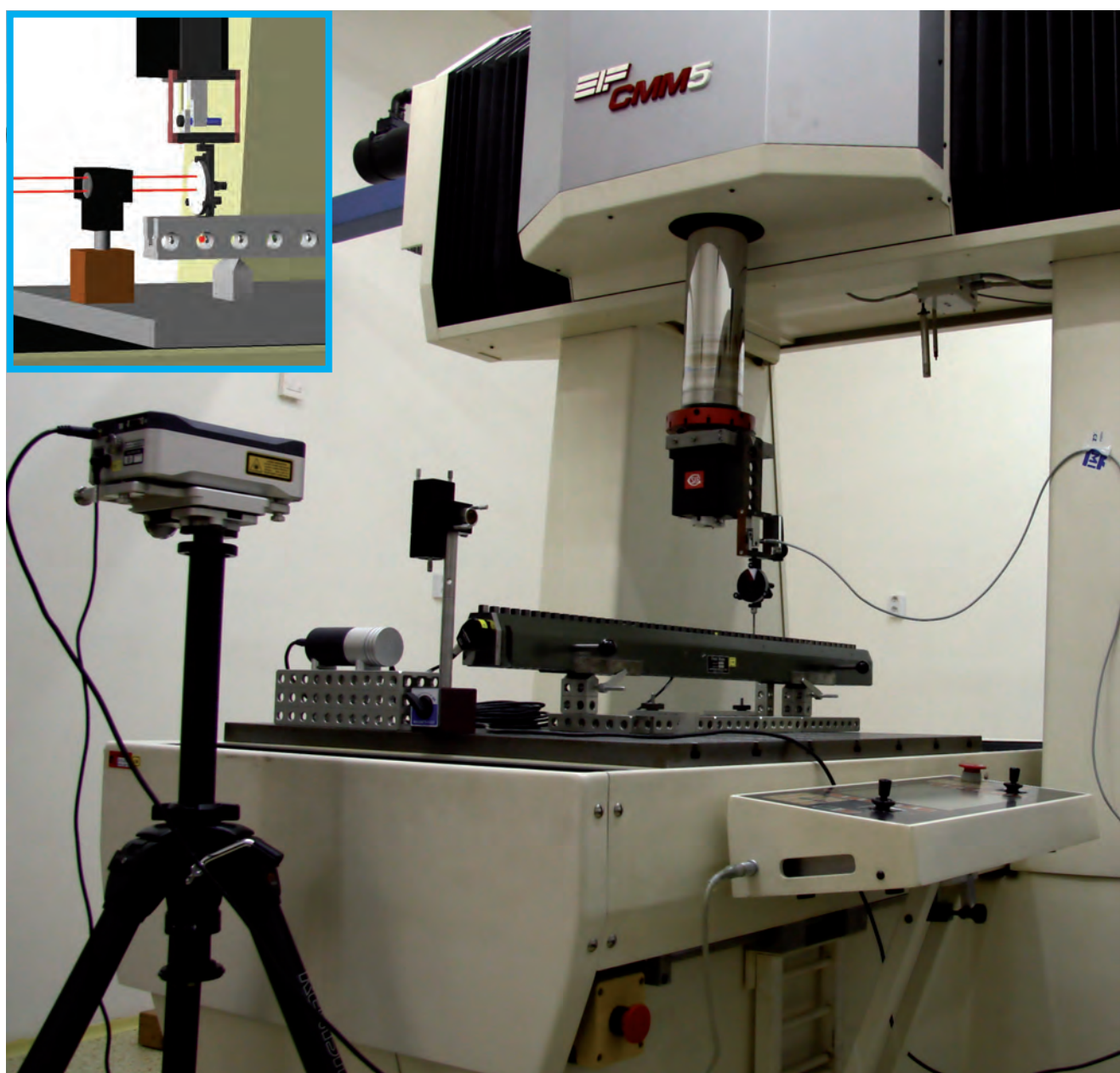
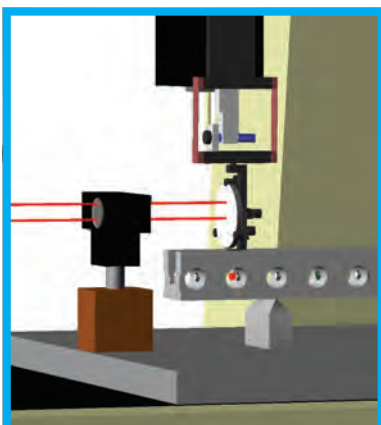


TEMATICKÁ
PŘÍLOHA Č. 4/2009

METROLOGIE

VĚDECKÁ
LEGÁLNÍ
PRAKTICKÁ



METROLOGIE DÉLKY

RNDr. Petr Balling TEMATICKÁ PŘÍLOHA METROLOGIE DÉLKY	2
---	----------

RNDr. Petr Balling PRIMÁRNÍ ETALONÁŽ DÉLKY	3
--	----------

Doc. Ing. Vít Zelený, CSc., Pavel Skalník ZVÝŠENÍ PŘESNOSTI KALIBRACE STUPŇOVÝCH MĚREK KOMBINACÍ SOUŘADNICOVÉHO STROJE A INTERFEROMETRU	10
---	-----------

Ing. František Dvořáček KALIBRACE LIBEL A AUTOKOLIMÁTORŮ	15
--	-----------

Mgr. Petr Klapetek, Ph.D., Mgr. Miroslav Valtr METROLOGICKÝ RASTROVACÍ SONDOVÝ MIKROSKOP	17
--	-----------

Mgr. Anna Campbellová, Mgr. Miroslav Valtr, Mgr. Petr Klapetek, Ph.D. MĚŘENÍ VELMI MALÝCH SIL V NÁVAZNOSTI NA DÉLKU	20
--	-----------

Mgr. Petr Křen MĚŘENÍ ROVINNOSTI VELKÝCH OPTICKÝCH PLOCH	23
--	-----------

Ing. Ondřej Číp, Ph.D., Ing. Josef Lazar, Dr., Ing. Zdeněk Buchta, Ph.D., Martin Čížek, Břetislav Mikel, Radek Šmíd LASEROVÝ ODMĚŘOVACÍ SYSTÉM PRO PŘESNÉ MĚŘENÍ VZDÁLENOSTÍ	26
--	-----------

Čeněk Nenáhlo, dipl. tech. POKROK V PRŮMYSLOVÉ PŘÍSTROJOVÉ TECHNICE	28
---	-----------

METROLOGY OF LENGTH

RNDr. Petr Balling THEMATIC SUPPLEMENT: LENGTH METROLOGY	2
--	----------

RNDr. Petr Balling PRIMARY STANDARDS OF LENGTH	3
--	----------

Doc. Ing. Vít Zelený, CSc., Pavel Skalník IMPROVING STEP GAUGE CALIBRATION ACCURACY BY THE COORDINATE MACHINE AND INTERFEROMETER COMBINED USE	10
---	-----------

Ing. František Dvořáček CALIBRATION OF LEVELS AND AUTOCOLLIMATORS	15
---	-----------

Mgr. Petr Klapetek, Ph.D., Mgr. Miroslav Valtr THE METROLOGICAL SCANNING PROBE MICROSCOPE	17
---	-----------

Mgr. Anna Campbellová, Mgr. Miroslav Valtr, Mgr. Petr Klapetek, Ph.D. MEASURING VERY SMALL FORCES IN RELATION TO THE LENGTH	20
--	-----------

Mgr. Petr Křen FLATNESS MEASUREMENT OF LARGE OPTICAL FLATS	23
--	-----------

Ing. Ondřej Číp, Ph.D., Ing. Josef Lazar, Dr., Ing. Zdeněk Buchta, Ph.D., Martin Čížek, Břetislav Mikel, Radek Šmíd LASER METERING SYSTEM FOR PRECISE LENGTH MEASUREMENT	26
--	-----------

Čeněk Nenáhlo, dipl. tech. PROGRESS IN INDUSTRIAL MEASUREMENT TECHNOLOGY	28
--	-----------

TEMATICKÁ PŘÍLOHA METROLOGIE DÉLKY

RNDr. Petr Balling

Český metrologický institut, Laboratoře primární metrologie

Již několik let vychází příloha časopisu Metrologie zaměřená na jeden konkrétní obor. Předchozí přílohy byly věnovány tlaku a metrologii vlastností elektrických prvků.

Cílem tohoto čísla není podat celkový přehled o oboru délky; to ani v daném rozsahu několika desítek stran není možné, protože principy a metody se velmi liší pro různé rozsahy (od dlouhých vzdáleností v astronomickém měřítku nebo geodézii po nanometrologii), pro různé měřené veličiny od nejjednodušších typu vlnové délky nebo posunutí po měření odchylek složitých tvarů nebo deformací, vibrací, teplotní roztažnosti nebo drsnosti s řadou velmi odlišných metod detekce – interferometrické, mechanické, fotogrammetrické, rentgenové nebo optické koherentní tomografie. Uvádíme spíše příklady oblastí, ve kterých nedávno došlo k významnému rozvoji.

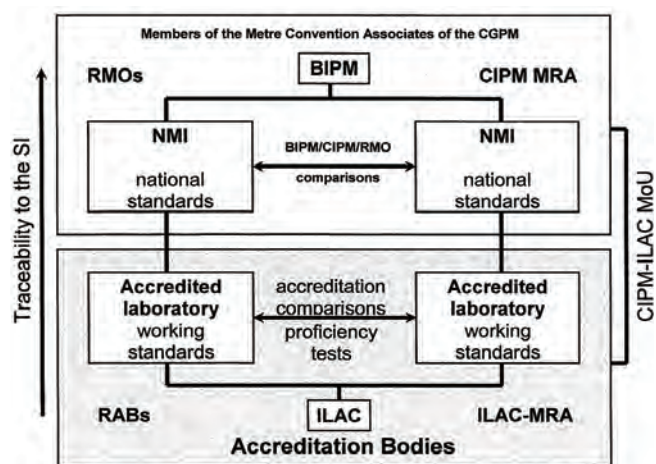
V prvním příspěvku popisují primární etalonáž délky a aktualizaci sestavy Státního etalonu délky. V dalším příspěvku Doc. Ing. Vít Zelený a Pavel Skalník z ČMI LPM představují zpřesnění kalibrací stupňových měrek využitím kombinace souřadnicového měřicího stroje a interferometru. Popis a kalibraci důležitých měřidel úhlu – libel a autokolimátorů uvádí Ing. František Dvořáček z ČMI OI Liberec. Vývoj metrologického AFM mikroskopu – opět zařízení, které kombinuje laserové interferometry s souřadnicovým měřením v oboru nanometrologie – je výsledkem spolupráce ČMI (Mgr. Petr Klapetek, PhD. a Ing. Miroslav Valtr) a ÚPT AV ČR v Brně (doc. Ing. Josef Lazar, Dr. a Ing. Ondřej Číp, Ph.D.). Další příspěvek se zabývá měřením malých sil, které je potřebné pro správné měření tvrdosti v nanometrologii. Petr Křen z ČMI LPM popisuje novou metodu, kterou navrhl a realizoval pro přesné měření topografie velkých optických ploch. Další aplikaci interferometrického měření – vývoj kalibrátoru průmyslových snímačů polohy – popisují Ondřej Číp a kolegové z ÚPT AV ČR v Brně. V posledním příspěvku Čeněk Nenáhlo informuje o novinkách v průmyslové přístrojové technice.

V druhém letošním čísle Metrologie vyšly další tři články z této oblasti: Ing. Jiří Lechner a kolegové z VÚGTK popsali nově vyhlášený Státní etalon velkých délek [1], Ing. Jan Habart a kolegové z ČMI LPM interferometrickou měřicí trať pro kalibraci pásů a elektronických dálkoměrů [2] a Ing. Jan Kůr a kolegové z Mesing, s. r. o. nově vyvinutý systém pro automatické bezdotykové měření drsnosti a úchylek tvaru [3].

Pro získání přehledu o současných možnostech metrologie doporučuji navštívit webové stránky <http://kcdb.bipm.org>, kde jsou v příloze C ujednání o vzájemném uznávání certifikátů vydávaných národními metrologickými instituty (CIPM MRA) uvedeny schválené kalibrační měřicí schopnosti institutů, které do systému zapojily. Služby jsou tříděny podle jednotné klasifikace DimVIM, která umožňuje snadno vyhledat požadované kalibrace nebo porov-

nat schopnosti jednotlivých institutů (klasifikace existuje i v české verzi [4]). Česká republika (ČMI a VÚGTK) má dnes uznáno sedmdesát kalibračních měřicí schopností, řadu z nich na špičkové světové úrovni; všechny jsou v jedné tabulce na adrese http://kcdb.bipm.org/AppendixC/L/CZ/L_CZ.pdf.

Obdobné vzájemném uznávání bylo později sjednáno i mezi akreditačními instituty (ILAC MRA), tzv. nejlepší měřicí schopnosti (BMC) akreditovaných laboratoří jsou také veřejně dostupné na stránkách akreditačních institutů (např. www.cia.cz) nebo organizací (<http://db.european-accreditation.org/>); zde ale není možné vyhledávání jednotlivých služeb, jen prohlížení příloh jednotlivých kalibračních laboratoří. V současné době probíhá přechodné období sjednocení významu měřicí schopnosti (BMC bude významem ekvivalentní CMC, stručně řečeno i schopnost akreditačních laboratoří bude muset být prokazatelná v porovnání – tedy povinně zahrnovat mj. i vliv měřeného objektu). Všechny akreditační instituty sdružené v ILAC také uznávají CMC všech institutů CIPM MRA.



LITERATURA

- [1] Ing. Jiří Lechner, CSc., Ing. Václav Slaboch, CSc., Ing. Ladislav Červinka, Ing. Ilya Umnov: Státní etalon délky 25 až 1 450 m – komplet složený z délkové geodetické základny Košice a elektronického dálkoměru Leica TCA 2003, Metrologie 2/2009, str. 15-20
- [2] Ing. Jan Habart, Pavel Skalník, Doc. Ing. Vít Zelený, CSc.: Měřicí trať o délce 32 m v LPM ČMI Praha, Metrologie 2/2009, str. 29
- [3] Ing. Jan Kůr, Ing. Daniel Smutný, Ing. Petr Kracík: Automatické měření povrchových defektů, úchylek geometrického tvaru a drsnosti, Metrologie 2/2009, str. 39
- [4] P. Balling: Klasifikace délkových měření z hlediska ujednání MRA, Metrologie 2/2003, s. 22-29 nebo volně ke stažení z <http://www.euramet.org/index.php?id=tc-l-dimvim>

PRIMÁRNÍ ETALONÁŽ DÉLKY

RNDr. Petr Balling

Český metrologický institut, Laboratoře primární metrologie

Abstrakt

V článku je po stručném historickém úvodu popsán státní etalon délky a vysvětleny důvody jeho současné modifikace a schéma návaznosti.

1. ÚVOD

V souladu se zákonem o metrologii je nezbytné zabezpečit správnost délkových měřidel a měření pomocí návaznosti na státní etalon jednotky délky, který realizuje zákonem stanovenou jednotku délky – metr. Podle definice metru platné od roku 1983 je takovým etalonem zařízení, které měří vzdálenost pomocí měření času, který potřebuje světlo k jejímu uražení.

1.1. Historie definice metru

Dekadický metrický systém byl vytvořen v době francouzské revoluce, v roce 1799 byly v archivu v Paříži uloženy platinové etalony metru a kilogramu. Metr byl vytvořen jako koncová měřka (reprezentující čtyřicetimilióntinu délky poledníku) – metr byl určen vzdáleností čel platinového hranolu; používáním se tedy znatelně opotřebovával. V roce 1875 byla podepsána Metrická konvence, založen Mezinárodní úřad pro váhy a míry (BIPM) v Sevres u Paříže, zaveden Mezinárodní systém jednotek (SI) a zahájena výroba etalonů metru a kilogramu ze slitiny platiny a iridia. Metr byl definován jako vzdálenost dvou rysek na mezinárodním prototypu při teplotě 0 °C. Členské země dostaly každá svůj etalon a jejich odchylky od mezinárodních etalonů byly určovány při kalibracích v BIPM. Československo získalo svůj národní etalon tohoto typu (No. 7) až v roce 1930.

Již před vznikem Metrické konvence upozorňoval J. C. Maxwell, že absolutně stále jednotky/etalony by neměly být odvozovány z rozměrů nebo pohybu planety, ale pomocí vlnových délek, period vibrací nebo hmotností molekul (nebo elementárních částic), které jsou nezníčitelné a nezměnitelné. Trvalo však dlouho, než se podařilo vytvořit prakticky použitelné kvantové etalony, které by dosahovaly lepší přesnosti než klasické hmotné míry. První veličinou, jejíž jednotka byla v SI takto definována (v roce 1960) byla délka: metr byl určitým násobkem vlnové délky oranžové spektrální čáry kryptonu [1]. Její nejistota byla až 4×10^{-9} relativně, tedy o několik řádů lepší než dlouhodobá stabilita hmotných metrů – jejich porovnání bylo sice možné s nejistotou okolo 100 nm (1×10^{-7} relativně), ale například československý metr No.7 podle výsledků kalibrací v BIPM mezi lety 1929 a 1962 změnil hodnotu o -500 nm (-5×10^{-7} relativně).

Prototype No 7 (alliage de 1874) à 0° = 1 m + 0,1
Mètre No 7 = 1 m - 0,40 μm, à 0°C.

Druhou veličinou, která přešla na kvantovou definici byl čas – od roku 1968 je SI sekunda realizována atomovými (cesiovými) hodinami, ale dosud se nepodařilo najít způsob,

jak počítáním částic nebo porovnáním se základními fyzikálními konstantami určit makroskopickou hmotnost (>1 g) s přesností srovnatelnou s klasickým prototypem kilogramu ($<1 \times 10^{-7}$ relativně).

Brzy po změně SI definice metru na variantu s vlnovou délkou kryptonu byly vyvinuty jednofrekvenční lasery, které jsou díky vyššímu jas a delší koherentní délce vhodnějším zdrojem záření pro interferometrická měření než výbojka a brzy se také podařilo stabilizovat jejich frekvenci s lepší opakovatelností, než byla nejistota etalonu délky. Uvažovalo se tedy o změně definice metru pomocí jiného (přesnějšího) kvantového přechodu – ovšem vývoj v laserové technice a metrologii postupoval rychle a hrozilo nebezpečí, že i pečlivě vybraný model bude rychle překován a definice by musela být často měněna. V roce 1972 se pro metanem stabilizovaný infračervený laser $3.39 \mu\text{m}$ poprvé podařilo změřit současně vlnovou délku (porovnáním s kryptonem ve vakuovém interferometru) a frekvenci (porovnáním s frekvencí cesiových hodin pomocí koherentního řetězce přesných zdrojů) – tenkrát to znamenalo nejpresnější určení rychlosti světla [2], [3].

	definice	realizace	mez. etal.		rel. nejistota návaznosti
1799	Meter des Archives	Pt koncová měřka			$> 1 \times 10^{-6}$
1889	Mezinárodní prototyp metru	PtIr čárkové měřtko	Ano		1×10^{-6} 1×10^{-7}
1960	násobek vlnové délky $^{86}\text{kryptonu}$	Kr výbojka + interferometr	Ne		1×10^{-8} 2×10^{-9}
1983	zafixována hodnota rychlosti světla	laser o známé frekvenci + interferometr nebo dálkoměr	Ne		$< 1 \times 10^{-10}$

Tab. 1: Přehled vývoje definice metru

Protože realizace SI sekundy atomovými hodinami byla přesnější než tehdejší optické etalony (vlnové délky), byla v roce 1982/3 zvolena změna SI definice metru, která fixuje hodnotu rychlosti světla ve vakuu a převádí měření délky na měření času a která je značně nezávislá na technickém vývoji – je tedy pravděpodobné, že ji nebude třeba dlouho měnit. Naopak etalony optické frekvence řízené velmi úzkými zakázanými kvantovými přechody detekovanými v chladných zachycených atomech nebo iontech v současnosti svojí nejistotou (10^{-17} relativně) překonávají nejpokročilejší cesiové hodiny (atomové fontány) a v blízké době pěti až deseti let se očekává změna SI definice sekundy.

1.2. Současná definice metru a její realizace

Od roku 1982 je základní jednotka SI (Metrické konvence) pro délku – metr – definována jako vzdálenost, kterou

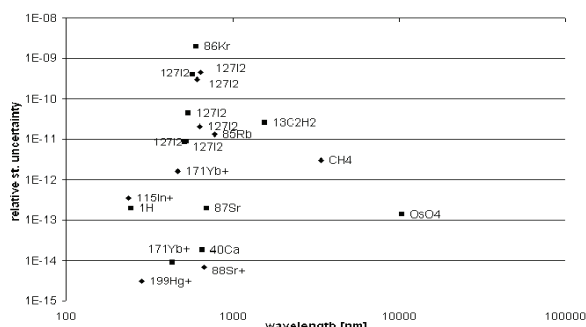
proběhne světlo ve vakuu za 1/299 792 458 sekundy, tato definice je také uvedena v Zákoně o metrologii č. 505.

Realizace této definice je možná třemi způsoby [4][5]:

- a) pomocí délky dráhy l , kterou ve vakuu urazí rovinná elektromagnetická vlna za čas t ; délku určíme po změření času t pomocí vztahu $l = c_0 \cdot t$, kde $c_0 = 299\,792\,458$ m/s je rychlost světla ve vakuu,
- b) pomocí vakuové vlnové délky λ rovinné elektromagnetické vlny frekvence f použitím vztahu $\lambda = c_0 / f$, kde $c_0 = 299\,792\,458$ m/s je rychlost světla ve vakuu (f změřit),
- c) pomocí záření ze seznamu uvedeného v doporučení [4],[5], jehož vakuové vlnové délky a frekvence mohou být použity s uvedenou nejistotou za předpokladu, že jsou dodrženy předepsané parametry a správná praxe (f známá).

Ve všech případech musí být provedeny korekce na případné vlivy difrakce, gravitace a nedokonalost vakua (index lomu vzduchu).

Přímá realizace – měření času, metoda a) – je ale vhodná jen pro dlouhé vzdálenosti, kvůli nízkému rozlišení (v řádu desetin nebo setin pikosekund, kterým odpovídá délka desetin nebo setin milimetru). V technické praxi (od desítek metrů do nanometrů) se pro měření používají interferenční metody, kde je měření času nahrazeno znalostí periody (frekvence) optického záření (frekvence stovek THz, perioda jednotky femtosekund). Měření periody/frekvence optického záření bylo až donedávna velice obtížné (pomocí koherentního řetězce řady generátorů spojujícího radiofrekvenční oblast s oblastí optickou), proto byl vytvořen seznam primárních etalonů, jejichž hodnota s příslušnou nejistotou je uznávána bez nutnosti nového navazování – jen na základě úspěšného mezinárodního porovnání s obdobnými etalony jiných národních metrologických institutů – podle metody c).



Obr. 1: Přehled vlnových délek a nejistot etalonů podle doporučení *Mise en Pratique* (2005)

Seznam doporučených zdrojů záření je vždy po několika letech podle potřeby aktualizován, současná verze zahrnuje dvacet typů referenčních kvantových přechodů v atomech a molekulách (obr. 1). Je v něm z důvodu kontinuity uvedena i vlnová délka kryptonové výbojky z předchozí definice metru.

1.3. Stav v ČR a ve světě

Laboratoře, které přinášejí nejvýznamnější pokrok v primární etalonáži délky a etalonů optických frekvencí jsou především JILA/NIST Boulder (USA), NPL Teddington (Velká

Británie), PTB Braunschweig (Německo), LNE-SYRTE/Pařížská observatoř (Francie), NRC Ottawa (Kanada), ILP Novosibirsk (Rusko), NMIJ/AIST Cukuba (Japonsko), na některých těchto pracovištích byly také vyvinuty koherentní frekvenční řetězce pro absolutní měření optických frekvencí.

Desítky národních metrologických institutů disponují jódem stabilizovanými helio-neonovými lasery 633 nm (červená), které si sami vyvinuli, případně zakoupili. Více než deset z nich má i etalony dalších vlnových délek a femtosekundový hřeben pro absolutní měření optických frekvencí.

V našich zemích se metrický systém (SI) využívá tradičně. Rakousko-Uhersko bylo zakládajícím členem BIPM (Metrické konvence) a užívání jednotek SI je upraveno zákonem o metrologii (č. 505/1990 Sb.).

ČSR získala platino-iridiový prototyp metru v roce 1930. Byl uchováván v cejchovním inspektorátu, později v Československém metrologickém ústavu v Praze kde byla po změně definice v r. 1960 uchováována etalonová kryptonová výbojka a později vyvíjeny, porovnávány a uchovávány i stabilizované lasery He-Ne/I₂ 633 nm od r. 1979, He-Ne/I₂ 612 nm od r. 1989, He-Ne/I₂ 543 nm od r. 1995, Nd:YAG/I₂ 532 nm/1064 nm od r. 2001, DFB laserové diody stabilizované na přechody acetylenu 1540 nm od roku 2004.

Jódem stabilizované lasery 633 nm byly později vyvinuty také v Ústavu přístrojové techniky AV v Brně (ÚPT) a v bratislavském pracovišti ČSMÚ. Československo bylo od osmdesátých let velmocí ve výrobě a využívání laserových interferometrů, které ve spolupráci s ÚPT vyráběla Metra Blansko, později Limtek.

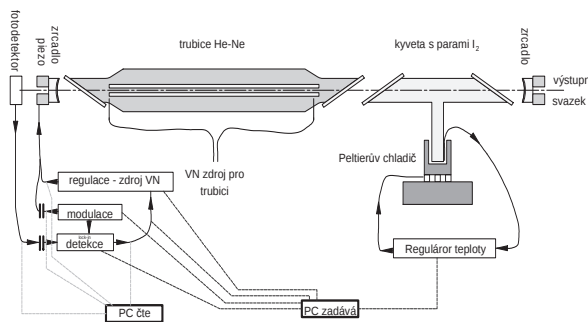
2. STÁTNÍ ETALON DÉLKY

Státní etalon délky byl v současné verzi vyhlášen 1. února 2008 [9] pod kódovým označením ECM 110-1/08-036; zahrnuje dále popsané lasery a interferometry.

Etalonem realizujícím jednotku délky metodou b) doporučení CCL [2.1] je pulsní fs-hřeben, který umožňuje měřit frekvenci (vakuovou vlnovou délku) optického záření stabilizovaných laserů absolutně – s návazností na etalon času a frekvence (cesiové hodiny) v našem případě zprostředkovanou prostřednictvím 10 MHz signálu z Rb hodin dlouhodobě stabilizovaných podle signálu GPS. Tímto způsobem lze mimo jiné měřit frekvenci primárních etalonů realizujících jednotku délky metodou c) a tak snížit jejich nejistotu na úroveň jejich opakovatelnosti. Například pro jódem stabilizovaný He-Ne laser 543 nm je pro metodu c) nejistota v doporučení CCL 50 kHz (1×10^{-10} rel.), ale díky absolutnímu měření fs-hřebenem a velmi dobré opakovatelnosti etalonů ČMI dosahujeme nejistoty s rezervou desetkrát lepší (5 kHz neboli 1×10^{-11} rel.). V ČMI jsou v provozu zde vyvinuté primární etalony 633 nm, 543 nm (dřívější státní etalony vlnových délek), 532 nm a 1542 nm (dříve referenční etalony); všechny mezinárodně porovnané nebo absolutně změřené v ČMI i v zahraničí. Tyto etalony lze po korekci indexu lomu vzduchu použít jako referenční zdroj záření v interferometrech IK-1 a IDKM k realizaci měření posunutí a fyzické délky a nebo je použít pro kalibraci sekundárních etalonů vlnové délky, vlnoměru, spektrometrů a podobně (viz schéma návaznosti na obr. 9).

2.1. Etalony vlnové délky

Etalon vlnové délky 633 nm tvoří helio-neonové lasery 633 nm (červená barva), jejichž frekvence, odpovídající přechodu mezi hladinami atomu neonu $3s_2-2p_4$, je stabilizována pomocí úzkých hyperjemných komponent molekuly jodu. Při interakci mezi optickým svazkem laseru a molekulami jodu, které vyplňují kyvetu vloženou do rezonátoru laseru, dochází k nelineární absorpci, díky které mohou být detekovány hyperjemné komponenty rotačně-vibračního přechodu R(127)11-5 molekuly izotopu jodu $^{127}\text{I}_2$. Tyto hyperjemné komponenty mají přesně definované a časově neměnné frekvence. Pomocí techniky modulace a detekce složky třetí harmonické lze hyperjemné komponenty detekovat a signál jednotlivých komponent (střední průchod signálu nulou) lze využít ke stabilizaci frekvence laseru prostřednictvím regulace délky rezonátoru piezokrystalem.



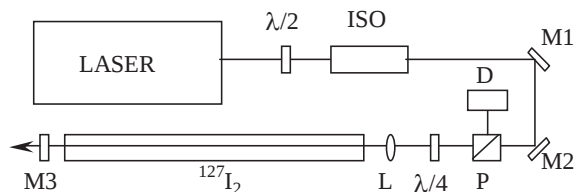
Obr. 2: Uspořádání etalonu 633 nm s interní jódovou kyvetou.

Pro nastavení pracovních parametrů podle doporučení pro realizaci metru [4] – teplota prstu jódové kyvety ($15 \pm 0,2$)°C, teplota stěny jódové kyvety (25 ± 5)°C vnitřní výkon laseru (10 ± 5 mW), hloubka frekvenční modulace ($6 \pm 0,3$) MHz a frekvenční stabilizaci jsou využity řídicí elektroniky MOLAS-2, které s menšími modifikacemi slouží i pro dále popisované etalony jiných vlnových délek. Každý z laserů realizované série pracuje v režimu jednoho podélného módu a v základním příčném módu a umožňuje detekci nejméně sedmi a nejvíce čtrnácti hyperjemných komponent.

Jódem stabilizované lasery 633 nm jsou v ČMI v provozu již 30 let a stále ještě jsou nejvýznamnějším článkem etalonu, protože naprostá většina laserových interferometrů používaných v metrologii a v průmyslu využívá helio-neonové lasery stejné vlnové délky a mohou tedy být tímto etalonem přímo kalibrovány. Kalibrační měřicí schopnost etalonu uznaná v rámci MRA [6] je $30 \text{ am}/20 \text{ kHz}/4,2 \times 10^{-11} \text{ rel.}$, tedy dostatečná pro všechna délková měření (pro ilustraci – tato relativní přesnost frekvence/vakuové délky znamená, že optická vzdálenost zrcadel laseru $\sim 0,3 \text{ m}$ je udržována na průměrné konstantní hodnotě s nejistotou menší než $0,013 \text{ nm}$ – méně než desetina rozměru atomu). Opakovatelnost a nejistota vlastního etalonu je více než 4-krát lepší, jak bylo prokázáno při každém z deseti mezinárodních porovnání provedených v letech 1981 až 2003.

Zdrojem záření pro **etalon vlnové délky 543 nm** (zelená) je helio-neonový laser s interními zrcadly pracující v režimu základního příčného a dvou až tří podélných módů. Délka

rezonátoru a odpovídající frekvence laseru jsou nastavovány dvěma způsoby – jednak regulací teploty rezonátoru pomocí odporového vinutí (pomalu a v celém rozsahu přeladitelnosti, cca 1 GHz) a dále pomocí piezokrystalu (rychle, ale jen v omezeném rozsahu cca 100 MHz). Výběr jedné frekvence – 1 podélného módu – se provádí pomocí polarizátoru, $\lambda/2$ destičky a pomocí permanentních magnetů tak, aby obsah nežádoucích frekvencí ve vybrané polarizaci byl menší než 1:100.



Obr. 3: Uspořádání etalonu 543 nm s externí jódovou kyvetou.

Jódová kyveta v níž sub-dopplerovsky detekujeme hyperjemné komponenty je (na rozdíl od jódem stabilizovaných laserů 633 nm) umístěna mimo rezonátor laseru. K utlumení zpětných odrazů je použito optického izolátoru (ISO). K saturaci dochází v externí kyvetě s parami $^{127}\text{I}_2$ při tlaku 4,2 Pa (nastaven udržováním teploty prstu kyvety na 0°C podle doporučení [4]). Kolimovaný čerpací svazek po průchodu polarizačním děličem (P) a kyvetou dopadá na polopropustné zrcadlo (M3) a jeho odražená část (sondovací svazek) prochází po stejné dráze kyvetou zpět. Pomocí $\lambda/4$ destičky je polarizace svazků v kyvetě převedena na kruhovou. Protože smysl rotace polarizace je u čerpacího a sondovacího svazku opačný, je po zpětném průchodu sondovacího svazku $\lambda/4$ destičkou vytvořena lineární polarizace stočená o 90° oproti čerpací, a sondovací svazek je odkloněn polarizačním děličem do detektoru (D). Při interakci mezi optickým svazkem laseru a molekulami jodu opět dochází k saturaci absorpce, díky které mohou být detekovány hyperjemné komponenty rotačně-vibračního přechodu molekuly jodu bez dopplerovského rozšíření. Řídicí elektronický systém MOLAS-2 je modifikován pro možnost spojení obou metod regulace frekvence laseru – teplotní a piezoelektrické. Po závěsu frekvence laseru na zvolenou hyperjemnou komponentu (piezoelektricky) je možno sepnout spínač spojující obě vazby – teplota trubice je pak automaticky regulována tak, aby konstantní frekvenci laseru (odpovídající zvolené komponentě) odpovídala konstantní hodnota VN napětí piezokrystalu (předem zvolená odporovým děličem, např. 100 V). Toto spojení obou regulací umožňuje zajistit větší odolnost etalonu proti změnám teploty okolí.

Etalon 543nm se účastnil dvou porovnání v BIPM (1996 a 2002), jeho stabilita $2 \times 10^{-12} \text{ rel.}$ pro jednosekundové vzorky je na absolutní světové špičce [7]. Kalibrační měřicí schopnost uznaná v MRA je $5,4 \text{ am}/5,5 \text{ kHz}/1 \times 10^{-11} \text{ rel.}$ Od roku 1997 je používán pro kalibrace zeleného laseru interferometru TESA (pro krátké koncové měřky) a od roku 2004 i v dále popsaném interferometru pro dlouhé koncové měřky.

Etalon vlnové délky 532 nm využívá pevnolátkový Nd:YAG laser Prometheus 20 NE (Inno Light), který je čerpán laserovou diodou. V monolitickém kruhovém rezonátoru

je generována vlnová délka 1064 nm, z které je v periodicky pólovaném krystalu KTP generována druhá harmonická optické frekvence odpovídající 532 nm. Teplotou krystalu YAG je možno zhruba nastavit vlnovou délku laseru (v rozsahu 532,217 nm až 532,288 nm). Jemné ladění vlnové délky a stabilizace laseru na dané komponenty určitého rotačně vibračního přechodu jódu se provádí piezokrystalem opět pomocí elektroniky MOLAS2. Teplotní a piezoelektrická vazba mohou být propojeny pro větší odolnost proti změnám teploty okolí. Uspořádání s externí jodovou kyvetou je obdobné jako u etalonu 543 nm (**obr. 3**), optický izolátor zde ale není nutné použít.

Protože podle doporučení [4] je nutno stabilizovat prst jodové kyvety dlouhodobě na -15 °C, bylo nutno vyvinout chladič s tepelnou izolací umožňující trvalou činnost při této teplotě. Proto 50 cm dlouhé jodové kyvety vyrobené v ÚPT AV ČR (Brno) byly mechanicky upevněny na měděnou chladičskou desku, která odvádí teplo z dvoustupňového peltierova chladiče přiletovaného Woodovým kovem, který je také použit pro kontaktování prstu k chladnému konci peltierova článku.

Etalon 532 nm ČMI YAG1 je v současnosti nejpřesnějším jednofrekvenčním laserem státního etalonu, krátkodobá stabilita je $<5 \times 10^{-13}$ rel. pro jednosekundové vzorky $<3.5 \times 10^{-14}$ rel. pro vzorky (300..10000) s. Etalon se účastnil porovnání v BIPM v roce 2001., jeho uznaná kalibrační měřicí schopnost je $2 \text{ am}/2 \text{ kHz}/4 \times 10^{-12}$ relativně, *pro ilustraci – tato relativní přesnost odpovídá měření vzdálenosti 15 tisíc kilometrů s nejistotou tloušťky lidského vlasu a opakovatelnosti pro (300..10000) sekund odpovídající setině tloušťky vlasu.* Etalon poskytuje současně záření 532 nm (zelená) a 1064 nm (blízká infračervená) – frekvence infračervené je přesně poloviční než u zelené (relativní nejistota je stejná). Laser 532 nm je používám v interferometru pro dlouhé koncové měřky a pro výzkumné účely.

Etalon vlnové délky 1542 nm Etalon tvoří DFB laser (CQF935_708) napájený stabilizovaným zdrojem s nízkým šumem (BS525). Důležité parametry pro oba lasery naměřené na počátku výzkumu shrnuje **tabulka 2**.

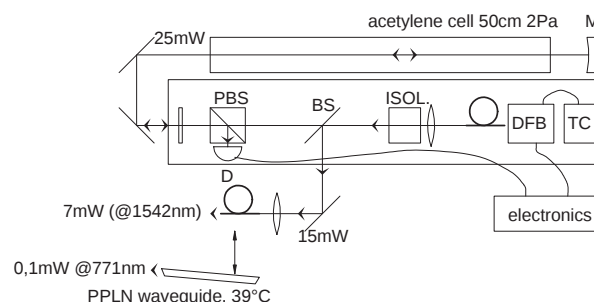
výrobní číslo DFB laseru	246608	246616	
citlivost frekvence na teplotu laseru	-10,7	-10,8	GHz/K
citlivost driveru stabilizace teploty	7	7	K/V
pracovní teplota pro 40 mW	34,5	32,1	°C
citlivost frekvence na proud laserem	-0,21	-0,16	GHz/mA
citlivost výkonu laseru na proud LD	0,157	0,146	W / A
výkon laseru v závislosti na fotoproudu	44	51	mW/mA

Tab. 2: Citlivosti DFB laserů 1542 nm

Stabilizace teploty laserové diody a vlnovodu v PPLN pro generování druhé harmonické optické frekvence (771 nm) je založena na hybridním obvodu TEC-AILD (High Effi-

ciency TEC Controller) firmy AnalogTechnologies. Jemné ladění vlnové délky a stabilizace laseru na sub-dopplerovsky detekovaný přechod acetylénu se provádí pomocí upravené elektroniky MOLAS2 (neobsahuje výstup VN). Etalony ČMI Ethyn 1 a Ethyn 2 je možné stabilizovat na tři přechody acetylénu $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$: P(14), P(15) a P(16) o vlnových délkách (1541,17 až 1542,38)nm / frekvencích (194,52 až 194,37)THz.

Etalony využívají kyvety vyrobené v ÚPT plněné na tlak 2 Pa a 5 Pa.



Obr. 4: Schéma uspořádání frekvenčně stabilizovaného DFB laseru s třemi možnostmi výstupu - svazek 1,54 μm (15 mW) volný, 1,54 μm navázaný do jednovidového vlákna zachovávajícího polarizaci (7 mW), svazek druhé harmonické 771 nm (0,1 mW pro měření frekvence fs hřebem ČMI)

Optické záření vystupující z vlákna DFB laseru je kolimováno asférickou čočkou a přes optický izolátor ISOL vedeno do acetylenové kyvety. Pro spektroskopii je použita technika obrácení smyslu kruhové polarizace vytvořené $\lambda/4$ destičkou a separace pomocí polarizačního děliče PBS stejně jako u etalonů 543 nm a 532 nm, zrcadlo za kyvetou zde není polopropustné ale totální, z důvodu potlačení rušivého vlivu i nepatrného zbytku rozptýleného záření od prvků za výstupem zpět do detektoru. V kyvetě dochází při protisměrném průchodu paprsků (po odrazu zpět) k sub-dopplerovské saturaci absorpce, která je detekována na InGaAs diodě D. Signál je zesílen a veden do řídicí elektroniky zajišťující stabilizaci laseru metodou třetí harmonické. Pro měření frekvence (vakuové vlnové délky) pomocí fs-hřebene ve viditelné oblasti je použito druhé harmonické (zde odpovídá 771 nm) generované v PPLN vlnovodu WF0304-10-H od firmy HC Photonics.

Etalon byl vyvinut za podpory grantové agentury AV ČR (S2508201) v letech 2003-2005 jako první s přímou sub-dopplerovskou detekcí (bez umístění kyvety ve zvláštním stabilizovaném rezonátoru) a v roce 2005 byl absolutně změněn pomocí vláknového femtosekundového hřebene v Ústavu kvantové optiky Maxe Plancka v Garchingu v Německu [8]. Je využíván jako etalon pro oblast optických telekomunikací – pro kalibraci spektrálních analyzátorů a vlnoměrů a účastní se mezilaboratorních porovnání. Uznaná kalibrační měřicí schopnost je $80 \text{ am}/10 \text{ kHz}/5 \times 10^{-11}$ rel., nejistota etalonu je 5 x lepší.

Všechny výše uvedené etalony vlnových délek byly vyvinuty nezávisle v České republice a výsledky jejich porov-

nání a absolutních měření tedy mohly posloužit pro kontrolu doporučení pro realizaci SI definice metru i jako podklad pro zpřesnění v něm uvedených hodnot (pro všechny uvedené vlnové délky) [4].

2.2. Femtosekundový hřebene

Technika femtosekundového generátoru hřebene optických frekvencí dramaticky zjednodušila a zpřesnila vzájemné porovnávání radio-frekvenčních (MHz až desítky GHz) a opto-frekvenčních (stovky THz) etalonů. Byla poprvé realizována v r. 1999 a v roce 2005 oceněná Nobelovou cenou za fyziku [3]. Jedná se o systém založený na femtosekundovém pulsním laseru, jehož opakovací a ofsetová frekvence jsou stabilizovány podle referenční frekvence a tak je generován rovnoměrný hřeben stovek tisíc přesně určených (a fázově koherentních) frekvencí v optické oblasti. Jednotlivé komponenty tohoto hřebene pak mohou být použity jako reference pro měření frekvence laserů – stačí změřit frekvenční rozdíl od nejbližší komponenty hřebene.

Součástí státního etalonu délky je femtosekundový generátor hřebene optických frekvencí FC 8004 (MenloSystems). Opakovací frekvence je stabilizována regulací délky fs laseru (motorem a piezoelementem). Stabilizace změny fáze obálky pulsu je dosažena stabilizací ofsetové frekvence regulací disperse rezonátoru fs laseru (pomocí motorem zasouvaného klínu a jemnou regulací čerpacího výkonu akusto-optickým modulátorem). Podrobnější popis zařízení a první výsledky měření byly publikovány v [10].

Během let 2005–2007 byl fs hřeben v ČMI podrobně zkoumán a rozvíjen a bylo potvrzeno, že vlastní generátor přispívá jen naprosto zanedbatelně k nejistotě měření – schopnost závěsu opakovací i ofsetové frekvence na referenční frekvenci i kvalita čítání by dostačovaly i pro nejistotu pod 10^{-14} rel. již pro jednosekundové vzorky. Celkový příspěvek fs hřebene k nejistotě měření optických frekvencí pomocí radiofrekvenční reference byl pro reálný případ testován při porovnání EURAMET 1045 v roce 2008 při kterém bylo prokázáno, že hlavním příspěvkem je rozptyl daný schopností závěsu na radiofrekvenční signál a že pro celodenní průměr klesá pod 3 Hz, t. j. pod 6×10^{-15} rel. Výsledná nejistota je tak dána nejistotou / opakovatelností měřených etalonů a stabilitou / nejistotou referenčních rubidiových hodin řízených GPS, která je nejslabším článkem fs hřebene ČMI – pro setiny sekund až desítky hodin je horší než stabilita kteréhokoli z optických etalonů (frekvenčně stabilizovaných laserů) – porovnání je patrné z grafu relativních stabilit na **obr. 6**.

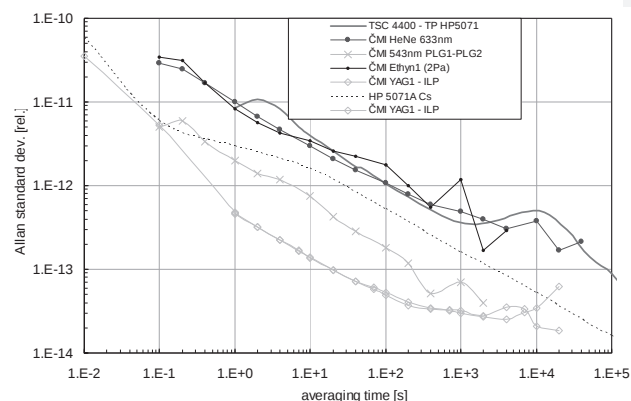
Femtosekundový hřeben je ale možné zapojit také obráceně – stabilizovat jej na optický frekvenční standard – opakovací frekvence pak dává velmi stabilní radiofrekvenční signál s nízkým fázovým šumem. V tomto případě je příspěvek schopnosti závěsu mnohem menší – pod 1 Hz (2×10^{-15} rel.) pro jednosekundové vzorky a pod 0,05 Hz (1×10^{-16} rel.) pro stosekundové průměry [10].

Kalibrační měřicí schopnost fs hřebene ČMI (2×10^{-13} rel.) byla uznána v rámci MRA v roce 2009. Pro ilustraci – *dvoje hodiny s touto relativní přesností by se „rozešly“ o jednu sekundu až po 159 tisících letech*. Etalony pro jednotlivé vl-

nové délky je nutno nadále udržovat, protože interferometry realizující délku ani vlnoměry nemohou pracovat přímo s pulsním zářením fs-hřebene. Není však již nutné uchovávat soubory etalonů pro danou vlnovou délku, které byly dříve nutné pro sledování stability a metrologických parametrů jejich interním porovnáváním – tato měření nyní provádíme fs hřebenem s nižší nejistotou a pro všechny vlnové délky.



Obr. 5: Generátor fs hřebene Menlo Systems FC 8004 s řídicí a vyhodnocovací elektronikou instalovaný v ČMI LPM



Obr. 6: Porovnání stability frekvence referenčních rubidiových hodin a optických etalonů (stabilita alternativních komerčních cesiových hodin je uvedena přerušovanou čarou)

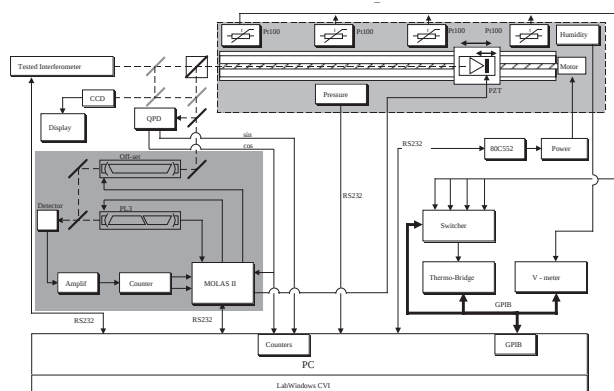
2.3. Interferometrie

Interferometry slouží pro přenos návaznosti od primárních etalonů (vlnové délky) do technické praxe. Princip měření je, že počítají interferenční proužky (celý počet + zlomky/fáze) během měřeného (kontinuálního) posunutí – jako například interferometrický komparátor IK-1, nebo určí délku/vzdálenost současným změřením fáze interferenčních proužků několika různých vlnových délek (statická / více-vlnná interferometrie, jako například dále popsaný interferometr pro dlouhé koncové měřky (IDKM)).

Interferometrický komparátor IK-1 byl vyvinut pro komplexní přesné testování měřicí funkce laserových interferometrů (LI) používaných v metrologii a průmyslu, které jsou velmi významným prostředkem pro přenos jednotky délky z primárních etalonů do praxe. Jejich nejistota ve směru svazku je kromě nejistoty frekvence jejich zdroje záře-

ní (kalibrovaného pomocí výše popsaných etalonů vlnové délky) dána i nejistotou kompenzace indexu lomu vzduchu a nejistotou interpolace interferenčních proužků. Tyto parametry jsou zjišťovány pomocí IK-1.

Na obrázku je uvedeno celkové blokové schéma laserového interferometrického komparátoru IK-1.



Obr. 7: Schéma interferometrického komparátoru IK-1

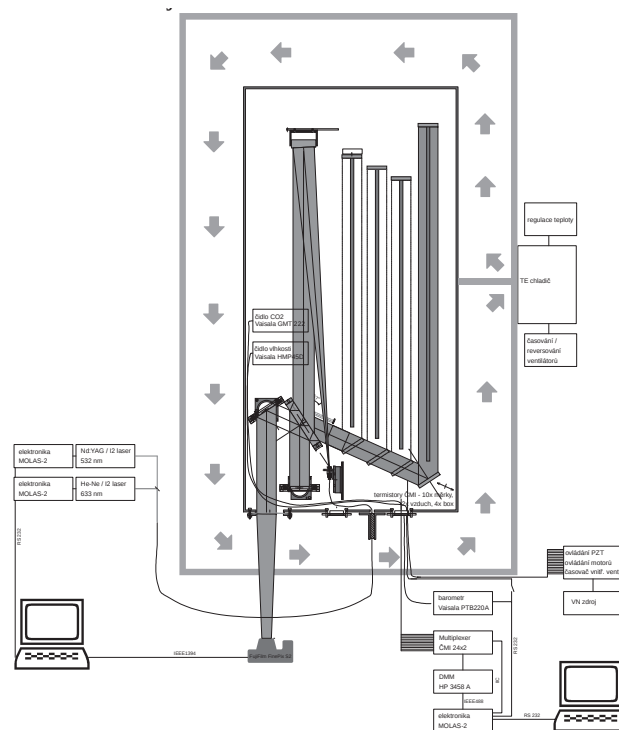
Referenčním zdrojem záření je ofsetový laser, který je frekvenčně stabilizován na zadaný frekvenční rozdíl od etalonového laseru PL3. Pro měření se zde využívá polarizačně kódované interferometrické uspořádání. Měřicí (komparační) větev je přitom tvořena koutovým odražečem umístěným na pohyblivém stolku optické lavice s rozsahem pohybu 1,8 m. Usazení koutového odražeče je řešeno pružinovým stolkem ovládaným piezoelementem, což umožňuje provádět aktivní stabilizaci optické délky komparační větve a tím eliminovat rušivé vlivy při měření. Pro ztotožnění měřicí větve testovaného LI a referenčního LI s posuvem se při současném použití stejných optických komponent využívá detektoru polohy svazku. Při kalibraci systémů s nekompatibilní optikou je alternativně použito uspořádání se vstřícnými svazky, v tomto případě je ale nutné do nejistoty zahrnout i příspěvek nejistoty ztotožnění měřicích os a zbytkových náklonů při pohybu stolku.

Celková kalibrace interferometru zahrnuje kalibraci vlnové délky, kalibraci snímačů teploty, tlaku a vlhkosti vzduchu a teploty materiálu a celkový test měření porovnáním s IK-1 ve třech režimech – bez kompenzace indexu lomu vzduchu, s kompenzací s pevně задanými (společnými) parametry prostředí a s automatickou kompenzací podle aktuálních hodnot čidel. IK-1 využívá pro kompenzaci indexu lomu modifikovanou Edlenovu formuli (uvedenou v metodice IK-1) s nejistotou včetně nejistot čidel a zbytkové nehomogenity a nestability prostředí 5×10^{-7} rel., MRA uznaná kalibrační měřicí schopnost je $U_c = Q[1; 100 \cdot L] \text{ nm}$ (L je měřená délka v metrech), byla prověřena při porovnání EUROMET 610, ve kterém IK-1 sloužil jako reference. Konstantní složka nejistoty 1 nm je nejlepší v rámci MRA.

Zařízení lze použít také na kalibraci přesných aktuátorů (běžící EUROMET projekt 866), čidel polohy/posunutí (dokončovaný projekt MPO Tandem FT-TA3/133) a po doplnění o mikroskop je možné kalibrovat i čárková měřítka. Nejistota pro čárková měřítka do 200 mm je

$U_c = Q[28; 377 \cdot L]$ nm, (L v metrech), byla odevzdána do klíčového porovnání EUROMET.L-K7 (projekt 882) v březnu 2008, podle předběžných výsledků byla potvrzena, ale zatím není publikována.

Interferometr pro dlouhé koncové měřky IDKM byl vyvinut v letech 2002–2004. Využívá přímo záření primárních etalonů 633 nm, 543 nm a 532 nm přivedené polarizací zachovávajícím optickým vláknem, které je jednovodové v celé příslušné spektrální oblasti. Vlastní interferometr je uložen v kvazi-hermetickém teplotně stabilizovaném duralovém boxu izolovaném dvěma vrstvami extrudovaného polystyrenu. Uvnitř boxu je parabolické zrcadlo, dělič svazku, referenční a pomocná zrcadla, a mechanika pro nastavování polohy čtyř současně vložených měrek (pomocí dálkového ovládání). K systému IDKM dále patří přístroje pro měření teploty (termistory a Pt100), tlaku, relativní vlhkosti a koncentrace CO₂. Elektronika IDKM umožňuje ovládání motorů (naklápění měrky), naklápění referenčního zrcadla (pomocí napětí na piezokrystalech), spouštění vnitřního větráčku a regulaci teploty boxu interferometru. Blokové schéma interferometru je uvedeno na **obr. 8**.

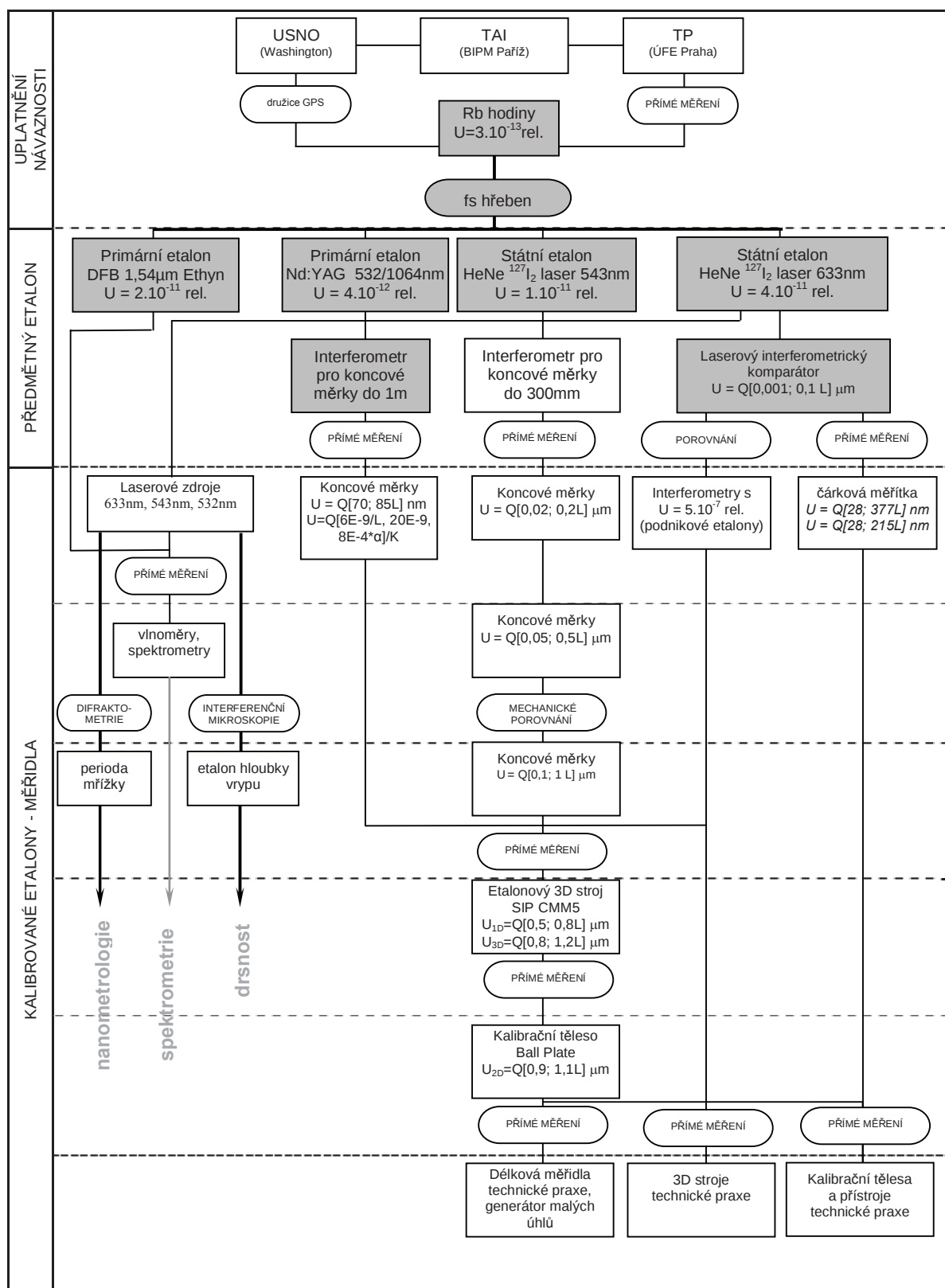


Obr. 8: Uspořádání interferometru pro dlouhé koncové měřky.

Délka měrky je určována ve vodorovné poloze za použití pomocné rovinné destičky, na kterou je měrka přilnuta nasunutím podle normy ČSN EN ISO 3650 „Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Etalony délek – koncové měrky“.

IDKM umožňuje kromě stanovení středové délky měřky i určení sklonu čel měřky v okolí středu a měření teplotní roztažnosti v oblasti (15 až 25)° C.

Interferometr IDKM se úspěšně účastnil klíčového porovnání EUROMET.L-K2 v roce 2004 (délka) a CCL



kde $Q[x; y; L]$ je kvadraticky kombinovaná rozšířená nejistota daná vzorcem $x^2 + (y/L)^2$ ^{1/2}

šedě stínovaná pole představují součásti Státního etalonu délky vyhlášeného v r. 2008
kurzívou označená nejistota pro čárkovou měřítka zatím není uznána v MRA

Obr. 9: Informativní schéma návaznosti státního etalonu délky

WGDM DG-8/ APMP.L-S1 v roce 2005, na jejich základě byly v MRA uznány kalibrační měřicí schopnosti:

$$U_{c(L)} = Q[70; 85L] \text{ nm}, L \text{ v m.}$$

$$U_{c(\alpha)} = Q[6 \times 10^{-9}/L; 20 \times 10^{-9}; 8 \times 10^{-4}\alpha]/K, L \text{ v m, } \alpha \text{ v K}^{-1}.$$

K interferometrům státního etalonu by logicky patřil i interferometr pro krátké koncové měřky (viz schéma návaznosti), ten ale kvůli dislokaci (v ČMI OI Liberec) zůstává referenčním etalonem.

3. SCHÉMA NÁVAZNOSTI

V současnosti není stanoveno žádné závazné schéma návaznosti, například v rámci MRA je možno zajistit návaznost prostřednictvím kteréhokoli institutu, který má uznanou příslušnou MRA a zdroje návaznosti lze i libovolně kombinovat – například teploměry si nechat zkalibrovat v jednom státě a koncové měřky v jiném. Měřidla také nemusí podléhat třídění podle přesnosti (OIML), ale návaznost (až na realizaci definice jednotky) musí být dokumentována, prováděna v rámci systému kvality (ISO/IEC 17025) a šíření nejistot správně vyhodnoceno. Obdoba CIPM MRA byla sjednána i mezi akreditačními instituty (ILAC MRA) a všechny akreditační instituty uznávají návaznost prostřednictvím CMC kteréhokoli státu.

Schéma návaznosti na **obr. 9** ilustruje současnou návaznost Státního etalonu délky a stručně ukazuje některá na něj navázaná měření.

4. ZÁVĚR

Součástí Státního etalonu délky tvoří provázaný celek nejen realizující SI definici jednotky délky [dvěma způsoby – podle bodu b) i c) doporučení CCL/CIPM] ale i zajišťující na velmi dobré světové úrovni návaznost pro obor vlnové délky, interferometrické měření vzdálenosti/posunutí, délky koncových měrek, čárková měřítka i nanometrologii. Na tento etalon je přímo navázáno 22 hodnot CMC v databázi KCDB BIPM, nepřímo pak 56 hodnot CMC v oboru délky (a řada dalších pro odvozené veličiny).

LITERATURA

- [1] The International System of Units (SI), „SI brochure“, 8th edition 2006, BIPM, <http://www.bipm.org/>
- [2] K. M. Evenson, J. S. Wells, F. R. Petersen, B. L. Danielson, G. W. Day, R. L. Barger, and J. L. Hall: Speed of Light from Direct Frequency and Wavelength Measurements of the Methane-Stabilized Laser, *Phys. Rev. Lett.* 29, 1346-1349 (1972).
- [3] P. Balling: Nobelova cena 2005 pro Johna L. Halla a Theodora W. Hänsche a pokrok v měření optických kmitočtů, *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, ročník 51 (2006), č.1, str. 12-22
- [4] Quinn, T. J.: Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards (2001), *Metrologia* 40, 103-133 (2003)
- [5] R. Felder: “Practical realization of the definition of the metre...”, *Metrologia* 42 pp.323-325 (2005) <http://www.bipm.org/en/committees/cc/ccl/mep.html>
- [6] Databáze klíčových porovnání a kalibračních měřicí schopností vzájemně uznávaných národními metrologickými instituty <http://kcdb.bipm.org>
- [7] Long Sheng Ma, Susanne Picard, Massimo Zucco, Jean-Marie Chartier and Lennart Robertsson, Petr Balling and Petr Kren, Jin Qian, Zhong You Lin, Chunying Shi, Miguel Viliesid Alonso, Gan Xu and Siew Leng Tan, Kaj Nyholm, Jes Henningsen and Jan Hald, Robert Windeler: Absolute Frequency Measurement of the R(12) 26-0 and R(106) 28-0 Transitions in $^{127}\text{I}_2$ at $\lambda=543 \text{ nm}$, *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, VOL.55, NO.3, JUNE 2006.
- [8] P. Balling, M. Fischer, P. Kubina, and R. Holzwarth: „Absolute frequency measurement of wavelength standard at 1542nm: acetylene stabilized DFB laser“, *Opt. Express* 13, 9196-9201 (2005)
- [9] Věstník Úřadu pro normalizaci a měření, Číslo 4 Duben 2008, OZNÁMENÍ č. 08/08, str. 118 <http://web.unmz.cz/v/vest0804.pdf>
- [10] P. Balling, P. Kren: Absolute frequency measurements of wavelength standards 532 nm, 543 nm, 633 nm and 1540 nm, *Eur. Phys. J. D* 48, (2008), str. 3–10



ZVÝŠENÍ PŘESNOSTI KALIBRACE STUPŇOVÝCH MĚREK KOMBINACÍ SOUŘADNICOVÉHO STROJE A INTERFEROMETRU

Doc. Ing. Vít Zelený, CSc., Pavel Skalník

Český metrologický institut

Abstrakt

Pro kalibrace stupňových měrek byla v laboratořích primární metrologie (LPM) ČMI navržena nová sonda, která

se umísťuje na švýcarský souřadnicový měřicí stroj SIP CMM5. Součástí sondy je rovinné zrcadlo, které umožňuje použití laserového interferometru (LI) pro měření v jednom směru. Zvýšení přesnosti kalibrace stupňových měrek i dalších artefaktů bylo prokázáno několika mezinárodními i celosvětovými měřeními.

1. ÚVOD

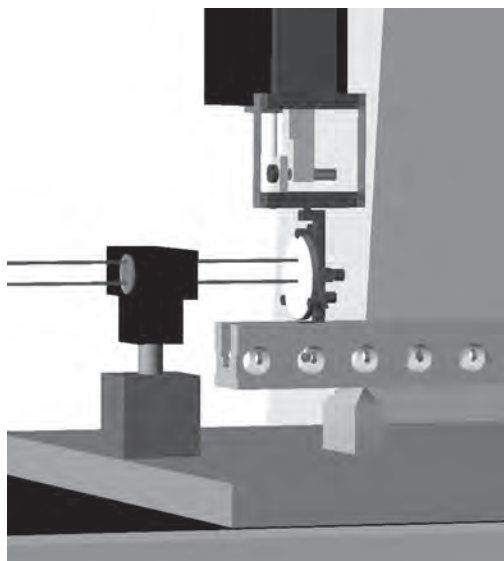
Souřadnicový měřicí stroj (SMS) je měřicí zařízení, které umožňuje snímat na povrchu měřených objektů měřicí body a v daném souřadnicovém systému z těchto bodů vyhodnocovat geometrické parametry. V LPM ČMI Praha se provádějí kalibrace artefaktů jako například stupňová měřka (step gauge), tyč s koulemi (ball bar), deska s koulemi (ball plate), tetrahedron, krychle a další, které slouží jako hmotné etalony délky pro přenos metrologické návaznosti do průmyslových podmínek. Tyto kalibrace se provádějí na dotykovém souřadnicovém měřicím stroji švýcarské výroby (SIP).

Nejistota měření uznaná pro kalibrace stupňových měrek pro ČMI v rámci MRA od roku 1999 byla $U=Q[0.5, 0.8L]\mu\text{m}$, L v m. Pro srovnání: Metas (Švýcarsko) $U=Q[0.17, 0.64L]\mu\text{m}$, L v m, NIST (USA) $U=Q[0.35, 0.1L]\mu\text{m}$, L v m, CEM (Španělsko) $U=Q[0.09, 0.45L]\mu\text{m}$, L v m. Vše pro $k=2$.

Pro některé aplikace původní nejistota měření nedostačovala, proto byla navržena nová sonda ve tvaru paralelogramu se zrcadlem, která v jednom směru umožňuje měření pomocí laserového interferometru (LI). Špičkové světové laboratoře většinou používají jednoúčelové měřicí zařízení také s LI, přesnými vedeními v jednom směru a kapacitními snímači ve spojení s dotykovou sondou.

2. ZPŮSOB MĚŘENÍ

Řešení, které snížilo nejistotu měření, bylo nalezeno v použití souřadnicového měřicího stroje SIP v kombinaci s laserovým interferometrem. Pro toto měření byla navržena nová sonda. Měří-li se pouze strojem SIP, je možné si představit nejistotu měření kolem měřeného dotykového bodu jako kouli, jejíž střed leží v bodu dotyku, a jejíž poloměr odpovídá velikosti nejistoty, jak je znázorněno na **obr. 2** (tmavší oblast v okolí dotyku). Tuto nejistotu lze nazvat isotropickou. Jestliže v jednom směru snížíme nejistotu měření pomocí laserového interferometru, mluvíme o neisotropické nejistotě. Tento případ si lze představit (mode-



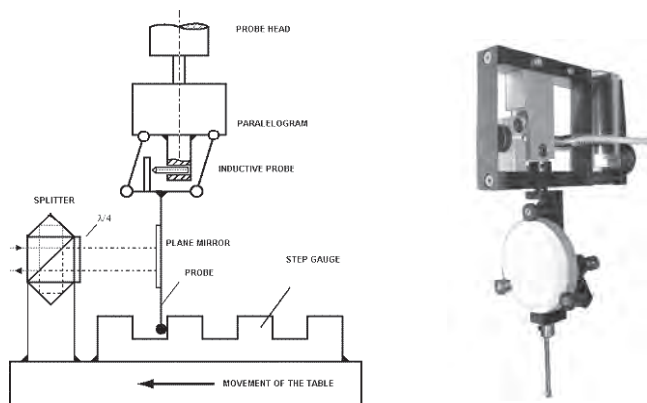
Obr. 1: Měřicí sestava

lovat) buď jako válec, nebo jako elipsoid (v případě zavedení pravděpodobnosti výskytu), viz **obr. 2**. Princip celého měření znázorňují **obr. 1 a 3**. Nejdříve je třeba mechanicky vyrovnat polohu měřky tak, aby byla co nejpřesněji uložena v ose X, tedy v ose pohybu stolu a ose měření LI. Vlastní měření se tedy redukuje na měření v jedné ose.



Obr. 2: Model nejistoty měření při dotyku

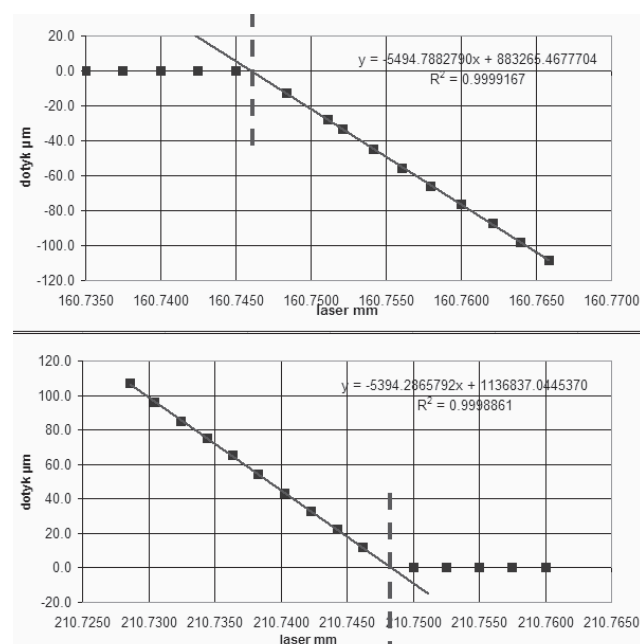
Dělič LI spolu s měřenou měrkou jsou upnuty k pohyblivému stolu v ose X. Měřicí sonda se zrcadlem je upnuta k pinole v ose Z. Pomocí pohybu stolu se s měřenou měrkou posune k měřicí sondě, která se nehýbe, dokud nedojde k dotyku. V okamžiku dotyku začíná být paralelogram hlavy unášen ve směru pohybu stolu a tato výchylka je čtena velmi citlivým indukčností snímačem zároveň s hodnotami z LI.



Obr. 3: Princip měření

Aby bylo možno se sondou pohybovat i v příčném směru, bylo použito kruhové zrcadlo, které je umístěno přímo na dráku sondy. Při první variantě bylo umístěno obdélníkové zrcadlo přímo na sondu. Stůl umožňuje velmi malý krok pohybu po dotyku (jde o jednotky μm). Po prvním dotyku se udělá těchto malých kroků ještě deset. Z těchto deseti kroků je možné s dostatečnou přesností provést extrapolaci signálu indukčností snímače do nuly, do nulové přitlačné síly – tedy do místa dotyku. V případě, že by hlava s paralelogramem byla ideálně tuhá, neměnila by se od chvíle dotyku měřená vzdálenost mezi zrcadlem a děličem. Ve skutečnosti vlivem elastických deformací ještě po okamžiku dotyku ve všech deseti uvedených malých krocích dochází k narůstání vzdálenosti mezi děličem a zrcadlem. Tento nárůst je způsoben ohybem sondy. Důležité je, že

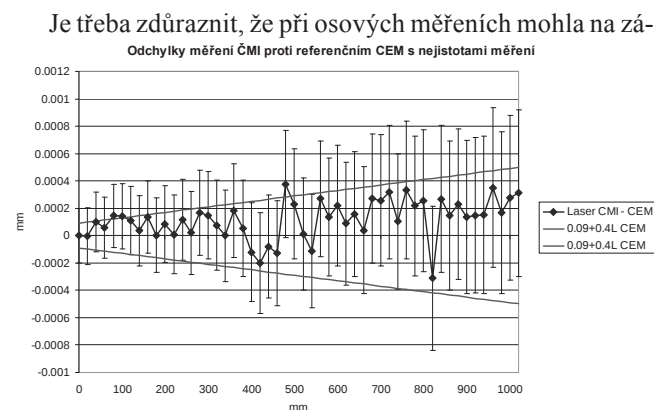
toto narůstání signálu z laserového interferometru je lineární. Lze tedy po bodu dotyku naměřit deset dvojic vzájemně si odpovídajících hodnot (vždy dvou signálů – z laserového interferometru a z indukčnostního snímače). Metodou nejmenších čtverců se z těchto dat vypočítá regresní přímka. Druhou přímkou tvoří osa X protínající osu Y v hodnotě 0, představující nulovou přitlačnou sílu dotyku. Rovnice těchto dvou přímek se pak extrapolují a průsečíkem je bod dotyku. Jedna přímka a bod dotyku s nulovou přitlačnou silou odpovídá měření jedné plošky („zleva“), druhá přímka odpovídá měření protilehlé plošky („zprava“). Levostranný i pravostranný průběh dotyku sondy s ploškou stupňové měrky, vč. naměřených bodů, je v grafech na **obr. 4.**, kde čárkovaná čára reprezentuje hledaný bod dotyku s nulovou přitlačnou silou. Při vyhodnocení je také sledován parametr R, který je koeficientem spolehlivosti výpočtu regresní přímky, kde při hodnotě 1 leží všechny body přesně na přímce.



Obr. 4: Extrapolace průběhu přitlačné síly dotyku

Celé měření bylo zautomatizováno, jak jednotlivé pojedy souřadnicového měřicího stroje, tak načítání signálů z laserového interferometru a indukčnostního snímače měřicí sondy. Program byl vytvořen v prostředí MS Visualbasic, zpracování naměřených dat již v číselné formě se potom provádí později v prostředí MS Excel. I když byla v laboratoři zajištěna stabilita teploty se změnami menšími než $\pm 0,1^\circ\text{C}$, rozptyl opakovaných měření se zlepšil jen na hodnotu $\pm 0,2\mu\text{m}$. Proto pro omezení vlivu zbytkové nehomogenity prostředí a nestability teploty měrky byl vytvořen mikroklimatický box. Byla použita teplotní materiálová čidla Renishaw, která jsou příslušenstvím k laserovému interferometru. Měření byla provedena opakovaně, velmi dobrý výsledek se několikrát potvrdil. Pro potvrzení správného měření byla zapůjčena ze španělského národního metrologického institutu kalibrovaná stupňová měrka. Byly měře-

ny polohy středů čel válečků v daném souřadnicovém systému. Na následujícím grafu (**obr. 5**) je výsledek z měření. Všem opakovaným měřením vyhověla nejistota měření $U=(0,2+0,4L)\mu\text{m}$, L v m, pro $k=2$.

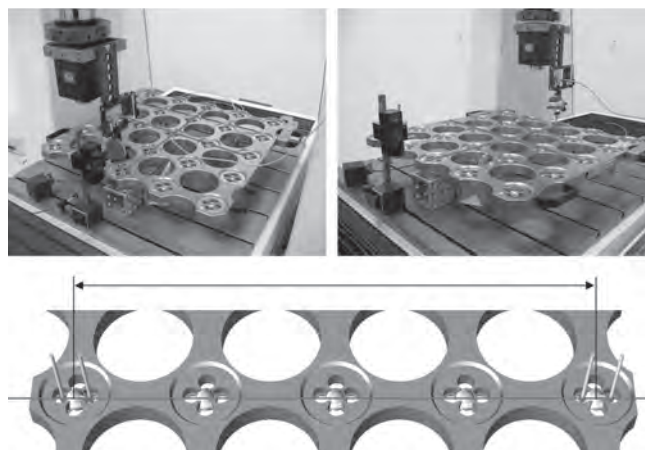


Obr. 5: Výsledek měření se stupňovou měrkou

kladě švýcarské kalibrace naše laboratoř deklarovat původní nejistotu $U=(0,5+0,9L)$, L v m, pro $k=2$. Z těchto důvodů je výsledek měření s novou sondou, při současném měření společně s laserovým interferometrem, velký úspěch.

2.1 Využití sondy při kalibracích desek s koulemi a otvory

Při kalibracích desek s koulemi a otvory se provádí metoda měření kompenzující chyby použitého souřadnicového měřicího stroje měřením ve čtyřech navzájem otočených polohách. Jako další krok je nutné provést tzv. přenos referenční délky z hmotného etalonu nebo laserového interferometru. Jako hmotný etalon se používá tyč s koulemi, deska s koulemi, koncová měrka atd. Z hlediska nejistot měření ale lépe vyhovuje přímé měření laserovým interferometrem v spojení s dotykovou sondou. Při této metodě je třeba opět mechanicky vyrovnat obě koule s pojezdem stroje a laserovým interferometrem. Potom se provede změření dvou bodů na protilehlých stranách obou koulí (**obr. 6**).



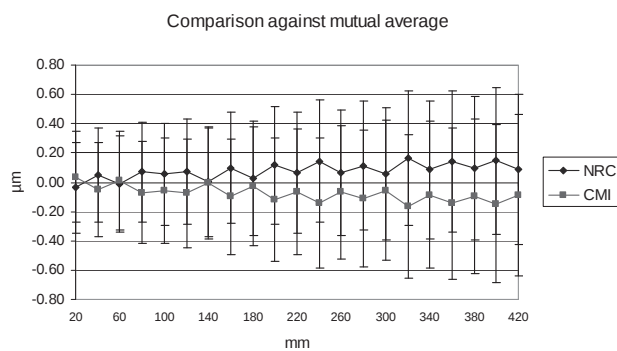
Obr. 6

Vyhodnocením středů obou bodů jsou určeny dva středy koulí, jejichž rozteč udává referenční kompenzační hodnotu pro přepočet souřadnic zbylých středů. Při tomto měření není třeba pracovat s přesným průměrem snímáčiho dotyku, jehož vliv je eliminován. Tohoto postupu bylo s úspěchem použito při několika mezinárodních porovnáních.

3. MEZINÁRODNÍ POROVNÁNÍ

3.1 Mezilaboratorní porovnání ČMI – NRC Kanada

Pro ověření metody měření na souřadnicovém měřicím stroji v kombinaci s výše uvedenou speciální měřicí sondou a laserovým interferometrem bylo zorganizováno mezilaboratorní porovnání s NRC Kanada. Jako nejvhodnější se jevila možnost použít hmotný etalon – stupňovou měrku. Konstrukce tohoto etalonu je taková, že při měření nejlépe dokáže odhalit případné chyby měření. Cílem bylo změřit rozteče čelních lapovaných ploch na válečcích upevněných v těle měrky. V ČMI bylo provedeno měření na stroji SIP s aplikací nové metody v kombinaci s laserovým interferometrem, kde je zajištěna prakticky přímá návaznost na primární etalon délky. Pro kompenzaci průměru snímáči sondy byly použity kalibrované koncové měrky délek 10, 30 a 50 mm. V NRC Kanada byla použita substituční metoda používající výhradně referenčních koncových měrek. Tato metoda ve spojení se špičkovým měřicím strojem Mitutoyo, umístěným v perfektně klimatizované laboratoři, zaručovala velmi dobrý výsledek. Nejistoty měření byly počítány v každé laboratoři nezávisle a ve výsledku jsou jen nepatrně odlišné: pro NRC $U=(0,3+0,5L)\mu\text{m}$, pro ČMI $U=(0,3+0,6L)\mu\text{m}$, kde L je měřená délka v metrech, oboje pro $k=2$. Byl proveden výpočet kritéria En pro vyhodnocování mezilaboratorních zkoušek dle evropských akreditovaných laboratoří, který vyšel ve všech bodech menší než 1. Největší odchylka mezi oběma laboratořemi byla $0,33\mu\text{m}$, což při naprosto odlišné metodě měření a zdroji návaznosti lze považovat za velmi dobrý výsledek. Grafické znázornění výsledků (obr. 7) prezentuje porovnání výsledků se vzájemným průměrem.

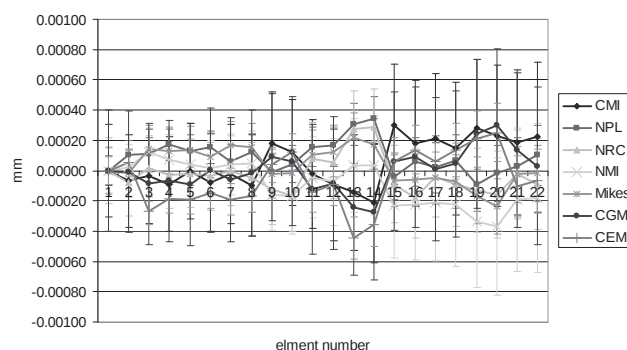


Obr. 7: Výsledek porovnávacího měření s NRC Kanada

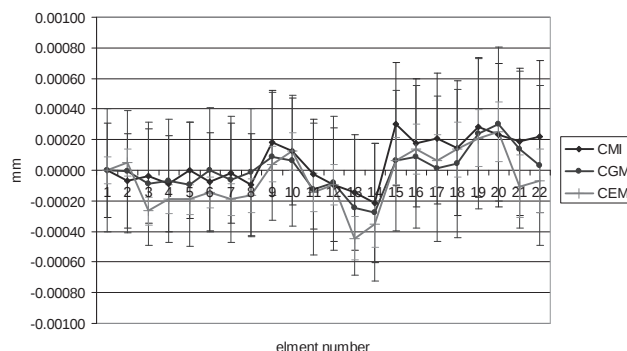
3.2 Mezinárodní porovnání EUROMET L-K5

Toto porovnání bylo pilotované CEM (Španělsko). Na konec se zúčastnilo celkem 23 laboratoří, nejen z Evropy.

Předmětem tohoto porovnání byla opět ocelová stupňová měrka 420 mm. Problémem bylo, že stabilita artefaktu nebyla dostatečná a vlivem těchto posunů bylo nutné stanovit více KCRV (referenčních hodnot). I přesto jsou výsledky ČMI velmi dobré a srovnatelné s ostatními laboratořemi. První graf (obr. 8) zobrazuje srovnání s prestižními evropskými laboratořemi a kanadským NRC, druhý (obr. 9), s laboratořemi ve skupině pro které byly stanoveny jiné referenční hodnoty vlivem nestability artefaktu.



Obr. 8: Výsledek porovnání Euromet L-K5 pro více laboratoří



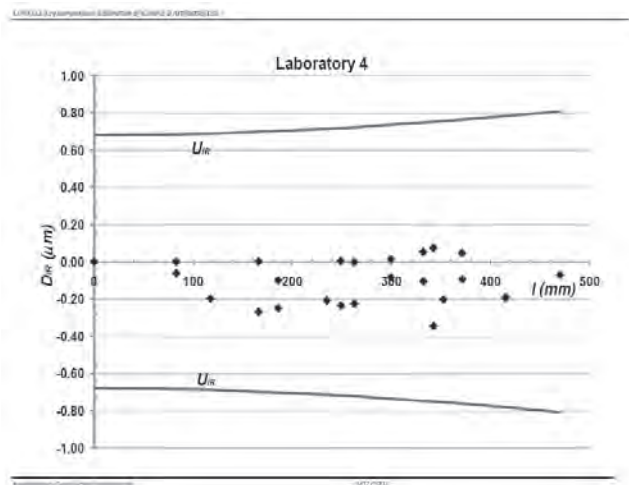
Obr. 9: Výsledek porovnání Euromet L-K5 pro skupinu se stejným KCRV

Byla odevzdána nejistota měření: $u=q[0.15;0.46L]\mu\text{m}$ L v m, pro $k=1$. Porovnání bylo úspěšné, všechny odchylky ČMI byly nižší než deklarované nejistoty.

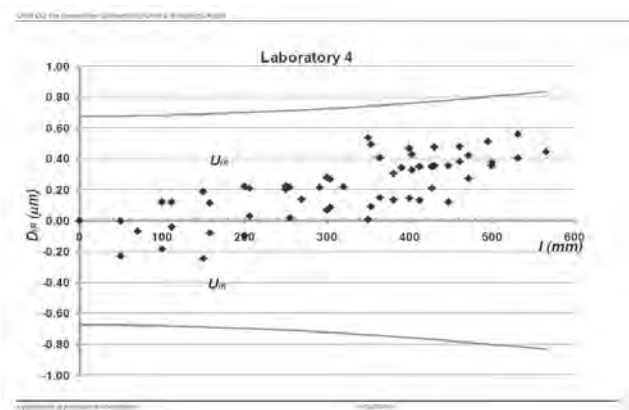
3.3 Mezinárodní klíčové porovnání CCL-K6

Toto meziregionální (světové) klíčové porovnání bylo pilotováno mexickým národním institutem CENAM. Zúčastnilo se 13 laboratoří z celého světa. Z evropského Eurometu to byli celkem 4 účastníci včetně ČMI. Jednalo se o měření 2D artefaktů typu ocelové desky s koulemi $332 \times 332\text{ mm}$ a zerdurové desky s otvory $400 \times 400\text{ mm}$. Koordinátor zajišťoval zapůjčení artefaktů z PTB a prováděl veškerou nezbytnou administrativu. Stabilita artefaktů během porovnání byla dobrá. Při vyhodnocení a stanovení tzv. KCRV (referenčních hodnot) bylo nutné některé partnery vyjmout vzhledem k jasnému podcenění nejistot měření. Výsledky ČMI (Laboratory 4) v porovnání s KCRV s deklarovanou nejistotou měření byly vyhovující. obr. 10 – deska s koulemi, obr. 11 – deska s otvory.

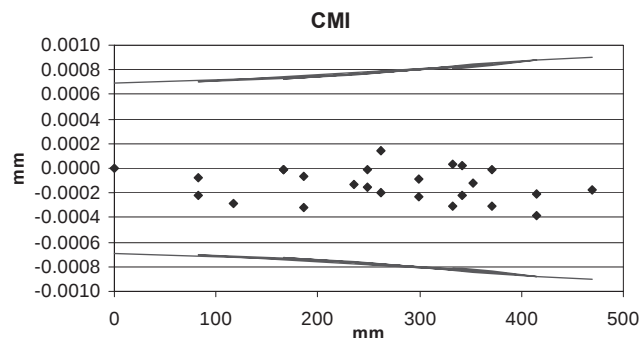
Výsledky porovnání ukazují na vysokou kvalitu 3D měřicího stroje SIP v kombinaci s odborností obsluhy. Tento druh kalibrací je běžně nabízen zákazníkům. Je zde patrný zřejmý prostor pro zlepšení udávané nejistoty měření v případě ocelové desky s koulemi.



Obr. 10: Výsledek CCL-K6 měření ocelové desky s koulemi



Obr. 11: Výsledek CCL-K6 měření zerodurové desky s otvory



Obr. 12: Výsledek L-K6 měření ocelové desky s koulemi

Celá zpráva čítající 162 stran rozebírá naměřená data velmi důkladně a dokonce porovnává jednotlivé účastní-

ky mezi sebou. Tato zpráva je k dispozici na této adrese: http://www.bipm.org/utis/common/pdf/final_reports/L/K6/CCL-K6.pdf

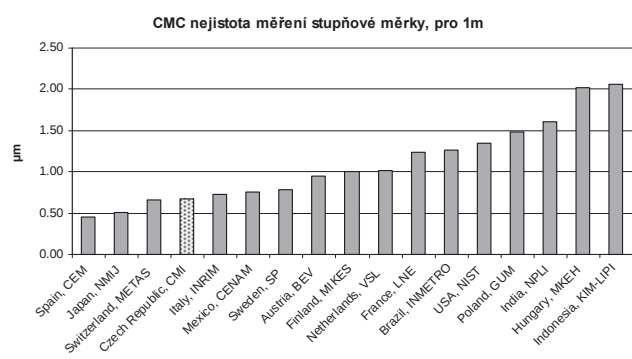
3.4 Mezinárodní porovnání EUROMET L-K6

V návaznosti na celosvětové porovnání CCL-K6 se konalo regionální (celoevropské) porovnání Euromet L-K6 s ocelovou deskou s koulemi, tentokrát pilotované PTB (Německo). Výsledek ČMI byl opět velmi dobrý (obr. 12).

4. ZÁVĚR

Snížení nejistoty kalibrací stupňových měrek bylo dosaženo přidáním měření pomocí laserového interferometru a návrhu nové, velmi citlivé sondy. Bylo to umožněno tím, že souřadnicový měřicí stroj vykazuje vysokou stabilitu, opakovatelnost a nízkou odchylku přímosti při pojezdu v ose. Dále umožňuje velmi malý krok pojezdu, řádově v jednotkách mikrometru. To umožnilo, po dotyku sondy s povrchem stupňové měrky, načítat několik bodů se vzrůstající silou dotyku a později matematicky vyhodnotit bod dotyku s nulovou přítlakovou silou.

Nejistota měření pro stupňové měrky $U=Q[0.3,0.6L]$ μm , L v m, pro $k=2$, bude v nejbližších měsících uznána/publikována v MRA KCDB (v září 2009 byla schválena v EURAMETu a odeslána k formálnímu schválení ostatními regionálními metrologickými organizacemi. Tím se ČMI posune na čtvrté místo na světě (z původního osmého) v přesnosti měření stupňových měrek viz obr. 13.



Obr. 13: Deklarované nejistoty měření stupňových měrek pro 1m, v rámci CMC

LITERATURA

- [1] Zelený, V., Skalník P.: Misurare in modo ridondante con una CMM e un interferometro laser; Probing, No 12/2005, Ottobre, p. 10-13, Torino, Italia, 2005
- [2] Zelený, V., Skalník P.: Redundant Measurements using Laser Interferometer on Coordinate Measuring Machine; Scientific Bulletin of University of Bielsko-Biala, Nr. 22, Serie 7, Wydawnictwo Akademii Technicycko-Humanistycznej w Bilsku Bialej, s. 425-430, Bielsko Biala, Polsko, duben 2006

KALIBRACE LIBEL A AUTOKOLIMÁTORŮ

Ing. František Dvořáček

Český metrologický institut

1. ÚVOD

Měření úhlu patří k vůbec nejstarším měření. Jeho kořeny jsou zmiňovány více než 3000 let před n. l. Pomocí úhlových měř byl určován čas, poloha, úhloměrné přístroje byly využívány k navigaci na moři apod.

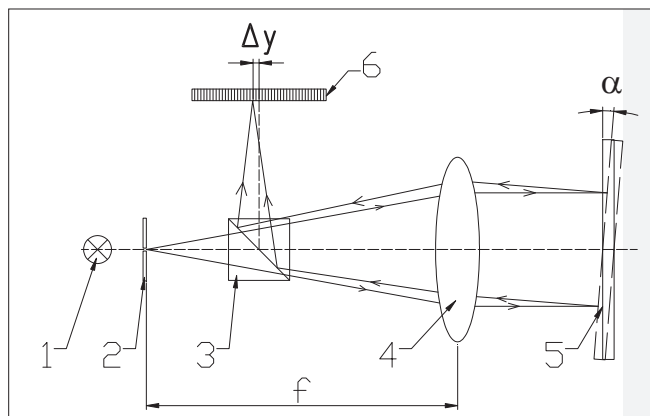
Dnes je používáno nepřeberné množství úhlových měřidel pro různé účely. Jedním z nejčastěji používaných měřidel je *libela* a jedním z nejpřesnějších měřidel rovinného úhlu je *autokolimátor*. Co se týká konstrukce, nemají tato měřidla téměř nic společného a využití v praxi bývá také velmi často odlišné. Velkou podobnost mezi těmito měřidly však najdeme ve způsobu jejich kalibrace.

V tomto článku budou stručně tato měřidla popsána a v krátkosti bude uveden princip jejich kalibrace.

2. AUTOKOLIMÁTORY

Autokolimátory jsou měřicí přístroje používané k přesnému opticko-vizuálnímu a fotoelektrickému měření úhlů malých náklonů odrazové roviny zrcadla. Jsou používány v mnoha oblastech průmyslové a rozměrové metrologie, například ke kalibraci dělicích hlav a stolů s pomocí optických polygonů nebo k určení přímosti, rovnoběžnosti a kolmosti obráběcích strojů a souřadnicových měřicích strojů.

Na **obr. 1** je znázorněn optický princip takzvaného elektronického autokolimátoru s digitálním odečtem dat.



Obr. 1: Schéma principu měření elektronického autokolimátoru: (1) světelný zdroj; (2) štěrbinová clonka; (3) dělič paprsků; (4) objektiv kolimátoru; (5) rovinné zrcadlo; (6) CCD snímač polohy

Světelný paprsek ze světelného zdroje (1) prochází clonkou (2) umístěnou v ohniskové vzdálenosti objektivu (4) kolimátoru. Po průchodu objektivem kolimátoru je paralelní svazek světla odrazen od rovinné plochy zrcadla (5) a po dalším průchodu objektivem kolimátoru je paprsek, s pomocí děliče paprsků (3), zobrazen na fotoelektrickém snímači polohy (6) (zde CCD snímač). Změna posunu Δy obrazu světla z clonky v ohniskové vzdálenosti je úměr-

ná tangentě dvojnásobku úhlu sklonu α rovinného zrcadla podle vztahu

$$\Delta y = f \cdot \tan(2\alpha), \quad (1)$$

kde f je ohnisková vzdálenost objektivu kolimátoru.

Elektronické autokolimátory jsou často vybaveny dvěma měřicími osami, které umožňují měření úhlů náklonu rovinného zrcátka ve dvou vzájemně kolmých rovinách. Optické rozlišení autokolimátorů, které závisí na ohniskové vzdálenosti a rozlišení CCD snímače, může dosahovat hodnot až $0,001''$. Podle specifikací výrobce, tyto autokolimátory s vysokým rozlišením měří s přesností až $0,01''$. Pro představu, tato hodnota odpovídá stoupání o šířku lidského vlasu na délce 1,5 km. [1], [2].

3. LIBELY

Libely jsou měřidla, která jsou nejobvykleji používána pro ustavování rovin do vodorovné polohy, měření malých úhlů (sklonů) a měření odchylek od horizontální polohy. Existuje velké množství druhů a typů libel o různých přesnostech.

Základní dělení libel je na libely *kapalinové* a *elektronické*. Jejich funkčnost je zajištěna na principu působení zemské gravitace.

Základem kapalinových libel je obvykle skleněná trubice. Její vnitřní povrch je vybroušený do tvaru soudku a je naplněna vhodnou čirou kapalinou tak, že po zatavení trubice zůstane uvnitř malá bublina obsahující páry plnicí kapaliny. Bublina pak pracuje jako ukazatel, který spolu se stupnicí vyrytou na vnější straně trubice, indikuje velikost sklonu vůči horizontální rovině. Na tomto principu, kde je pevně umístěna libelová trubice v tělese libely, pracují například libely *strojní podélné, rámové, úhlové, stavební* apod. Nejdůležitějším parametrem u těchto libel je tzv. *citlivost* libely T , která je dána poměrem vzdálenosti dílku stupnice d a poloměru výbrusu libelové trubice R . Citlivost je udávána v jednotkách rovinného úhlu nebo také jako poměr mm/m. Převážná většina strojních libel je vyráběna s citlivostí 0,02 mm/m. To znamená, že při změně sklonu libely o 0,02 mm/m ($4,125''$) dojde k posunu bubliny o jeden dílek. Dále existují také kapalinové libely s rozšířeným rozsahem – *mikrometrické* a *koincidenční*. Mikrometrické libely mají libelovou trubici uloženou v rámu, který je přestavován ve vertikální rovině pomocí mikrometrického šroubu. Tím je dosaženo vyššího rozsahu měření libely. Koincidenční libely mají navíc systém optických hranolů, který zvyšuje přesnost určení středové polohy. Nejrozšířenější koincidenční libela *Zeiss* může plynule měřit sklony v rozsahu ± 10 mm/m s citlivostí 0,01 mm/m.

Elektronické libely jsou konstrukčně podstatně odlišné od libel kapalinových. Tyto libely dosahují vysokých přesností měření a podrobný princip jejich fungování si výrobci chrání jako své know-how. Jedním ze způsobů konstrukce

elektronické libely je za použití kyvadla zavěšeného mezi indukčními cívkami v můstkovém zapojení. Když je libela v horizontální poloze, je můstek vyvážený. Při naklonění roviny dojde k vychýlení kyvadla k jedné z indukčních cívek, čímž je porušena rovnováha můstku a z velikosti změny indukce je určována velikost náklonu libely. [3]

4. KALIBRACE LIBEL A AUTOKOLIMÁTORŮ

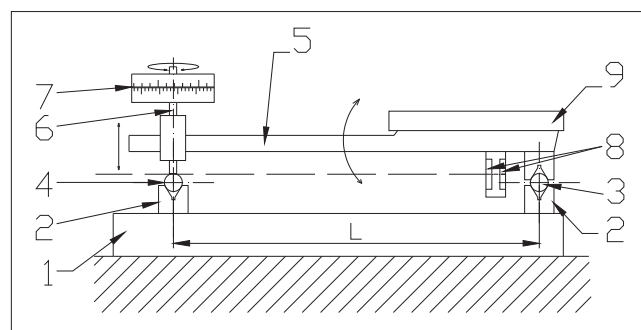
Nejočekávanějším parametrem po kalibraci těchto měřidel jsou u kapalinových libel skutečné hodnoty citlivosti a hodnoty korekcí v jednotlivých kalibrovaných bodech úhloměrné stupnice libel koincidenčních, elektronických a autokolimátorů. Kromě měření těchto parametrů jsou u přístrojů prováděny další testy – vnější prohlídka, funkční zkouška, kontroly rovinnosti a kolmosti příložných ploch apod. Tyto zkoušky zde nebudou dále podrobněji popisovány.

4.1. Etalony využívané pro kalibrace libel a autokolimátorů

Ke kalibraci libel a autokolimátorů jsou v současné době používány dva etalony, jedním je *generátor malých úhlů*. Jeho výhodou je poměrně široký rozsah měření $\pm 200'$ a lze na něm teoreticky měřit autokolimátory i libely s takto širokou stupnicí. Ve skutečnosti je rozsah nejčastěji kalibrovaných měřidel mnohem menší.

Z hlediska konstrukce je tento přístroj realizací sinusového či tangentového principu.

Generátor malých úhlů (obr. 2) se skládá ze základní desky (1), na které jsou pevně umístěny ložiskové bloky (2) a v nich uloženy válečky (3) a kulička (4). Na nich je položeno rameno (5), na jehož jednom konci je umístěn přesný mikrometrický šroub (6) a jeho poloha je odčítána na stupnici bubínku (7). Stoupání závitu mikrometrického šroubu je voleno tak, aby vzhledem k základní délce L jedna otáčka šroubu odpovídala změně sklonu ramena o $5'$. Stupnice bubínku je pak rozdělena tak, že nejpřesnější rozlišení stupnice je $0,1''$. [3]



Obr. 2: Schéma generátoru malých úhlů: (1) základní deska; (2) ložiskové bloky; (3) válečky; (4) kulička; (5) pohyblivé rameno; (6) mikrometrický šroub; (7) bubínek s úhloměrnou stupnicí; (8) zrcátko pro zacílení autokolimátorů; (9) stoleček pro umístění libely

Druhým používaným etalonem pro kalibrace libel a autokolimátorů je autokolimátor státního etalonu rovinného úhlu.

Státní etalon rovinného úhlu je složen ze dvou elektronických autokolimátorů s vysokým rozlišením společnosti Möller-Wedel Optical, typ *Elcomat 2000* a *Elcomat 3000*. Nejistota měření se je $0,008''$ a $0,014''$. Rozsah měření u *Elcomat 2000* je $\pm 1040''$, u *Elcomat 3000* je $\pm 1100''$.

4.2. Kalibrace autokolimátorů pomocí generátoru malých úhlů

Princip kalibrace autokolimátorů pomocí generátoru malých úhlů je tedy založen na pohyblivém rameni, jehož náklon je nastavován pomocí mikrometrického šroubu. Na konci ramena je pevně umístěno zrcátko (8, obr. 2), které zajišťuje potřebný odraz paprsku autokolimátoru. Zrcátko je umístěno tak, aby při změně sklonu ramene o určitý úhel bylo natočeno o shodnou velikost úhlu. Na toto rovinné zrcadlo je justován kalibrovaný autokolimátor. Na stupnici mikrometrického šroubu generátoru malých úhlů je pak odečítána změna sklonu ramene, která je během kalibrace porovnávána se změnou úhlu odečtenou na kalibrovaném autokolimátoru. Během kalibrace je však nutné pohybovat ramenem v obou směrech a při tom vykazuje generátor malých úhlů určitou hysterezi, která je pak promítnuta do výsledné nejistoty měření. Tento způsob kalibrace je v současnosti používán pro měření autokolimátorů s rozlišením stupnice nad $1''$. Současná platná hodnota CMC pro ČMI pro tento způsob měření je $U=0,5''$, při $P=95\%$, $k=2$ [4].

4.3. Kalibrace autokolimátorů pomocí přesného autokolimátoru

Mnohem vyšších přesností je dosahováno, když je jako etalonu použito autokolimátoru, v případě ČMI částí státního etalonu rovinného úhlu. Metoda měření je podobná jako v předchozím případě. Je zde také použit generátor malých úhlů, ale již pouze jako pomůcka pro naklápění zrcátek, od kterých je odrážen paprsek autokolimátorů. Na rameni generátoru malých úhlů jsou připevněna dvě rovinná zrcadla (8, obr. 2) takovým způsobem, že když je naklopeno ramenem přístroje, obě zrcátka se pootočí o shodný úhel. Na jedno zrcátko je zacílen kalibrovaný autokolimátor a na druhé autokolimátor státního etalonu. Úhly naklopení jsou stále generovány pomocí původního přístroje, avšak měřeny jsou již mnohem přesnějším autokolimátorem. Tím je jednak zajištěno přesnější rozlišení stupnice a je také eliminována nestabilita měření přístroje při pohybu ramena oběma směry, dále je mnohem nižší nejistota měření použitého etalonu.

Při použití této metody, kdy bude etalonem autokolimátor státního etalonu, je možné dosáhnout nejistoty měření teoreticky až $U=0,03''$. Podmínky pro dosažení takovéto hodnoty jsou, že bude použit autokolimátor *Elcomat 3000* s rozlišením stupnice měření $0,005''$, jeho nejistota měření nepřesáhne $0,02''$, budou započítány korekce, které byly změřeny při jeho kalibraci a uvažována bude i nejistota pro interpolaci naměřených hodnot, které se pohybují mezi hodnotami, kde byl autokolimátor kalibrován. Tuto metodu zatím ČMI nemá evidovanou v databázi KCDB. Pro rok 2010 je plánováno klíčové porovnání kalibrací autokolimátorů a předpokládá se, že po jeho dokončení bude uznána hodnota CMC pod hranicí $0,1''$.

4.4. Kalibrace libel pomocí generátoru malých úhlů

Stejně jako při kalibraci autokolimátorů, jsou na stupnici mikrometrického šroubu generátoru odečítány hodnoty sklonu. Na rozdíl od měření autokolimátorů, kde je měřen úhel sklonu zrcátka, je libela položena na rovinné desce naklápěcího stolečku (9, **obr. 2**), který je pevně fixován na sklopné rameno přístroje. Platí tedy, že pokud je ramenem otočeno o daný úhel, o stejný úhel se naklopí stůlek s libelou a také obě zrcátka, používaná při kalibraci autokolimátorů. Tato metoda je vhodná zejména pro kalibraci kapalinových libel, např. strojních a koincidenčních. Je možné takto také měřit elektronické libely, zejména pokud je vyžadována kalibrace v rozsahu větším než $\pm 1100''$.

ČMI má pro tento postup měření v databázi KCDB evidovanou hodnotu CMC $U=1''$, pro $k=2$ a $P=95\%$ [4].

4.5. Kalibrace libel pomocí přesného autokolimátoru

Změna způsobu měření je založena na podobném principu jako změna metody při kalibraci autokolimátorů. Stále je využíván generátor malých úhlů na jehož stolku je umístěna kalibrovaná libela. Tento přístroj však již není etalonem a stává se pouze prostředkem, který generuje požadovaný sklon libely. Pro měření úhlu naklopení je použit autokolimátor, který je zaměřen na zrcátko upevněné na rameni generátoru. Jak již bylo zmíněno výše, zrcátko i kalibrační stůlek jsou na rameni generátoru umístěny takovým způsobem, že velikost jejich natočení, při pohybu ramena,

je shodná. Nevýhodou této metody je fakt, že s takto nízkou nejistotou měření lze kalibrovat libely pouze s rozsahem maximálně 2200'', což je limitní hodnota autokolimátoru Elcomat 3000. Naopak mezi výhody lze počítat to, že na odčítacím zařízení autokolimátoru mohou být zobrazeny měřené hodnoty v různých jednotkách. Vzhledem k tomu, že u libel bývá stupnice uvedena v rozmanitých úhlových mírách – lze nastavit stupnici autokolimátoru tak, aby naměřené úhly byly zobrazovány ve stejných jednotkách, které jsou použity na libele. Odpadá tím tedy nutnost přepočtu a možnost chyby či nepřesnosti při zaokrouhlování. Dále je autokolimátor přímo propojen s počítačem a zaznamenává naměřené hodnoty do souboru. Tím je zamezeno vzniku chyby nesprávným zápisem.

V databázi KCDB má ČMI uznanou velikost nejistoty CMC $U=0,3''$, pro $k=2$ [4]. V současnosti jsou zpracovávány podklady pro další snížení CMC k hranici $0,1''$.

LITERATURA

- [1] Just A., Krause M., Probst R., Wittekopf R., „Calibration of high-resolution electronic autocollimators against an angle comparator“ *Metrologia* Vol. **40** (2003), str. 288-289
- [2] <http://www.moeller-wedel-optical.com>
- [3] Brezina I., „Základy metrologie uhlov“ *ALFA Bratislava, SNTL Praha* (1982), str. 7-84
- [4] <http://kcdb.bipm.org/appendixC>



METROLOGICKÝ RASTROVACÍ SONDOVÝ MIKROSKOP

Mgr. Petr Klapetek, Ph.D., Mgr. Miroslav Valtr

Český metrologický institut

Ing. Josef Lazar, Dr., Ing. Ondřej Číp, Ph.D.

Ústav přístrojové techniky

1. ÚVOD

Pro zajištění přesnosti a správnosti měření v oboru mikroelektroniky, optiky, optoelektroniky a souvisejících oborů je nezbytné soustředit se na měření rozměrů planárních struktur v řádu mikrometrů a nanometrů. Pro takové účely se využívá metoda rastrovací sondové mikroskopie (SPM – scanning probe microscopy), a zejména její varianta AFM (atomic force microscopy). Tato metoda umožňuje měřit morfologii povrchů pevných látek v rozlišení, které se i na vzduchu může blížit rozlišení atomárnímu. Maximální rozsah měřené plochy je přitom v řádu desetin milimetru. Velké rozlišení, rychlost i nedestruktivní přístup se zasloužily o množství aplikací AFM v metrologii malých délek, zejména při měření rozměrů nano- a mikroobjektů a měření

parametrů povrchové drsnosti. AFM může být navíc kombinováno i s dalšími senzory (např. magnetického pole), a je tedy možné provádět lokální materiálovou analýzu, byť ve většině případů nikoliv jako absolutní měření.

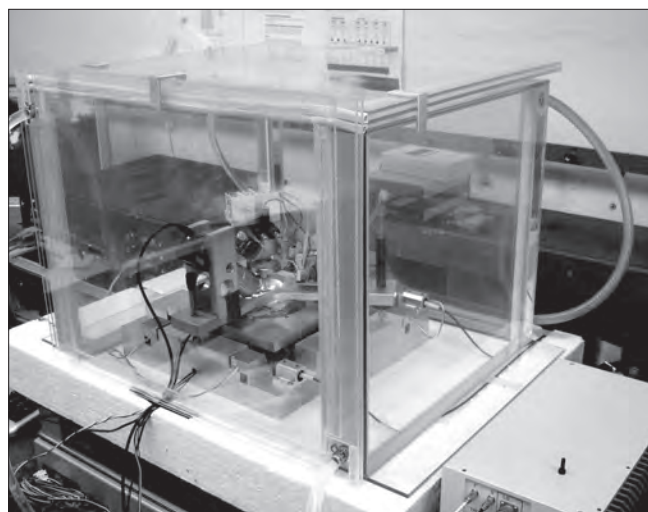
Se vzrůstajícími požadavky na přesná měření v oboru nanometrologie začal Český metrologický institut vyvíjet iniciativu zaměřenou na vývoj vlastního etalonu vhodného ke kalibraci etalonů a pracovních měřidel v tomto oboru. Významným impulzem k řešení úkolu bylo řešení projektu programu Nanotechnologie pro společnost „Metrologie metodami rastrovací sondové mikroskopie“ a související spolupráce s Ústavem přístrojové techniky.

Vývoj etalonu ČMI pro obor nanometrologie – metrologického SPM – vycházel z několika let zkušeností s provozem komerčních SPM, které byly používány jak pro kalibraci etalonů v oboru, tak pro výzkumné účely v oblasti fyziky povrchů. Aplikace v metrologii byly omezeny poměrně složitým řetězcem návaznosti a obecně principiálně špatnými metrologickými vlastnostmi komponent, které se při konstrukci mikroskopů běžně používají (zejména pie-

zokeramické komponenty). Je třeba zdůraznit, že např. počáteční kalibrace zařízení od výrobce je zatížena chybou v jednotkách procent. Kalibracemi s využitím difrakčních mřížek a etalonů výšky schodku je sice možné nejistotu měření výrazně snížit, i tak je dlouhodobá stabilita zařízení problematickým prvkem a samotná kalibrace naráží na principiální limity. Bylo proto rozhodnuto postavit metrologické SPM jako samostatné zařízení, částečně založené na využití komerčně dostupných elementů, částečně vyvinuté přímo na našem pracovišti (řešením úkolů technického rozvoje ÚNMZ a řešením projektu programu Nanotechnologie pro společnost „Metrologie metodami rastrovací sondové mikroskopie“), nebo na pracovišti spoluřešitele grantového projektu programu Nanotechnologie pro společnost, kterým je Oddělení koherentní optiky Ústavu přístrojové techniky AVČR (laserový odměřovací systém).

2. POPIS METROLOGICKÉHO SPM

Etalon se skládá ze tří celků provázaných řídicí elektronikou. Tyto celky jsou záměrně vytvářeny jako poměrně nezávislé, což nám umožňuje snadné budoucí modifikace v souvislosti s dalším vývojem v oboru, který je stále velmi dynamický.



Obr. 1: Metrologické SPM v tepelně izolačním boxu

Stolek Physik Instrumente

Stolek umožňuje měření na maximálním rozsahu 200 x 200 x 20 mikrometrů s rozlišením v řádu jednotek nanometrů (podle parametrů zpětné vazby). Stolek sám je vybaven kapacitními senzory a je schopen pracovat v režimu zpětné vazby (pro účely polohování). V následující tabulce jsou uvedeny hlavní technické parametry stolku:

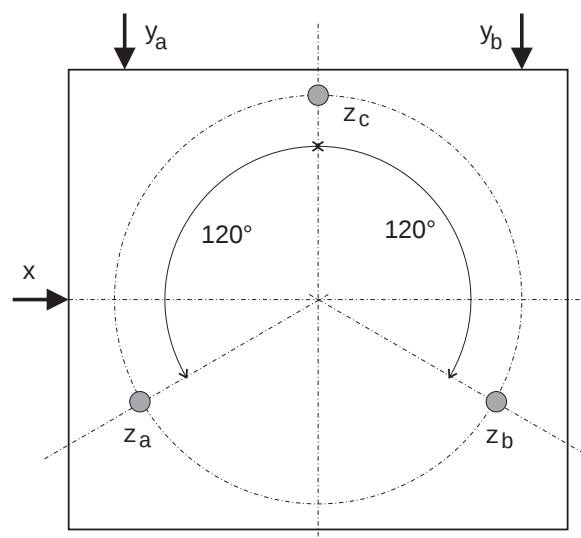
	bez zpětné vazby	se zpětnou vazbou
rozsah (x, y, z)	200 x 200 x 20 um	200 x 200 x 20 um
rozlišení (x, y, z)	0,5; 0,5; 0,1 nm	2; 2; 0,1 nm
opakovatelnost (x, y, z)	10; 10; 1 nm	10; 10; 1 nm

Pro řízení polohování stolku je využita digitální jednotka E710, která zajišťuje jak vlastní generování vysokého napětí pro jednotlivé piezoelementy, tak čtení poloh stolku pomocí integrovaných kapacitních senzorů. Elektronika je propojena s osobním počítačem sériovým rozhraním GPIB.

Pro kombinaci stolku s dalšími zařízeními jsme využili vlastní knihovnu, která byla vytvořena pro ovládání stolku přes rozhraní GPIB (karta National Instruments) v operačním systému Linux. To s sebou nese některé výhody z pohledu kombinace více různorodých přístrojů i z pohledu vzdáleného ovládání přístroje při dlouhotrvajících měřeních.

Laserový odměřovací systém

Laserový odměřovací systém využívá jódem stabilizovaný Nd:YAG laser (532 nm) a na míru vyrobenou sadu interferometrů pro tuto vlnovou délku. Je umístěn v základně vyrobené z hliníku (jedná se o prototyp) a zahrnuje celkem šest nezávislých senzorů: 1 senzor pro osu x, 2 senzory pro osu y a 3 senzory pro osu z. Senzory jsou umístěny takovým způsobem, aby jejich pomyslný střed byl ve středu stolku (kde je umístěn hrot mikroskopu). Světlo z Nd:YAG laseru je do jednotlivých interferometrů rozvedeno dílem vláknovou, dílem klasickou optikou. Na stolku Physik Instrumente je umístěna deska se šesti zrcadly, na kterou je při měření pokládán vzorek, resp. držák vzorku.



Obr. 2: Pozice odměřování interferometry (pohled shora), hrot je umístěn ve středu desky ve virtuálním středu všech paprsků

Mechanické komponenty základny a odrazné desky interferometrů, stejně jako elektronika, byly vyrobeny v Ústavu přístrojové techniky AVČR. Elektronika příslušející k interferometru se skládá z vlastních detekčních jednotek pro jednotlivé kanály a serveru (PC s OS Windows) zodpovědného za kontinuální příjem dat z elektroniky a jejich další předávání. Jedná se o server založený na protokolu Netcans (přenos dat přes TCP/IP), který dále komunikuje s vlastní řídicí elektronikou mikroskopu. Součástí sestavy

je také jednotka pro měření tlaku, teploty a vlhkosti vzduchu. Tyto údaje jsou předávány prostřednictvím serveru do řídicího počítače, kde jsou využity pro výpočet indexu lomu vzduchu.

Hlava SPM

Hlava SPM je detekčním prvkem pro snímání vzdálenosti mezi hrotem a povrchem, resp. síly působící mezi hrotem a povrchem, tj. veličiny, která je využita pro zpětnou vazbu v mikroskopu. Tato hlava se skládá z následujících součástí:

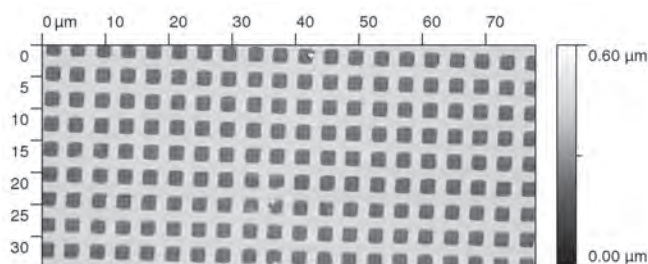
- hrot a jeho držák upevněný na piezokeramice pro rychlý posun v ose z (vyrovnání rychlých dějů, jako jsou vibrace);
- senzor posunu hrotu vůči hlavě SPM (např. senzor mechanického napětí, kapacitní nebo interferometrický senzor);
- předzesilovač pro signály z detekce vzdálenosti hrotu od povrchu (např. tunelový proud, kvadrantní detektor);
- motorizovaný držák hlavy mikroskopu umožňující jeho umístění na základnu interferometru.

K hlavě je připojena elektronika, která zpracovává signály z detektoru vzdálenosti mezi hrotem a povrchem a zprostředkovává rychlou zpětnou vazbu pro rychlý posun hrotu v ose z. Tato elektronika je založena na využití jednočipového mikroprocesoru Atmel (Atxmega) a je spojena s řídicím počítačem pomocí sériové linky RS232 a kabelu vedoucího k multifunkční měřicí kartě National Instruments PCI 6251.

Software SPM

Software mikroskopu je založen na bázi knihoven volně šiřitelného programu Gwyddion, na jehož vývoji se ČMI podílí. Jedná se o modulární program pro analýzu SPM dat, a pro účely vytvoření ovládacího programu k mikroskopu byly využity zejména jeho knihovny pro vizualizaci a správu dat.

Řídicí program komunikuje se serverem interferometru a v každém okamžiku měření je zaznamenávána kromě hodnot poloh ze stolku také hodnota čtení jednotlivých interferometrů (každý proces je čten samostatným vláknem a hodnoty jsou současně ukládány pro zajištění synchronizace). Tím je zajištěna metrologická návaznost a možnost přepočtu všech měřených hodnot na údaje poskytnuté interferometrem.



Obr. 3: Typické měření pomocí AFM – morfologie kalibrační mřížky

3. MĚŘENÍ POMOCÍ SPM

Jako příklad typického měření využívaného v nanometrologii uvádíme popis měření (a souvisejících nejistot) při charakterizaci periody difrakční mřížky v rámci porovnání Euromet 925. Po měření v rozsahu 50 x 50 mikrometrů v kontaktním režimu je proveden přepočet na čtení interferometrů a data jsou takto připravena k softwarové analýze. Pro vyhodnocení výsledků měření využíváme program Gwyddion (<http://gwyddion.net>), a to konkrétně nástroj pro extrahování profilů a nástroj pro čtení hodnot z grafu. Z pohledu zpracování SPM dat se tedy jedná o poměrně jednoduchý postup, určená perioda je 701 nm.

Vyhodnocení nejistoty měření typu A se provádí v souladu s dokumentem EA/R, tj. na základě rozptylu měřených dat. Obecně je pro dosažení co možná nejpřesnějšího určení periody mřížky je nutné provádět co možná největší počet opakovaných měření. Kromě opakování měření profilů na měřených datech (jedno měření) je žádoucí, je-li to technicky možné, opakovat také vlastní měření pomocí AFM v průběhu experimentu, v tomto případě jsme provedli tři nezávislá měření. Soubor hodnot periody vstupující do vyhodnocení nejistoty typu A tedy zahrnuje cca 50 údajů.

Pro vyhodnocení nejistoty typu B vycházíme z následujících vlivů:

- nejistota kalibrace mikroskopu v ose x (z nejistoty interferometru);
- nejistota teploty přepočtená na teplotní roztažnost materiálu masky;
- nejistota kolmosti zvoleného profilu ke směru motivu;

Nejistoty měření kombinujeme na základě dokumentu EA/R použitím zákona o šíření chyb, z funkčního vyjádření příspěvků a stanovením jejich citlivostních koeficientů. Průměrná hodnota periody cca 700 nm měřená přes oblast 75 μm je tedy určena s rozšířenou nejistotou 1 nm ($k=2$). Nejistota metrologického SPM je tedy 5x nižší, než nejistota komerčního mikroskopu využívaného v předchozích porovnáních (6 nm na 1000 nm).

Je třeba zdůraznit, že s dalším vývojem mikroskopu, zejména v oblasti stabilizace laseru, aktivní kompenzace rotací stolku a polohováním senzoru do průsečíku os interferometrů by bylo možné nejistotu dále snížit. To je ostatně dalším záměrem řešitelského kolektivu.

4. ZÁVĚR

Ve spolupráci Českého metrologického institutu a Ústavu přístrojové techniky AVČR byl zkonstruován rastrovací mikroskop s poměrně velkým rozsahem, který je přímo navázán na etalony délky. Parametry metrologického rastrovacího mikroskopu spolu s výrazně jednodušším řetězcem návaznosti jsou příspěvkem k výraznému snížení nejistoty pro měření v oblasti nanometrologie. Další vývoj etalonu se zaměřuje na zrychlení měření a implementaci nových typů senzorů, což by mělo dále posilovat schopnost ČMI provádět měření v této dynamicky se rozvíjející oblasti průmyslu.

MĚŘENÍ VELMI MALÝCH SIL V NÁVAZNOSTI NA DÉLKU

Mgr. Anna Campbellová, Mgr. Miroslav Valtr,

Mgr. Petr Klapetek, PhD.

Český Metrologický Institut

Abstrakt

Článek shrnuje možnosti získávání návaznosti velmi malých sil zejména s využitím přesného měření délky a popisu je postup, který zvolilo ČMI k rozřešení této problematiky. Pro tyto účely byla využita možnost získání návaznosti prostřednictvím křemíkových ramének kalibrovaných např. na hmotnostním komparátoru.

1. ÚVOD

Měření a generování velmi malých sil, v řádu nN-μN, je klíčovým prvkem mnoha měřicích přístrojů v oboru fyziky povrchů a tenkých vrstev. S rozvojem technologií tenkých vrstev, kompozitních materiálů a povrchových úprav založených na možnostech nanotechnologie, se objevuje potřeba metrologického zajištění měření v této oblasti.

Velmi malé síly se uplatňují zejména ve dvou klíčových experimentálních metodách využívaných v metrologii povrchů a tenkých vrstev:

- Mikroskopie atomárních sil je patrně nejvyužívanější metoda pro měření morfologie povrchů v nano- a mikroměřítku. Klíčovým prvkem mikroskopu atomárních sil je senzor síly, nejčastěji realizovaný prostřednictvím pružného elementu a senzoru deformace. Zatímco pro samotné měření tvaru je klíčové jen udržování konstantní síly, pro získání dalších informací o vzorku je důležité také měření meziatomárních sil působících mezi hrotem mikroskopu a povrchem.
- Nano- a mikroindentace je metoda pro měření mechanických vlastností materiálů (obdobně jako klasická indentace studuje tvrdost materiálu) s možnostmi vysokého prostorového a hloubkového rozlišení. Zařízení generuje sílu (zvětšuje a zmenšuje zátěž ve smyslu klasické indentace) a sleduje odezvu materiálu.

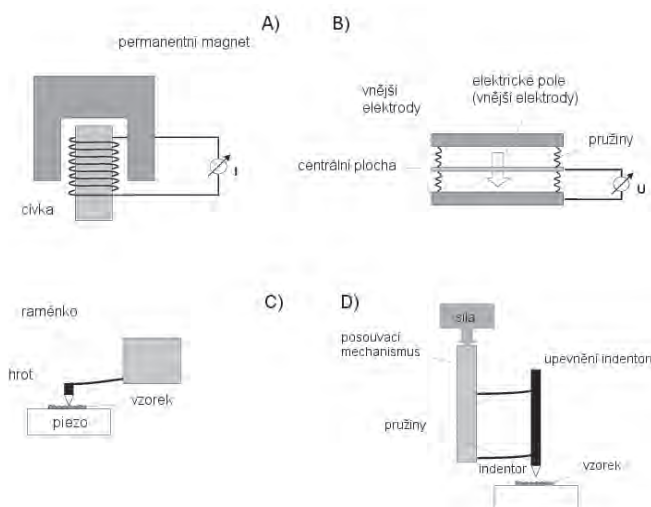
V tomto článku jsou shrnuty základní principy měření a generování malých sil ve zmíněných metodách a je popsána metoda návaznosti na délku a hmotnost využívaná v Českém metrologickém institutu. Blíže je popsána zejména metoda nanoindentace, která je velmi moderním prvkem v analýze mechanických vlastností pevných látek.

2. MĚŘENÍ A GENEROVÁNÍ VELMI MALÝCH SIL

Vzhledem k požadovaným rozsahům sil, které je nutné generovat a měřit, řádově desítky nN až stovky mN, jsou samotné způsoby měření a generování takto malých sil ve většině případů založeny na metodách, které vychází z měření velmi malých vzdáleností.

Základní způsoby generování malých sil [1] jsou následující:

- elektromagneticky pomocí permanentního magnetu v cívce;
- elektrostaticky mezi plochami, na které je přivedeno napětí;
- piezoelektricky;
- spojením pomocí pružin s piezoelektrickým generátorem síly;
- laserem pomocí optické pastě.



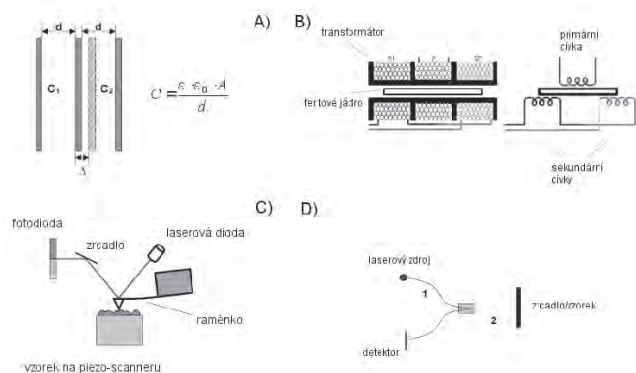
Obr. 1: Metody generování velmi malých sil. A) Elektromagneticky, B) Elektrostaticky, C) Piezoelektricky, D) Pomocí pružinového přenosu. Převzato z [1]

Základní typy měření polohy v těchto zařízeních jsou přitom následující [1]:

- diferenciální kapacitní senzor, tj. využití závislosti kapacity na posuvu;
- lineární diferenciální převodník, tj. generování napětí v závislosti na posuvu;
- opticky pomocí měření ohybu raménka kvadrantním detektorem;
- interferometricky;
- pomocí dvoufotonové fluorescence.

V mikroskopu atomárních sil je nejčastější kombinace generování a měření sil pružným elementem, který je součástí hrotu (raménkem hrotu, tzv. cantileverem). Při nanoindentaci je využíváno více principů. Pro měření ve větším rozsahu (s možností generování a měření větších sil) je nejčastější využití elektromagnetického principu, u zařízení určeného pro nejmenší síly je to využití elektrostatického pole a kapacitních snímačů.

Jak je možné vidět, klíčovým prvkem mnoha principů měření malých sil je převod síly na posunutí a jeho měření. Je to pochopitelné – metody měření velmi malých vzdáleností patří mezi jedny z nejrozvinutějších metod metrologie.



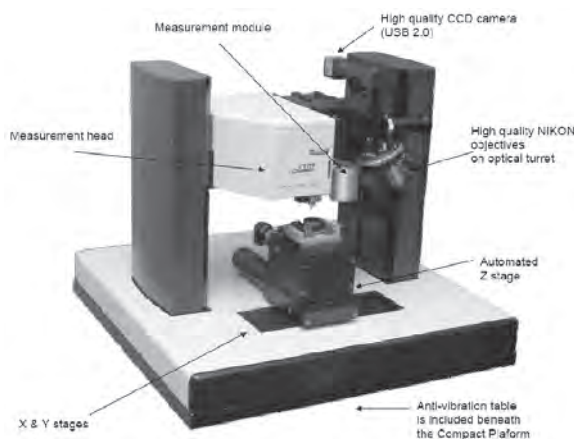
Obr. 2: Metody měření velmi malých vzdáleností. A) Diferenciální kapacitní senzor, B) Lineární diferenciální převodník, C) Pomocí kvadrantního detektoru D) Interferometricky. Převzato z [1]

3. NANOINDENTACE

Speciálním případem přístroje, který nejen měří, ale i generuje malé síly, je nanoindentor. Nanoindentace je aplikace myšlenky obvyklé (makro)indentace v oboru velmi malých sil, řádově nN až μN . Samotné makroskopické indentace jsou základní metodou pro studium mechanických vlastností materiálů. V makroskopických indentacích je tvrdý hrot (obvykle diamantový) o známých mechanických vlastnostech vtisknut do materiálu a ze známé zátěže a změřené plochy vtisku je následně určena tvrdost. Naproti tomu nanoindentace zaznamenávají celý průběh zátěže a hloubky vtisku, dále používají mnohem menší hroty, čímž umožňují studium mechanických vlastností i v malých rozměrech. Ze zatěžovací křivky, tj. závislosti zátěže na hloubce vtisku, je možné určit tvrdost, elastický modul a jiné charakterizující veličiny i pro velmi tenkou vrstvu povrchu, popř. analyzovat závislost těchto veličin na hloubce.

Základem nanoindentačních měření je přesné určení síly působící na hrot a polohy hrotu vzhledem ke vzorku. Na trhu je dostupných několik typů nanoindentorů, které se liší konkrétním řešením této problematiky.

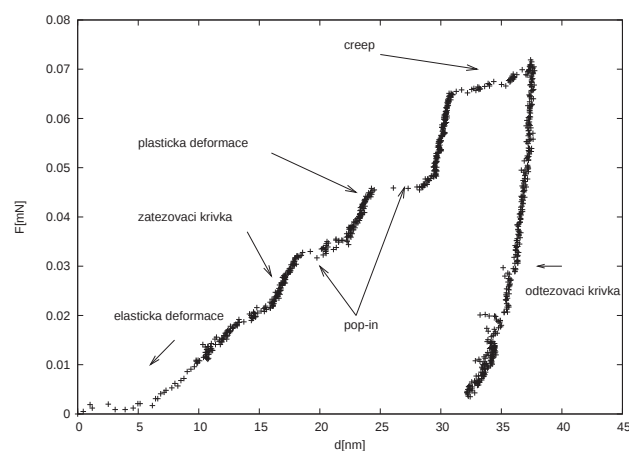
Pro studium velmi malých sil v materiálech je na ČMI používán nanoindentor společnosti CSM Instruments.



Obr. 3: Schéma nanoindentoru UNHT od CSM Instruments. Převzato z www.csm-instruments.com.

Rozsah zátěže je 0,025–100 mN, rozlišení je 0,001 μN . Maximální hloubka je 100 μm , rozlišení je 0,001 nm. Vzorek je umístěn na stolku, rozsah posuvů stolku ve směrech x, y, z je 120 x 20 x 3 mm. Tepelný drift je velmi malý, cca 1 ppm/°C. Pro ultrananoindentace je běžně používán hrot typu Berkových, který má tvar trojbokého hranolu s přesně definovanými úhly: úhel mezi osou a hranou je 76,9°, úhel mezi osou a těžnicí stěny je 65,3°.

Jednou ze zajímavých aplikací na hranici technických možností současných přístrojů je studium tzv. Pop-in efektů. Při zatěžování materiálu dochází při určitých kritických hodnotách k náhlým reorganizacím struktury – vzniku a rozvoji dislokací, vzniku skluzových rovin a dalších efektů spojených s posuvem malého množství atomů. Na obr. 4 je ukázka průběhu zatěžovací křivky pro nikl. Zatěžování bylo lineární v čase po dobu 30 s, poté následovala 15 s fáze konstantní zátěže a poté odtěžovací fáze o stejné rychlosti jako zatěžování. Maximální dosažená zátěž byla 70 μN . Na křivce jsou vidět pop-in efekty (rychlý růst hloubky při téměř konstantní síle), ale i velmi malý creep efekt (rostoucí hloubka při konstantní zátěži). Vzorkovací frekvence je 10 Hz, ovšem v rámci zpracování softwarem jsou k dispozici pouze upravená data, která jsou i uvedena na obr. 4.



Obr. 4: Zatěžovací křivka při nanoindentaci.

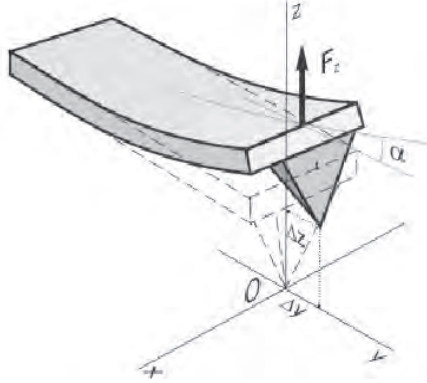
Zatěžování začíná elastickou deformací, při které je závislost síly na hloubce lineární podle Hookova zákona. Při dalším zvyšování síly následuje plastická deformace, zde např. můžeme vidět tzv. pop-in efekty, body při kterých prudce vzroste hloubka. U tohoto vzorku můžeme dále vidět efekt creep, při němž roste hloubka indentace, ačkoli zátěž zůstává konstantní. Nanoindentace je ukončena odtěžováním.

4. NÁVAZNOST V OBORU MALÝCH SIL

Pro návaznost byla zvolena metoda převodu malých sil na měření výchylky raménka AFM hrotu. Jedná se o patrně nejjednodušší přístup při realizaci přenosového standardu pro měření malých sil. Křemíkové raménko AFM hrotu (cantilever) je velmi stabilní prvek a je možné ho využít jak pro zajištění přenosu návaznosti mezi různými zařízeními

(v našem případě mikroskop atomárních sil a nanoindentor), tak pro porovnání s jinými metodami.

Pro model raménka jako jednostranně vetknutého nosníku lze určit vztah mezi silou působící na raménko a jeho výchylkou [2].



Obr. 5: Schéma raménka AFM s hrotem. Převzato z [2].

Pro rozsahy sil a výchylek, při nichž se uplatňuje čistý ohyb a platí Hookův zákon, je vztah pro výchylku na konci raménka

$$\Delta z = \frac{F_z l^3}{3EJ_z} - \frac{5mgl^3}{24EJ_z},$$

přičemž l je délka raménka, m jeho hmotnost, E modul pružnosti a J_z axiální moment setrvačnosti vzhledem k ose, která prochází jeho těžištěm rovnoběžně s osou y . Pro obvyklá raménka používaná v AFM je druhý člen zanedbatelný a platí lineární vztah mezi působící silou a výchylkou. Známe-li konstantu úměry mezi silou a výchylkou, tedy tuhost raménka, můžeme ze znalosti výchylky určit sílu působící na raménko. Výše uvedený vztah platí pro ideální případ, se kterým se ve skutečnosti nesetkáváme, a je tedy možné jej použít pouze jako odhad. Ve skutečnosti by bylo nutné podrobnější rozpracování samotného upevnění tak i materiálu hrotu. Skutečné hroty často bývají pokovené (z jedné nebo druhé strany) a odhad Youngova modulu je velmi obtížný.

Tuhost raménka lze přesněji určit z analýzy termálních kmitů raménka v tekutině (vzduchu) [3]:

Mějme raménko obdélníkového tvaru o šířce b , tloušťce h a délce L . Raménko je izotropní, elastické, jeho hustota je μ . Raménko se nachází v tekutině hustoty ρ a viskozity η . Předpokládejme, že amplituda kmitů je mnohem menší než jakýkoliv z jeho rozměrů.

Pokud tekutina působí na raménko pouze termálním pohybem molekul a pro malé disipativní efekty lze raménko aproximovat jednoduchým, tlumeným, harmonickým oscilátorem:

$$x \approx \left((\omega^2 - \omega_{R,n}^2)^2 + \frac{\omega^2 \omega_{R,n}^2}{Q_n^2} \right)^{-1/2}.$$

Frekvence vlastních kmitů řádu n je dána

$$\frac{\omega_{R,n}}{\omega_{vac,n}} = \left(1 + \frac{\pi \rho b^2}{4\mu} \Gamma(\omega_{R,n}) \right)^{-1/2}$$

faktor kvality (poměr pološířky a maxima) je

$$Q_n = \frac{4\mu}{\pi \rho b^2} + \frac{\Gamma_r(\omega_{R,n})}{\Gamma_i(\omega_{R,n})}.$$

Zde $\omega_{vac,n}$ je vlastní frekvence ve vakuu a Γ_r , resp. Γ_i reálná resp. imaginární část hydrodynamické funkce pro raménko. Vlastní frekvence závisí na Youngově modulu pružnosti a axiálním momentu setrvačnosti

$$\omega_{vac,n} = \frac{C_n}{L^2} \sqrt{\frac{EJ_z}{\mu}}$$

C_n je kořen rovnice $1 + C_n \cos C_n \cosh C_n = 0$.

Hydrodynamická funkce je bezrozměrná funkce, která hraje roli frekvenčně závislé „konstanty úměry“ v závislosti síly na (frekvenční závislosti) výchylky raménka. Sílou, zde rozumíme sílu, kterou působí tekutina Brownovým pohybem svých molekul na raménko. Samotnou hydrodynamickou funkci pro daný tvar lze nalézt z pohybových rovnic pro rychlostní pole v tekutině.

Hydrodynamickou funkci obdélníkového raménka nelze určit analyticky, je určena pomocí funkce pro raménko s kruhovým průřezem, kterou analyticky určit lze, a polynomu, jehož koeficienty byly určeny metodou nejmenších

čtverců $\Gamma_{rect}(\omega) = \Omega(\omega) \Gamma_{circ}(\omega)$, kde Ω je zmíněný polynom a Γ_{circ}

$$\Gamma_{circ}(\omega) = 1 + \frac{4iK_1(-i\sqrt{i\text{Re}})}{\sqrt{i\text{Re}}K_0(-i\sqrt{i\text{Re}})}.$$

Zde je $\text{Re} = \rho \omega^2 b^4 / 4\eta$ Reynoldsovo číslo a funkce K_1 , K_0 zobecněné Besselovy funkce třetího druhu.

Ze znalosti tvaru frekvenčního piku, parametrů vzduchu (hustoty a viskozity) a rozměrů raménka (délka a šířka) je tedy možné určit tuhost raménka

$$k = \frac{3\pi}{4C_1^4} L b^2 \rho \omega_{R,1}^2 \Gamma_i(\omega_{R,1}) Q_1.$$

Vzhledem k tomu, že $\omega_{R,n}$ klesá s druhou mocninou délky, tuhost klesá jako v předchozím s třetí mocninou.

Pokud tedy umíme tuhost raménka určit v mikroskopu (viz výše), můžeme použít zatěžovací křivku při měření na tomtéž raménku v nanoindentoru pro kalibraci nanoindentoru. Pomocí AFM mikroskopu lze kalibrovat senzor hloubky nanoindentoru a ze známé lineární závislosti kalibrovat i senzor síly.

Pro navázání na jiné etalony je vhodné využít kombinaci měření délky a hmotnosti. Pomocí piezoelektrického posunu můžeme zatlačit raménko do hmotnostního komparátoru

a měřit změnu indikované hmotnosti v závislosti na poloze druhého konce raménka (interferometricky). Na základě měřené závislosti můžeme opět vyhodnotit tuhost raménka. Je třeba říct, že možnosti etalonů hmotnosti jsou v tomto směru poněkud omezené, vhodným převodem síly (např. využitím různých částí raménka pro různé experimenty) je však možné tento problém částečně potlačit.

Z dosud dostupných dat vyplývá, že největším přínosem k celkové nejistotě je hmotnostní komparátor. Nicméně i přesto se tato možnost jeví jako nejdostupnější a nejjednodušší cesta k návaznosti.

5. ZÁVĚR

Měření a generování sil v řádu nN – mN má v metrologii mnoho uplatnění, zejména v oblasti studia povrchů tenkých vrstev a obecně povrchu materiálů. V laboratořích Českého

metrologického institutu se věnujeme zejména problematice návaznosti měření sil mezi jednotlivými experimenty a zajištění návaznosti pro metodu nanoindentace. Ukazuje se, že s využitím standardního raménka AFM hrotu je možné provádět jak přenos návaznosti, tak její získání z etalonů hmotnosti a délky.

Literatura:

- [1] Kim, D. K., *Nanoindentation*, www.slideshare.net/viet4777/nano-indentation-lecture1
- [2] www.ntmdt.com/spm-basics
- [3] J. E. Sader, *Frequency response of cantilever beams immersed in viscous fluids with applications to atomic force microscopy*, Journal of Applied Physics **84** 1, 1998
- [4] Z. Li, S. Gao, K. Herrmann, *Development of a micro-miniature nanoindentation instrument*, Hardmeko 2007



MĚŘENÍ ROVINNOSTI VELKÝCH OPTICKÝCH PLOCH

Mgr. Petr Křen

Český metrologický institut

Abstrakt

V článku je popsána nová interferometrická metoda měření rovinnosti přesných optických ploch.

1. ÚVOD

Tvar a rozměry měřených 3D objektů jsou převážně určovány měřením povrchových odchylek od předpokládaného tvaru. Dotyková měření makroskopických objektů jsou vhodná pro měření do přesnosti desetin mikrometrů. U měření mikroskopických objektů lze sice docílit sub-nanometrových rozlišení struktury, ale určovat tvar makroskopických objektů na řádově nanometry není snadné. Většinou se k tomuto účelu používají optické interferometry, které eliminují vliv dotyku na měřený povrch. Svazek interferometru o průměru několika jednotek až desítek centimetrů umožňuje (ve směru normály) sledovat jednoduchý tvar či změny tvaru v nanometrové oblasti. Proto je z metrologického hlediska důležité charakterizovat vlnoplochu těchto interferometrů a odchylky pocházející z neideálnosti elementů. Základními prvky interferometru, které ovlivňují měřící vlnoplochu, jsou dělič a referenční plocha (zrcadlo), které jsou většinou rovinné. Z tohoto důvodu byl zkonstruován speciální interferometr pro charakterizaci rovinnosti optických ploch s nejistotou v řádu jednotek nm.

2. PRINCIP METODY

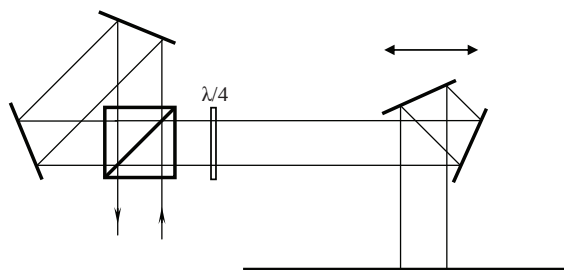
Definice rovinnosti vychází z normy ISO 1101:2004 a je vyjádřena jako minimální tloušťka zóny omezené dvě-

mi paralelními plochami mezi kterými je daný povrch. Rovinnost přesných optických ploch využívaných v interferometrii se pohybuje ve zlomcích vlnové délky λ , aby je bylo možné vůbec v interferometru použít. Ale výrobci dosahují přesností i lepších než $\lambda/100$, což například umožňuje interferometricky měřit koncové měrky s nejistotami v řádu jednotek nm.

V rámci metrologické návaznosti tedy bylo třeba zajistit zařízení, které by tuto charakterizaci umožnilo. Určit absolutně rovinnost artefaktu umožňují různé metody. Například metoda separace pomocí tří ploch s více měřeními v různých polohách [1]. Tato metoda ale vyžaduje disponování více kusy (a to i rozměrově velkými a finančně náročnými) a nejistoty měření se zvětšují (je tu i vliv deformace vlastním natočením). Také existují komerční a relativně nákladné interferometry schopné měřit plochy o průměru i 100 až 150 mm. Ale i zde je třeba k zajištění metrologické návaznosti nějaké reference. Tu lze získat z 1D reference a tou je přímočaré šíření světelného paprsku. Tohoto principu využívá metoda ESAD vyvinutá v PTB v Německu [2]. U ní se pomocí autokolimátorů měří relativní úhlové odchylky odraženého svazku v různých polohách. Z úhlu mezi normálami lze pak odvodit topografii 1D řezu a z několika řezů lze zrekonstruovat 2D topografii odchylek od rovinnosti. Podobný princip využívá i unikátní zařízení pro měření rovinnosti povrchu v ČMI, kde je autokolimátor nahrazen diferenčním interferometrem pro měření úhlu [3]. Toto zařízení bylo předchůzích několika letech vyvíjeno v rámci úkolu ÚNMZ - PRM č. III/6 - Rozvoj primární etalonáže délky.

Interferometr pro měření optických ploch je schematicky znázorněn na **obr 1**. Koherentní záření z jednomodového frekvenčně nestabilizovaného He-Ne laseru 633 nm

se dělí v polarizační kostce (složené ze dvou optických hranolů). Jeden svazek s jednou lineární polarizací je odražen do vodorovného směru, druhý svazek s druhou lineární polarizací (kolmou k první) je pomocí dvou zrcadel odražen do paralelního směru s původním svazkem, ale posunut (například o 10 mm). Tyto svazky procházejí čtvrtvlnnou destičkou $\lambda/4$ a tvoří onu referenci přímosti. Jejich paralelnost s přesným motorizovaným podélným posuvem (rozsah 600 mm) se před měřením nastavuje pomocí analyzátoru polohy svazku. Poté dopadají na dvojici zrcadel tvořící tzv. „dutý pentahranol“. Ten svazky odkloní do přibližně kolmého směru svisle dolů na vodorovně uloženou měřenou optickou plochu. Hlavní funkcí této dvojice zrcadel je to, že úhel odklonění je stabilní tak, jaká je vzájemná mechanická úhlová stabilita této dvojice (kompenzuje se vliv společných úhlových změn při posuvu). Od měřené plochy se záření odrazí zpět a díky druhému průchodu čtvrtvlnnou destičkou (změna lineární polarizace) se nevrací do laseru, ale odchází do homodynního detektoru. Tam je polarizačně vyhodnocován rozdíl fáze interferenčních proužků, čímž se určuje úhel naklonění měřené roviny v daném místě (výhodou diferenčního interferometru se zanedbatelným rozdílem délky ramen je vyhnout se nutnosti použít frekvenčně stabilizovaný laser). Při postupném opakování měření těchto úhlů sklonu v polohách podélného posuvu měřených o vzdálenost svazků lze stanovit 1D profil pro daný řez. Celkovou 2D topografii lze získat pomocí dalších paralelních 1D profilů (artefakt posouván příčným posuvem) a dalších sad měření při vodorovně otočeném artefaktu.



Obr. 1: Schéma diferenčního interferometru pro měření rovinnosti optických ploch.

Principu měření lze využít i pro měření ploch s difúzním odrazem, který laserový svazek rozptýlí. Bylo by ale třeba upravit zařízení následujícím způsobem. Přidáním vodorovného rovinného zrcátka (nebo dvojice dutých koutových odražečů v dané vzdálenosti svazků) pod „pentahranol“, které by se podélně posouvalo společně s ním, ale navíc samostatně svisle posouvalo a naklápělo podle čidel polohy (vzdálenosti) měřeného povrchu tak, aby kopírovalo onen povrch. V případě vodivých povrchů jsou vhodná bezkontaktní kapacitní čidla polohy s napěťovým výstupem, jejichž šum se pro doby jednotlivých odměrů (zhruba sekunda) pohybuje i jen okolo 1 nm.

3. VLASTNÍ ZAŘÍZENÍ

Popsané zařízení pro měření rovinnosti optických ploch je umístěno na žulovém optickém stole bez vibroizolace

(naklápění stolu by bylo spíše na škodu z důvodu změny úhlů spojené s deformacemi). Celý interferometr je s artefaktem umístěn v boxu zaručujícím pasivní stabilizaci teploty. Homogenity teploty je dosahováno pomocí vnitřní cirkulace vzduchu, která zamezuje střednědobým fluktuacím interferometru a hustotnímu usazování vzduchu (eliminuje možný vliv na prohnutí svazku při šíření v gradientním prostředí). Interferometr tak po několikahodinovém ustálení dosahuje driftu i jen 1 nm/hod (což odpovídá změně úhlu jen $0,02''/\text{hod}$).

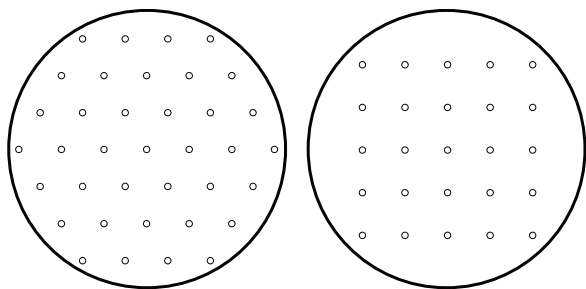
Plně automatizované měření (podélný posuv na 1D profil a příčný posuv artefaktu) umožňuje snadný průběh několikahodinového scanování pro větší optické plochy, aniž by se muselo mnohokrát vyčkat na teplotní ustálení, které by výrazně prodloužilo dobu měření. Přesto i tak měření trvá delší dobu (podobně jako u metody ESAD), ale je možný výjimečný rozsah velikosti měřené plochy (až 500 mm), větší než rozsah největšího přesného interferometru s použitím celého svazku (umožňujícího ale rychlé 2D snímkování), který byl sestaven v AIST v Japonsku pro měřicí průměr 300 mm.

Vyvinuté zařízení umožňuje měřit nejen zrcadla (odrazivosti přes 90 %), ale po přidání elektrického zesílení signálu i leštěné ocelové podložky (odrazivost okolo 50 %) či samotné sklo (pouze 4 % intenzity), pokud je zamezeno vícenásobným odrazům z jiných povrchů (klín, kontaktní kapalina, hrubý povrch druhé strany). Rozsah měření odchylek od rovinnosti je limitován maximálním odchýlením normály plochy – přibližně 1 mrad – a tedy je možné přesně měřit odchylky zhruba do 1 μm (pro větší nerovnosti jsou vhodnější dotykové stroje). Přičemž přímota a opakovatelnost polohování motorizovaných posuvů je lepší než 10 μm . Náklony (vybočování a kymácení) dané neideálností vedení jsou do 0,1 mrad. Kolébání („roll“) příčného posuvu je pod 0,03 mrad na 150 mm posuvu. Odchylky jsou tedy dostatečně malé na to, aby ovlivnily měření a umožňují tedy příčné posouvání artefaktu bez rozladění interferometru.

Nejistota měření interferometrem je převážně dána relativní nejistotou vzdálenosti svazků (zvyšování příčného rozlišení zvyšuje nejistotu měření) a vlivem zbytkové neparalelnosti svazků s posuvem. Opakovatelnost odchylek 1D profilu (bez přenastavování interferometru a ve stejné poloze artefaktu) pro sobě jdoucí měření je 1 nm i pro scany délky přes 100 mm. Byly provedeny také různé testy nejistoty měření. Na stolek podélného scanovacího posuvu bylo přidáno závaží (přes 8 kg), a byla měřena změna měřeného profilu oproti 1D scanu bez závaží. Systematický vliv tíhy stolku deformující celé zařízení v závislosti na poloze byl vyhodnocen jako menší než 1 nm pro měřený profil délky 150 mm. Byly provedeny i testy měření z druhé strany 1D scanu (otočení artefaktu o 180°). Dále byl sledován vliv fáze proužku interferometru na daný 1D profil. Díky nelinearitě interpolace interferenčního proužku dosahuje změna profilu v protifázi 3 nm. Je-li na signál detektoru aplikována korekce eliptičnosti, jsou výsledky i několikrát horší, a proto se pro vyhodnocování používají pouze nekorigované hodnoty. Homogenita teploty měřená teploměry

Pt100 je pro celý box do $0,1^{\circ}\text{C}$ (převážně mírným zahříváním motorem posuvu). Odpovídající vliv ohnutí svazku by tedy měl být menší než 1 nm. Dále byly provedeny testy změny divergence svazků a měření při různě úhlově rozladěném interferometru. I tyto parametry lze opakovaně nastavovat tak, že odpovídající vliv na nejistotu měření dává podobné výsledky jako u předchozích testů. Celková nejistota pro 150 mm plochu $\lambda/10$ je pod 10 nm.

Pro rekonstrukci 2D topografie odchylek od rovinnosti se měřící místa laseru volí buď v hexagonálním nebo čtvercovém rastru bodů. Protože je nutné provádět měření 1D scanů minimálně ve 3 směrech, aby bylo možno určit i torzi plochy, je výhodnější hexagonální uspořádání bodů (úhlopříčné směry u čtvercového rastru mají jiné vzdálenosti, což vyžaduje změnu vzdálenosti svazků a prodlužuje tak měření a zvyšuje jeho nejistotu). Další nevýhodou čtvercového rastru je menší pokrytí měřené plochy (při stejné vzdálenosti svazků interferometru je měřeno méně bodů na rastru).



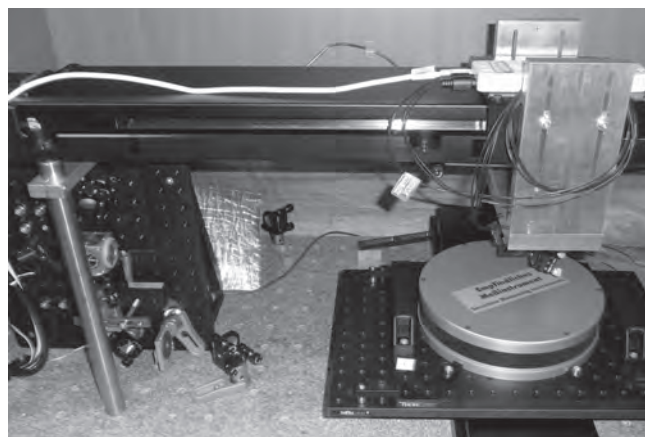
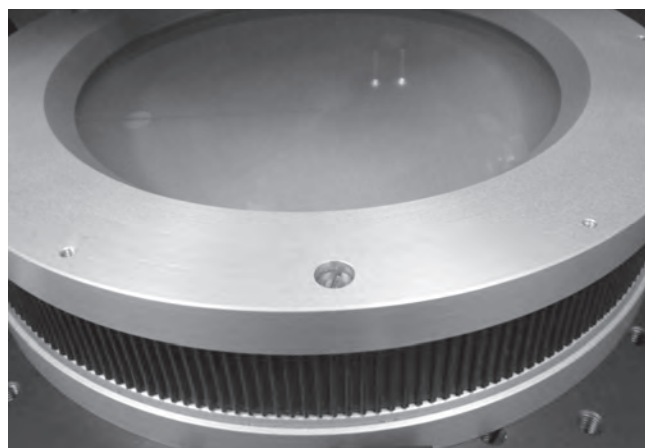
Obr. 2: Místa stop laserových svazků při odměrech (hexagonální a čtvercový rastr)

4. REKONSTRUKCE TVARU PLOCHY

Jednotlivé 1D profily jsou díky kolébání příčného posuvu každý v jiném přesně neznámém úhlu náklonu. Nelze je tedy přímo složit k sobě, protože pro takovéto výsledky potřebná znalost úhlu je zhruba 10 nrad ($0,002''$). Ovšem při měření dalších sad profilů v jiném směru lze posouváním a naklápěním 1D profilů sestavovat 2D topografii. Toto skládání 1D profilů lze realizovat různými způsoby. Nejlepším způsobem je přímo současná vzájemná lineární regrese všech 1D profilů z různých poloh a směrů. To by ale vedlo ke komplikované soustavě desítky vzájemně provázaných rovnic o desítkách neznámých. Proto byly pro validaci zvoleny dva jednodušší způsoby. U první metody se zvolí maximální trojúhelník v příčných souřadnicích jehož vrcholy jsou přímo dané (určují náhodnou rovinu) a tři 1D scany (dle potřeby naklopené) pak tvoří strany tohoto trojúhelníka. Na něj se nasadí další 1D scany a tak se postupně vytvoří 2D topografie. Druhá metoda spočívá v iteračním způsobu, kdy všechny 1D scany v daném směru jsou individuálně naklopeny regrese podle profilů daných v předchozím směru (na počátku je zvolena nulová směrnice). Poté se směr změny a regrese se opakuje dokola až jsou změny minimální (po 5. iteraci jsou v desetínách nm). Obě metody dávají výsledky srovnatelné na zhruba 1 nm, což umožňuje validovat výpočty.

5. MEZINÁRODNÍ POROVNÁNÍ

V současné době probíhá výzkumné porovnání EURA-MET 672 („Determination of form/topography of high-quality flats“ – „High-accuracy flatness intercomparison“) pilotované PTB, kterého se ČMI účastní s tímto zařízením. Je to hvězdicovité porovnání se 14 účastníky převážně z Evropy. Měří se rovinnost přesné Zerodurové optické desky o průměru 205 mm (oblast měření 150 mm). Ta je umístěna v hliníkovém krytu se snímatelným horním víkem (viz obr. 3). Protože nelze podle protokolu porovnání optickou desku vyjmout, je poloha a orientace artefaktu řešena opticky podle bodů mimo plochu, které jsou ale s ní mechanicky spjaty. Zerodurová deska je v krytu podepřena třemi korkovými podpěrami v místech pro minimální mechanický průhyb (který přesto dle výpočtů činí několik nm).



Obr. 3: Fotografie Zerodurového artefaktu a jeho měření v ČMI

6. ZÁVĚR

Realizované, relativně jednoduché a finančně nenáročné zařízení – diferenční interferometr – tedy umožňuje měřit rovinnost optické plochy s přesností na jednotky nanometrů. Nánavnost mu zajišťuje přímočaré šíření svazku a použitý He-Ne laser 633 nm. Podle sdělení CCL [4] totiž má již i tento nestabilizovaný He-Ne laser bez návaznosti hodnotu vakuové vlnové délky 632,9908 nm s rozšířenou nejistotou 3 ppm. Výsledky mezinárodního porovnání měření přesných optických ploch zatím nejsou známy.

LITERATURA

- [1] Griesmann U., Wang Q., Soons J., „Three-flat tests including mounting-induced deformations“ *Optical Engineering* Vol. **46** (2007), 093601-1-15
- [2] Schulz M., Geckeler R. D., Illemann J., „High accuracy form measurement of large optical surfaces“ *Proc. SPIE* Vol. **5190** (2003), str. 211-220
- [3] Křen P., „A simple interferometric method for determining the flatness of large optical flats with 1 nm repeatability“ *Meas. Sci. Technol.* Vol. **19** (2008), 107001 (5pp)
- [4] Stone J. A., Decker J. E., Gill P., Juncar P., Lewis A., Rovera G. D., Viliesid M., „Advice from the CCL on the use of unstabilized lasers as standards of wavelength: the helium–neon laser at 633nm“ *Metrologia* Vol. **46** (2009), str. 11-18



LASEROVÝ ODMĚŘOVACÍ SYSTÉM PRO PŘESNÉ MĚŘENÍ VZDÁLENOSTÍ

**Ing. Ondřej Číp, Ph.D., Ing. Josef Lazar, Dr.,
Ing. Zdeněk Buchta, Ph.D., Ing. Martin Čížek,
Ing. Břetislav Mikel, Ph.D., Mgr. Radek Šmíd**

Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i.

1. ÚVOD

Současná metrologie délky používá definici jednotky 1 metr, což je délka dráhy, kterou urazí světlo ve vakuu za $1 / 299\,792\,458$ sekundy. Tato definice se v národních metrologických institutech realizuje pomocí normálových laserů, které vyzařují koherentní záření s přesně určenou délkou vlny. Pakliže je toto světlo použito pro optické odměřování délky, získáváme přístroj zvaný laserový interferometr, který měří s přímou návazností na tuto definici. Principem optického měření je interference (skládání) dvou světelných vln, které pokud jsou ve fázi, vytvoří na výstupu interferometru pole světlé, pokud jsou v protifázi vidíme pole tmavé. Jakmile posouváme měřicí zrcadlo jedné ze těchto vln v prostoru neznámé měřené vzdálenosti, v rytmu tohoto posuvu se střídavě objevují na výstupu pole tmavá a světlá. Pouhým sečtením počtu těchto světelných změn pak zjistíme, o kolik vlnových délek jsme se posunuli, jinými slovy, kolik vlnových délek světelné vlny se „vejde“ do neznámé vzdálenosti. Následným vynásobením tohoto počtu vlnovou délkou (u červeného laseru např. 633 nm) pak již víme, kolik tato vzdálenost měří, a to již přímo v metrech.

Základním dílkem měření vzdálenosti interferometrem je tedy vlnová délka, což ovšem při velikosti 633 nm je rozlišení poměrně hrubé. Proto se u těchto optických přístrojů používá dělení dílku (interferenčního proužku) na zlomky, které mohou dosahovat řádu jednotek nanometrů. Tyto metody jsou v dnešní době dobře propracované a oddělení Koherenční optiky Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky (ÚPT AV ČR) se na výzkumu v této oblasti dlouhodobě podílí. Výzkumnému týmu ÚPT AV ČR se podařilo v minulých letech dokonce zavést originální metodu, která zajišťuje linearitu dělení interferenčního proužku, která sahá až k desetině nanometru, tedy vzdálenosti srovnatelné s velikostí atomů.

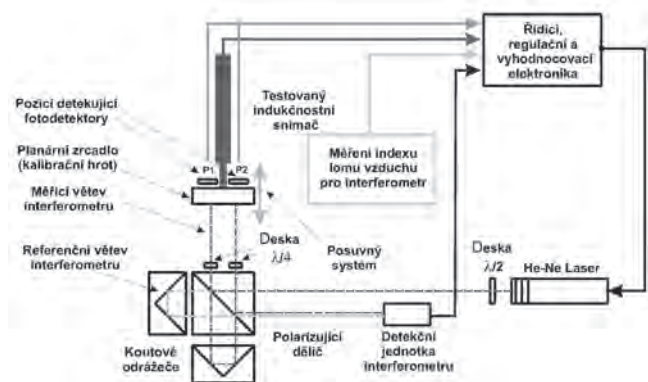
2. PŘESENÉ MĚŘENÍ VZDÁLENOSTÍ JE KLÍČEM KE KONKURENCESCHOPNOSTI ČESKÉHO PRŮMYSLU

Vstup českých průmyslových podniků na globální světové trhy klade čím dál vyšší požadavky na kvalitu a tím i konkurenceschopnost nabízených výrobků. Jde-li o výrobky přesného strojírenství, jedním z měřítek kvality je jejich vysoká geometrická přesnost. Přesnost výroby se postupně zvyšuje a již nyní lze najít oblasti výroby, které díky nasazení metod nanotechnologie umějí dosáhnout geometrických rozměrů produktů o velikosti v řádu nanometrů. Protože ne vždy lze použít pro tuto výrobu laserové interferometry (vysoká cena, citlivost na pracovní podmínky apod.), jejich výrobci jsou nuceni používat elektronické snímače délky, především snímače indukčnostní, kapacitní a optoelektrická pravítka. Jedním z předpokladů, jak zajistit vysokou přesnost měření délky elektronickými snímači, je kalibrace jejich stupnic pomocí laserových interferometrů. Pracují-li laserové interferometry jako přesné normály pro kalibrace, nazýváme je délkovými komparátory, pro oblast nanoměření pak nanokomparátory.

Oddělení Koherenční optiky ÚPT AV ČR, Český metrologický institut a firma Mesing, s.r.o., v současné době dokončují výzkumný projekt, jehož cílem je kompaktní laserový nanokomparátor pro přesné kalibrace délkových měřidel.

3. TECHNICKÉ ŘEŠENÍ LASEROVÉHO ODMĚŘOVACÍHO SYSTÉMU

Laserový nanokomparátor (**obr. 1**) je řešen jako automatický odměřovací systém, kde kalibrační sondou je posuvné rovinné zrcadlo. Na střed měřicího zrcadla je umístěn dotyk testovaného snímače délky. Dráha posuvu zrcadla je vymezena soustavou precizních lineárních vedení s minimální vůlí a poloha zrcadla je řízena kombinací krokového motoru (hrubý posuv 100 mm s rozlišením 50 nm) a třemi piezoelektrickými měniči (jemný posuv 5 μ m s rozlišením 0,04 nm). Z opačné strany měří-



Obr. 1: Schéma optické soustavy laserového interferometru

ciho zrcadla je umístěna optická soustava laserového interferometru, který je srdcem celého nanokomparátoru.

Jako zdroj laserového záření je použit stabilizovaný He-Ne laser pracující na vlnové délce 633 nm. Světlo z laseru je vedeno optickým vláknem na vstup interferometru, kde je pomocí děliče světla rozděleno na dva světelné svazky: referenční větev a měřicí větev. Jednou z novinek této optické soustavy interferometru je právě uspořádání měřicí větve, která je realizována v ose měření jako dvouprůchodová, čímž je dosaženo zmenšení základního dílku na čtvrtinu vlnové délky (tj. 158 nm).

4. UNIKÁTNÍ METODA STABILIZACE POLOHY KALIBRAČNÍHO HROTU

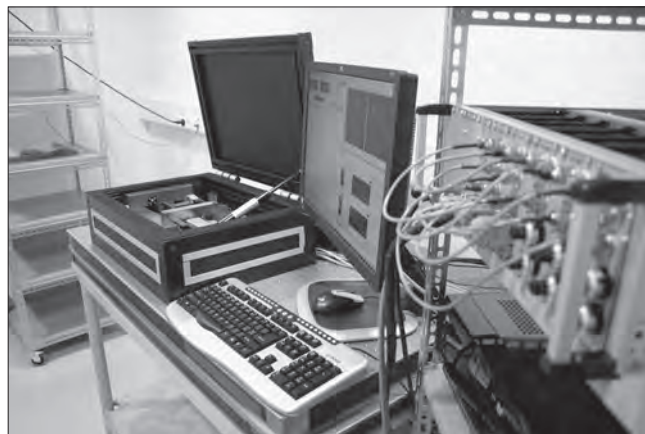
Použití lineární vedení, na kterém je umístěno zrcadlo interferometru, vykazuje velmi malý odklon od měřicí osy snímače (typicky $< 100 \mu\text{rad}$). Časem však dochází k mechanickému opotřebení a chyba kolébání a vybočování (tzv. „pitch“ a „yaw“ error) se zvyšuje až několikanásobně. V takovém případě interferometr měří s chybou a navíc s hystezí. To vše snižuje reprodukovatelnost měření a tedy i nejistotu kalibrace. Pro rozsahy snímačů o délce např. 25 mm může způsobit zhoršující se vůle vedení chybu až několik desítek nanometrů. Pro zamezení těchto nežádoucích vlivů byla výzkumným týmem ÚPT AV ČR vyvinuta metoda tzv. aktivní stabilizace náklonu zrcadla, která zhoršující se vůli lineárních vedení kompenzuje.

Metoda využívá zmíněných tří piezoelektrických měničů, které upevňují zrcadlo na jezdec lineárního vedení. Měníče zrcadlo jemně posouvají v ose měření a zároveň zrcadlo mohou naklápět ve svislé či vodorovné ose. Aktivní stabilizace náklonu je řízena sledováním místa dopadu druhého průchodu měřicího svazku. Zrcadlo je polopropustné a tudíž fotodetektor P2, který je umístěn za zrcadlem, snímá polohu dopadu světelného svazku. Jakmile dojde k náklonu zrcadla vlivem vůle vedení, regulační algoritmus provede akční zásah a pomocí piezo měničů zajistí zpětný příklon zrcadla do správné polohy (přesně kolmé na osu měření). Regulační smyčka, která je realizována na bázi signálových procesorů, tak po celou dobu kalibrace snímače nežádoucí náklony zrcadla plně vykompenzuje. Metoda kompenzace zaručuje odklon obou os měřicího zrcadla interferometru maximálně 20 μrad .

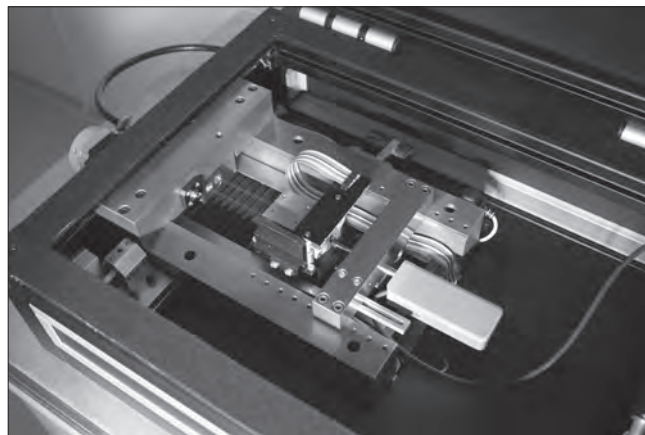
Po proběhnutí laserového svazku měřicí větvi dochází na výstupu interferometru k detekci interference. Toto provádí detekční jednotka s kvadraturním výstupem, která zajišťuje velmi jemné dělení základního dílku (proužku) až na desetiiny nanometrů.

5. MECHANICKÁ KONSTRUKCE LASEROVÉHO ODMĚŘOVACÍHO SYSTÉMU

Základna laserového nanokomparátoru je konstruována jako litinový rám, který spojuje referenční bod interferometru a kalibrovaného snímače v pevně definované poloze (obr. 2, obr. 3). Samozřejmostí je i monitorování teplotních změn celého přístroje souborem teplotních čidel. Rovněž je monitorována i teplota, vlhkost a tlak vzduchu, který obklopuje měřicí větve laserového interferometru. Je to z toho důvodu, že laserová měření na vzduchu jsou ovlivněna inde-



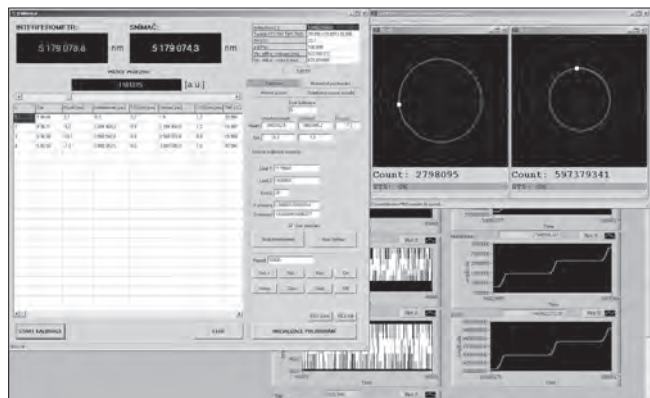
Obr. 2: Laserový nanokomparátor pro kalibrace délkových snímačů – celkový pohled



Obr. 3: Laserový nanokomparátor – detail

xem lomu atmosféry a proto je nezbytné přepočítat naměřené údaje z interferometru přes tuto hodnotu.

Průběh kalibrace je řízen počítačem PC, který je vybaven specializovaným softwarem pro zpracování výsledků kalibrace (obr. 4). Umožňuje grafické zobrazení průběhu kalibračního procesu, vynesení kalibračních křivek a také i výpočty korekčních parametrů pro testované snímače.



Obr. 4: Pohled na řídicí a kalibrační software nanokomparátoru

6. SOUČASNOST A BUDOUCNOST PŘÍSTROJE

Nanokomparátor vznikl během necelých tří let za přispění soukromých prostředků především firmy Mesing a finanční podpory programu Tandem FT-TA3/133 z Minister-

stva průmyslu a obchodu. Řešitelský tým za něj získal na 50. Mezinárodním strojírenském veletrhu v Brně Cenu redakce Technického týdeníku a Cenu časopisu Automatizace. Nyní se velmi pečlivě vyhodnocuje kalibrační měřicí schopnost (tzv. celková nejistota) tohoto přístroje. Předběžné výpočty ukazují, že tato hodnota se bude pohybovat do 20 nm pro rozsah měření 25 mm. Zároveň se v laboratořích ÚPT AV ČR testují kalibrace celé řady délkových snímačů. Kromě indukčních snímačů, které vyrábí firma Mesing, jsou testovány i snímače firem ESSA ČR a Heidenhain SRN.

Řešitelský tým pracuje na zařazení nanokomparátoru do národní metrologické soustavy ČR, kdy tento systém bude k dispozici výrobcům elektronických snímačů délky. Firma Mesing zároveň plánuje funkční vzorek nanokomparátoru převést do komerční podoby a nabízet jej pro metrologická střediska větších strojírenských firem a metrologických laboratoří v Evropské unii a Švýcarsku. Tento přístroj má tak velký potenciál stát se nejen potřebným zařízením v národních podmínkách ČR, ale je i příkladem mezioborové spolupráce výzkumných institucí se sférou soukromých inovačních podniků.



POKROK V PRŮMYSLOVÉ PŘÍSTROJOVÉ TECHNICE

Čeněk Nenáhlo, dipl. tech.

Česká metrologická společnost

Abstrakt

V článku jsou popsány některé měřicí přístroje a měřicí metody pro kontrolu kvality výroby v průmyslu, zejména ve strojírenství.

1. ÚVOD

Délka patří v průmyslových organizacích k nejméně používaným veličinám, zejména v oborech výroba – montáž, kde délková měření a měření navazujících veličin (geometrické parametry, textura povrchu) dosahují až 80 %, popř. 90 % všech měření v daném provozu. Při posuzování délkových měřicích operací, navazujících na výrobní operace, je třeba uvažovat požadovanou přesnost měření, ale i dobu trvání měřicí operace. Průměrná doba měření představuje cca 5 % času výrobní operace, u složitých operací, např. kontrole ozubených kol, až 25 % výrobního času. Při délkových měřeních se tedy musí brát zřetel jak na technické, resp. metrologické, tak i na ekonomické aspekty.

2. CO OVLIVŇUJE PŘESNOST ROZMĚROVÝCH MĚŘENÍ?

Na délková měření jsou v průmyslové výrobě kladeny vysoké požadavky. Jde jednak o **soustavné zvyšování**

přesnosti strojírenské výroby: odhadem až o jeden stupeň přesnosti IT (viz ČSN EN 20286:1996) každých patnáct až dvacet let (což představuje zpřesnění výrobních tolerancí až o 50 %, popř. i 60 %), alespoň pokud jde o výrobní tolerance součástí, ovlivňujících funkci, spolehlivost a životnost vyráběných strojů.

Na toto zpřesnění výroby musí reagovat i zvyšování přesnosti měřicích metod a měřicích zařízení. I když není rozlišení měřicího přístroje rozhodující charakteristikou přesnosti, přesto podává výstižný obrázek o požadavcích, které se z hlediska přesnosti na přístroj kladou. Byla-li před několika lety požadována rozlišení v oblasti mikrometrů a jejich zlomků, nyní se u špičkových přístrojů dostáváme do nanometrické oblasti. Dalším významným prvkem, který ovlivňuje délková, popř. rozměrová a geometrická měření, je **soubor norem GPS** (Rozměrové a geometrické specifikace produktů a jejich ověřování – Dimensional and geometrical specifications and verification). Jde o specifickou oblast mezinárodních norem ISO, která zahrnuje požadavky na rozměrové a geometrické tolerování, značení na výkresech, potřebnou měřicí techniku, zařízení pro její kalibraci a způsob stanovení nejistot měření.

S ohledem na zabezpečení optimální kvality výroby vyplývá potřeba snížit co nejvíce dobu, která uplyne mezi vyrobením neshodné součásti a její identifikací. Ve snaze zkrátit tuto dobu na minimum se měřicí operace přesouvají co nejblíže vlastní výrobě. Metrologické podmínky výrobních

středisek, např. CNC obráběcích center, nejsou právě příznivé přesnému měření, ať již jde o prudké výkyvy teploty nebo chvění výrobních center, dále o nepříznivý vliv chladicích a řezných kapalin a všudypřítomnou olejovou mlhu. To vše vytváří pro měření podmínky, které – i když s určitou nádsázkou – někteří výrobci měřidel označují jako *metrologické peklo*.

Z následující tabulky je zřejmé, že **teplotní chyby** mohou dosahovat značných hodnot a to i tehdy, jsou-li teploty měřené součásti a měřidla vzájemně vyrovnané (liší-li se ovšem od teploty referenční). V následující tabulce jsou uvedeny tyto chyby pro různé materiály měřených součástí (ocel, mosaz, hliníkové slitiny, polyamid) a pro teploty typické pro různé fáze výroby ve strojírenské dílně: 20 °C, 25 °C, 30 °C, 35 °C. Hodnoty v tabulce se vztahují k měřené délce 100 mm a pro měřidlo z oceli.

Měřidlo: ocel měřená délka: 100 mm		Teplota			
		20 °C	25 °C	30 °C	35 °C
Materiál součásti	součinitel α [10^{-6} °C ⁻¹]	systematická teplotní chyba ΔL μ m			
polyamid	100	0	44	89	133
hliníková slitina	24	0	6,3	13	19
mosaz	18	0	3,2	6,5	9,7
ocel	11,5	0	0	0	0

Ve skutečnosti může být teplotní chyba ještě větší, uvádíme-li neznámou složku určení hodnoty teplotního součinitele roztažnosti a teploty (měřené součásti a měřidla). I při vyrovnání teplot měřidla a měřené součásti může docházet mezi nimi k drobným rozdílům. Rovněž skutečný teplotní součinitel roztažnosti nemusí odpovídat hodnotě tabulkové. To se projeví zejména při odhadu nejistoty měření: obvykle se vychází z předpokladu, že nejistota stanovení teplotního součinitele roztažnosti může dosahovat 10 % její jmenovité hodnoty a že teplota je určena s chybou 1 K [1].

V následujícím přehledu se pokusíme orientovat na některé důležité oblasti strojírenské výroby, kde měření ovlivňuje významnějším způsobem kvalitu výroby, resp. kvalitu práce technické kontroly nebo metrologie a uvedeme typické představitele určitých vývojových směrů. S ohledem na omezený rozsah článku nelze zařadit všechny důležité metrologické tendence v průmyslové výrobě. Upouštíme proto od určité encyklopedičnosti a s rizikem jisté nevyváženosti se orientujeme pouze na některé nové, resp. perspektivní oblasti. Při výběru jednotlivých přístrojů, na kterých demonstrujeme vývojové směry, se zaměřujeme na taková zařízení, u kterých můžeme doložit špičkové parametry, např. s ohledem na přesnost měření (největší dovolená chyba měření MPE_E) nebo specifický měřicí rozsah. Přitom jsme si vědomi, že s ohledem na požadavky přesnosti měření dostačí mnohdy zájemci přístroj, který sice nedosahuje uvedených

špičkových metrologických parametrů, ale s ohledem na celkové hodnocení dané měřicí operace je v daném případě ekonomicky výhodnější.

Pokud uvádíme konkrétní přístroj, v závorce doplníme jeho výrobce, popř. dodavatele. Pochopitelně se pokusíme charakterizovat tato měřidla z hlediska přesnosti, zejména pomocí největší dovolené chyby měření MPE_E . Uvádíme-li ve výrazu mezní chyby měřenou délku L , rozumí se tato délka v milimetrech.

3. MĚŘENÍ V DÍLNĚ

3.1 Komunální měřidla

V průmyslové dílně nebo obrobně se používají především jednoduchá dílenská (komunální) měřidla. Na první pohled by bylo neúčelné hledat mezi těmito měřidly případy inovačních řešení. Stačí však vybrat jedno z nejstarších měřidel tohoto druhu, třmenový mikrometr, který se používá více než 150 roků, aby se ukázalo, že zásadní změny mohou nastat i v současné době. U **mikrometru QuantuMike** (Mitutoyo) s měřicím rozsahem (0 až 25) mm a (25 až 50) mm dochází ke zvětšení



Obr. 4: Třmenový mikrometr QuantuMike

je hodnota nižší než uvádějí příslušné normy DIN 863 nebo ČSN ISO 3611 (u obou norem je mezní chyba mikrometru srovnatelného měřicího rozsahu $G = 4 \mu$ m, popř. $F_{max} = 4 \mu$ m). K velkým změnám dochází digitalizací dílenských měřidel, ať již jde o posuvky, hloubkoměry, dutinoměry, třmenové mikrometry. Měřidla jsou opatřena výstupem, který umožňuje připojení vhodného vyhodnocovacího zařízení. I nejjednodušší vyhodnocovací jednotky jsou vybaveny sloupcovou tiskárnou. Příkladem je **mini-procesor DP-1VR** (Mitutoyo),



Obr. 2: mini-procesor DP-1 VR (Mitutoyo)

kteří dokáže zpracovat až deset tisíc dat, umožňuje jejich číslcový a částečně i grafický záznam a výpočet základních statistických charakteristik (aritmetický průměr, rozpětí, výběrovou směrodatnou odchylku, v některých případech i výpočet způsobilosti stroje nebo procesu, popř. vyhotoví regulační kartu). Předvo-

lí-li se toleranční meze, na grafickém záznamu se vyznačí automaticky hodnoty ležící vně těchto mezí apod.

Trh s komunálními délkovými měřidly je značně rozsáhlý, uvádíme ještě další výrobce jako je Mahr, Hahn + Kolb, Käfer, Kordt (všichni Německo), TESA, Sylvac (oba Švýcarsko), Marposs (Itálie), Bowers Metrology Ltd. (Velká Británie), Schut geometrical metrology (Nizozemí), brněnský MESING a další. Jako zajímavost připomínáme některé výrobce čínských měřidel, např. Qinghai Measuring and Cutting Tools Co., kteří začínají pronikat na mezinárodních veletrzích (např. CONTROL Stuttgart) do Evropy. Možná že to připomene některým našim pamětníkům nástup japonských výrobců měřidel na počátku druhé poloviny minulého století.

3.2 Výškoměry

Jednoduchá dílenská měřidla (posuvky, trny, měrky apod.) ve spojení s průměrnou deskou umožňovala řešit v minulosti i poměrně složité a pracné měřicí úlohy, zejména proměřování skříňových součástí. Jedním z důležitých měřidel, uplatňovaným při těchto operacích, byl i posuvný novníkový výškoměr, u kterého byla jako snímací prvek použita rýsovací jehla.

V průběhu doby došlo k rychlému rozmachu výškoměrů, ze kterých se staly progresivní měřicí přístroje se svislou osou měření, založené na elektronickém principu. Ve stojanu výškoměru je uloženo měřítko (zpravidla inkrementální), po stojanu se posouvá měřicí hlava s elektronickým snímačem. Výškoměry umožňují měření délek, průměrů, roztečí, dále měření geometrických parametrů jako přímost, kolmost, sklon a rovinnost, ve svislé (1D) souřadnici, ale i vyhodnocování v režimu 2D. Hmotnost těchto výškoměrů je poměrně velká. Aby bylo možno zabezpečit jejich plynulý posun po průměrné desce, jsou některé typy výškoměrů opatřeny kompresorem umístěným v základové části výškoměru. Tak se docílí, že se výškoměr posouvá po průměrné desce lehce na vzduchovém polštáři. Největší dovolená chyba MPE_E u špičkových výškoměrů nepřekročí $(1,1 + L/1000) \mu m$.

Příkladem moderního výškoměru je **lineární výškoměr LH 600** (Mitutoyo) se zdvihem měřicí hlavy 600 mm, resp. měřicím rozsahem 972 mm, rozlišením (volitelným) 0,1 μm , popř. 1 μm nebo 10 μm . Výsledky měření a vyhodnocování se zobrazují na grafickém displeji. Výškoměr může pracovat i v poloautomatickém režimu.

K rychlému rozšíření těchto výškoměrů přispívá i skutečnost, že do jisté míry (v omezeném rozsahu) mohou nahradit i souřadnicové měřicí stroje, zvláště tehdy, je-li ekonomická návratnost těchto strojů obtížně prokazatelná. Další oblastí, kde se mohou výškoměry uplatnit, jsou orýsovací operace, kde výškoměr představuje výrazný racionalizační prvek.

Připomínáme ještě další výrobce výškoměrů, např. Mahr (Německo), Metris (Velká Británie), SYLVAC, TESA, Trimos (všichni Švýcarsko).

3.3 Měřicí stanice

Jde zejména o zakázkově vyráběná zařízení používaná při kontrole kvality výroby ve vyšších typech výrob (sériová až hromadná výroba). Některé stanice jsou orientovány na ruční vkládání měřených součástí, jiné jsou poloautomatické až automatické a umožňují začleňování do výrobních linek, dávají možnost stoprocentní kontroly kvality, požadavek tedy, který se prosazuje jak v automobilovém průmyslu, tak i v dalších průmyslových odvětvích. Typickým rysem pro zakázková měřicí zařízení je výrazná spolupráce zákazníka při návrhu měřicí stanice. Potěšitelné je, že se tato spolupráce nevztahuje pouze na řešení ryze technických problémů (navržené měřicí metody, logistika), ale i na otázky související se zabezpečením jednotnosti a přesnosti během provozu měřicí stanice.

Příkladem může být **automatická měřicí stanice KS-528** (AMEST), která slouží ke stoprocentní kontrole železničních kol, vyráběných v nepřetržitém třisměnném provozu. Zařízení kontroluje pomocí systému laserů a speciálních



Obr. 3: Lineární výškoměr LH 600 (Mitutoyo)



Obr. 4: Automatická měřicí stanice KS-528 (AMEST)

kamer více než 30 parametrů na jediném kole. Manipulaci měřených kol zabezpečuje otočný manipulátor. V návaznosti na předchozí odstavec podotýkáme, že během konstruování spolupracovala při návrhu zabezpečení jednotnosti a přesnosti stanice také akreditovaná kalibrační laboratoř výrobce (AMEST).

Zakázkové měřicí stanice vyrábí několik dalších firem, např. brněnský MESING, měřicí stanice vyráběné sériově nabízejí firmy HOMMEL Etamic, Mahr, Carl Zeiss (všechny Německo) atd.

4. MĚŘENÍ V METROLOGICKÉ LABORATOŘI

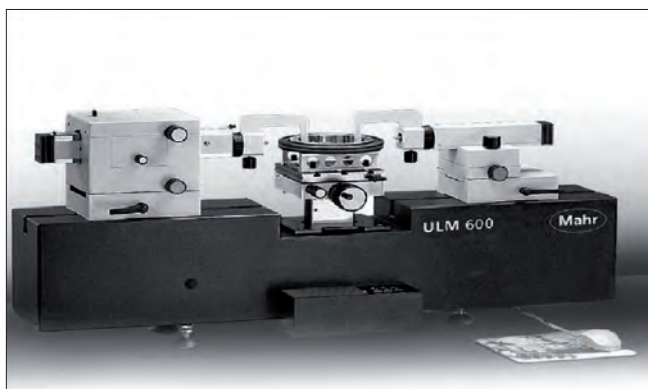
4.1 Délkoměry

Délkoměry patří k přístrojům základního vybavení každé délkové metrologické laboratoře. Obvykle se vyrábějí ve vodorovném provedení, rozsáhlé příslušenství umožňuje univerzálnost použití: kalibrace ztělesněných měr a přístrojů (mezni kalibry, nastavovací kroužky, třmenové kalibry, závitové a kuželové kalibry, číselníkové úchylkoměry, mikrometrické šrouby) a přesná měření obrobků. Z hlediska metrologického je důležité dodržování Abbeho komparátorového principu.

Poznámka: Podle Abbeho komparátorového principu má být přístroj uspořádán tak, aby měřený rozměr byl pokračováním měřítka přístroje, resp. aby měřítka přístroje a osa měření ležely na společné přímce.

Jako měřicí systém délkoměru bývá použito inkrementální měřítka (rozlišení 0,01 μm , popř. 0,1 μm). Některé typy délkoměrů s větším měřicím rozsahem jsou vybaveny jako měřicím prvkem laserovým interferometrem (např. ULM L s měřicím rozsahem až 1 620 mm).

Příkladem vodorovného přístroje je **univerzální měřicí přístroj ULM 600** (Mahr). $\text{MPE}_E = (0,1 + L/2\,000) \mu\text{m}$ (platí pro celý měřicí rozsah $L = 600$ mm, pro rozměr $L = 120$ mm je $\text{MPE}_E = 0,16 \mu\text{m}$). Známé systematické chyby



Obr. 5: Délkoměr ULM 600 (Mahr)

přístroje se korigují automaticky systémem CAA (Computer Aided Accuracy), pro měření teploty (přístroje i prostředí) jsou určeny dva až čtyři senzory.

Obdobné délkoměry vyrábí např. TRIMOS (Švýcarsko).

4.2 Měřicí mikroskopy

Měřicí mikroskopy ovládly metrologické laboratoře ve druhé polovině minulého století. Jejich typická úloha, měření ve dvourozměrných (pravoúhlých nebo polárních) souřadnicích umožňovala zejména optická měření vnějších závitů a různých přesných profilů. Měří se v průchozím (dia-) nebo odraženém světle (epi-). Obsluha přístroje zaměřuje nitkovým křížem jednotlivé měřené body a jejich souřadnice čte na příslušných měřítkách. Novější měřicí mikroskopy jsou vybaveny počítačem.

Příkladem moderního měřicího mikroskopu je **videomikroskop iNEXIV VMA2520** (NIKON) s měřicími rozsahy v rovině $X - Y$ (250 x 200) mm, zapojení třetí (svislé) souřadnice ukazuje již ke tříosovým měřicím strojům, i když přesnost měření v ose Z je podstatně nižší.

K dalším výrobcům měřicích mikroskopů patří např. Mitutoyo, OLYMPUS (oba Japonsko).

4.3 Kruhoměry

Přístroje pro měření kruhovitosti se uplatňují nejen v ložiskářském průmyslu, ale i ve strojírenských organizacích. Jde o dílenské i laboratorní přístroje, určené jak pro měření rotačních součástí, např. ložiskových kroužků, tak i kruhovitosti otvorů ve skříňových součástech, např. automobilového průmyslu. Přesnost měření na těchto přístrojích je odvozena od přesnosti rotace otočného stolu: u špičkových zařízení, např. **Talyrondy 295** (Taylor Hobson), kruhové házení stolu nepřekročí 0,02 μm , úchylka kruhovitosti přesného etalonu používaného při kalibraci, popř. seřízení nepřesáhne 10 nm. K přesnosti měření přispívá i automatické vyrovňování měřené součásti na hodnotu menší než 0,2 μm . Rozlišení přístroje je 1,2 nm. 18 000 datových bodů, snímaných po obvodu měřeného povrchu představuje solidní základnu pro přesné hodnocení. Kvalita ložisek se vyhodnocuje programem Ultra, který umožňuje mj. harmonickou analýzu, rychlostní analýzu, kombinující informace o vlnitosti povrchu a rychlosti, které lze využít ke zlepšení predikce funkční výkonnosti ložisek, dále hodnocení úchylek tloušťky stěny na vnitřních a vnějších drahách ložisek apod.

Vedle firmy Taylor Hobson (Velká Británie) dodává kruhoměry také Mahr, Carl Zeiss, Hommel Etamic (všechny Německo) a další.

Při kontrole kvality výroby přesných rotačních částí hraje stále větší úlohu jak úchylky tvaru, např. kruhovitost, tak i složky textury povrchu, zejména drsnost (viz kap. 6) a jejich vzájemné působení. Jak pro kruhovitost, tak i pro měření textury jsou k dispozici vhodné přístroje. U některých z nich však lze měřit oba parametry (kruhovitost i texturu povrchu) na jediném přístroji v jednom měřicím běhu. Jde např. o **přístroj HommelRoundscan** (Hommel-Etamic). Měřicí sonda přístroje je vybavena dvoustranným dotekem s různým provedením hrotu na každé straně. Měření dvou různých parametrů na jediném přístroji přináší vedle ryze metrologických i ekonomické výhody. Zatímco u hřídele převodovky měřené odděleným způsobem (kruhovitost a následně drsnost) trvalo měření asi 16 minut, bylo při měření na jediném přístroji dosaženo měřicího času cca 6 minut.

5. SOUŘADNICOVÉ MĚŘICÍ STROJE

5.1 Vývoj souřadnicových měřicích strojů

Souřadnicové měřicí stroje (dále jen CMM – Coordinate Measuring Machines) prošly velmi rychlým vývojem a patří k nejdynamičtěji se rozvíjejícím měřicím prostředkům ve strojírenství. Prvé CMM, které se ve strojírenských závodech objevily v šedesátých letech minulého století, byly odvozeny metrologicky od měřicích mikroskopů a technologicky od

NC frézek. Tyto CMM byly většinou používány v metrologických laboratořích (to ostatně platí v případě extrémních požadavků na přesnost měření dosud), postupně se však přesunovaly do výrobních středisek. Přesnost CMM nejvyšších metrologických kvalit lze v současné době charakterizovat největší dovolenou chybou $MPE_E = (0,3 + L/1\,000) \mu\text{m}$, což představuje pro měřenou délku $L = 120 \text{ mm}$ $MPE_E = 0,42 \mu\text{m}$, v případě $L = 630 \text{ mm}$ $MPE_E = 1,0 \mu\text{m}$.

Prvotním vybavením CMM pro snímání měřených prvků jsou dotykové senzory, ať již jde o spínací hlavy (při snímání měřeného bodu se poskytne pouze spouštěcí signál, pomocí kterého se určí souřadnice měřeného bodu dynamickým způsobem měření) nebo měřicí hlavy, které mají interně zabudovaný vlastní souřadnicový systém v rozsahu několika milimetrů, u kterých výsledné hodnoty jsou dány překrytím měřených hodnot senzoru a přečtených souřadnic na odměřovacích systémech CMM (tzv. statický způsob měření). Zvláštním druhem snímání rozměrů je skenování (scanning – souvislé snímání souřadnic). Další perspektivní oblastí CMM je reverzní inženýrství (digitalizace).

Poznámka: Podstatou reverzního inženýrství (digitalizace) je vytvoření technické dokumentace ze hmotného (nezdokumentovaného) fyzického objektu, např. lisovací formy nebo zápusky. Digitalizace zahrnuje snímání prostorových souřadnic měřeného objektu, zpracování naměřených dat, jejich převod a vytvoření digitálního modelu objektu.

Vedle dotykových snímačů se u CMM ve snaze rozšířit možnosti jejich nasazení používají i optické senzory, např. bezdotykové senzory, laserové triangulační senzory apod. Vzniká tak nová kategorie CMM, **multisenzorové měřicí stroje**. Příkladem může být CMM **VideoCheck UA** (Werth-Messtechnik) s měřicími rozsahy 400 mm (X, Y), 200 mm (Z) a rozlišením 1 nm. Aby byla dosažena velká přesnost měření (UA – Ultra Accuracy), musí být zachován přísný teplotní režim: teplota ovzduší $20,0 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,1 \text{ K}$, gradient teploty max. $0,1 \text{ K/h}$. V tom případě je největší dovolená chyba MPE_E dána výrazem:



Obr. 6: Multisenzorový měřicí stroj Werth-VideoCheck UA (Werth-Messtechnik)

	MPE_E obecný tvar	MPE_E pro $L = 120 \text{ mm}$
jednosměrné měření (1 D)	$(0,15 + L/900) \mu\text{m}$	$0,28 \mu\text{m}$
obousměrné měření (1 D)	$(0,35 + L/900) \mu\text{m}$	$0,48 \mu\text{m}$
obousměrné měření (2 D)	$(0,50 + L/900) \mu\text{m}$	$0,63 \mu\text{m}$
obousměrné měření (3 D)	$(0,75 + L/900) \mu\text{m}$	$0,88 \mu\text{m}$

Poznámka: Při nedodržení podmínek teplotního režimu se MPE_E zvýší.

K výrobcům CMM dále patří Carl Zeiss, Leitz, WENZEL Präzision, Thome (všichni Německo), LK Ltd. (Velká Británie), DEA (Itálie), Mitutoyo (Japonsko), CE Johansson (Švédsko) atd., někteří výrobci vytvářejí sdružení, např. Hexagon Metrology.

5.2 Teplotní vlivy u souřadnicových měřicích strojů

CMM, používané v dílenském prostředí, jsou vystaveny nepříznivým podmínkám – změny teploty a její kolísání ovlivňují výrazně dosažitelnou přesnost měření. Některé CMM jsou vybaveny korekčními systémy. Snímače měří průběžně teplotu rozhodujících komponentů CMM (např. 2 snímače pro každou z os X a Y, jeden pro osu Z) i teplotu kontrolované součásti a korigují případné teplotní chyby v reálném čase.

Pozornost se věnuje i způsobu vyjádření největší dovolené chyby MPE_E , popř. nejistotě měření s ohledem na teplotu. Výrobci CMM totiž obvykle zahrnují do MPE_E i její příslušnou teplotní složku a při stanovení této chyby počítají s maximální dovolenou odchylkou teploty od teploty referenční, např. $(18 \text{ až } 28) \text{ }^\circ\text{C}$. Při stanovení MPE_E se tedy vychází z nejnepříznivější hodnoty okolního prostředí, která se však v daném případě nemusí vůbec vyskytovat. Je zřejmé, že měří-li se při méně odlišné teplotě, než odpovídá maximální dovolené odchylce, jsou v MPE_E vyjádřené tímto způsobem zbytečně velké příspěvky, které se následně projeví např. při odhadu nejistoty měření. Proto někteří výrobci CMM udávají různé MPE_E s ohledem na rozdílné dovolené teplotní intervaly.

Jako příklad uvádíme **CMM výložníkového typu BRAVO HA** (DEA) (rozlišení $1 \mu\text{m}$) s jedním nebo dvěma rameny, určené pro zapojení přímo do výrobního procesu.

Poznámka: S ohledem na nejednotnou terminologii se používá pro tyto stroje pojem stroj s vodorovným ramenem, popř. stojanový stroj.

Tomu také odpovídají požadavky na dodržování teploty prostředí, ve kterém tyto stroje pracují a příslušné MPE_E . Viz **tabulka**.

Měřicí rozsah mm			CMM s jedním ramenem	CMM se dvěma rameny
X	Y	Z	$MPE_E \mu\text{m}$	$MPE_E \mu\text{m}$
6000	1600	2400	$15 + 10 L/1000 \leq 45 \text{ 1}$ $25 + 28 L/1000 \leq 109 \text{ 2}$	$30 + 13 L/1000 \leq 70 \text{ 1}$ $55 + 32 L/1000 \leq 145 \text{ 2}$

Poznámka:

- 1) Kolísání teploty okolí 16 °C až 24 °C, změny teploty 1 °C/1 h, 3 °C/24 h.
- 2) Kolísání teploty okolí 16 °C až 32 °C, změny teploty 2 °C/1 h, 10 °C/24 h.

Největší dovolenou chybu lze však definovat u některých typů CMM, určených pro zapojení do výrobního procesu (in-line) i jiným způsobem, který zavádí firma Carl Zeiss u CMM CenterMax jako tzv. **teplotně variabilní přesnost TVA** (Temperature Variable Accuracy). Podle této metody si může uživatel CMM stanovit MPE_E , vztahující se ke skutečně dosažené teplotě. Největší dovolená chyba CMM (v obecném tvaru) je dána výrazem (viz literatura [2]):

$$MPE_E (TVA U3) = 1,6 + (0,05 \cdot |\Delta\delta| + L / (300 - 7 \cdot |\Delta\delta|)),$$

kde výraz $1,6 + (0,05 \cdot |\Delta\delta|)$ odpovídá klasické konstantní komponentě, ale s teplotně variabilním doplněním $\Delta\delta$ (odchylka od 20 °C),

výraz $L / (300 - 7 \cdot |\Delta\delta|)$ odpovídá klasické komponentě, závislé na délce L . MPE_E je v tomto případě v mikrometrech.

Uvedený vzorec platí za předpokladu, že okolní teplota nepřekročí interval (15 až 35) °C, kolísání teploty během 1 h nepřekročí 2 °C a během 24 h 8 °C.

V následující tabulce uvádíme 4 případy, definující MPE_E měřicího stroje CenterMax podle uvedené závislosti:

Druh nasazení CMM	Teplota	MPE_E obecný tvar	MPE_E pro $L = 120$ mm
referenční podmínky	20 °C	$(1,6 + L/300) \mu\text{m}$	2,0 μm
metrolog. laboratoř	22 °C	$(1,7 + L/286) \mu\text{m}$	2,1 μm
běžná výroba	28 °C	$(2,0 + L/244) \mu\text{m}$	2,5 μm
tradiční výroba	35 °C	$(2,35 + L/195) \mu\text{m}$	3,0 μm

5.3 Dílenské souřadnicové měřicí stroje

Vedle univerzálních CMM, které se vyznačují velkými aplikačními možnostmi, se prosazuje i další trend ve vývoji CMM: na rozdíl od předchozích jde o jednoduché stroje, které nevyžadují žádné zvláštní znalosti uživatele. Měření na takovém stroji může provádět po několika hodinách zácvičení i nezaučený pracovník. Zvláště pro malé podniky, které nemohou obsadit druhou a třetí směnu metrologem nebo kvalifikovaným pracovníkem TK je výhodné, může-li na takovém stroji měřit přímo pracovník výroby.

Jeden z prvních strojů této kategorie, **MICRO-HITE 3D** (TESA) s měřicími rozsahy (X, Y, Z) 460 mm x 510 mm x 420 mm je tak jednoduchý a snadný při obsluze, že se pro něj ujal slangový název *souřadnicová posuvka*. Tento CMM byl postupně vybaven progresivními snímacími hlavami, v případě potřeby lze u něj použít i CCD kamera. Jeden z posledních typů dílenských strojů, **kompaktní CMM DuraMax** (Zeiss), se vyznačuje poměrně velkými měřicími rozsahy (X, Y, Z) 500 mm při malých rozměrech stroje a $MPE_E = (2,4 + L/300) \mu\text{m}$ při měření v teplotním rozsahu



Obr. 7: Souřadnicový měřicí stroj GageMax (Zeiss)

(18 až 30) °C. CMM pracuje v režimu CNC při rychlosti pohybu posuvných hmot 300 mm/s, v případě potřeby může být v dílně snadno přesunut a měřit v bezprostřední blízkosti výrobního místa.

5.4 Mobilní měřicí systémy

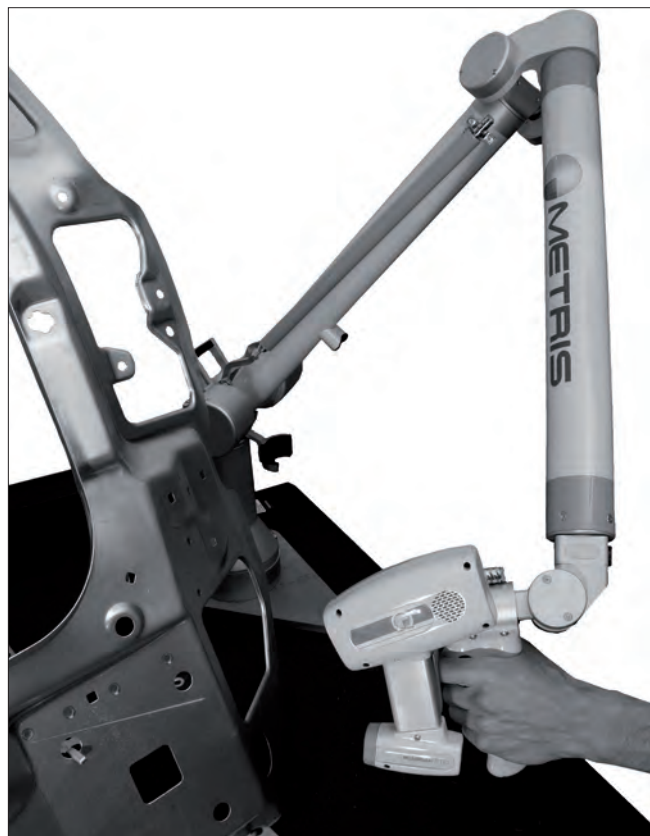
Velké a přesné objekty, např. převodové skříně, karoserie apod. vyžadují CMM s velkými rozsahy měření. U některých CMM mostového typu dosahuje některá ze souřadnic až desítek metrů (např. $Y = 12\,000$ mm). Rozměrné měření objektů se k takovým strojům dopravují se značnými obtížemi. V automobilovém a v leteckém průmyslu, popř. v loděřství se uplatňuje nový trend: mobilní souřadnicové měřicí systémy. Je totiž snazší přemístit poměrně lehký a malý přístroj k velkému měřenému objektu než naopak.

Z různých typů CMM této kategorie uvádíme dva nejrozšířenější typy:

- měřicí ramena (anglické označení *arm*),
- laserové přístroje (anglické označení *tracker*, resp. *lasertracker*).

Základem měřicích ramen je mechanická paže s několika (obvykle šesti až sedmi) klouby, spojenými trubicemi z nekonvenčních materiálů, např. karbonového vlákna. Kontrolované prvky na rozměrných částech se snímají dotekovými snímači, upevněnými na konci mechanické paže. Příkladem je **měřicí rameno MCA** (Metris). Rameno se může upínat na průměrnou desku nebo na pojízdný stativ. Pomocí patentované manuální sondy lze rameno MCA použít i při skenování nebo jako nosič laserového skeneru, zejména pro reverzní inženýrství.

Laserové přístroje představují další kategorii mobilních 3D systémů. Při měření se využívá odraz bodového laserového paprsku. Příkladem je **Laser Tracker X** (FARO), kterým lze měřit objekty v rozsahu až 70 m, přičemž měřicí



Obr. 8: Měřicí rameno MCA (Metris)



Obr. 9: LaserTracker X (FARO)

rozsah je max. 35 m. Chyba měření se zvyšuje se vzdáleností od zdroje záření a při maximálním rozsahu činí 0,136 mm.

K výrobcům mobilních systémů patří FARO, API (oba USA), Metronor (Norsko), METRIS (Velká Británie), Leica Geosystems (Švýcarsko) atd.

5.5 Počítačová tomografie (CT)

Využití rentgenových paprsků při nedestruktivním testování (NDT) otevřelo další možnosti NDT v oblasti propojení počítačové tomografie s konvenční 3D rozměrovou metrologií. Počítačový tomograf kontroluje rentgenovým zářením nejen vnější plochy, ale i vnitřní části, resp. dutiny měřených součástí a zobrazuje je jako 3D obraz. Základem měřicího stroje je deska s otočným stolem, na který se kladě měřená součást. Rentgenové paprsky pronikají kontrolovaným objektem, jeho profil je detekován a zobrazí se na vhodném rentgenovém detektoru (senzoru) jako dvourozměrný digitální obraz. Postupným natáčením kontrolovaného objektu kolem jeho vlastní osy se jednotlivé obrazy (až několik set dvourozměrných rentgenogramů) přetransformují na 3D objemový model. Lze kontrolovat objekty o různé velikosti, např. z oceli, hliníkových slitin, keramických materiálů nebo plastů. Výhodou této technologie je získání kompletní geometrie kontrolované součásti při jediném měřicím postupu a proměření vnitřních geometrií součástí, které konvenčními optickými nebo dotykovými metodami nejsou zjistitelné. Kromě toho se může kontrolovat homogenita materiálu, rozeznávat staženiny, vměstky, pórovitost apod.



Obr. 10: Tomograf Metrotom (Zeiss)

Příkladem takového přístroje počítačové tomografie může být **Tomo-Scope** (Werth Messtechnik) nebo **Metrotom** (Zeiss). Pro představu uvádíme největší dovolené chyby u přístroje TomoScope:

	MPE _E v obecném tvaru	MPE _E pro $L = 120 \text{ mm}$
MPE _E 1 (v ose)	$(2,5 + L/120) \text{ } \mu\text{m}$	3,5 μm
MPE _E 2 (v rovině)	$(2,9 + L/100) \text{ } \mu\text{m}$	4,1 μm
MPE _E 3 (v prostoru)	$(4,5 + L/75) \text{ } \mu\text{m}$	6,1 μm

Na zařízení TomoScope se kontrolují součásti výšky max (200 až 500) mm, průměru max. (90 až 350) mm, na zařízení Metrotom lze kontrolovat součásti až do velikosti 350 mm.

6. TEXTURA JE VÍC NEŽ DRSNOST POVRCHU

6.1 Parametry a charakteristiky textury

Rozvoj měření drsnosti povrchu se zvýšil přechodem (v rámci norem GPS) na novou veličinu **texturu povrchu**.

Poznámka: Dosud v některých normách používaný pojem **struktura povrchu** je nahrazován pojmem **textura povrchu**.

V této nové veličině je zahrnuto několik složek, které na sebe vhodně navazují:

- drsnost povrchu, tzv. parametry *R* (Roughness),
- vlnitost, tzv. parametry *W* (Waviness),
- základní profil, tzv. parametry *P* (Profile).

Jednotlivé druhy parametrů jsou popsány v normě ČSN EN ISO 4287 jako výškové, délkové a hybridní parametry, křivky a příbuzné parametry. Podstatně se tak zvyšuje počet parametrů, které můžeme použít k popisu kontrolovaného povrchu.

Příklad: Zatímco dříve se největší výška profilu *Rz* vztahovala pouze k drsnosti povrchu, nyní platí i pro vlnitost (*Wz*) nebo pro základní profil (*Pz*). Obdobně je tomu i u průměrné aritmetické úchylnosti profilu (*Ra*, *Wa*, *Pa*) a u dalších parametrů.

Uvedené parametry charakterizují texturu povrchu v tradičním dvourozměrném hodnocení (2D). Tendence vyhodnocovat profil textury povrchu podrobněji, zejména při posuzování funkčních vlastností povrchu, u tribologicky náročných součástí apod. vede k prostorovému (třírozměrnému) hodnocení textury povrchu (3D). Prostorová analýza textury povrchu vyžaduje zpracování velkého množství dat, přináší však mnoho dalších informací [3]. Nové parametry pro prostorové hodnocení textury jsou obsaženy v návrhu normy prEN ISO 25178 a jsou odvozeny z parametrů 2D podle ISO 4287. Pro získání prostorových charakteristik povrchu z dat, získaných dotykovými i bezdotykovými systémy, jsou k dispozici vhodné programy, např. **Talymap** (Taylor Hobson).

6.2 Dotyková měření textury

Velkého pokroku bylo dosaženo v oblasti dílenských přístrojů. Zatímco starší přístroje měří pouze několik parametrů drsnosti povrchu (*Ra*, *Rz* apod.), jsou nové dílenské profiloměry určeny pro měření a vyhodnocování různých parametrů textury povrchu. **Přístroj Surtronic S25** (Taylor Hobson)

pracuje ve svislém měřicím rozsahu $\pm 250 \text{ } \mu\text{m}$ (rozlišení 0,01 μm). Přístroj umožňuje v délce 1,25 mm až 25 mm vyhodnocovat až 18 různých charakteristik textury povrchu a jejich profil registrovat. Příkladem laboratorního přístroje téhož výrobce je **Form Talysurf PGI 2540**. Délka vyhodnocování je daná rozsahem snímání v posuvové jednotce přístroje: max. 200 mm. Vertikální měřicí rozsah při kontrole profilů je 25 mm s rozlišením 0,4 nm, při měření textury 0,2 nm. K eliminaci nepříznivých vlivů, způsobených např. chvěním, je přístroj vybaven aktivním antivibračním uložením a účinnou ochranou měřicího prostředí.



Obr. 11: Profiloměr Form Talysurf PGI (Taylor Hobson)

Novinkou v této oblasti jsou programy, umožňující progresivní analýzu změn textury povrchu v režimu 4D. Dosaďovací 3D hodnocení povrchu (*X*, *Y*, *Z*) je doplněno o čtvrtý rozměr – proměnnou (*t*), kterou může být čas, teplota, tlak nebo jiná fyzikální veličina. Tímto způsobem lze vyhodnocovat nejen statické vlastnosti zkoušeného povrchu, ale zejména sledovat změny textury povrchu během jeho funkčního zatěžování, deformace tepelně zatěžovaných součástí apod. 4D analýzu provádí například **program Mountains** (Digital Surf).

Do skupiny výrobců dotykových profilometrů patří vedle Taylor Hobson (Velká Británie) také Mahr, Hommelwerke (oba Německo), DIAVITE (Švýcarsko) a další.

6.3 Bezdotyková měření textury

Jedny z prvních metod měření drsnosti povrchu před téměř osmdesáti lety byly optické metody, ať již šlo o měření na Schmalzově nebo na interferenčním mikroskopu. Současnost je opět ve znamení nástupu optických metod, i když nyní jde o metody, založené na zcela jiném principu, než u metod, které jsme uvedli. Příčinou zavádění optických metod v současnosti jsou požadavky automobilového průmyslu na stoprocentní kontrolu přesných povrchů v režimu in line. Nové typy přístrojů jsou optické měřicí systémy, které pracují bezdotykově a jsou schopny během několika sekund

poskytnout topografické zobrazení podstatně většího výřezu celkového povrchu, než jak lze získat dotykovými profilměry. Tyto optické měřicí systémy jsou založeny na technice rozptýleného světla, která analyzuje rozložení povrchem odraženého světla a získává tak statistické údaje o geometrických vlastnostech povrchu. Měření je velmi rychlé (100 měření během 1 sekundy). Zdrojem světla je rudá LED, která vytváří na měřeném povrchu světelnou skvrnu cca 0,9 mm. Odražené světlo se snímá v úhlu 35° a přivádí se na řádkovou diodu. Pomocí mikroprocesoru a vyhodnocovacího softwaru je z rozložení intenzity odraženého světla vyhodnocena optická hodnota drsnosti S_o (Surface optical), která odpovídá hodnotě R_dq (průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu podle ČSN EN ISO 4287). Příkladem přístroje pro měření pomocí rozptýleného světla je **systém QS 500** (Optosurf). Pracuje v rozsahu ($0,01 \mu\text{m} < Ra < 1 \mu\text{m}$).

Podobné přístroje vyrábí několik dalších firem, např. FRT (Německo), která spolupracuje s brněnskou firmou MESING.

7. MÍSTO ZÁVĚRU

V předchozích kapitolách jsme se pokusili popsat současný stav ve vybraných oblastech špičkové měřicí techniky. Jak se během poslední doby tato technika vyvíjela? Vezměme jako příklad měření skříňové součásti, např. převodové skříně. V minulosti se prováděla tato kontrola zpravidla na průměrné desce pomocí měřicích trnů, koncových měrek, stojánků, číselníkových úchylkoměrů, úhelníků, popř. posuvných výškoměrů (viz úvod kapitoly 3.2). Výrobní tolerance

a mezní úchytky, které tehdy předepisovali konstruktéři, byly při tehdejšímu stavu měřicí techniky pouze obtížně měřitelné. V současné době se taková součást měří na třísouřadnicovém měřicím stroji (CMM). Od doby měření na průměrné desce se mnohonásobně zvýšil počet měřených dat, získaných na CMM, vzrostla přesnost měření (vyjádřena např. nejistotou měření) a podstatně se zkrátily měřicí časy. Ukazuje se však ještě něco navíc. Díky současné měřicí technice může pracovník, který měří (operátor, pracovník TK, metrolog) poskytnout pracovníkům technické přípravy výroby (TPV) mnohem více informací a bez většího pracovního úsilí, než dosud. Vezmeme-li příklad z kontroly textury povrchu, jde o celou řadu nových charakteristik (viz kap. 6.1), které dovedou mnohem lépe než dosud popsat vliv chování měřeného povrchu na funkci nebo životnost součásti a tím pomoci konstruktérovi vyjádřit lépe než dosud požadavky na kvalitu povrchu. Zde se projevuje progresivní úloha měřicí techniky, zejména při zvyšování kvality vyráběné produkce a konkurenční schopnosti podniku, tedy v oblastech v dnešní době více než aktuálních.

Literatura

- [1]. Ferger, D., Neumann, H. J.: Spolehlivé výsledky měření v každém ročním období. In: Sborník Měřicí technika pro kontrolu jakosti, Česká metrologická společnost, Plzeň 2007
- [2]. CenterMax, prospekt, Carl Zeiss IMT Oberkochen
- [3]. Beck C.: Quo vadis, Rauheitsmessung? QZ – Qualität und Zuverlässigkeit, 54, Nr. 4, April 2009



Redakční rada:

Ing. Emil Grajciar (předseda), Ing. František Jelínek, CSc. (místopředseda), Ing. Jiří Kraus, Doc. Ing. Jiří Horský, CSc., Ing. Zdeněk Tůma, Ing. Milan Badal, Prof. Ing. Jaroslav Boháček, DrSc., Ing. Otokar Buzek, CSc., Ing. Pavel Ducháček, CSc., Ing. Jiří Kazda, Bc. Kateřina Čábelová, Ing. Jindřich Mlejnek, RNDr. Klára Popadičová, Jitka Hrušková.
PhDr. Bořivoj Kleník – šéfredaktor.

Časopis vychází 4 x ročně. Cena výtisku 80,- Kč, roční předplatné 320,- Kč + 9 % DPH + poštovné a balné. Vydavatel: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ) ve spolupráci s Českým metrologickým institutem, Českou metrologickou společností a Českým kalibračním sdružením. Sídlo vydavatele: ÚNMZ, Gorazdova 24, 128 01 Praha 2. IČO: 48135267. Povolení tisku: registrace MK ČR 6111, MIČ 46 676, ISSN 1210-3543.

Místo vydávání: Praha. Datum vydání: prosinec 2009. Nakladatelský servis, předplatné a inzerce: PhDr. Bořivoj Kleník, Bezdědice 19, 294 25 Katusice, tel./fax: +420 326 394 888, mobil: 603 846 527, e-mail: klenik@q-art.cz. Nevyžádané materiály se nevracejí. Za původnost a správnost příspěvků odpovídají autoři.

Tato Tematická příloha je součástí č. 4/2009 časopisu Metrologie. © ÚNMZ

Foto na obálce:

Souřadnicový měřicí stroj SIP v kombinaci s laserovým interferometrem.

Photo on the front page:

Step gauge calibration on SIP coordinate measuring machine with additional measurement using laser interferometer.

