$ – konstantní složky

3.2.3.3 Kombinovaná standardní nejistota

Kombinovaná standardní nejistota byla vypočtena dle vztahu (2.3.2–9) v podkapitole 2.3 – 2.3.2.3. Vztah byl upraven na:

$$u_c^2(l) = \sum_{i=1}^N u_i^2(l), \quad (3.2.3 - 15)$$

a dále matematickou úpravou vztahu (3.2.3 – 15) a dosazením příslušných hodnot za jednotlivé zdroje nejistot byla kombinovaná standardní nejistota vypočtena jako kladná hodnota druhé odmocniny kombinovaného rozptylu $u_c(l)$:

$$u_c(l) = \sqrt{\begin{aligned} &u(A)^2 + u_\lambda(l)^2 + u_{rp}(l)^2 + u_{ep}(l)^2 + u_{np}(l)^2 + u_{rt}(l)^2 + u_{et}(l)^2 + u_{nt}(l)^2 + u_{rH}(l)^2 + u_{eH}(l)^2 \\ &+ u_{nH}(l)^2 + u_{rx}(l)^2 + u_{ex}(l)^2 + u_{nx}(l)^2 + u_E(l)^2 + u_S(l)^2 + u_A(l)^2 + u_o(l)^2 + u_f(l)^2 + u_w(l)^2 \\ &+ u_r(l)^2 + u_{\delta kor}(l)^2 + u_{kos1}(l)^2 + u_{kos2}(l)^2 + u_{kos31}(l)^2 + u_{kos32}(l)^2 + u_{rt2}(l)^2 + u_{et2}(l)^2 \\ &+ u_{nt2}(l)^2 + u_{dt}(l)^2 + u_{dt2}(l)^2 + u_{\delta\alpha}(l)^2 \end{aligned}} \quad (3.2.3 - 16)$$

kde je $u(A)$ rozptyl měřené hodnoty délky KM, $u_\lambda(l)$ vlnová délka laseru za podmínek měření, $u_{rp}(l)$ rozlišení tlakoměru, $u_{ep}(l)$ chyba tlakoměru, $u_{np}(l)$ nejistota měření tlakoměru, $u_{rt}(l)$ rozlišení teploměru/1, $u_{et}(l)$ chyba teploměru/1, $u_{nt}(l)$ nejistota teploměru/1, $u_{rH}(l)$ rozlišení vlhkoměru, $u_{eH}(l)$ chyba vlhkoměru, $u_{nH}(l)$ nejistota měření vlhkoměru, $u_{rx}(l)$ rozlišení převodníku koncentrace CO₂, $u_{ex}(l)$ chyba převodníku koncentrace CO₂, $u_{nx}(l)$ nejistota měření převodníku koncentrace CO₂, $u_E(l)$ vliv způsobu výpočtu vlnové délky dle Edlénovy rovnice za podmínek prostředí, $u_S(l)$ velikost zdroje, $u_A(l)$ nejistota rozptylu opakovaných měření délky KM, $u_o(l)$ aberace optické soustavy, $u_f(l)$ rovinnost a rovnoběžnost měřené plochy KM, $u_w(l)$ určení středu bílého interferenčního proužku, $u_r(l)$ určení zlomku červeného interferenčního proužku, $u_{\delta kor}(l)$ korekce změny fáze laseru, $u_{kos1}(l)$ pevně umístěná polopropustná zrcadla ve vzdálenosti 400 mm, $u_{kos2}(l)$ úhlová chyba vložení KM do sestavy, $u_{kos31}(l)$ a $u_{kos32}(l)$ divergence svazku, $u_{rt2}(l)$ rozlišení teploměru/2, $u_{et2}(l)$ chyba teploměru/2, $u_{nt2}(l)$ nejistota teploměru/2, $u_{dt}(l)$ vliv změny teploty na základní litinovou desku – posun optických komponent, $u_{dt2}(l)$ vliv změny teploty na základní litinovou desku – posun mechanických komponent, $u_{\delta\alpha}(l)$ teplotní součinitele délkové roztažnosti KM.

3.2.3.4 Rozšířená nejistota měření

V rámci rozdělení pravděpodobnosti bylo předpokládáno t-rozdělení – $k_p = t_p(v_{eff})$ s t-faktorem založeným na počtu v_{eff} efektivních stupňů volnosti $u_c(y)$, získaným z Welch–Satterthwaitova vztahu [45],

$$v_{eff} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}}, \quad (3.2.3 - 17)$$

kde je $u(y)$ standardní nejistota vztahující se k odhadu y hodnoty výstupní veličiny, $u_i(y)$ příspěvek ke standardní nejistotě vztahující se k odhadu y hodnoty výstupní veličiny a v_i efektivní stupeň volnosti hodnoty standardní nejistoty $u_i(y)$.

Stupně volnosti ν_i přiřazené ke standardní nejistotě $u(x_i)$ byly vypočteny dle vztahu:

$$\nu_i \approx \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta u(x_i)}{u(x_i)} \right]^{-2}. \quad (3.2.3 - 18)$$

Jedná se o posouzení, jak je hodnota standardní nejistoty spolehlivá.

Výpočet rozšířené nejistoty byl stanoven dle níže uvedených bodů:

- stanovení $u_c(l)$,
- výpočet ν_{eff} z Welch–Satterthwaitova vzorce,
- stanovení (dle příslušné tabulky) t-faktoru $t_p(\nu_{eff})$ pro požadovanou konfidenční úroveň,
- výpočet $U_p = k_p \times u_c(l)$ pro $k_p = t_p(\nu_{eff})$.

Pro stanovení hodnoty rozšířené nejistoty se vycházelo z tabulky 3.2.3 – 11, která obsahuje kompletní shrnuté údaje v rámci podkapitol 3.2.3.1 a 3.2.3.2 k jejímu výpočtu.

Počet stupňů volnosti byl u každé složky vypočten na hodnotu 1000, mimo složky aberace optické soustavy $u_o(l)$ – zde byla hodnota spočtena na 100 stupňů volnosti a nejistota měřené délky KM $u_A(l)$ – 9 stupňů volnosti.

Kombinovaná standardní nejistota $u_c(l)$ byla u konstantní části vypočtena na hodnotu 26,038 nm s počtem efektivních stupňů volnosti 164 a u relativní části na hodnotu $0,252 \times l_n$ s 2403 efektivními stupni volnosti. Bylo požadováno získat rozšířenou nejistotu $U_{95} = k_{95} \times u_c(l)$, která poskytuje interval s konfidenční úrovní přibližně 95%.

K získání požadované rozšířené nejistoty byla důležitá jak konstantní, tak relativní hodnota kombinované standardní nejistoty, včetně efektivních stupňů volnosti.

Počet efektivních stupňů volnosti (v případě potřeby se hodnota zaokrouhluje k nejbližšímu menšímu celému číslu) pro konstantní část $\nu_{eff}(l_n) = 164$ – poté z tabulky 1 v příloze 1 následuje stanovení $t_{95}(164) = 1,975$ a $U_{95} = t_{95}(164) \times u_c(l)$.

Číselná hodnota rozšířené nejistoty $U = k \times u_c$ je dána kombinovanou standardní nejistotou, která odpovídá pro konstantní část $u_c = 26,038$ nm a koeficientem rozšíření $k = 1,975$, jehož hodnota spočívá na t-rozdělení pro $\nu = 164$ stupňů volnosti a určuje interval s odhadnutou konfidenční úrovní 95 %.

Odpovídající konstantní rozšířená nejistota je tedy $U_{konstantni} = 1,975 \times 26,038 = 51,42$ nm, zaokrouhleně **51 nm**.

Počet efektivních stupňů volnosti pro relativní část $\nu_{eff}(l) = 2403$ – poté z tabulky 1 v příloze 1 následuje stanovení $t_{95}(2403) = 1,961$ a $U_{95} = t_{95}(2403) \times u_c(l) \times l_n$.

Číselná hodnota rozšířené nejistoty pro relativní část je $u_c = 0,252 \times l_n$ nm. Koeficient rozšíření je $k = 1,961$. Hodnota koeficientu spočívá na t-rozdělení pro $\nu = 2403$ stupňů volnosti a určuje interval s odhadnutou konfidenční úrovní 95 %.

Odpovídající relativní rozšířená nejistota je tedy $U_{relativni}=1,961 \times 0,252 \times l_n = 0,49 \times l_n$, zaokrouhleně $0,5 \times l_n \text{ nm}$. Tato relativní hodnota kombinované standardní nejistoty je závislá na délce KM.

Rozšířená nejistota měření má následně tvar:

$$U = \sqrt{51^2 + (0,5 \times l_n)^2} \text{ nm},$$

kde l_n je jmenovitá délka KM dosazená v milimetrech.

3.3 MĚŘENÍ DÉLKY KM BEZKONTAKTNÍM SYSTÉMEM

Tato podkapitola obsahuje vypracovanou metodiku tj. kalibrační postup pro měření délky KM na bezkontaktním systému dle platných mezinárodních norem pro přímé potřeby ČMI OI Liberec.

Vypracovaná metodika je platná pro měření délky KM v rozsahu délek 0,3 mm až 100 mm, tříd přesnosti K, 0, 1 a 2 podle [1]. Bezkontaktní systém je navázán na státní etalon délky prostřednictvím stabilizovaného He–Ne laseru.

Metodika byla vypracována v souladu s dokumenty [1], [2], [4], [45].

3.3.1 Zařízení a pomůcky pro měření délky KM bezkontaktním systémem

Blokové schéma sestavy je uvedeno na obrázku 3.3.1 – 1. Seznam použitých komponent je uveden v tabulce 3.3.1. – 1.

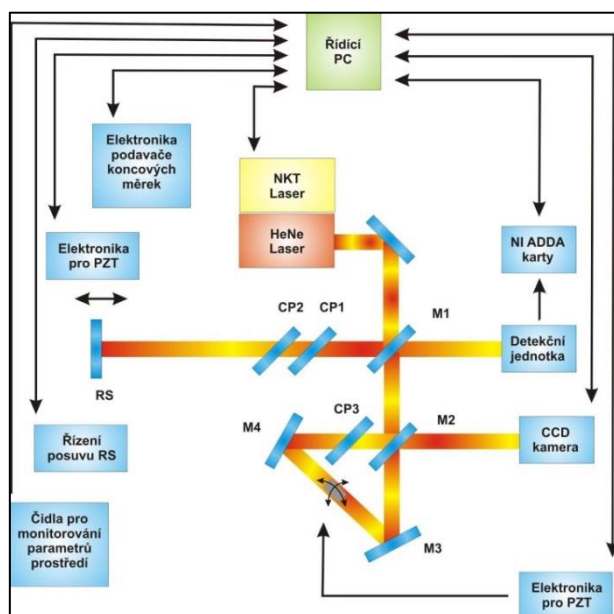
Základem systému je He–Ne stabilizovaný laser o vlnové délce 633 nm, který je navázán na státní etalon. Jako zdroj širokospektrálního optického záření je použit pikosekundový laser. Optické prvky tvoří jednomodová optická vlákna, vláknový dělič sazku, použitý pro sloučení záření He–Ne laseru a NKT laseru, 3“ zrcadla, 3“ klínové děliče svazku a kompenzační desky, pole fotodetektorů a kamera pro záznam interferogramů.

Tabulka 3.3.1. – 1 Použité komponenty

Název dílu	Výrobce
*Stabilizovaný HeNe laser 633 nm SL02/1	SIOS
*Pikosekundový laser SuperK Extreme	NKT Photonics
Teplotní kontrolery, ADDA a VN karty	ÚPT
Dálkové ovládání motorů, PZT	ÚPT
Měřicí karty USB 6361	National Instruments
Optická vlákna, optovláknový dělič	SIOS, SQS, ÚPT
Kolimační čočka AC254–125–C	Thorlabs
Zrcadla, částečně odrážející zrcadla, kompenzační desky	Meopta, ÚPT
CCD kamera 41BU02	TheImagingSource
Matice fotodetektorů, zesilovače signálů	ÚPT
Měřič atmosférického tlaku PTU 303	Vaisala
Měřič vlhkosti vzduchu PTU 303	Vaisala
Měřič koncentrace CO ₂ (0–0,5%)	Almemo
Motorizovaný posuv zrcadla LIMES80	OWIS
Držáky optických komponent 3“	OWIS

**Uvedené položky musí mít platnou kalibraci. V případě dílu Stabilizovaný He–Ne laser 633 nm SL02/1 je kalibrován HeNe laser 633 nm, teplotní čidla včetně referenčního odporu a snímače tlaku, vlhkosti a koncentrace CO₂.*

Nedílnou součástí systému jsou dále přístroje a komponenty pro měření teploty, tlaku, relativní vlhkosti, koncentrace CO₂, elektronika pro generování řídicích signálů a zpracování naměřených dat.



Obr. 3.3.1 – 1 Blokové schéma systému pro bezkontaktní kalibraci KM

Tabulka 3.3.1. – 2 Příslušenství KM pro manipulaci s KM

Název příslušenství			
1	Teploměr pro monitorování teploty v laboratoři	6	Konzervační prostředek (lékařská vazelína)
2	Nádoby pro mytí KM	7	Kleště a pinzety
3	Lékařský benzín	8	Odmagnetovací přístroj
4	Čisticí prostředky (vlasový štětec, optické utěrky, vata, atd.)	9	Brusný kámen arkansas – zabroušený brusným práškem o zrnitosti 3 až 4 μm
5	Kožené nebo látkové rukavice, vinylové bezprachové rukavice	10	Kameninová nebo litinová deska s lapovanou plochou pro temperování KM

3.3.2 Postup měření

Předmětem kalibrace jsou krátké KM v rozsahu od 0,3 do 100 mm.

Postup práce je sestaven z:

1. Přípravy KM a měřicího zařízení.
2. Technické prohlídky KM.
3. Temperování KM.
4. Stanovení odchylky středové délky a odchylky rovinnosti a rovnoběžnosti pomocí automatického vyhodnocovacího systému.
5. Vyhodnocení měření.

Vliv prostředí uvnitř měřicího systému je monitorován pomocí vestavných čidel. Pro měření KM je standardní teplota 20°C, která je automaticky regulována pro celou laboratoř pomocí klimatizace. Je-li během měření překročen jakýkoli parametr, který má vliv na výsledky měření nebo by mohl vést k poškození přístrojů, je nutné měření okamžitě ukončit a závadu odstranit.

3.3.2.1 Zapnutí systému

Měřicí systém musí být zapnut s dostatečným časovým předstihem před vlastním měřením. Důvodem je příprava (zahřátí) jednotlivých komponent na měřicí proces (zahřívání komponent během měřicího procesu by negativně ovlivnilo výsledky měření, či zbytečně prodloužilo temperační interval). Měřicí systém je zapnut bez vložených KM do zásobníku.

Pokud bylo z nějakého důvodu měření přerušeno a systém vypnut na více než 5 hodin, nové měření může být zahájeno nejdříve 24 hodin po opětovném zapnutí systému.

Zapnutí měřicího systému je prováděno v následujících krocích:

1. Odstranit zadní panel z přístrojového stojanového rozvaděče (rozvaděčem se rozumí stojan, ve kterém je umístěn PC, elektronika a NKT laser) – nutné pro zapnutí jednotlivých komponent podle níže uvedených bodů číslo 2 až 5.
2. Přepínačem zapnout prodlužovací kabel ve spodní části rozvaděče.
3. Zapnout NKT laser – přepínač na zadní straně laseru u napájecího kabelu.
4. Zapnout *rack s elektronikou – přepínač na zadní straně racku u napájecího kabelu.
5. Zapnout rack s teplotními kontroléry – přepínač na zadní straně racku u napájecího kabelu.
6. Zapnout obě měřicí karty NI – přepínač na boční straně karty u napájecího kabelu
7. Dokončit zapnutí NKT laseru – klíček na čelním panelu do polohy ON, potvrdit „Interlock“ (tlačítko s otočenou šipkou umístěné vedle displeje na čelním panelu laseru). Vlastní záření laseru se aktivuje stiskem tlačítka „Emission“, které je umístěno na pravé straně čelního panelu laseru. Aktivace je indikována červenou LED diodou umístěnou v blízkosti tlačítka („Emission“). Standardně se aktivace provádí softwarově před vlastním měřením. Laser se v aktivním režimu používá jen pro měřicí proces, jinak musí být vypnutý.
8. Zapnout přepínač na prodlužovacím kabelu – napájení řídicích jednotek motorů na vozíku pod optickou sestavou.
9. Zapnout řídicí jednotku motorů.
10. Zapnout He-Ne laser, umístěný za optickou sestavou – páčkový přepínač pod černým krytem laseru. Laser vyžaduje přibližně 10 minut pro temperaci. Dosažení provozního stavu je indikováno zelenou LED, umístěnou vedle páčkového přepínače.
11. Zapnout PC.
12. Veškeré moduly řídicího programu měřicího systému se spustí souborem „merkostroj.bat“ – ikona umístěná na ploše PC.

**Rack je standardizovaný systém umožňující přehlednou montáž a propojování různých elektrických a elektronických zařízení spolu s vyústěním kabelových rozvodů do sloupců nad sebe v ocelovém rámu.*

3.3.2.2 Kontrola a nastavení systému

Postup kontroly a nastavení měřicího systému je rozdělen do dvou kategorií podle doporučené frekvence provádění jednotlivých úkonů.

Do první kategorie patří kontrola základního nastavení měřicího systému. Do druhé kategorie pravidelná kontrola nastavení měřicího systému.

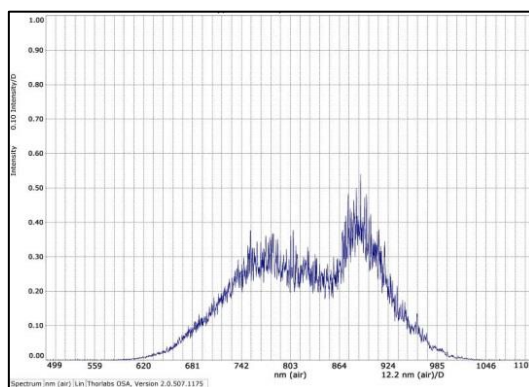
Kontrola základního nastavení měřicího systému

Níže jsou uvedeny základní kontrolní kroky nastavení měřicího systému, které je doporučeno provést při prvním spuštění systému po: dlouhodobé odstávce systému (ve stabilním laboratorním prostředí po více než měsíční nečinnosti systému) a v případě výpadku regulace teploty v laboratoři, která by způsobila změnu teploty mechanických komponent systému v rozsahu větším než $\pm 5^\circ\text{C}$ od standardní laboratorní teploty 20°C .

1. Kontrola tvaru spektra širokospektrálního záření

Tvar spektra širokospektrálního záření je dán nastavením navázání záření NKT laseru do jednomodového optického vlákna.

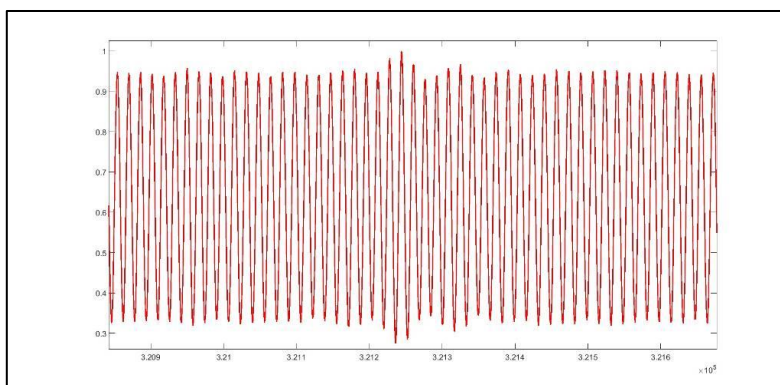
Optimální tvar spektra je zachycen na obrázku 3.3.2. – 1. Spektrum by mělo být bez výraznějších maxim se středem v blízké infračervené oblasti a s co nejnižší intenzitou v rámci vlnové délky 633 nm. Výše uvedené je důležité pro možnost optického oddělení záření NKT a He-Ne laseru v detekční jednotce.



Obr. 3.3.2 – 1 Příklad nastavení spektra širokospektrálního záření NKT laseru

Nastavení spektra se provádí pomocí šroubů držáku vláknového kolimátoru v kolimační jednotce, umístěné v zadní části rozvaděče s elektronikou, nad vlastním NKT laserem. (Kolimační jednotku není nutné odkrýtovat.)

Typickým projevem neoptimálního nastavení spektra je nízký poměr signál x šum u referenčních signálů (bude rozebráno v odstavci 3, SNR by mělo být minimálně 100) a také průnik bílých interferenčních signálů do červených signálů optických pravítek, obrázek 3.3.2 – 2.



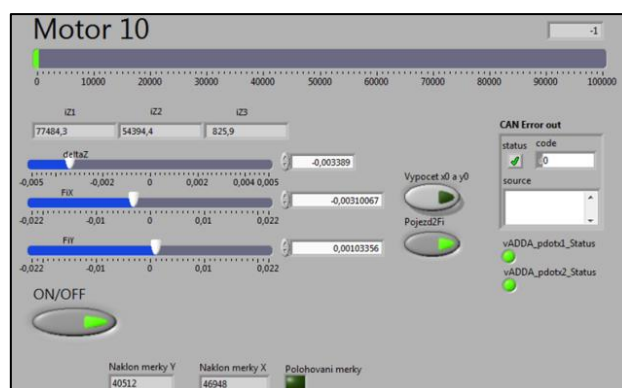
Obr. 3.3.2 – 2 Ukázka akceptovatelné míry průniku bílého interferenčního proužku do červených signálů optických pravítek

2. Kontrola nastavení algoritmu korekce náklonu referenčního zrcadla

Algoritmus korekce náklonu referenčního zrcadla nastavuje velikost napětí na PZT šroubech držáku referenčního zrcadla (označeného v programovém modulu jako RS) tak, aby byly plně kompenzovány úhlové odchylky pojezdu OWIS při polohování zrcadla.

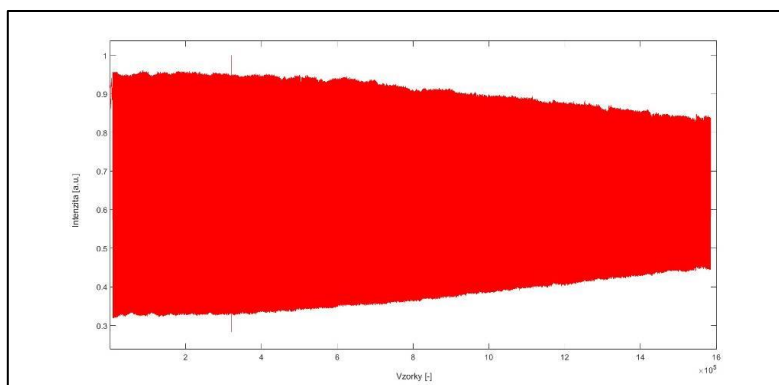
Nastavení počátečních podmínek algoritmu je realizováno pomocí programového modulu „Korekce naklonu RS“, jehož čelní panel je zobrazen na obrázku 3.3.2 – 3.

Při **zapnutém He-Ne laseru** a **vypnutém NKT laseru** vloží obsluha stínítko (bílý proužek papíru) do cesty výstupního svazku ze sestavy, mezi M1 a detekční jednotku (viz obr. 3.3.1 – 1). Pomocí posuvníků FiX a FiY provede nastavení jednoproužkové interference. Stiskem tlačítka „Vypocet x0 a y0“ dojde k vygenerování počátečních podmínek pro algoritmus. Stiskem přepínače „Pojezd2Fi“ se aktivuje regulační algoritmus.



Obr. 3.3.2 – 3 Čelní panel programového modulu KOREKCE NAKLONU RS

Neoptimální funkce algoritmu se projeví jako výrazné změny amplitudy signálu červených pravítek, obrázek 3.3.2 – 4. Neoptimální funkce algoritmu se může projevit také ve formě jednoproužkové interference, ale pouze v poloze, pro kterou byla nastavena. Při posunu RS do jiné polohy je na stínítku pozorovatelných více interferenčních proužků.



Obr. 3.3.2 – 4 Vliv neoptimální funkce algoritmu pro korekci náklonu RS na amplitudu inkrementálního interferenčního signálu (červeného pravítka)

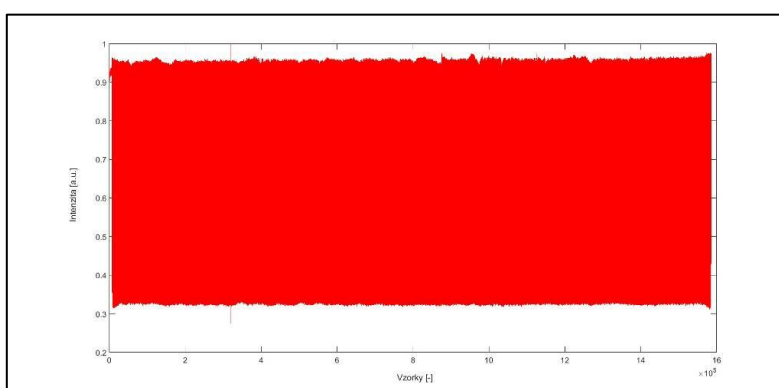
3. Kontrola měřených signálů

Prvním krokem pro kontrolu měření signálů je aktivace algoritmu korekce náklonu RS, popsaná výše v bodě 2.

Při **zapnutém He–Ne laseru** a **zapnutém NKT laseru** se provede referenční měření. Referenční měření se provádí bez vložené KM v rozsahu 0 – 30000 posunu RS (detailněji v podkapitole 3.2.2.4).

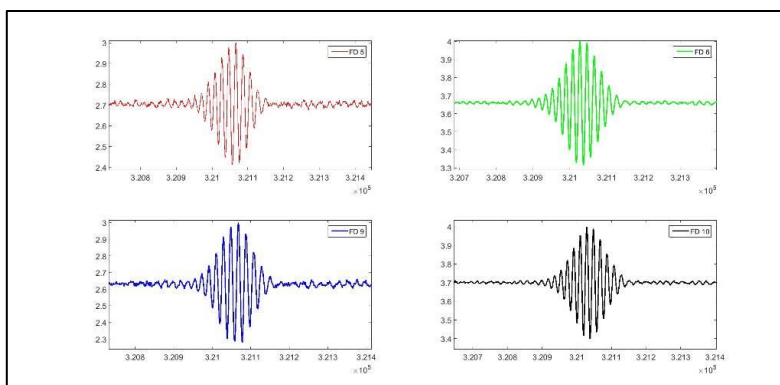
Po aktualizaci názvu souborů a spuštění skriptu jsou generovány průběhy měřených signálů na vybraných fotodetektorech.

Příklad signálů inkrementálního odměřování relativní změny polohy RS (tzv. červená pravítka) je zobrazen na obrázku 3.3.2 – 5. Obsluha kontroluje přítomnost signálů, stabilitu amplitudy a míru pronikání bílého interferenčního proužku (referenční signál s akceptovatelnou mírou průniku bílých proužků do červených pravítek je uveden na obrázku 3.3.2 – 2 a 3.3.2 – 5).



Obr. 3.3.2 – 5 Ukázka optimálního inkrementálního interferenčního signálu (červeného pravítka)

Příklad signálů s bílými interferenčními proužky, označujícími referenční polohu P1 je ukázáno na obrázku 3.3.2 – 6. Obsluha kontroluje přítomnost signálů a symetrii bílého interferenčního proužku vůči jeho středu.



Obr. 3.3.2 – 6 Ukázka optimálního průběhu bílých interferenčních proužků v P1

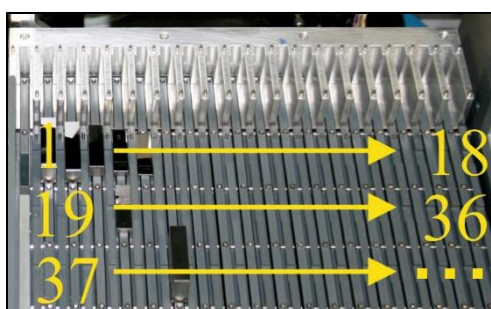
Pravidelná kontrola nastavení měřicího systému

Při běžném provozu měřicího systému je před každým novým měřením délky u sady KM nutná pouze vizuální kontrola přítomnosti jednoproužkové interference na výstupu interferometru a případně její doladění, popsáno výše v bodě 2, podkapitola 3.3.2.2.

3.3.2.3 Příprava KM pro měření

KM se očistí v digestoři od konzervační vrstvy umytím v lékařském benzínu a vyleštěním lapovaných ploch optickou utěrkou, jedná se o tzv. hrubé mytí. Při manipulaci s KM se vždy používají rukavice. Během mytí v digestoři se používají vinylové rukavice. Pro ostatní manipulaci se používají kožené nebo tepelně izolované látkové rukavice s pryžovou vrstvou a speciální kleště nebo pinzety.

Poté je lékařským benzinem umyt i zásobník KM. Provede se vizuální kontrola KM pod lupou. V případě, že je na měřicích plochách KM koroze, rýhy nebo jiné poškození, poškozený povrch se opraví pomocí lapovacího kamene. Dále se KM myjí načisto pomocí vaty a lékařského benzínu a ukládají se k teplotě na kameninovou nebo ocelovou desku (pokud v zásobníku přístroje je umístěna další sada KM ke kalibraci) nebo se vkládají přímo do vstupního zásobníku měřicího přístroje, obrázek 2.5.2 – 2.



A – počet založení KM na řadu

B – správné založení KM

Obr. 3.3.2 – 7 Ukázka založení KM

Do roštu se KM zakládají v určeném pořadí tak, aby byla KM v základací pozici v těsném kontaktu s vymezovacím kolíkem směrem k optické sestavě, zobrazeno na obrázku 3.3.2 – 7.

3.3.2.4 Měření

Vlastní proces měření probíhá plně automaticky bez nutnosti zásahů ze strany obsluhy. Z tohoto důvodu je doporučeno vlastní měření spouštět ze vzdáleného počítače. Zamezí se tím eliminaci nežádoucích mechanických vlivů (otřesů, vibrací) a teplotních změn vlivem pohybu osob v laboratoři v době temperačního cyklu a vlastního měření.

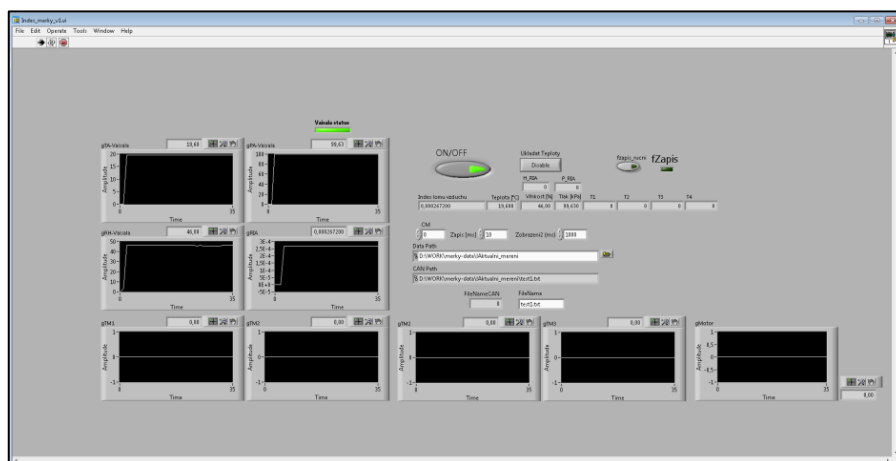
Řídící programy pro vlastní měření délky KM jsou spuštěny pomocí dávkového souboru „merkostroj.bat“.

Před spuštěním souboru je nutné provést následující kontroly a nastavení:

1. Modul „Index merky“

Modul slouží k monitorování atmosférických podmínek měření. Je provedena kontrola potvrzení spojení modulu s měřicí aparaturou – kontrola hodnot teplot, tlaku, relativní vlhkosti a koncentraci CO₂ ve vzduchu. V případě vychýlení hodnot z doporučených mezních hodnot měření se nepokračuje ve spouštění měření, ale provedou se kroky vedoucí k dosažení předepsaných laboratorních podmínek pro kalibraci KM.

Index lomu vzduchu pro korekci vlnové délky He–Ne laseru je počítán a ukládán automaticky. Výpočet se provádí podle modifikované Edlénovi rovnice podle Bönsch, Potulski – kapitola 3.2.



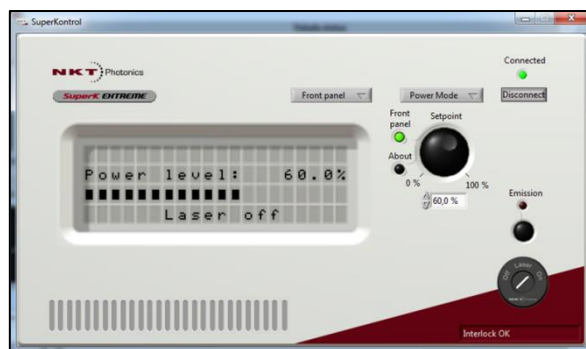
Obr. 3.3.2 – 8 Čelní panel modulu „Index merky“

2. Modul „Korekce náklonu RS“

Provede se nastavení a aktivace dle podkapitoly 3.2.2.2 – Kontrola základního nastavení měřicího systému, bod 2.

3. Modul „SuperKontrol“

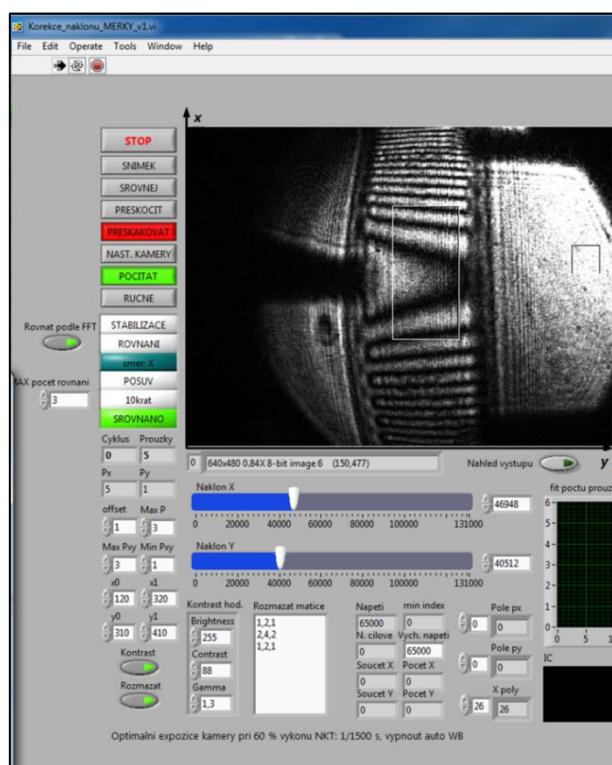
Modul umožňuje zapnutí a vypnutí záření NKT laseru ze vzdáleného PC. Provede se stiskem tlačítka „Emission“, indikováno je svítící červenou kontrolkou, umístěnou nad tímto tlačítkem, zobrazeno na obrázku 3.3.2 – 9. Výkon laseru je nastaven na 60%.



Obr. 3.3.2 – 9 Čelní panel modulu „SuperKontrol“

4. Modul „Korekce naklonu MERKY“

Modul slouží pro korekci úhlové odchylky osy měřené KM a osy měřicího svazku. Čelní panel tohoto modulu je na obrázku 3.3.2 – 10.



Obr. 3.3.2 – 10 Čelní panel modulu „SuperKontrol“

Před vlastním měřením je doporučeno provést následující kroky:

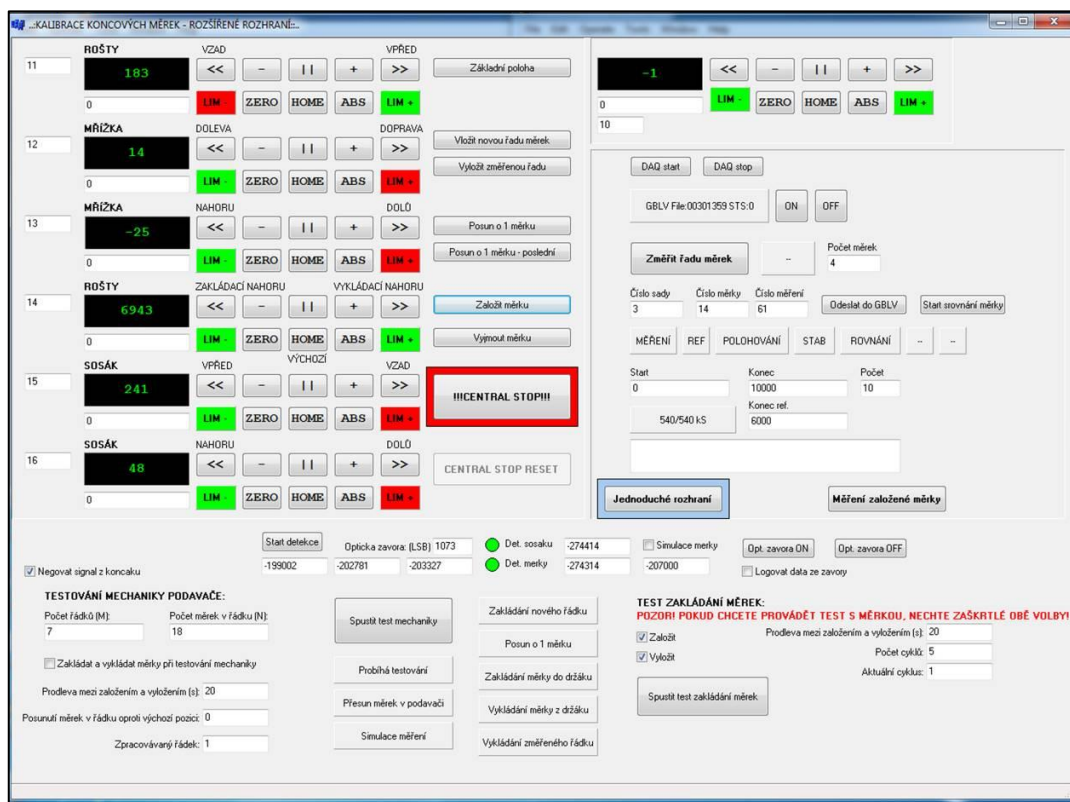
1. Stiskem tlačítka „Snímek“ je načten aktuální snímek z kamery a ověřena tak funkčnost komunikace.
2. Stiskem tlačítka „Nast. Kamery“ se přejde do nastavení kamery, kde dochází k ověření, zda je expoziční čas správně nastaven. Doporučeno je 1/1500 sekund při výkonu NKT laseru 60%. Doporučuje se před spuštěním vlastního měření vybrat jednu KM ze sady pro kalibraci a na ní ověřit funkčnost algoritmu pro

rovnání KM (tzn. vybranou KM založit do měřicí pozice a stiskem tlačítka „Srovnej“ algoritmus aktivovat).

5. Modul „Podavac“

Modul slouží pro ovládání podavače KM. Přes daný modul lze také spouštět, sledovat a případně nouzově ukončovat vlastní měření délky KM.

Čelní panel modulu je zobrazen na obrázku 3.3.1 – 12.



Obr. 3.3.2 – 11 Čelní panel modulu „Podavac“

Před vlastním měření je nutné aktualizovat následující položky:

1. „Počet měrek“ – celkový počet měřených KM (počet KM ve všech řádcích). KM musí být řazeny dle obrázku 3.3.2 – 7.
2. „Číslo sady“ – jedná se o číselné označení sady KM. Číslo zůstává po celou dobu měření stejné.
3. „Číslo měrky“ – například „1“, toto číslo se s každou měřenou KM zvyšuje o 1.
4. „Konec“ – určuje rozsah pohybu RS a tím i schopnost změřit KM do určité jmenovité délky. Udává se jmenovitý rozměr nejdelší KM v sadě. Hodnota je společná pro celou sadu KM. Návod pro vhodné nastavení hodnoty je uveden v tabulce 3.3.1. – 3. Nastavuje se max. do hodnoty „106000“.
5. „Počet“ – jedná se počet opakování měření délky KM. Důležitá hodnota pro výpočet nejistoty měření tj. výpočet výběrové směrodatné odchylky. Doporučeno nechat na hodnotě 10.

Tabulka 3.3.2. – 1 Doporučené nastavení rozsahu pohybu RS

Jmenovitá délka KM	Rozsah měření
do 1,5 mm	0 – 10.000
do 7 mm	0 – 15.000
do 10 mm	0 – 20.000
do 20 mm	0 – 30.000
do 60 mm	0 – 60.000
do 100 mm	0 – 106.000

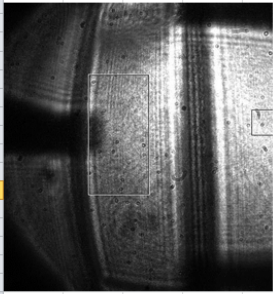
Vlastní měřicí proces se spustí tlačítkem „ZMĚŘIT ŘADU MĚREK“.

Měřicí proces je možné nouzově zastavit tlačítkem „CENTRAL STOP“.

3.3.2.5 Vyhodnocení

Naměřená data jsou automaticky uložena v adresáři „!Aktuální_měření“.

Nejprve jsou data zkopírována do nového adresáře, poté se pomocí skriptu v MATLABu „zpracovani_dat.m“ aktualizují čísla souborů odpovídající naměřeným datům a spustí se výpočet. Výsledná data jsou exportována v podobě Excelovské tabulky – zobrazeno na obrázku 3.3.2 – 12.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Datum	9.2.2016	Čas	22:06					
2									
3	Specifikace koncové měřky				Podmínky měření				
4									
5	Číslo objednávky	obj007			Teplota	20,324°C			
6	Číslo sady	1103816			Tlak	96,39 kPa			
7	Číslo měřky	gb012006			Vlhkost	44,70%			
8	Výrobce	Mitutoyo			Index lomu vzduchu	1,0002579			
9	Materiál	Ocel							
10	Třída	0							
11	Nominální délka	1,180 mm							
12	Teplotní roztažnost	10,8 ppm/K							
13									
14	Poloha měřky před měřením				Výsledek měření				
15									
16					Střední hodnota	1,179990 mm			
17					Směrodatná odchylka	29 nm			
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
26									
27									
28									
29									
30									
31									

Obr. 3.3.2 – 12 Výsledná data

3.3.3 Nejistota měření

Vyhodnocení nejistoty měření je provedeno v souladu s dokumenty [1], [2], [4], [45]. Do výsledné nejistoty jsou započítány nejvýznamnější zdroje nejistot, které byly stanoveny v rámci podkapitoly 3.2.

Výpočet nejistoty měření, která je uznána jako CMC je uvedena v tabulce 3.3.3 – 1A a 1B.

Tabulka 3.3.3 – 1A Výpočet nejistoty měření – relativní složka

Relativní složka standardní nejistoty	$U(x_i)$	Rozdělení	Počet stupňů volnosti ν	Koeficient citlivosti $c_i \equiv \partial f / \partial x_i$	Výsledná standardní nejistota $u_i(l) \left[\frac{nm}{mm} \right] \times l_n$
Vlnová délka laseru za podmínek měření	2×10^{-5} nm	normální	1000	$1580 \frac{nm}{mm} \times l_n$	0,016
Rozlišení tlakoměru – Vaisala PTU 303	10 Pa	rovnoměrné	1000	$2,684 \times 10^{-3} \frac{nm}{Pa \times mm} \times l_n$	0,016
Chyba tlakoměru – Vaisala PTU 303	12 Pa	rovnoměrné	1000	$2,684 \times 10^{-3} \frac{nm}{Pa \times mm} \times l_n$	0,019
Nejistota měření tlakoměru – Vaisala PTU 303	20 Pa	normální	1000	$2,684 \times 10^{-3} \frac{nm}{Pa \times mm} \times l_n$	0,027
Rozlišení teploměru ÚPT/1	0,001 °C	rovnoměrné	1000	$0,955 \frac{nm}{^{\circ}C \times mm} \times l_n$	0,001
Chyba teploměru ÚPT/1	0,02 °C	rovnoměrné	1000	$0,955 \frac{nm}{^{\circ}C \times mm} \times l_n$	0,017
Nejistota teploměru ÚPT/1	0,02 °C	normální	1000	$0,955 \frac{nm}{^{\circ}C \times mm} \times l_n$	0,010
Rozlišení vlhkoměru – Vaisala PTU 303 s čidlem vlhkosti Humicap 180	0,1 %	rovnoměrné	1000	$8,659 \times 10^{-3} \frac{nm}{\% \times mm} \times l_n$	0,001
Chyba vlhkoměru – Vaisala PTU 303 s čidlem vlhkosti Humicap 180	0,5 %	rovnoměrné	1000	$8,659 \times 10^{-3} \frac{nm}{\% \times mm} \times l_n$	0,003
Nejistota měření vlhkoměru – Vaisala PTU 303 s čidlem vlhkosti Humicap 180	2 %	normální	1000	$8,659 \times 10^{-3} \frac{nm}{\% \times mm} \times l_n$	0,009
Rozlišení převodníku koncentrace CO ₂ – Vaisala GM70	10 ppm	rovnoměrné	1000	$1,448 \times 10^{-4} \frac{nm}{ppm \times mm} \times l_n$	0,001
Chyba převodníku koncentrace CO ₂ – Vaisala GM70	20 ppm	rovnoměrné	1000	$1,448 \times 10^{-4} \frac{nm}{ppm \times mm} \times l_n$	0,002
Nejistota měření převodníku koncentrace CO ₂ – Vaisala GM70	100 ppm	normální	1000	$1,448 \times 10^{-4} \frac{nm}{ppm \times mm} \times l_n$	0,007
Vliv způsobu výpočtu vlnové délky dle Edlénovy rovnice za podmínek prostředí	2×10^{-8}	rovnoměrné	1000	$1 \times 10^6 \frac{nm}{mm} \times l_n$	0,012
Velikost zdroje	7 μm	rovnoměrné	1000	$3 \times 10^{-3} \frac{nm}{\mu m \times mm} \times l_n$	0,012
Divergence svazku (kos32)	$2 \times 10^{-2} \frac{nm}{mm}$	rovnoměrné	1000	l_n	0,012
Rozlišení teploměru/2	0,001 °C	rovnoměrné	1000	$11,5 \frac{nm}{^{\circ}C \times mm} \times l_n$	0,007
Chyba teploměru/2 a přesnost měření teploty KM	0,025 °C	rovnoměrné	1000	$11,5 \frac{nm}{^{\circ}C \times mm} \times l_n$	0,166
Nejistota teploměru/2	0,01 °C	normální	1000	$11,5 \frac{nm}{^{\circ}C \times mm} \times l_n$	0,058
Teplotní součinitel délkové roztažnosti KM	$1 \frac{ppm}{^{\circ}C}$	rovnoměrné	1000	$0,3 \text{ } ^{\circ}C \times l_n$	0,173
Kombinovaná standardní nejistota relativní části $u_c(l) \left[\frac{nm}{mm} \right] \times l_n$					0,252
Počet efektivních stupňů volnosti ν_{eff} [–]					2403
koeficient rozšíření $k_{95\%}$ [–]					1,961
Rozšířená nejistota relativní části $\left[\frac{nm}{mm} \right] \times l_n$					0,49

kde l_n je jmenovitá délka KM v [mm].

Tabulka 3.3.3 – 1B Výpočet nejistoty měření – konstantní složka

Konstantní složka standardní nejistoty	$U(x_i)$	Rozdělení	Počet stupňů volnosti v	Koeficient citlivosti $c_i \equiv \partial f / \partial x_i$	Výsledná standardní nejistota $u_i(l)$ [nm]
Rozptyl měřených hodnoty délky KM	$\frac{35 \text{ nm}}{\sqrt{10}}$	–	9	1	11,1
Aberace optické soustavy	0,1 proužku	rovnoměrné	100	316,5 nm	18,3
Rovinnost a rovnoběžnost měřené plochy KM	3 nm	rovnoměrné	1000	1	1,7
Určení středu bílého interferenčního proužku	3 nm	rovnoměrné	1000	1	1,7
Určení zlomku červeného interferenčního proužku	0,01172 proužku	rovnoměrné	1000	316,5 nm	2,1
Korekce změny fáze laseru	20 nm	normální	1000	1	10
Pevně umístěná polopropustná zrcadla ve vzdálenosti 400 mm	$3,21 \times 10^{-2} \text{ nm}$	rovnoměrné	1000	1	0,02
Úhlová chyba vložení KM do sestavy	$1,65 \times 10^{-2} \text{ nm}$	rovnoměrné	1000	1	0,01
Divergence svazku (kos31)	10 nm	rovnoměrné	1000	1	5,8
Vliv změny teploty na základní litinovou desku – posun optických komponent	0,003 °C	rovnoměrné	1000	$4920 \frac{\text{nm}}{^\circ\text{C}}$	8,5
Vliv změny teploty na základní litinovou desku – posun mechanických komponent	0,003 °C	rovnoměrné	1000	$1150 \frac{\text{nm}}{^\circ\text{C}}$	2,0
Kombinovaná standardní nejistota konstantní části $u_c(l)$ [nm]					26,038
Počet efektivních stupňů volnosti v_{eff} [–]					164
koeficient rozšíření $k_{95\%}$ [–]					1,975
Rozšířená nejistota konstantní části [nm]					51,416

Velikost nejistoty měření U je:

$$U = \sqrt{51^2 + (0,5 \times l_n)^2} \text{ nm},$$

kde je l_n jmenovitá délka KM udaná v milimetrech.

3.3.3.1 Příklad výpočtu nejistoty měření pro KM jmenovité délky 50 mm

Uvedený příklad v tabulce 3.3.3 – 2 je zaměřen na konkrétní výpočet nejistoty měření KM o jmenovité délce 50 mm.

 Tabulka 3.3.3 – 2 Výpočet nejistoty měření, KM $l_n=50 \text{ mm}$

Složka standardní nejistoty	$U(x_i)$	Rozdělení	*PSV v	Koeficient citlivosti $c_i \equiv \partial f / \partial x_i$	Výsledná standardní nejistota $u_i(l)$ [nm]
Vlnová délka laseru za podmínek měření	$2 \times 10^{-5} \text{ nm}$	normální	1000	$1580 \frac{\text{nm}}{\text{mm}} \times l_n \times 50 \text{ mm}$	0,8
Rozlišení tlakoměru – Vaisala PTU 303	10 Pa	rovnoměrné	1000	$2,684 \times 10^{-3} \frac{\text{nm}}{\text{Pa} \times \text{mm}} \times 50 \text{ mm}$	0,8
Chyba tlakoměru – Vaisala PTU 303	12 Pa	rovnoměrné	1000	$2,684 \times 10^{-3} \frac{\text{nm}}{\text{Pa} \times \text{mm}} \times 50 \text{ mm}$	0,9
Nejistota měření tlakoměru – Vaisala PTU 303	20 Pa	normální	1000	$2,684 \times 10^{-3} \frac{\text{nm}}{\text{Pa} \times \text{mm}} \times 50 \text{ mm}$	1,3
Rozlišení teploměru ÚPT/1	0,001 °C	rovnoměrné	1000	$0,955 \frac{\text{nm}}{^\circ\text{C} \times \text{mm}} \times 50 \text{ mm}$	0,0
Chyba teploměru ÚPT/1	0,02 °C	rovnoměrné	1000	$0,955 \frac{\text{nm}}{^\circ\text{C} \times \text{mm}} \times 50 \text{ mm}$	0,8
Nejistota teploměru ÚPT/1	0,02 °C	normální	1000	$0,955 \frac{\text{nm}}{^\circ\text{C} \times \text{mm}} \times 50 \text{ mm}$	0,5

Složka standardní nejistoty	$U(x_i)$	Rozdělení	*PSV v	Koeficient citlivosti $c_i \equiv \partial f / \partial x_i$	Výsledná standardní nejistota $u_i(l)$ [nm]
Rozlišení vlhkoměru – Vaisala PTU 303 s čidlem vlhkosti Humicap 180	0,1 %	rovnoměrné	1000	$8,659 \times 10^{-3} \frac{\text{mm}}{\% \times \text{mm}} \times 50 \text{mm}$	0,0
Chyba vlhkoměru – Vaisala PTU 303 s čidlem vlhkosti Humicap 180	0,5 %	rovnoměrné	1000	$8,659 \times 10^{-3} \frac{\text{mm}}{\% \times \text{mm}} \times 50 \text{mm}$	0,1
Nejistota měření vlhkoměru – Vaisala PTU 303 s čidlem vlhkosti Humicap 180	2 %	normální	1000	$8,659 \times 10^{-3} \frac{\text{mm}}{\% \times \text{mm}} \times 50 \text{mm}$	0,4
Rozlišení převodníku koncentrace CO ₂ – Vaisala GM70	10 ppm	rovnoměrné	1000	$1,448 \times 10^{-4} \frac{\text{nm}}{\text{ppm} \times \text{mm}} \times 50 \text{mm}$	0,0
Chyba převodníku koncentrace CO ₂ – Vaisala GM70	20 ppm	rovnoměrné	1000	$1,448 \times 10^{-4} \frac{\text{nm}}{\text{ppm} \times \text{mm}} \times 50 \text{mm}$	0,1
Nejistota měření převodníku koncentrace CO ₂ – Vaisala GM70	100 ppm	normální	1000	$1,448 \times 10^{-4} \frac{\text{nm}}{\text{ppm} \times \text{mm}} \times 50 \text{mm}$	0,4
Vliv způsobu výpočtu vlnové délky dle Edlénovy rovnice za podmínek prostředí	2×10^{-8}	rovnoměrné	1000	$1 \times 10^6 \frac{\text{nm}}{\text{mm}} \times 50 \text{mm}$	0,6
Velikost zdroje	7 μm	rovnoměrné	1000	$3 \times 10^{-3} \frac{\text{nm}}{\mu\text{m} \times \text{mm}} \times 50 \text{mm}$	0,6
Divergence svazku (kos32)	$2 \times 10^{-2} \frac{\text{nm}}{\text{mm}}$	rovnoměrné	1000	50 mm	0,6
Rozlišení teploměru/2	0,001 °C	rovnoměrné	1000	$11,5 \frac{\text{nm}}{^\circ\text{C} \times \text{mm}} \times 50 \text{mm}$	0,3
Chyba teploměru/2 a přesnost měření teploty KM	0,025 °C	rovnoměrné	1000	$11,5 \frac{\text{nm}}{^\circ\text{C} \times \text{mm}} \times 50 \text{mm}$	8,3
Nejistota teploměru/2	0,01 °C	normální	1000	$11,5 \frac{\text{nm}}{^\circ\text{C} \times \text{mm}} \times 50 \text{mm}$	2,9
Teplotní součinitel délkové roztažnosti KM	$1 \frac{\text{ppm}}{^\circ\text{C}}$	rovnoměrné	1000	$0,3 \text{ } ^\circ\text{C} \times 50 \text{mm}$	8,7
Rozptyl měřených hodnoty délky KM	$\frac{35 \text{ nm}}{\sqrt{10}}$	–	9	1	11,1
Aberace optické soustavy	0,1 proužku	rovnoměrné	100	316,5 nm	18,3
Rovinnost a rovnoběžnost měřené plochy KM	3 nm	rovnoměrné	1000	1	1,7
Určení středu bílého interferenčního proužku	3 nm	rovnoměrné	1000	1	1,7
Určení zlomku červeného interferenčního proužku	0,01172 proužku	rovnoměrné	1000	316,5 nm	2,1
Korekce změny fáze laseru	20 nm	normální	1000	1	10
Pevně umístěná polopropustná zrcadla ve vzdálenosti 400 mm	$3,21 \times 10^{-2}$ nm	rovnoměrné	1000	1	0,02
Úhlová chyba vložení KM do sestavy	$1,65 \times 10^{-2}$ nm	rovnoměrné	1000	1	0,01
Divergence svazku (kos31)	10 nm	rovnoměrné	1000	1	5,8
Vliv změny teploty na základní litinovou desku – posun optických komponent	0,003 °C	rovnoměrné	1000	$4920 \frac{\text{nm}}{^\circ\text{C}}$	8,5
Vliv změny teploty na základní litinovou desku – posun mechanických komponent	0,003 °C	rovnoměrné	1000	$1150 \frac{\text{nm}}{^\circ\text{C}}$	2,0
Kombinovaná standardní nejistota $u_c(l)$ [nm]					28,9
Počet efektivních stupňů volnosti v_{eff} [–]					250
koeficient rozšíření $k_{95\%}$ [–]					1,970
Rozšířená nejistota [nm]					57

* PSV – počet stupňů volnosti

Odpovídající rozšířená nejistota je $U_{95} = k_{95} \times u_c(50)$ tj. $U = 1,970 \times 28,9 = 56,93$,
zaokrouhleně 57 nm, tj. 0,000057 mm.

Výsledek měření

Aritmetický průměr z 10 opakovaných měření délek je 17 nm (0,000017 mm).
Hodnota středové délky KM l_n je tedy $l_n = 50 + 0,000017 = 50,000017$ mm.

Konečný výsledek měření lze vyjádřit jako: $l_n = (50,000017 \pm 0,000057)$ mm.

3.4 MEZISYSTÉMOVÉ POROVNÁNÍ STÁVAJÍCÍCH SYSTÉMŮ K MĚŘENÍ DÉLKY KM S BEZKONTAKTNÍM SYSTÉMEM

Tato podkapitola obsahuje porovnání stávajících systémů ke kalibraci KM používaných v ČMI OI Liberec s bezkontaktním systémem.

Při porovnání měřicích systémů byly nejprve definovány základní požadavky (nízká časová náročnost, nepoškození KM, vysoká přesnost a nízká nejistota měření, měření délek KM do 300 mm, nízké náklady na provoz, atd.), které jsou na systémy pro měření délky KM kladeny. Ty pak byly porovnány se základními vlastnostmi a parametry jednotlivých posuzovaných systémů.

3.4.1 Podmínky měření a příprava KM

Informace o podmínkách měření a přípravě KM jsou uvedeny v kapitole 3. Experimentální část.

Pro mezisystémové porovnání byly vybrány KM jmenovitých délek: 0,5; 1; 1,005; 1,12; 2,5; 7; 10; 18; 20; 25; 50; 75; 90; 100. Základní parametry KM jsou uvedeny v tab. 3.4.1 – 1.

Tabulka 3.4.1 – 1 Základní parametry udávané pro KM

Jmenovitá délka KM (mm)	Třída přesnosti	Typ	Teplotní souč. délkové roztažnosti $\left[\frac{\mu m}{m \times ^\circ C} \right]$	Výrobce
0,5	0	ocel	10,8 ±0,5	Mitutoyo
1	0	ocel	10,8 ±0,5	Mitutoyo
1,005	0	ocel	10,8 ±0,5	Mitutoyo
1,12	0	ocel	10,8 ±0,5	Mitutoyo
2,5	0	ocel	10,8 ±0,5	Mitutoyo
7	0	ocel	10,8 ±0,5	Mitutoyo
10	0	ocel	10,8 ±0,5	Mitutoyo
18	0	ocel	10,8 ±0,5	Mitutoyo
20	0	ocel	10,8 ±0,5	Mitutoyo
25	0	ocel	10,8 ±0,5	Mitutoyo
50	0	ocel	10,8 ±0,5	Mitutoyo
75	0	ocel	10,8 ±0,5	Mitutoyo
90	0	ocel	10,8 ±0,5	Mitutoyo
100	0	ocel	10,8 ±0,5	Mitutoyo

Volba měřicích systémů byla provedena tak, aby byly zastoupeny dosavadní systémy používané v ČMI k měření délky KM a nově zaváděný bezkontaktní systém.

Bezkontaktní systém, TESA NPL A.G.I. 300 a TESA–UPC jsou přístroje, na kterých je realizováno měření délky KM pomocí metody komparační nebo–li porovnávací.

Měření délky pomocí bezkontaktního systému a TESA NPL A.G.I. 300 je postaveno na porovnání délky se známým etalonem tj. délkou světelné vlny. Přibližná délka KM je známa (z jejího označení), proto se určuje jen zlomek, o který délka KM převyšuje celkový počet vlnových délek světla.

Měření délky prostřednictvím systému TESA–UPC je založeno na porovnávání KM se známým etalonem tj. KM se stejnou jmenovitou délkou, ale vyšší přesností. Měření délky KM u systému probíhá tak, že se hroty snímače dotýkáme povrchu KM.

3.4.2 Porovnání měřicích systémů pro kalibrace krátkých KM

Systémy byly porovnávány z hlediska návaznosti na státní etalon, podmínek realizace a časové náročnosti měření, poškození KM při měření, přesnosti a nejistoty měření, minimální a maximální měřené délky KM, pořizovací ceny a nákladů na provoz.

1. Návaznost na státní etalony

TESA NPL A.G.I. 300

Systém je přímo navázán na státní etalon délky prostřednictvím femtosekundového generátoru hřebene optických frekvencí a jodem stabilizovaného He–Ne laseru – 633 nm.

Bezkontaktní systém

Bezkontaktní systém je přímo navázán na státní etalon délky prostřednictvím stabilizovaného He–Ne laseru – 633 nm.

TESA–UPC

Systém je navázán na státní etalon délky prostřednictvím etalonových KM – 1. řádu měřených na interferenčním komparátoru TESA NPL A.G.I. 300 a porovnávaných s etalonem, kterým je délka světelné vlny, jodem stabilizovaného He–Ne laseru – 633 nm, interferenčního komparátoru TESA NPL A.G.I. 300. Pro přehlednost vysvětleno v kapitole 2.4. – tabulka 2.4 – 1 – Navázání KM na státní etalon (schéma návaznosti KM).

Metody měření délky KM aplikované na přístrojích TESA NPL A.G.I. 300 a TESA–UPC jsou definovány v mezinárodní normě ČSN EN ISO 3650 jako standard.

2. Podmínky realizace a časová náročnost měření

TESA NPL A.G.I. 300

Na daném systému lze měřit pouze KM s vysokou kvalitou měřicích ploch (nesmějí obsahovat silné škrábance, rýhy, atd.). Jedná se o KM třídy přesnosti K – 0, spadající do 1. sekundárního řádu (systém navázání měřidel na státní etalon viz. tabulka 2.4 – 1, podkapitola 2.4). Kvalita nasunutí k desce závisí na vlastnostech povrchu KM a referenční desky. KM nižšího řádu tj. 2 – 5 bývají většinou poškozené a bylo by velmi obtížné až nemožné je na referenční desku nasunout.

Není možné měřit jen jednu samotnou KM, ale vždy musí být měřeny více než 2 ks KM. Dostatečně spolehlivé je toto měření při použití čtyř a více KM. Ideální je měření sady KM (např. 122 ks KM). Celá sada KM či určitého počtu kusů musí být měřena na stejné referenční desce, z důvodu korekce ztráty fáze laseru (stejně KM na různých referenčních deskách, ač z totožného materiálu a opracované stejným způsobem, budou mít jinou hodnotu korekce ztráty fáze laseru).

Systém vyžaduje velmi vysokou náročnost z hlediska přípravné fáze a vlastního měření. U přípravné fáze se jedná o temperaci KM, seřízení aparatury měřicího systému a kvalitního nasunutí KM na referenční desku. Z hlediska měřicího procesu jde zejména o dodržení měřicího postupu.

Naměřené hodnoty je nutné kontrolovat kompletním opakovaným měřením. Pokud měření délky KM provádí více laborantů, všichni musí měření provádět nezávisle na sobě.

Změření celé sady KM (122 ks) trvá 1 až 3 měsíce.

Vysoce kvalifikovaný laborant je požadovanou nutností při obsluze daného systému. Pokud by měření prováděl nezkušený laborant, hrozí výrazné poškození jak měřených KM, tak i samotného interferometru. Zaškolení laboranta trvá velice dlouho a minimálně prvních 6 měsíců musí pracovat pod dohledem vyškoleného laboranta. Poté musí být jeho práce stále sledována a naměřené výsledky kontrolovány.

Bezkontaktní systém

Na daném systému lze měřit KM třídy přesnosti K až 2 s vysokou i nižší kvalitou povrchu, spadající do 1. – 5. sekundárního řádu. Poškozený (silně poškrábaný) povrch KM může způsobit deformaci vlnoploch odraženého světla a tím i nedostatečně kvalitní interferenci.

Lze měřit jednu samostatnou KM bez nutnosti měření celé sady KM.

Systém stejně jako TESA NPL A.G.I. 300 vyžaduje náročnost z hlediska přípravné fáze, tj. temperace KM a seřízení aparatury měřicího systému. Naměřené hodnoty je nutné kontrolovat.

Změření celé sady KM (122 ks) trvá 1 až 4 dny, dle nastavení doby temperace.

K měření délky KM postačuje pouze jeden kvalifikovaný laborant. V rámci měřicího procesu laborant pouze provádí základní kontrolu nastavení systému, spuštění a vypnutí měřicího cyklu, vložení a vykládání KM do a ze zásobníku a dodržení provozních podmínek.

Měřicí proces probíhá plně automaticky bez nutnosti zásahů ze strany obsluhy. Z tohoto důvodu je doporučeno vlastní měření spouštět ze vzdáleného počítače. Zamezí se tím eliminaci nežádoucích mechanických vlivů (otřesů, vibrací) a teplotních změn vlivem pohybu osob v laboratoři v době temperačního cyklu a vlastního měření.

Doba procesu měření závisí na délce měřených KM a kvalitě povrchu měřicích ploch. Řídící program umožňuje nastavit pouze jeden rozsah měření pro celou sadu KM. Tento rozsah je dán nejdelší KM v měřené sadě. Čas měření jedné KM je uveden v tabulce 3.4.2 – 1.

Tabulka 3.4.2 – 1 Čas měření KM

Jmenovitá délka KM [mm]	Rozsah měření [a.u.]	Čas měření jedné KM [min]
do 1,5	0 – 10 000	3
do 7	0 – 15 000	4
do 10	0 – 20 000	5
do 20	0 – 30 000	7
do 60	0 – 60 000	11
do 100	0 – 106 000	21

Z hlediska kvality měřicích ploch KM je délka měření ovlivněna vhodným nastavením programového modulu pro optimalizaci natočení osy KM vůči ose měřicího svazku. Aktivace algoritmu pro optimalizaci polohy KM v měřicím systému může dobu měření každé KM prodloužit o několik minut.

TESA–UPC

Systémem lze měřit KM třídy přesnosti 1 – 2 s nízkou kvalitou povrchu KM (rýhy, škrábance, atd.), spadající do 2. – 5. sekundárního řádu.

Lze měřit jen jednu samotnou KM, ke které je příslušná etalonová KM tzn., nemusí být měřena sada KM.

Systém vyžaduje náročnost z hlediska přípravné fáze a vlastního měření. U přípravné fáze se jedná o temperaci KM včetně celé aparatury měřicího systému (dotyky). Z hlediska měřicího procesu jde zejména o dodržení měřicího postupu.

Naměřené hodnoty je nutné kontrolovat. Měření délky KM 2. sekundárního řádu provádí nezávisle 2 laboranti (každý vykoná 6 sérií měření). Měření délky KM 3., 4. a 5. sekundárního řádu vykoná 1 laborant (6 sérií měření).

Z hlediska časové náročnosti je nutné na změření celé sady KM (122 ks) 1 až 2 týdny.

Měření délky KM není technicky tolik náročné, jako při měření na TESA NPL A.G.I. 300. Avšak, při nesprávné manipulaci s KM a přístrojem hrozí poškození snímačů – dotyků. Pro kontrolu prováděných měření je nutné, aby laborant byl dostatečně zkušený a dokázal rozpoznat, že aktuálně naměřené výsledky mohou být chybné, např. díky nečistotám na KM nebo na dotykách snímače.

Nutností je vlastnit ekvivalentní sadu (či jednotlivé) KM, která má vyšší přesnost než měřené KM.

3. Poškození KM při měření

TESA NPL A.G.I. 300

Aby mohla být změřena délka, musí být KM uchycena nasunutím k referenční desce (s vysokou přilnavostí a rovinností). Nasunutí KM na desku se neobejde bez povrchového poškození KM i desky. Poškození je ve formě nevratných rýh, škrábanců, tj. plastické deformace, obrázek 3.4.2 – 1AB.



A – Před měřením délky KM



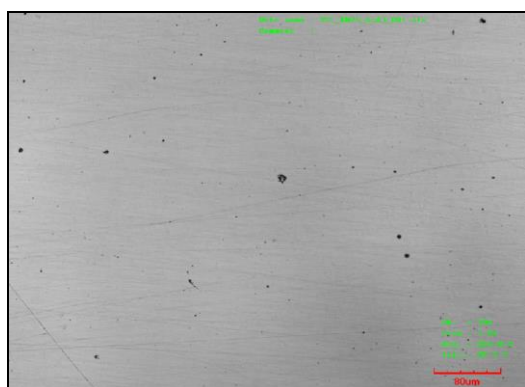
B – Po měření délky KM

Obr. 3.4.2 – 1 Povrchové poškození KM jmenovité délky 25 mm – TESA NPL A.G.I. 300

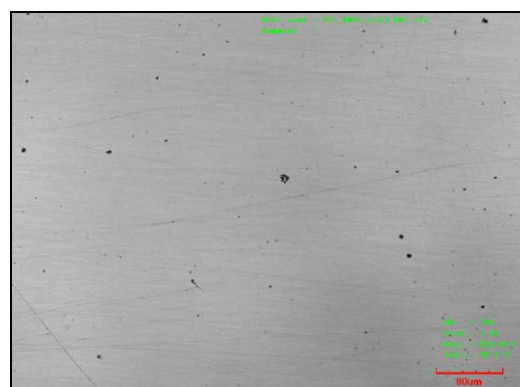
Z dlouhodobých zkušeností ČMI OI Liberec bylo zjištěno, že sada KM třídy přesnosti K, dle normy [1], má odpovídající kvalitu povrchu pro danou metodu měření cca. 6 let, při pravidelné roční kalibraci. Po realizaci 6 kalibrací bývají KM natolik poškozené, že není možné již realizovat danou metodu měření.

Bezkontaktní systém

KM je při měření délky umístěna v optické sestavě na trojici bodových podpěr ocelového držáku. Na měřicí pozici ji transportuje unašeč. Během transportu a ani v rámci umístění nedochází k poškození povrchu KM. Toto konstatování vyplývá z prováděných měření povrchu KM v rámci daného měření délky na systému (měření bylo provedeno na sadě KM o 122 ks KM), viz obrázek 3.4.2 – 2. Obrázek ukazuje povrch KM jmenovité délky 25 mm před a po měření délky KM.



Před měřením délky KM



Po měření délky KM

Obr. 3.4.2 – 2 Povrchové poškození KM jmenovité délky 25 mm – bezkontaktní systém

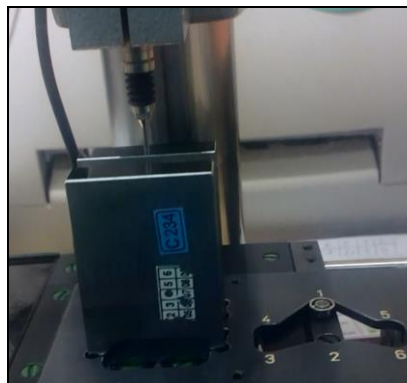
TESA–UPC

Délka KM je měřena pomocí horního a spodního dotyku snímače, obrázek 3.4.2 – 3. Během měření nedochází k poškození KM. Byla zjištěna pouze minimální pružná deformace u KM (kontakt KM a snímače – horní a spodní dotyk). Dané konstatování vyplývá

z provedené numerické simulace v rámci, které byl zjišťován vliv zatěžujících sil na deformaci a napětí v povrchu KM během jejího měření na daném systému.



*Před měřením délky KM
(horní a spodní dotyk)*



Měření délky KM

Obr. 3.4.2 – 3 Měření délky KM – TESA–UPC

Pro numerickou simulaci byl využit software PAM STAMP 2G umožňující modelování technologických procesů a deformačního chování materiálů při různém typu zatížení. Použitá geometrie zkušebního přípravku, testovaných KM i volba okrajových podmínek zatížení při definici numerické simulace vycházela vždy z reálných podmínek měření délky KM na daném systému. Horní dotyk byl stanoven 1 N a spodní 0,63 N. Válcové podpory měřicího zařízení o průměru 3,5 mm a dotyky (horní a spodní) byly při výpočtu považovány za tuhá tělesa. S ohledem na vysokou požadovanou přesnost výpočtu napětí a deformace KM byl volen pro numerickou simulaci Hillův anizotropní model deformačního chování využívající pro výpočet objemové prvky. Numerická simulace pro stanovení deformace a napětí při měření délky KM na systému byla provedena pro KM jmenovitých délek 0,5; 1; 1,005; 1,12; 2,5; 7; 10; 18; 20; 25; 50; 75; 90; 100 (dle bodu 3.4.1 Podmínky měření a příprava KM).

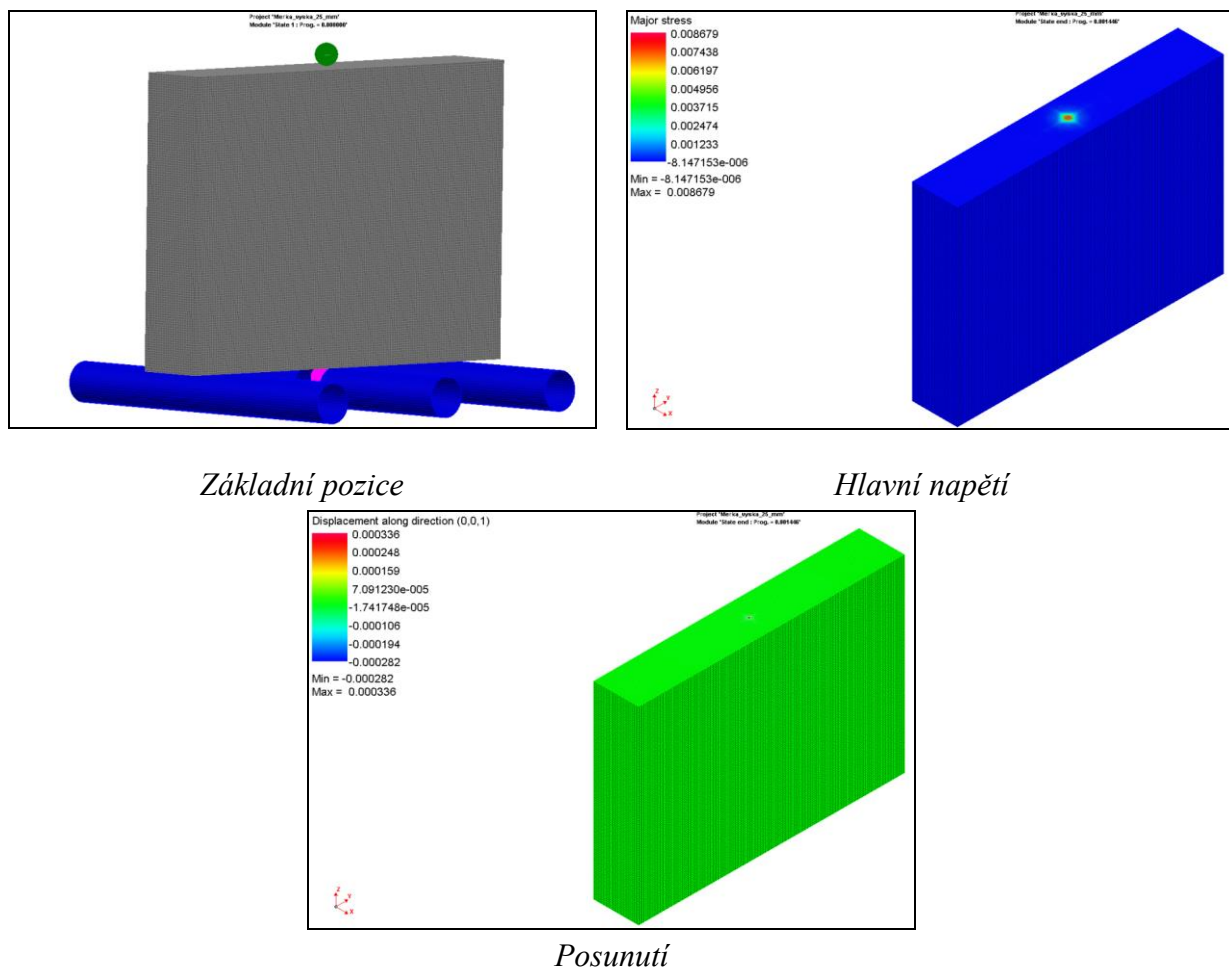
Jako KM byly zvoleny objemové prvky ve tvaru kvádru s rozměry 9 x 30 mm pro rozměry KM do 10 mm, 9 x 35 mm pro rozměry nad 10 mm. Kritériem pro vyhodnocení numerického výpočtu u jednotlivých KM byla velikost hlavního (Major) napětí [GPa] a velikost posunutí (Displacement) [GPa].

Z výsledků simulace bylo zjištěno, že se hodnota hlavního napětí pro horní dotyk pohybuje v rozmezí 0,008 – 0,02 GPa, pro spodní dotyk 0,000008 – 0,00004 GPa. Hodnoty 0,02 a 0,00004 GPa byly naměřeny pro KM do 0,5 mm. U KM délky vyšší jak 0,5 mm se hodnoty pohybovaly pro horní dotyk kolem 0,008 GPa a spodní dotyk 0,000008 GPa.

Hodnota posunutí (vtlačení) horního dotyku se pohybovala okolo –0,0003 GPa a spodního dotyku okolo 0,0003 GPa.

Výsledné hodnoty byly posuzovány k hodnotě meze kluzu v tlaku R_{et} materiálu KM, která je 2,600 – 3,400 [GPa]. Z výsledných hodnot bylo prokázáno, že dochází pouze k malým elastickým deformacím, hodnoty se pohybují pod mezí pružnosti ocelových KM.

Ilustrativní výsledky numerické simulace pro KM jmenovité délky 25 mm jsou ukázány na obrázku 3.4.2 – 4.



Obr. 3.4.2 – 4 Numerická simulace napětí pro KM jmenovité délky 25 mm – TESA–UPC.

4. Přesnost a nejistota měření

Nejdůležitějšími parametry z hlediska porovnávání systémů je přesnost měření a nejistota. Přesnost měření se týká průměrné naměřené hodnoty KM. Nejistota měření je parametr přidružený k výsledku měření, který charakterizuje rozptýlení hodnot, jež by mohly být důvodně prisuzovány k měřené veličině.

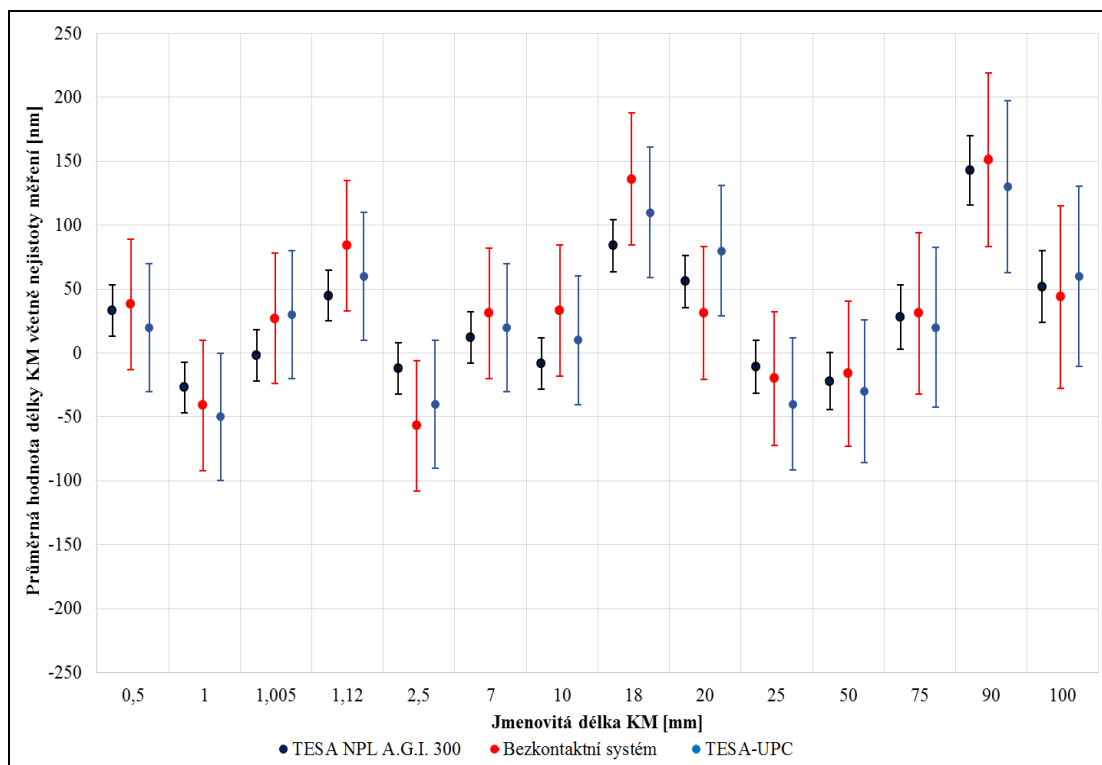
Průměrná hodnota délky KM byla určena, jako aritmetický průměr z opakovaných měření délky KM. U systému TESA NPL A.G.I. 300 to bylo z 6 opakovaných měření. U bezkontaktního systému z 10 opakovaných měření a u TESA–UPC z 6 opakovaných měření.

Nejistota měření byla vypočtena dle metodik jednotlivých systémů – podkapitoly 2.4.1 (TESA NPL A.G.I. 300), 2.4.2 (TESA–UPC) a 3.2 (bezkontaktní systém). Tabulka 3.4.2 – 2 shrnuje vypočtené hodnoty.

Výsledné hodnoty jsou zřehledněny v grafu na obrázku 3.4.2 – 5. Z tabulky 3.4.2 – 2 a grafu je zřejmé, že průměrná hodnota délky KM a nejistota měření u bezkontaktního systému se nejvíce shoduje s hodnotami TESA–UPC.

Tabulka 3.4.2 – 2 Průměrná hodnota délky KM včetně nejistoty měření

Jmenovitá délka KM [mm]	Průměrná hodnota délky KM			Nejistota měření (k=2)		
	TESA NPL A.G.I. 300 [nm] $x_{ref}(TESA\ NPL)$	Bezkontak tní systém [nm] $x_{bezcons}$	TESA– UPC [nm] $x_{ref}(TESA\ UPC)$	TESA NPL A.G.I. 300 [nm] $U_{TESA\ NPL}$	Bezkontak tní systém [nm] $U_{bezcons}$	TESA– UPC [nm] $U_{TESA\ UPC}$
0,5	33	38	20	20	51	50
1	–27	–41	–50	20	51	50
1,005	–2	27	30	20	51	50
1,12	45	84	60	20	51	50
2,5	–12	–57	–40	20	51	50
7	12	31	20	20	51	50
10	–8	33	10	20	51	50
18	84	136	110	20	52	51
20	56	31	80	20	52	51
25	–11	–20	–40	21	53	52
50	–22	–16	–30	22	57	56
75	28	31	20	25	63	63
90	143	151	130	27	68	67
100	52	44	60	28	71	71



Obr. 3.4.2 – 5 Průměrná hodnota délky KM včetně nejistoty měření

Dále se provedlo mezisystémové porovnávání. Jednalo se o porovnání výsledků měření bezkontaktního systému s výsledky měření referenčních systémů tj. TESA NPL A.G.I. 300 a TESA–UPC. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 3.4.2 – 3.

Cílem mezisystémového porovnávání bylo prokázání způsobilosti systému pro potřeby ČMI z hlediska přesnosti měření délky KM a stanovení nejistoty měření. (ČMI je akreditovaný organizátor mezilaboratorních porovnání podle ČSN EN ISO/IEC 17043 "Posuzování shody – Obecné požadavky na zkoušení způsobilosti" [2].).

V rámci mezisystémového porovnání bylo vycházeno z dokumentu [2, 44].

Pro mezisystémové porovnání bylo použito vztahu z normy [2]:

$$E_n = \frac{x_{\text{bezkon.s}} - x_{\text{ref (TESA NPL / TESA-UPC)}}}{\sqrt{U_{\text{bezkon.s}}^2 + U_{\text{TESA NPL / TESA-UPC}}^2}} \quad (3.4.2 - 1)$$

kde $E_n \in <-1; +1>$. E_n ukazuje míru shody mezi systémy. Základními hodnotami jsou naměřené průměrné hodnoty délky KM pro příslušné jmenovité délky KM na sledovaných systémech a jejich nejistoty měření.

Tabulka 3.4.2 – 3 Mezisystémové porovnání

Jmenovitá délka KM [mm]	E_n	
	Bezkontaktní systém a TESA NPL A.G.I. 300 [nm]	Bezkontaktní systém a TESA–UPC [nm]
0,5	0,091	0,252
1	–0,256	0,126
1,005	0,529	–0,042
1,12	0,712	0,336
2,5	–0,821	–0,238
7	0,346	0,154
10	0,745	0,320
18	0,935	0,358
20	–0,448	–0,673
25	–0,160	0,272
50	0,098	0,176
75	0,044	0,124
90	0,109	0,220
100	–0,104	–0,159

Z výpočtů dle vztahu (3.4.2 – 1) bylo zjištěno, že hodnota U byla pro bezkontaktní systém správně stanovena. Všechny vypočtené hodnoty E_n se pohybovaly v rozmezí od –1 do +1.

Při porovnání výsledků hodnot E_n z tabulky 3.4.2 – 3 bylo zjištěno, že nejvyšší shoda (hodnoty se blížily více k nule) v rámci měření přesnosti a nejistoty byla prokázána mezi bezkontaktním systémem a TESA–UPC. Nižší shoda byla prokázána mezi bezkontaktním systémem a TESA NPL A.G.I. 300.

5. Minimální a maximální měřená délka KM

Důležitým sledovaným parametrem je rozměr KM, který lze v rámci daného systému změřit. Intervaly (minimum a maximum) délek KM, které lze na příslušném systému změřit jsou uvedeny v tabulce 3.4.2 – 4.

Tabulka 3.4.2 – 4 Rozměr KM

Systém pro měření délky KM	Rozměr KM [mm]
TESA NPL A.G.I. 300	0,3 – 300
Bezkontaktní systém	0,3 – 100
TESA–UPC	0,3 – 100

Všechny tři systémy jsou schopny změřit délku KM od 0,3 mm do 100 mm. Na systému TESA NPL A.G.I. 300 lze navíc měřit KM až do jmenovité délky 300 mm.

6. Pořizovací cena systému a náklady na provoz

Pořizovací cena systému a zejména náklady na provoz jsou dalšími sledovanými parametry při porovnávání systémů pro měření délky KM.

Pořizovací ceny jsou dány výrobcem. Ceny jsou uvedeny pro přehlednost v tabulce 3.4.2 – 5, která obsahuje i vyčíslené náklady na provozy systémů.

Náklady na provoz jednotlivých systémů jsou rozepsány níže.

TESA NPL A.G.I. 300

Náklady na provoz systému činí 150 000 – 300 000 Kč/rok. Do nákladů je započítána pravidelná údržba laserů, komponent systému (tlakoměr, teploměry, vlhkoměr, referenční rezistor, optika atd.) a referenční desky. Z hlediska údržby u laserů se jedná o výměnu He–Ne trubice či jejího vysokonapětového zdroje a seřízení svazku laseru do optického vlákna. U komponent systému se jedná o jejich celkové seřízení včetně optické sestavy. U referenční desky se údržba týká přelapování celé plochy, na kterou jsou nasouvány KM. Poškození desky vzniká opakovaným nasouváním KM, vznik škrábanců a rýh. Finanční náklady na danou údržbu desky se pohybují od 100 000 – 200 000 Kč.

V případě poruchy systému je nezbytné pozvání zahraničních odborníků od výrobce, případně vysoce kvalifikovaných odborníků na problematiku interferometrie. S tím souvisí nemalé finanční náklady.

Bezkontaktní systém

Náklady na provoz bezkontaktního systému byly vyčísleny na 50 000 – 80 000 Kč/rok. Do nákladů byla započítána pravidelná údržba laseru a komponent systému (tlakoměr, vlhkoměr, teploměry, převodník koncentrace CO₂, optika, atd.). Z hlediska údržby u laseru jde o seřízení svazku do optického vlákna, případně vyčištění výstupní aparatury laseru. U komponent systému se jedná o seřízení optické sestavy či podavače KM. Nutno

počítat také s poruchovostí (výměnou) některého z motorů podavače KM, případně pohonu posuvu měřicího zrcadla a výměnu PZT elementu zabudovaného ve šroubech Thorlabs.

V případě poruchy systému je zajištěn 24 hodinový servis odborníků z ÚPT, Brno a firmy MESING (výrobce drobných komponent systému).

TESA–UPC

Náklady na provoz systému jsou nízké v porovnání s výše uvedenými systémy, pohybují se do 25 000 Kč/rok. Do nákladů je započítána pravidelná údržba indukčních snímačů a kontrola stability měřicího stolu. Z hlediska údržby indukčních snímačů se jedná o seřízení obou měřicích dotyků (horní a spodní) a jejich kalibraci.

Poruchy u systému jsou mechanického charakteru. Drobné opravy může vykonat laborant obsluhující systém, v případě náročnějších oprav je povolán kvalifikovaný odborník na dané zařízení.

Tabulka 3.4.2 – 5 Pořizovací cena systému a náklady na provoz

Systém pro měření délky KM	Pořizovací cena systému [Kč]	Náklady na provoz systému [Kč/rok]
TESA NPL A.G.I. 300	15 000 000	150 000 – 300 000
Bezkontaktní systém	8 000 000	50 000 – 80 000
TESA–UPC	700 000	25 000

Závěrečné shrnutí

Závěrečné shrnutí, ve formě pozitiv a negativ, vyplývající z porovnání stávajících systémů používaných v ČMI ke kalibraci KM s bezkontaktním systémem jsou uvedeny v tabulce 3.4.2 – 6.

Tabulka 3.4.2 – 6 Pozitiva a negativa měřicích systémů

TESA NPL A.G.I. 300	
Pozitiva	Negativa
Vysoká přesnost měření délky KM. Nejistota měření: $U = \sqrt{20^2 + (0,2 \times l_n)^2} \text{ nm}$. Přímá návaznost na státní etalon délky ČR. Dlouhodobě zavedená metoda měření KM. Systémem lze změřit délku KM od 0,3 mm do 300 mm.	Měření KM třídy přesnosti K až 0 (KM s vysokou kvalitou měřicích ploch). Měření délky KM 1. sekundárního řádu. Dochází k povrchovému poškození měřicích ploch KM při nasunutí na referenční desku. Není možné měřit jen jednu samotnou KM, ale vždy musí být měřeny více než 2 ks KM. Náročnost z hlediska přípravné fáze a vlastního měření. Naměřené hodnoty je nutné kontrolovat kompletním opakovaným měřením. Měření délky KM 1. sekundárního řádu obvykle provádí nezávisle 2 laboranti (každý vykoná 6 sérií měření). Změření celé sady KM (122 ks) trvá 1 až 3 měsíce. Vysoce kvalifikovaný laborant je požadovanou nutností. Uchycení KM k přístroji je realizováno přes referenční desku, na které nelze nasunout poškozené (poškrábané) KM. Náklady na provoz systému činí 150 000 – 300 000 Kč/rok.
Bezkontaktní systém	
Pozitiva	Negativa
Měření KM třídy přesnosti K až 2. Měření délky KM 1. – 5. sekundárního řádu. Nedochází k poškození měřicích ploch KM. Návaznost na státní etalon délky ČR. Lze měřit jednu samostatnou KM. Změření celé sady KM (122 ks) trvá 1 – 4 dny (dle nastavení doby temperace). Měřicí proces probíhá plně automaticky bez zásahů laboranta (nedochází k nežádoucím vlivům – vibrace, teplotní změny). Měření délky KM provádí jeden laborant. Nedochází k poškození měřicích ploch KM.	Nejistota měření: $U = \sqrt{51^2 + (0,5 \times l_n)^2} \text{ nm}$. Nižší přesnost měření. Náročnost z hlediska přípravné fáze. Doba procesu měření závisí na délce měřených KM a kvalitě povrchu měřicích ploch. Na měření má vliv silně poškozený (poškrábaný) povrch KM. Měření délek KM od 0,3 mm do 100 mm. Náklady na provoz systému činí 50 000 – 80 000 Kč/rok.

TESA–UPC	
Pozitiva	Negativa
Měření KM třídy přesnosti K až 2. Měření délky KM 2. – 5. sekundárního řádu. Nedochází k poškození měřicích ploch KM. Návaznost na státní etalon délky ČR. Dlouhodobě zavedená metoda měření KM. Lze měřit jen jednu samotnou KM (+ etalonová KM). Na měření nemá výrazný vliv poškozený (poškrábaný) povrch KM. Náklady na provoz systému činí 25 000 Kč/rok.	Nejistota měření: $U = \sqrt{50^2 + (0,5 \times l_n)^2} \text{ nm}.$ Nižší přesnost měření. Náročnost z hlediska přípravné fáze a vlastního měření. Naměřené hodnoty je nutné kontrolovat kompletním opakováním. Měření délky KM 2. sekundárního řádu provádí nezávisle 2 laboranti (každý vykoná 6 sérií měření). Měření délky KM 3., 4. a 5. sekundárního řádu vykoná 1 laborant (6 sérií měření). Nutností je vlastnit ekvivalentní sadu (či jednotlivé) KM, etalonovou sadu, která má vyšší přesnost než měřené KM (s tím souvisí finanční náklady na pořízení sady a její pravidelnou kalibraci). Měření délek KM od 0,3 mm do 100 mm. Změření celé sady KM (122 ks) trvá 1 až 2 týdny.

4. DISKUZE

Hlavním cílem předkládané práce bylo připravit bezkontaktní systém pro zavedení do běžného provozu ČMI k měření délky KM.

K dosažení cíle bylo nutné zoptimalizovat bezkontaktní systém pro přímé potřeby laboratorního měření, vytvořit kompletní dokumentaci k validaci dané metody měření tj. stanovit nejistotu měření a následně metodiku (kalibrační postup) pro měření na daném přístroji a porovnat systém se stávajícími systémy a jejich metodami měření běžně využívaných v ČMI.

Nezbytné základní pojmy týkající se řešené problematiky, vztahy a definice jsou uvedeny v teoretické části kapitole 2.

Do této části práce jsou zahrnuty přehledně informace o interferenci (podkapitola 2.1), KM (podkapitola 2.2) a informace vztahující se k nejistotě měření (podkapitola 2.3). Dále jsou zde stručně uvedeny popisy metod a zařízení pro měření délky KM na pracovišti ČMI OI Liberec (podkapitola 2.4). Jednalo se popis metody interferenční prováděné na přístroji TESA NPL A.G.I. 300 (podkapitola 2.4.1) a komparační prováděné na přístroji TESA-UPC (podkapitola 2.4.2). Nedílnou součástí teoretické části je základní popis a metoda měření délky KM na bezkontaktním přístroji (podkapitola 2.6).

Hlavním záměrem a cílem bylo bezkontaktní systém připravit a využít pro přímé potřeby ČMI v rámci měření délky KM. Dosažení cíle je kompletně věnována celá kapitola 3.

Úvodní část kapitoly 3 obsahuje informace o jednotlivých etapách, popisu podmínek měření a přípravy KM.

Aby bylo dosaženo plánovaného cíle, musel být nejprve systém optimalizován z hlediska konstrukčního řešení a následně důkladně experimentálně prověřen z hlediska funkčnosti v laboratorních podmínkách ČMI. Optimalizaci bezkontaktního systému pro měření délky KM v závislosti na přímé potřeby ČMI je věnována podkapitola 3.1.

Po prověření systému v laboratorních podmínkách ČMI byla stanovena pro daný přístroj a metodu měření nejistota. Způsob určení a hodnota nejistoty měření je uvedena v podkapitole 3.2. Nejistota měření byla zpracována v souladu s dokumenty [1], [4], [5], [40], [45], [49], [50]. Dále bylo vycházeno z významných publikací [10, 11, 13, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 26, 30, 31, 32, 34, 39].

Aby mohl být systém využíván v ČMI byla zpracována metodika pro měření délky KM na daném přístroji dle dokumentů [1], [2], [4], [45]. tj. byl vytvořen kalibrační postup. Metodice měření je věnována podkapitola 3.3. Metodika pro kalibraci KM je připravená k validaci.

Porovnání stávajících systémů k měření délky KM v ČMI s bezkontaktním systémem je uvedeno v podkapitole 3.4.

Z rozsáhlého souboru měření a získaných výsledků uvedených v podkapitolách 3.1 – 3.4 je možno poukázat na následující:

▪ **Optimalizace bezkontaktního systému pro měření délky KM v závislosti na přímé potřebě ČMI**

V rámci optimalizace sestavy bezkontaktního systému pro měření délky KM bylo provedeno 9 významných změn, které jsou podrobně rozepsány v podkapitole 3.1.

Jednalo se o:

1. Návrh a implementaci metody pro aktivní stabilizaci polohy KM v experimentální sestavě.
2. Nové matice fotodetektorů pro detekci interferenčních signálů, včetně úpravy elektroniky pro zpracování signálů.
3. Analýzu metod pro detekci středu bílých interferenčních proužků, výběr nejvhodnější metody a její implementace do programu pro zpracování výsledků měření.
4. Optimalizaci algoritmu pro zpracování výsledků měření délky KM.
5. Novou konstrukci kolimační jednotky pro NKT (bílý) laser.
6. Analýzu možností využití paralelní optiky.
7. Úpravy řídicích programů systému.
8. Úpravy mechanických částí podavače KM.
9. Návrh a realizace systému pro řízení polohy uložení KM v měřicí sestavě.

Mezi nejvýznamnější změny, které ovlivnily funkčnost bezkontaktního systému, patří návrh a realizace systému pro řízení polohy uložení KM v měřicí sestavě (bod 9) a komplexní analýza zpracovávaných interferenčních signálů, ať už se jedná o volbu vhodné metody pro detekci středu bílého interferenčního proužku (bod 3), nebo o optimalizaci algoritmu pro zpracování výsledků měření délky KM (bod 4).

Při měření délky KM je jednou ze základních podmínek automatického podavače založit měřenou KM co nejpřesněji na určené místo v optické sestavě. V původním návrhu systému bylo počítáno se zakládání KM do optické sestavy pouze na základě údaje o aktuální poloze příslušného motoru, získané prostřednictvím integrovaného enkodéru. Toto řešení se v praxi bohužel ukázalo jako nedostatečné.

Jednotlivé pozice v zásobníku podavače jsou optimalizovány pro rozměr KM 9 x 35 mm. V případě KM s rozměr KM 9 x 30 mm dochází v průběhu posuvu KM v podavači k jejich posuvu ve vymezeném prostoru a to v řádu jednotek milimetrů. Po usazení na unašeč pak může být kratší (9 x 30 mm) KM posunuta až o 5 mm vůči předpokládané (ideální) poloze. Daná situace pak znamená, že i v bezvůlovém mechanickém systému je polohování KM na určenou pozici pouze z údaje o aktuální poloze motoru nedostatečné.

Tento problém byl vyřešen v rámci optimalizace **Návrh a realizace systému pro řízení polohy uložení KM v měřicí sestavě**. Řešením bylo rozšíření systému o optický snímač polohy KM na unašeči, transportujícím KM do optické sestavy. Optický snímač a jeho umístění je zachyceno na obrázku 3.1 – 15 uvedeného v podkapitole 3.1. Použitý optický snímač představuje kombinaci zdroje záření a fotodetektoru, který zaznamenává míru zdrojem

vyzářeného světla, odraženého od objektu před snímačem. Signál z fotodetektoru je prostřednictvím komunikační karty předáván přes sběrnici CAD do počítače a zpracován řídicím softwarem tak, jak je naznačeno na obrázku 3.1 – 15 v podkapitole 3.1. Ze získaného signálu je určena vzájemná vzdálenost unašeče a měřicích ploch KM. Na základě zjištěné vzdálenosti je aktualizována cílová pozice pro dojezd unašeče tak, aby respektovala aktuální polohu KM a aby bylo zajištěno její uložení na určené místo v optické sestavě. Experimentálně bylo ověřeno, že takto řešený polohovací systém zajistí opakovatelnost uložení KM menší než 0,1 mm.

U systému je využívána pro detekci středu bílých interferenčních proužků tzv. korelační metoda. Tato metoda je založená na porovnání naměřeného signálu a signálu modelového, ve kterém známe polohu středu bílého interferenčního proužku. Pro použití korelační metody byl u systému vytvořen model bílého interferenčního proužku, jehož volba do značné míry ovlivňovala přesnost detekce. V rámci optimalizace **Analýza metod pro detekci středu bílých interferenčních proužků, výběr nejvhodnější metody a její implementace do programu pro zpracování výsledků měření** byl daný problém řešen.

Byla provedena komplexní analýza celkem pěti metod [38] pro detekci středu bílých interferenčních proužků. Jednalo se o metodu: těžiště proužku, korelační, fitování proužku, analýzy ve frekvenční oblasti (FDA) a maxima obálky. Vybrané metody byly analyzovány jak z hlediska jejich vlivu na celkovou přesnost měření, tak z hlediska odolnosti vůči disperzi a v neposlední řadě i z hlediska jejich výpočetní náročnosti. Všechny testované algoritmy byly naprogramovány v prostředí MATLAB a pro účely jejich vzájemného srovnání byla navržena sestava Michelsonova interferometru, na níž bylo provedeno experimentální měření pro různá nastavení interferometru tak, aby byla přesnost a odolnost vůči disperzi spolehlivě zjištěna.

Z provedeného srovnání metod detekce středu bílého interferenčního proužku vyplynulo, že v případě interferometru optimálně kompenzovaného na disperzi je z hlediska přesnosti detekce nejvhodnější stávající metoda korelační a metoda fitování proužku. Metoda korelační je však výpočetně náročnější a její rozlišení je navíc omezeno vzorkovací vzdáleností. Je-li v interferometru použita klínová kompenzační deska, v případě jejího neoptimálního nastavení dochází k tomu, že metody detekující v signálu maximum vyhodnotí rovinný povrch jako schody. Proti tomuto jevu byla velmi odolná metoda fitování proužku s detekcí maxima obálky signálu. Metoda fitování proužku detekuje rovinný povrch jako rovinu i v případě neoptimálního nastavení klínové kompenzační desky – což pro daný systém představuje podstatnou výhodu.

V rámci optimalizace algoritmu pro zpracování výsledků měření byla do systému zavedena metoda fitování proužku, pro spolehlivou a přesnou detekci středu bílého interferenčního proužku, obrázek 3.1 – 11, podkapitola 3.1.

Vedle výběru a zavedení metody pro určení středu bílého interferenčního proužku, popsané výše, byl také samostatně vyvíjen vlastní algoritmus pro určení délky měřené KM v rámci **Optimalizace algoritmu pro zpracování výsledků měření délky KM**.

Vývoj algoritmu spočíval ve vhodné interpretaci naměřených hodnot, označovaných v popisu měřicího systému jako měřicí polohy P1, P2 a P3. Měřicí poloha P1 je měřena fotodetektory umístěnými mimo oblast KM (v celém záznamu je pouze jediný bílý interferenční proužek) a měřicí polohy P2 a P3 jsou měřeny fotodetektory umístěnými v oblasti KM – v záznamu je dvojice bílých interferenčních proužků, odpovídajících rovnovážnému stavu interferometru při odrazu měřicího svazku postupně od obou měřicích ploch KM.

V reálném záznamu jsou při vícebodovém měření téže měřicí pozice zjištěny odchylky mezi jednotlivými body. Tyto odchylky jsou zapříčiněny jednak neideální vlnoplochou svazku, neideální paralelitou a rovinností měřicích ploch KM. Z tohoto důvodu bylo potřeba k měřeným datům přistoupit nikoli jako k prosté trojici bodů, ale v každé měřicí poloze jako k souboru bodů, jimiž je třeba vhodně proložit rovinu a měřicí polohu pro výpočet délky KM vhodně dopočítat. Právě vhodné proložení rovin a spolehlivé vyřazení chybně detekovaných měřicích bodů je základem přesného stanovení délky KM. Proložení rovin změřenými body ilustruje obrázek 3.1 – 13 v podkapitole 3.1.

▪ **Nejistota měření pro bezkontaktní systém**

Podmínkou pro zavedení bezkontaktního systému do ČMI bylo stanovit jeho nejistotu měření. Stanovení nejistoty k danému systému je uvedeno podrobně v podkapitole 3.2.

Základem bylo stanovení zdrojů nejistot, které přispívají k výsledné nejistotě měření bezkontaktního systému. Zdroje nejistot byly rozděleny do 2 základních kategorií – zdroje, u kterých byla standardní nejistota získána ze statistické analýzy řady měření a zdroje, kde standardní nejistota byla určena jinými metodami než statistickou analýzou.

První skupinu tvoří pouze jeden zdroj. Jedná se o rozptyl měřené hodnoty délky KM. Jeho hodnota byla určena podle podkapitoly 2.3 – 2.3.2.1 Stanovení nejistoty typu A.

Druhá kategorie obsahuje 9 podkategorií:

1. Vlnová délka laseru za podmínek měření.
 - a) Vlivy působící na hodnotu vlnové délky laseru za podmínek měření.
 - Vliv atmosférického tlaku na vlnovou délku laseru.
 - Vliv teploty na vlnovou délku laseru.
 - Vliv relativní vlhkosti na vlnovou délku laseru.
 - Vliv koncentrace CO₂ na vlnovou délku laseru.
 - b) Vliv způsobu výpočtu vlnové délky dle Edlénovy rovnice za podmínek prostředí.
2. Velikost zdroje.
3. Aberace optické soustavy.
4. Rovinnost a rovnoběžnost měřené plochy KM.
5. Určení středu bílého interferenčního proužku.
6. Určení zlomku červeného proužku.
7. Korekce změny fáze laseru.
8. Kosinova chyba.
 - a) Pevně umístěná polopropustná zrcadla ve vzdálenosti 400 mm.
 - b) Úhlová chyba vložení KM do sestavy.

c) Divergence svazku.

9. Vliv teploty.

a) Korekce délky KM vzhledem k 20 °C.

b) Vliv změny teploty na základní litinovou desku – posun optických komponent.

c) Vliv změny teploty na základní litinovou desku – posun mechanických komponent.

d) Vliv nejistoty teplotního součinitele délkové roztažnosti KM.

Jedná se o zdroje, u kterých byla hodnota standardní nejistoty určena dle podkapitoly 2.3 – 2.3.2.2 Stanovení nejistoty typu B.

Byla navržena metodika stanovení nejistoty měření v souladu s dokumenty [1], [4], [5], [40], [44], [45], [49], [50], v rámci které byla nejprve pro každý výše uvedený zdroj určena příslušná standardní nejistota, která se následně započítala do kombinované standardní nejistoty a poté se stanovila rozšířená nejistota měření pro daný systém.

U některých zdrojů byla v jejich hodnotách standardní nejistoty obsažena položka l_n (jmenovitá délka KM). Tyto nejistoty poté tvořily tzv. relativní složku rozšířené nejistoty – jejich hodnota se mění se jmenovitou délkou KM. Standardní nejistoty bez položky l_n tvořily tzv. konstantní složku rozšířené nejistoty – jejich hodnota se nemění se jmenovitou délkou KM. Velikosti standardních nejistot jednotlivých zdrojů za relativní a konstantní složku rozšířené nejistoty měření jsou uvedeny v tabulce 3.2.3 – 10 a zřehledněny v kruhových grafech na obrázku 3.2.3 – 2A a 2B v podkapitole 3.2.

Na výsledné nejistotě měření se za relativní složku nejméně projevuje rozlišení teploměru/1, rozlišení vlhkoměru – Vaisala PTU 303 s čidlem vlhkosti Humicap 180 a rozlišení převodníku koncentrace CO₂ – Vaisala GM70. Dané zdroje vykazují standardní nejistotu $0,001 \frac{nm}{mm} \times l_n$.

Naopak nejvíce se projevuje zdroj teplotního součinitele délkové roztažnosti KM, který má hodnotu $0,173 \frac{nm}{mm} \times l_n$, chyba teploměru/2 a přesnost měření teploty KM, která má $0,166 \frac{nm}{mm} \times l_n$ a nejistota teploměru/2, která má hodnotu $0,058 \frac{nm}{mm} \times l_n$.

Za konstantní složku se na výsledné nejistotě měření nejméně projevuje úhlová chyba vložení KM do sestavy, která má hodnotu 0,01 nm a pevně umístěná polopropustná zrcadla ve vzdálenosti 400 mm, jejichž hodnota je 0,02 nm.

Nejvíce se projevuje aberace optické soustavy, rozptyl měřené hodnoty délky KM a korekce změny fáze laseru. Aberace optické soustavy tvoří 18,3 nm. Rozptyl měřené hodnoty délky KM je 11,1 nm a korekce změny fáze laseru je 10 nm.

Ve významných publikacích od YOKOYAMI a kol. [13, 46] bylo dosaženo téměř stejného výsledku. Nejvíce se projevoval za relativní část zdroj teplotní součinitel délkové roztažnosti KM a za konstantní část korekce změny fáze laseru. Naopak nejméně se projevoval za relativní část zdroj zařízení pro měření teploty a za konstantní část to byl zdroj dlouhodobá stabilita systému (což odpovídá stabilitě použitých komponent v systému).

Rozšířená nejistota měření pro bezkontaktní systém byla stanovena ve tvaru:

$$U = \sqrt{51^2 + (0,5 \times l_n)^2} \text{ nm},$$

kde l_n je jmenovitá délka KM dosazená v milimetrech.

Výsledná nejistota měření je v relaci s výslednou nejistotou v publikaci [46].

▪ **Měření délky KM bezkontaktním systémem**

Byla vytvořena metodika měření délky KM pro bezkontaktní měřicí systém dle Metodika byla vypracována v souladu s dokumenty [1], [2], [4], [45]. Metodika je platná pro měření délky KM v rozsahu délek 0,3 mm až 100 mm v ČMI.

Metodika obsahuje v úvodní části základní informace o zařízení a pomůckách pro měření délky KM. Na úvodní část navazuje podrobně rozpracovaný postup měření. Postup měření se skládá z informací o: zapnutí systému, kontrole a nastavení systému, přípravě KM pro měření, měření, vyhodnocení a nejistotě měření. V závěru metodiky je uvedeno vyhodnocení nejistoty měření a uveden příklad výpočtu nejistoty pro KM o jmenovité délce 50 mm.

Zpracovaná metodika měření (její kompletní dokumentace) je připravena k validaci. Metodika bude po validaci zavedena do systému oběhu řízené dokumentace ČMI.

▪ **Mezisystémové porovnání stávajících systémů k měření délky KM s bezkontaktním systémem**

Systémy byly porovnávány z hlediska návaznosti na státní etalon, podmínek realizace a časové náročnosti měření, poškození KM při měření, přesnosti a nejistoty měření, minimální a maximální měřené délky KM, pořizovací ceny a nákladů na provoz.

1. Návaznost na státní etalony

Systém TESA NPL A.G.I. 300 je přímo navázán na státní etalon délky prostřednictvím femtosekundového generátoru hřebene optických frekvencí a jodem stabilizovaného He–Ne laseru – 633 nm. Bezkontaktní systém je přímo navázán na státní etalon délky prostřednictvím stabilizovaného He–Ne laseru – 633 nm. A systém TESA–UPC je navázán na státní etalon délky prostřednictvím etalonových KM – 1. řádu měřených na interferenčním komparátoru TESA NPL A.G.I. 300 a porovnávaných s etalonem, kterým je délka světelné vlny, jodem stabilizovaného He–Ne laseru – 633 nm, interferenčního komparátoru TESA NPL A.G.I. 300.

Metody měření délky KM aplikované na přístrojích TESA NPL A.G.I. 300 a TESA–UPC jsou definovány v mezinárodní normě ČSN EN ISO 3650 jako standard.

2. Podmínky realizace a časová náročnost měření

Na TESA NPL A.G.I. 300 lze měřit pouze KM s vysokou kvalitou měřicích ploch. Jedná se o KM třídy přesnosti K – 0, spadající do 1. sekundárního řádu. Není možné měřit jen jednu samotnou KM, ale vždy musí být měřeny více než 2 ks KM. Systém vyžaduje velmi vysokou náročnost z hlediska přípravné fáze a vlastního měření. Naměřené hodnoty je nutné

kontrolovat kompletním opakovaným měřením. Změření celé sady KM (122 ks) trvá 1 až 3 měsíce. Vysoce kvalifikovaný laborant je požadovanou nutností při obsluze daného systému.

Na bezkontaktním systému lze měřit KM třídy přesnosti K až 2 s vysokou i nižší kvalitou povrchu, spadající do 1. – 5. sekundárního řádu. Lze měřit jednu samostatnou KM bez nutnosti měření celé sady KM. Systém vyžaduje náročnost z hlediska přípravné fáze. Měřicí proces probíhá plně automaticky. Doba procesu měření závisí na délce měřených KM a kvalitě povrchu měřících ploch. Změření celé sady KM (122 ks) 1 až 4 dny. Kvalifikovaný laborant není nutností při obsluze daného systému.

Systémem TESA–UPC lze měřit KM třídy přesnosti 1 – 2 s nízkou kvalitou povrchu KM, spadající do 2. – 5. sekundárního řádu. Lze měřit jen jednu samotnou KM, ke které je požadovanou nutností etalonová KM s vyšší přesností. Systém vyžaduje náročnost z hlediska přípravné fáze a vlastního měření. Naměřené hodnoty je nutné kontrolovat opakovaným měřením. Změření celé sady KM (122 ks) trvá 1 až 2 týdny. Kvalifikovaný laborant je nutností při obsluze daného systému.

3. Poškození KM při měření

Při měření na systému TESA NPL A.G.I. 300 dochází k poškození měřicího povrchu KM ve formě nevratných rýh, škrábanců, tj. plastické deformace, obrázek 3.4.2 – 1, podkapitola 3.4. Dané konstatování je ve shodě s publikacemi od THALMANNA, BÖNSCHE, DORINA a ISHIIHO [25, 26, 28, 32, 43].

V rámci měření na bezkontaktním systému nebylo prokázáno žádné poškození povrchu KM, viz obrázek 3.4.2 – 2, podkapitola 3.4.

Při měření na systému TESA–UPC byla zjištěna pouze minimální pružná deformace u KM (kontakt KM a snímače – horní a spodní dotyk). Dané konstatování vyplývá z provedené numerické simulace v rámci, které byl zjišťován vliv zatěžujících sil na deformaci a napětí v povrchu KM během jejího měření na daném systému, viz obrázek 3.4.2 – 3, podkapitola 3.4.

Výsledek je v relaci s údaji v publikacích od BÖNSCHE a DORINA [26, 43].

4. Přesnost a nejistota měření

Při obecném porovnání systémů TESA NPL A.G.I. 300, bezkontaktní a TESA–UPC bylo zjištěno, že je průměrná naměřená hodnota délky KM (pro vybrané KM) a nejistota měření u bezkontaktního systému a systému TESA–UPC ve shodě. Systém TESA NPL A.G.I. 300 vykazoval mnohem nižší naměřené hodnoty délky KM a nižší nejistotu měření (cca o polovinu). Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.4.2 – 2 a zřehledněny v grafu na obrázku 3.4.2 – 5, podkapitola 3.4.

V rámci mezisystémového porovnání bylo vycházeno z dokumentu [2, 44]. Při porovnání systémů na základě vztahu (3.4.2 – 1) pro mezilaboratorní porovnání vycházející z normy [2] byla prokázána nejvyšší shoda mezi bezkontaktním systémem a TESA–UPC. Nižší shoda byla prokázána mezi bezkontaktním systémem a TESA NPL A.G.I. 300.

Přes daný vztah bylo také potvrzeno správné stanovení nejistoty měření pro bezkontaktní systém.

5. Minimální a maximální měřená délka KM

Všechny tři porovnávané systémy jsou schopny změřit délku KM od 0,3 mm do 100 mm. Na systému TESA NPL A.G.I. 300 lze navíc měřit KM až do jmenovité délky 300 mm.

6. Pořizovací cena systému a náklady na provoz

Pořizovací ceny jsou dány výrobcí systémů. Ceny jsou uvedeny pro přehlednost v tabulce 3.4.2 – 5, v podkapitole 3.4, která obsahuje i vyčíslené náklady na provoz systémy.

Náklady na provoz systému TESA NPL A.G.I. 300 činí 150 000 – 300 000 Kč/rok. Do významných nákladů patří zejména přelapování referenční desky, které je cca od 100 000 – 200 000 Kč a pravidelná údržba laserů a komponent systému. Nemalé finanční náklady souvisí také s pozváním zahraničních odborníků od výrobce či odborníků na problematiku interferometrie v případě poruchy systému.

Náklady na provoz bezkontaktního systému byly vyčísleny na 50 000 – 80 000 Kč/rok. Do nákladů byla započítána pravidelná údržba laseru a komponent systému. V případě poruchy systému je zajištěn 24 hodinový servis odborníků z ÚPT, Brno a firmy MESING.

Náklady na provoz systému TESA–UPC jsou nízké v porovnání s výše uvedenými systémy, pohybují se do 25 000 Kč/rok. Do nákladů je započítána pravidelná údržba indukčnostních snímačů a kontrola stability měřicího stolu. V případě poruchy může drobné opravy vykonat laborant obsluhující systém, v případě náročnějších oprav je povolán kvalifikovaný odborník na dané zařízení.

Závěrečné shrnutí, ve formě pozitiv a negativ, vyplývající z porovnání stávajících systémů používaných v ČMI ke kalibraci KM s bezkontaktním systémem jsou uvedeny v tabulce 3.4.2 – 6, podkapitola 3.4.

Systém TESA NPL A.G.I. 300 se vyznačuje vysokou přesností a nízkou nejistotou měření; přímou návazností na státní etalon ČR a metodou měření, která je dlouhodobě zavedená. Velkou nevýhodou je, že na daném systému lze měřit jen KM třídy přesnosti K až 0, 1. sekundárního řádu; dochází k povrchovému poškození KM; není možné měřit jen jednu samotnou KM; změření celé sady KM (122 ks) trvá 1 až 3 měsíce a náklady na provoz systému činí 150 000 – 300 000 Kč/rok.

Systém TESA–UPC je mechanický komparátor, který se vyznačuje měřením KM třídy přesnosti K až 2, 2. – 5. sekundárního řádu; nepoškození měřicích ploch KM; přímou návazností na státní etalon ČR a metodou měření, která je dlouhodobě zavedená. Na systému lze měřit jen jednu samotnou KM; náklady na provoz činí 25 000 Kč/rok. Nevýhodou je nižší přesnost a vyšší nejistota měření a nutnost vlastnit ekvivalentní sadu (či jednotlivé) KM, která má vyšší přesnost než měřené KM; změření celé sady KM (122 ks) trvá 1 až 2 týdny.

Bezkontaktní systém nabízí možnost mezi oběma systémy.

Nevýhodou je sice nižší přesnost, vyšší nejistota měření a provozní náklady, ale velkou výhodou je rychlé a automatizované měření – měření celé sady KM (122 ks) trvá 1 až 4 dny, které činní systém **unikátním**; měření KM třídy přesnosti K až 2, 1. – 5. sekundárního řádu; nepoškození měřicích ploch KM; návaznost na státní etalon ČR; možnost měřit jednu samostatnou KM; nízká časová náročnost.

5. ZÁVĚR

Předložená habilitační práce zpracována na téma „**Bezkontaktní systém pro měření délky koncových měrek**“ přispívá k rozšíření poznatků o měření délky KM s využitím principů nízkokoherenční interferometrie. Dané téma spadá do fundamentální metrologie, oblast délka.

Práce je členěna do dvou hlavních částí.

V teoretické části byl proveden rozbor dané problematiky. Hlavní pozornost byla věnována interferenci, KM, nejistotě měření, metodám a zařízením pro měření délky KM na pracovišti ČMI OI Liberec a základnímu popisu bezkontaktního systému.

Experimentální část byla zaměřena na čtyři oblasti – optimalizaci stávajícího bezkontaktního systému v závislosti na přímé potřebě ČMI, stanovení nejistoty měření pro daný systém, vytvoření metodiky měření a porovnání systému se stávajícími systémy k měření délky KM běžně využívaných v ČMI OI Liberec.

Z rozsáhlého souboru měření a získaných výsledků na bezkontaktním systému lze formulovat následující:

1. Byl zoptimalizován měřicí systém dle přímých potřeb ČMI. V rámci optimalizace bylo provedeno 9 zásadních změn, které významnou měrou přispěly k lepší funkčnosti bezkontaktního systému. Mezi 3 podstatné optimalizační změny patřil nový systém pro řízení polohy uložení KM v měřicí sestavě, kvalitnější metoda pro detekci středu bílých interferenčních proužků a její implementace do programu pro zpracování výsledků měření a optimalizace algoritmu pro zpracování výsledků měření délky KM.
2. Byla stanovena nejistota měření pro systém jako: $U = \sqrt{51^2 + (0,5 \times l_n)^2} \text{ nm}$, kde l_n je jmenovitá délka KM dosazena v milimetrech. Daná hodnota byla určena jako CMC (kalibrační a měřicí schopnost) pro měřicí systém.
Nejistota měření byla zpracována v souladu platné mezinárodní normy ČSN EN ISO 3650 [1] a předpisů [4], [5], [40], [44], [45], [49], [50]. Nejprve byl sestaven seznam všech zdrojů nejistot, pro každý zdroj byla určena příslušná standardní nejistota, která byla započítána do kombinované standardní nejistoty a poté byla stanovena rozšířená nejistota měření pro daný systém.
3. Byla vypracována metodika měření délky KM na daném měřicím systému dle platné mezinárodní normy ČSN EN ISO 3650 [1] a předpisů [2], [4], [45]. Metodika je platná pro měření délky KM v rozsahu délek 0,3 mm až 100 mm v ČMI. Zpracovaná metodika je připravena k validaci.
4. CMC měřicího systému je srovnatelná s přístrojem TESA–UPC využívaného k měření délky KM v ČMI OI Liberec.

Unikátnost optimalizovaného systému spočívá v rychlém a automatizovaném měření délky KM; měření KM třídy přesnosti K až 2, 1. – 5. sekundárního řádu; nepoškození měřicích ploch KM; návaznosti na státní etalon ČR; možnosti měřit jednu samostatnou KM; nízké časové náročnosti.

Práce souvisí s výzkumnými záměry realizovanými v posledních 10ti letech a shrnuje rozsáhlé poznatky o měření délky KM s využitím principů nízkokoherenční interferometrie.

Výsledky získané v této práci poslouží pro vědecko-výzkumný projekt TA03010663 – Nové systémy pro kontrolu délky koncových měrek a vyhodnocení kvality jejich povrchů (2013–2016, TA0/TA). Autorka předkládané práce je hlavní řešitelka za TUL a spoluřešitelka projektu.

Vlastní přínos práce

Práce shrnuje poznatky o měření délky KM v oblasti interferometrie a popisuje nový systém pro automatickou bezkontaktní kalibraci KM pracující na bázi nízkokoherenční interferometrie a jeho zavedení do ČMI.

Přínosem předkládané habilitační práce je:

1. Provedená optimalizace systému pro bezkontaktní měření délky KM v návaznosti na přímé potřeby ČMI.
2. Stanovená nejistota měření pro daný systém.
3. Vytvořená metodika měření (kalibrační postup) délky KM na daném systému.
4. Připravena veškerá dokumentace pro validaci nové metody pro měření délky KM.

Díky realizaci projektu TA03010663 a zpracování předložené práce bude mít ČMI k dispozici unikátní rychlý a spolehlivý systém pro měření délky KM. Zároveň bude bezkontaktní systém zařazen jako produkt do mezinárodního programu podpory výstavby zahraničních metrologických institutů, které jsou nyní budovány v rozvíjejících se ekonomikách (Mongolsko, Rumunsko, atd.).

Novost tohoto systému spočívá ve způsobu optického odměřování délky KM a v technickém řešení automatického podavače pro KM. Při optickém odměřování délky KM je při využití kombinace laserové interferometrie a interferometrie nízké koherence získána absolutní hodnota délky KM jako výsledek jednokrokového bezkontaktního měření, probíhajícího bez nutnosti použití referenční desky na kterou jsou KM nasunuty, jak je tomu u systému TESA NPL A.G.I. 300, nebo porovnání výsledku měření s hodnotou referenční, jak je u systému TESA–UPC. Tento způsob měření délky KM je patentově chráněn (Český národní patent číslo 302948) a není doposud v metrologické praxi využíváný.

Novost systému je i v technickém řešení automatického podavače KM s kapacitou až 126 kusů KM. Důmyslnou kombinací vertikálních a horizontálních pohybů několika nezávislých částí systému jsou KM postupně transportovány ze základací části podavače do měřicí pozice v optické sestavě a následně do vykládací části podavače. To vše při minimálních prostorových nárocích celé konstrukce.

Vhodně navrženými optimalizačními kroky byl stávající systém upraven pro přímé potřeby laboratorního měření v ČMI, byla vytvořena kompletní dokumentace k validaci dané metody měření tj. stanovila se nejistota měření a metodika (kalibrační postup) pro měření na daném přístroji.

Systém je novým produktem v metrologii pro oblast délkového měření a dosahuje významných kvalit jako standardní systémy, které jsou využívány k měření KM v ČMI.

Směr dalšího vývoje

Jak už bylo uvedeno v úvodu – práce reaguje na sílící potřebu automatizace procesu měření délky KM z hlediska národní metrologické laboratoře ČMI. Tato potřeba je reakcí na požadavky výrobců přesného strojírenství, kteří vyžadují rychlou, kvalitní a nepoškozující kalibraci KM. Bezkontaktní systém je vhodným řešením.

Výsledná nejistota měření a přesnost systému byla minimalizována optimalizačními zásahy. Dalšími konstrukčními a jinými návrhy např. volbou jiných materiálů komponent lze přesnost měření zvyšovat a pokračovat ve snižování nejistot měření. Jednalo by se například o náhradu stávajících klínových optických prvků sestavy optikou paralelní, která by významně usnadnila základní nastavení optické sestavy a následně přispěla i ke snížení nejistoty měření. Dále například o náhradu fotodetektorových matic rychlou CCD kamerou, umožňující 3D analýzu povrchu měřené KM. Tato funkce je v aktuální verzi systému dostupná jen nepřímo, prostřednictvím vyhodnocení počtu a tvaru interferenčních proužků v obrazu získaném v rámci činnosti algoritmu pro optimalizaci polohy KM v měřicí sestavě.

Systém pro automatickou bezkontaktní kalibraci KM může také sloužit pro návrh dalších měřicích systémů např. pro dlouhé KM (od 250 mm do 1000 mm).

Bezkontaktní systém bude po zavedení a odzkoušení v ČMI také nabízen i do prestižních mezinárodních metrologických institutů jako jsou PTB (Německo), NPL (Velká Británie), GUM (Polsko), NIST (USA) atd. a bude zařazen jako produkt do mezinárodního programu podpory výstavby zahraničních metrologických institutů, které jsou nyní budovány v rozvíjejících se ekonomikách.

6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ČSN EN ISO 3650. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Etalony délek – Koncové měrky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2000. 24 s. Třídící znak 25 3308.
- [2] ČSN EN ISO/IEC 17043. *Posuzování shody – Všeobecné požadavky na zkoušení způsobilosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. 47 s. Třídící znak 01 5264.
- [3] International Standard ISO 3534–1: 2006. *Statistika – Slovník a značky – Část 1: Obecné statistické termíny a termíny používané v pravděpodobnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. 81 s. Třídící znak 01 0216.
- [4] ILAC P14:12/2010. *Politika ILAC pro nejistotu měření při kalibracích* [online]. [cit. 2015–09–30]. Dostupné na: <http://www.cia.cz/Download.ashx?Type=Document&Id=16841>.
- [5] JCGM 104: 2009. *Evaluation of measurement data – An introduction to the Guide to the expression of uncertainty in measurement and related documents* [online] [cit. 2015–09–30]. Dostupné na: http://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_104_2009_E.pdf.
- [6] ÚSTAV PŘÍSTROJOVÉ TECHNIKY AV ČR, V.V.I., BRNO. *Ppt prezentace: Jak dlouhý je jeden metr? Světlo jako garant správné míry*. Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i., Brno, © 2015.
- [7] GILLARD, C.W.; BUHOLZ, N. E. *Progress in absolute distance interferometry*. Opt. Eng. 22, 1983, s. 348–353 [cit. 2015–09–30]. Dostupné na: <http://jartweb.net/thesis/Chapter2.pdf>.
- [8] ROWLEY, W.R.C. *Laser wavelength measurements and standards for the determination of length*. Precis. Meas. & Fund. Constants, NBS Spec. Publ. 617, 1984, s. 57–64.
- [9] OUTFRATA, J. *Základní měrky*. Praha: SNTL, 1961. ISBN –.
- [10] ISHII, Y. *Phase correction in measurement of gauge blocks using a new double-ended interferometer*. Proc. SPIE 3477, 1998, s. 173–180.
- [11] NICOLAUS, R.A.; KANG, C.; BÖNSCH, G. *Doubleended Fizeau interferometers with phase-stepping evaluation for measurement of cubes*. Proc. SPIE 3477, 1998, s. 109–115.
- [12] THWAITE, E.G. *Phase Correction in the Interferometric Measurement of End Standards*. Metrologia 14, 1978, s. 53–62.
- [13] YOKOYAMA, Y. *New calibration system for interferometric measurement of gauge blocks without wringing onto a platen*. Proc. JSPE, 2004, s. 563–566 [cit. 2015–09–30]. Dostupné na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607604831>.
- [14] OKAJI, M.; YAMADA, N.; MORIYAMA, H. *Ultraprecise thermal expansion measurements of ceramic and steel gauge blocks with an interferometric dilatometer*. Metrologia, 37, 2000, s. 165–171.
- [15] BÖNSCH, G.; POTULSKI, E. *Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlén's formulae*. Metrologia 35, 1998, s. 133–139.
- [16] DECKER, J.E.; PEKELSKY, J.R. *Uncertainty evaluation for the measurement of gauge blocks by optical interferometry*. Metrologia 34, 1997, s. 479–493.

- [17] IKONEN, E; RISKI, K. *Gauge-block interferometer based on one stabilized laser and a white-light source*. Metrologia 30, 1993, s. 95–104.
- [18] BRUCE, C.F. *The effects of collimation and oblique incidence in length interferometers*. Aust. J. Phys. 8, 1955, s. 224–240.
- [19] BIRCH, K.P.; DOWNS, M.J. *Correction to the updated Edl'en equation for the refractive index of air*. Metrologia 31, 1994, s. 315–326.
- [20] PUGH D.J.; JACKSON, K. *Automatic gauge block measurement using multiple wavelength interferometry*. Proc. SPIE 656, 1986, s. 244–250.
- [21] LEWIS, A.J. *Two-wavelength phase-stepping interferometry for absolute length measurement*. Proc. Applied Optics and Opto-Electronics Conf., 1990, s. 269–270.
- [22] LEWIS, A.J. *Absolute length measurement using multiple-wavelength phase-stepping interferometry – PhD Thesis*. London, University of London. 1993, s. 1–324.
- [23] LEWIS, A.J. *Measurement of length, surface form and thermal expansion coefficient of length bars up to 1.5m using multiple-wavelength phase-stepping interferometry*. Meas. Sci. Technol. 5, 1994, s. 694–703.
- [24] DECKER, J.E.; BUSTRAAN, K.; DE BONTH, S.; PEKELSKY, J.R. *Updates to the NRC gauge block interferometer*. NRC Document 42753, 2000.
- [25] THALMANN, R. *CCL key comparison: calibration of gauge blocks by interferometry*. Metrologia 39, 2002, s. 165–177.
- [26] BÖNSCH, G. *Gauge blocks as length standards measured by interferometry or comparison: length definition, traceability chain, and limitations*. Proc. SPIE 3477, 1998, s. 199–210.
- [27] DOIRON, T.D.; EVERETT, D; FAUST, B.S.; STAFIELD, E.S.; STOUP, J.R. *Case against optical gauge block*. Proc. SPIE 3477, 1998, s. 188–198.
- [28] DOIRON, T. *Gauge blocks—a zombie technology*. J. Res. Natl Inst. Stand. Technol. 113, 2008, s. 175–184.
- [29] HUGHES, E.B. *Measurement of the linear thermal expansion coefficient of gauge blocks by interferometry*. Proc. SPIE 2088, 1993, s. 179–189.
- [30] DECKER, J.E.; MILES, J.R.; MADEJ, A.A.; SIEMSEN, R.F.; SIEMSEN, K.J.; DE BONTH, S.; BUSTRAAN, K.; TEMPLE, S.; PEKELSKY, J.R. *Increasing the range of unambiguity in step-height measurement with multiple-wavelength interferometry – application to absolute long gauge block measurement*. Appl. Opt. 42, 2003, s. 5670–5678.
- [31] BÖNSCH, G. *Automatic gauge block measurement by phase stepping interferometry with three laser wavelength*. Proceedings of Conference on Recent Developments in Traceable Dimensional Measurements 4401, 2001, s. 1–10.
- [32] ISHII, Y.; SEINO, S. *New method for interferometric measurement of gauge blocks without wringing onto a platen*. Metrologia 35, 1998, s. 67–73.
- [33] BUCHTA, Z.; MIKEL, B.; LAZAR, J.; ČÍP, O. *White-light fringe detection based on novel light source and color CCD camera*. Measurement Science and Technology 22, 2011, 094031–6.

- [34] IKONEN, E.; KAUPPINEN, J.; KORKOLAINEN, T.; LUUKKAINEN, J.; RISKI, K. *Interferometric calibration of gauge blocks by using one stabilized laser and a white-light source*. Appl. Opt. 30, 1991, s. 4477–4478.
- [35] ČÍP, O.; PETRŮ, F. *A scale-linearization method for precise laser interferometry*. Meas. Sci. Technol. 11, 2000, s. 133–141.
- [36] ČÍP, O.; BUCHTA, Z.; PETRŮ, F.; LAZAR, J. *On-line monitoring of the refraction index of air for ultra-precise length measurement in the nano-world*. Proceedings of 8th IEEE Africon Conference 8, 2007, s. 294–298.
- [37] LAZAR, J.; ČÍP, O.; ČÍŽEK, M.; HRABINA, J.; BUCHTA, Z. *Suppression of air refractive index variation in high-resolution interferometry*. Sensors 11, 2011, s. 7644–7655.
- [38] PIKÁLEK, T.; FOŘT, T.; BUCHTA, Z. *Detection techniques in low-coherence interferometry and their impact on overall measurement accuracy*. Appl. Opt. 53, 2014, s. 8463–8470.
- [39] BÖNSCH, G. *Interferometric calibration of an integrating sphere for determination of the roughness correction of gauge blocks*. Proc. SPIE 3477, 1998, s. 152–160.
- [40] JCGM 100: 2008. *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement* [online]. [cit. 2015–09–20]. Dostupné na: <http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html>.
- [41] QUINN, T.J. *Practical realization of the definition of the metre*. Metrologia 36, 1999, s. 211–244.
- [42] BALLING, P. *Klasifikace délkových měření z hlediska smlouvy MRA*. Metrologie 2, 2003, s. 22–29.
- [43] DORIN, T.; BEERS, J. *The Gauge Block Handbook*. 2009 [cit. 2015–10–02]. Dostupné na: <http://www.nist.gov/calibrations/upload/mono180.pdf>.
- [44] ČESKÝ INSTITUT PRO AKREDITACI. ILAC–G8:03/2009: *Pokyny k uvádění shody se specifikací* [online]. ČIA, © 2009 [cit. 2015–12–12]. Dostupné na: <http://www.cia.cz/Download.ashx?Type=Document&Id=16827>.
- [45] ČESKÝ INSTITUT PRO AKREDITACI. EA–4/02 M:2013: *Vyjádření nejistoty měření při kalibraci* [online]. ČIA, © 2013 [cit. 2015–12–12]. Dostupné na: <http://www.cia.cz/Download.ashx?Type=Document&Id=16811>.
- [46] KURIYAMAA, Y.; YOKOYAMAA, Y.; ISHIIA, Y.; ISHIKAWAB, J.; MAKINOC, H. *Development of a New Interferometric Measurement System for Determining the Main Characteristics of Gauge Blocks*. Proc. CIRP 55, 2006, s. 563–566.
- [47] MITUTOYO. *Základní informace ke koncovým měrkám*. Mitutoyo, © 2015.
- [48] PIKÁLEK, T. *Analýza povrchu profilů pomocí interferometrie nízké koherence*. Brno, 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav fyzikálního inženýrství.
- [49] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. *Sborníky technické harmonizace 2012 – „Pokyn pro vyjadřování nejistoty měření“* [online]. ÚNMZ, © 2012 [cit. 2015–12–12]. Dostupné na: <http://www.unmz.cz/files/Sborn%C3%ADky%20TH/GUM%20-%20celek%20-DEF.pdf>.

- [50] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. *Sborníky technické harmonizace 2005 – „Nejistoty měření, přesnost měření, správnost měření a otázky spojené se vzájemnou porovnatelností výsledků a s prohlášením o shodě s technickými specifikacemi“* [online]. ÚNMZ, © 2005 [cit. 2015–12–12]. Dostupné na: http://www.unmz.cz/sborniky_th/sb8/nejistoty.pdf.
- [51] KCDB. *BIPM* [online]. KCDB, © 2002–2016 [cit. 2016–02–01]. Dostupné na: http://kcdb.bipm.org/appendixC/country_list_search.asp?CountSelected=CZ&iservice=L/DimMet.2.2.1.
- [52] ČSN EN ISO 1. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Referenční teplota pro geometrické požadavky na výrobky a jejich ověřování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2003. 44 s. Třídící znak 014110.
- [53] SALEH, B.E.A; TEICH, M.C. *Základy fotoniky*. Praha: Matfyzpress, 1994. ISBN 80–85863–01–4.
- [54] ÚSTAV PŘÍSTROJOVÉ TECHNIKY AV ČR, V.V.I., BRNO. *Firemní podklady*. Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i., Brno, © 2015.
- [55] MIKŠ, A. *Aplikovaná optika*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2009. ISBN 978–80–0104–254–0.

PŘÍLOHA HABILITAČNÍ PRÁCE

PŘÍLOHA 1

Tabulka 1 – Hodnota $t_p(v)$ z t -rozdělení pro počet v stupňů volnosti, která definuje interval $-t_p(v)$ až $+t_p(v)$ obsahující podíl p rozdělení

Počet stupňů volnosti Degrees of freedom	Podíl p v %					
	Fraction p in percent					
v	68,27 ^(a)	90	95	95,45 ^(a)	99	99,73 ^(a)
1	1,84	6,31	12,71	13,97	63,66	235,80
2	1,32	2,92	4,30	4,53	9,92	19,21
3	1,20	2,35	3,18	3,31	5,84	9,22
4	1,14	2,13	2,78	2,87	4,60	6,62
5	1,11	2,02	2,57	2,65	4,03	5,51
6	1,09	1,94	2,45	2,52	3,71	4,90
7	1,08	1,89	2,36	2,43	3,50	4,53
8	1,07	1,86	2,31	2,37	3,36	4,28
9	1,06	1,83	2,26	2,32	3,25	4,09
10	1,05	1,81	2,23	2,28	3,17	3,96
11	1,05	1,80	2,20	2,25	3,11	3,85
12	1,04	1,78	2,18	2,23	3,05	3,76
13	1,04	1,77	2,16	2,21	3,01	3,69
14	1,04	1,76	2,14	2,20	2,98	3,64
15	1,03	1,75	2,13	2,18	2,95	3,59
16	1,03	1,75	2,12	2,17	2,92	3,54
17	1,03	1,74	2,11	2,16	2,90	3,51
18	1,03	1,73	2,10	2,15	2,88	3,48
19	1,03	1,73	2,09	2,14	2,86	3,45
20	1,03	1,72	2,09	2,13	2,85	3,42
25	1,02	1,71	2,06	2,11	2,79	3,33
30	1,02	1,70	2,04	2,09	2,75	3,27
35	1,01	1,70	2,03	2,07	2,72	3,23
40	1,01	1,68	2,02	2,06	2,70	3,20
45	1,01	1,68	2,01	2,06	2,69	3,18
50	1,01	1,68	2,01	2,05	2,68	3,16
100	1,005	1,660	1,984	2,025	2,626	3,077
∞	1,000	1,645	1,960	2,000	2,576	3,000

^{a)} Pro veličinu z popsanou normálním rozdělením s očekávanou hodnotou μ_z a směrodatnou odchylkou σ , intervalem $\mu_z \pm k\sigma$ s podílem $p = 68,27\%$, $95,45\%$, a $99,73\%$ rozdělení pro $k = 1, 2$ a 3 .

^{a)} For a quantity z described by a normal distribution with expectation μ_z and standard deviation σ , the interval $\mu_z \pm k\sigma$ encompasses $p = 68,27\%$, $95,45\%$, and $99,73\%$ percent of the distribution for $k = 1, 2$ and 3 , respectively.