



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A
ROBOTIKY

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

VYUŽITÍ LASERŮ VE STROJÍRENSTVÍ - INTERFEROMETR RENISHAW

LASER APPLICATION IN MACHINE INDUSTRY - INTERFEROMETER RENISHAW

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

PETR ŠRŮT

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JANA DOŇAROVÁ, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2012/13

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Petr Šrůt

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Využití laserů ve strojírenství - interferometr Renishaw

v anglickém jazyce:

Laser application in Machine Industry - interferometer Renishaw

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rešerše na vybrané téma

Srovnání interferometrů ML10 a XL-80

Cíle bakalářské práce:

- druhy a možnosti laserové techniky
- internetový a literární průzkum

Seznam odborné literatury:

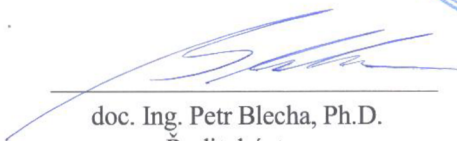
- [1] KUSALA, Jaroslav. Laser a jeho využití. 2004
- [2] Renishaw - Měření a kalibrace. 2001-2007
- [3] ČSN ISO 230-2 : Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslíkové řízených osách. 2. vyd. Praha : Český normalizační institut, 1999.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jana Doňarová, Ph.D.


Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne 14.11.2012




doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
Ředitel ústavu


prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

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

ABSTRAKT

Nastínění vývoje laserů. Popsání fungování různých druhů laserů. Vysvětlení principů interferometrů. Základní informace o interferometrech XL-80 a ML10. Porovnání těchto interferometrů.

Klíčová slova

laser, interferometr, kompenzátor, měřicí optika

ABSTRACT


Outlining the development of lasers. Describe the operation of various types of lasers. Explanation of principles interferometers. Basic information about the interferometer XL-80 and ML10. Comparison of these interferometers.

Key words

laser, interferometer, compensator, measuring optics

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠRŮT, Petr. *Využití laserů ve strojírenství – interferometr Renishaw*. Brno 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. 31 s. příloh. Vedoucí práce Ing. Jana Doňarová, Ph.D.


	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 6
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Využití laserů ve strojírenství - interferometr Renishaw** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

.....
Petr Šrůt


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

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucí bakalářské práce paní Ing. Janě Doňarové, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině, za podporu během mého studia.

OBSAH


ABSTRAKT	5
PROHLÁŠENÍ.....	6
PODĚKOVÁNÍ	7
OBSAH	8
ÚVOD.....	9
1 Historický vývoj	10
2 Laser.....	11
2.1 Vlastnosti laserového paprsku	11
2.2 Interference světla	11
2.3 Princip laseru	11
3 Druhy laserů	12
3.1 Plynový helium-neonový laser	12
3.2 Pevnolátkový laser.....	12
3.3 Polovodičový laser	13
3.4 CO ₂ laser	13
4 Základní typy interferometrů	14
4.1 Michelsonův interferometr.....	14
4.2 Machův-Zehnderův interferometr.....	14
4.3 Fabryův-Perotův interferometr	15
5 Laserový systém ML10.....	16
5.1 Laserová hlavice ML10 (ML10 Gold Standard).....	16
5.2 Laserový kompenzátor EC10.....	17
5.3 Software Laser 10.....	17
6 Laserový systém XL-80	19
6.1 Laserová hlavice XL-80	19
6.2 Laserový kompenzátor XC-80 a snímače	20
6.3 Software.....	21
7 Příslušenství k laserovým systémům	23
7.1 Měřicí optika	23
8 Faktor chyb ovlivňující lineární měření.....	25
9 Srovnání parametrů interferometrů	28
Závěr.....	29
Seznam použitých zdrojů.....	30

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 9
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

ÚVOD

Mnoho lidí ani neví, co slovo laser znamená. Slovo laser je zkratkou anglického výrazu *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* ('zesílení světla pomocí vynucené (stimulované) emise záření'). Jedná se o druh světla, které má své specifické vlastnosti, a to monochromaticnost (jednobarevnost), koherentnost (uspořádanost) a malou divergenci (rozbíhavost). Díky těmto vlastnostem se využívá k mnoha specifickým činnostem v různých oborech. Od doby položení základů vědecké teorie prodělaly přístroje pracující na principu využití laserového paprsku značný vývoj.

Bakalářská práce se zabývá rešerší na téma interferometrie (vlastnosti světla) a podáním základních informací o interferometrech (měřicích přístrojích) ML10 a XL-80 vyrobenými brněnskou firmou Renishaw. Tyto interferometry slouží ve strojírenském oboru k měření vzdálenosti a analýze pohybu.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 10
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

1 Historický vývoj

Historický vývoj poznatků o laserovém paprsku začíná popisem teoretických základů vynucené emise záření, které podal Albert Einstein v roce 1917. Začátkem 50. let byly položeny základy nového oboru – kvantové elektroniky a byla realizována záření generující a zesilující elektromagnetické záření na principu stimulované emise záření. [1]

C. H. Towns a A. L. Shawlow uvedli v roce 1956 do provozu první maser. Název maser byl odvozen z počátečních písmen názvu *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation* ('zesilovač mikrovln pomocí stimulované emise záření'). [2]

První projekt laseru navrhli C. H. Towns a A. L. Shawlow v roce 1958. O dva roky později T. H. Maiman zkonstruoval a provozoval první rubínový laser. Nadále byla realizována laserová zařízení na bázi pevných, plyných aktivních látek. [1]

V roce 1961 A. Javan, W. Bennett a D. Herriott sestrojili první plynový laser s vlnovou délkou světla 1150 nanometrů. Aktivní látku tvořila směs hélia a neonu. V roce 1964 J. F. Geusic a R. G. Smith uvedli do provozu první neodymový laser (Nd:YAG). Od roku 1971 byl zaznamenán enormní rozvoj laserové technologie. [3]

2 Laser

2.1 Vlastnosti laserového paprsku

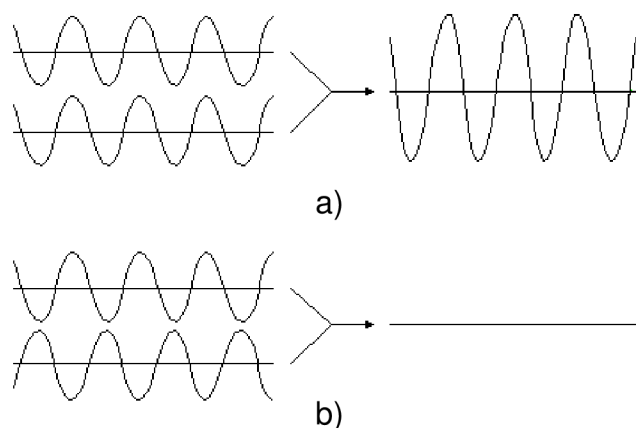
- Koherence – frekvence záření je stále stejná a fázový posun se nemění, [9]
- Monochromaticnost – je elektromagnetické záření pouze jedné vlnové délky, [10]
- Vlnová délka – je délka celé vlny, vzdálenost, kterou vlna urazí během jedné periody, [11]
- Divergence – rozbíhavost tj. průměr paprsku se spolu se vzdáleností zvětšuje. [28]

2.2 Interference světla

Aby interference mohla vzniknout, musí být splněny tyto podmínky:

- všechna záření dopadající do jednoho bodu musí mít stejnou vlnovou délku,
- v daném bodě na stínítku musí mít všechna záření neměnný dráhový rozdíl (tzn. Také stálý fázový rozdíl).

Záření, které splňuje tyto podmínky je označováno jako koherentní záření. Na stínítku dochází k interferenci (skládání) světla. Do každého bodu na stínítku dopadá světlo z obou štěrbin. Dráhový rozdíl rozhoduje o tom, jestli na stínítku vznikne světlý nebo tmavý proužek. Světlý proužek vznikne, pokud je dráhový rozdíl roven sudému násobku vlnové délky a říkáme, že se jedná o konstruktivní interferenci (viz. obr. 3a) Pokud je dráhový rozdíl lichému násobku vlnové délky, pak vznikne tmavý proužek a říkáme, že se jedná o destruktivní interferenci (viz. obr. 3b). [24]



Obr.3 a) Konstruktivní interference b) Destruktivní interference[12].

2.3 Princip laseru

Laser je tvořen aktivním prostředím, rezonátorem a zdrojem energie. Zdroj energie (např. výbojka) dodává do aktivního média energii. Tato energie vybudí elektrony aktivního prostředí do vyšší energetické hladiny, dojde k tzv. excitaci. Takto je vybudena většina elektronů aktivního prostředí. Při přesunu elektronu na nižší



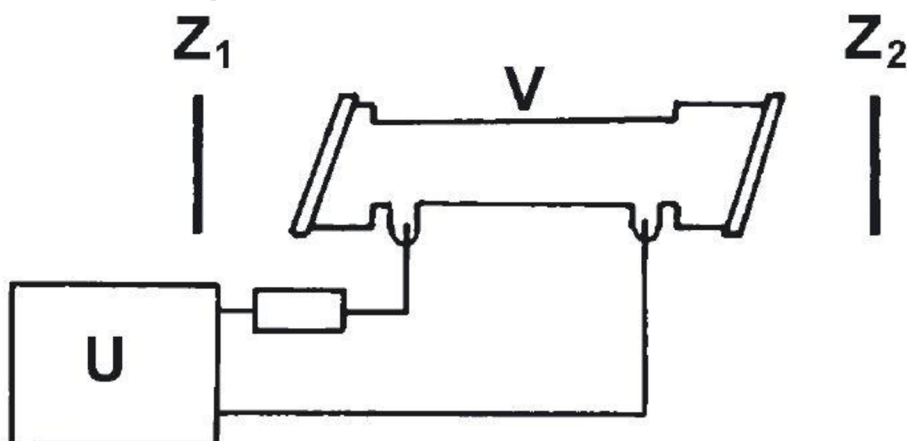
energetickou hladinu dojde k vyzáření (emisi) kvanta energie ve formě fotonů. Tyto fotony se ovlivňují s dalšími elektrony, čímž spouštějí stimulovanou emisi fotonů, se stejnou frekvencí a fází. Jelikož je aktivní prostředí umístěno do rezonátoru, dochází k odrazu paprsku fotonů a jeho opětovným průchodem aktivním prostředím. To podporuje stimulovanou emisi, a tím dochází k exponenciálnímu zesilování toku fotonů. Výsledný svazek fotonů opouští rezonátor skrze výstupní polopropustné zrcadlo. [26]

3 Druhy laserů

Lasery se dělí podle aktivního prostředí na plynové, pevnolátkové, polovodičové a CO₂.

3.1 Plynový helium-neonový laser

Aktivní prostředí je tvořeno výbojovou dráhou výbojky plněné směsí helia a neonu. Pomocí elektrického výboje se atomy helia budí do vyšších energetických stavů. Při srážkách předávají atomy helia atomům neonu energii. Stimulované emise při přechodech takto vzbuzených atomů neonu na nižší energetické hladiny se pak využívá ke generaci koherentního záření. Jedno z možných uspořádání takového laseru ukazuje obr. 1. Mezi zrcadly Z₁, Z₂ tvořícími rezonátor laseru je umístěna výbojka V, napájená ze zdroje U. Jedno z obou zrcadel je polopropustné a umožňuje tak výstup generovaného světelného svazku. Čelní plochy výbojové trubice bývají skloněny v Brewsterově úhlu, aby se zde intenzita paprsku zbytečně nesnižovala nežádoucím částečným odrazem. Z hlediska pracovního režimu je tento typ laseru kontinuální, tzn., že generace záření probíhá nepřetržitě, na rozdíl od pulsních laserů, kde vybudování systému a vyzáření proběhne v krátkém okamžiku. Helium-neonové lasery nevynikají vysokým výkonem, na rozdíl od některých laserů pulsních. Význačnou vlastností generovaného světla je malá divergence svazku, jeho koherence a monochromaticnost. V tomto směru laser podstatně předčí klasické zdroje světla. [4]



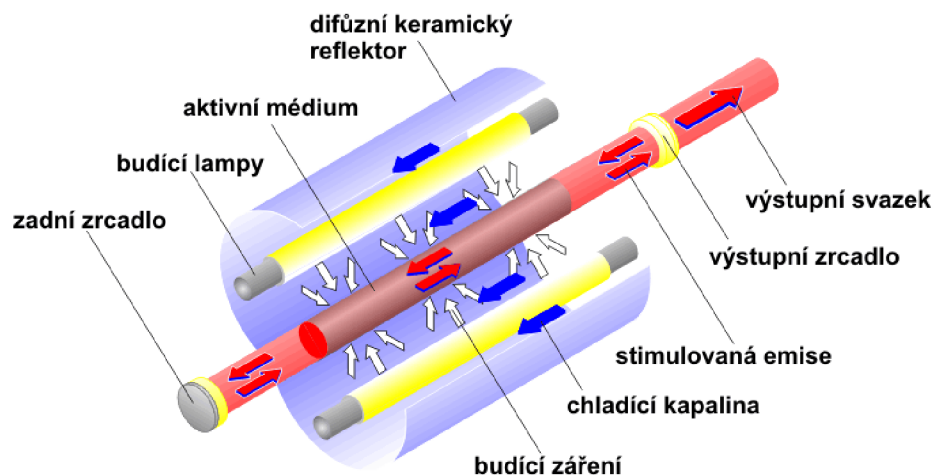
Obr.1 Schéma helium-neonového laseru [4].

3.2 Pevnolátkový laser

Typickým zástupcem je rubínový laser, který používá krystal syntetického rubínu. Dá se provozovat v kontinuálním nebo impulsním režimu. Tento laser se zpravidla používá v impulsním režimu, kde v miliontině sekundy vyzáří výkon řádově miliony



wattů. Tento laser generuje ve vlnové délce 694,3 nm. Dále je velmi rozšířen yttriumaluminiový granát s příměsí *neodymu* případně *chromu* (Nd:YAG (viz. obr. 2) resp. Cr:YAG). K čerpání se dá využít světlo i obyčejné žárovky, xenonové výbojky atp. Krystal z aktivního prostředí je válcového tvaru a délky od deseti milimetrů až do dvaceti centimetrů. Konce krystalu jsou zařízeny na 90 stupňů a dokonale vyleštěny. Na tyto plošky se v některých případech napařují kovy (nejčastěji stříbro Ag), které vytváří na jedné straně odrazovou plochu a na druhé straně plochu polopropustnou (zrcadlo). Krystal spolu s budicí lampou (výbojkou) jsou umístěny do eliptické odrazové dutiny. Dutinu je potřeba chladit. [6,7]



Obr. 2 Lampami buzený Nd:YAG laser [5].

3.3 Polovodičový laser

Polovodičové lasery jsou nejrozšířenější lasery. Někdy se nazývají jako laserová dioda. Jako aktivní prostředí využívají polovodičový přechod. Pracují s elektronovými přechody mezi vodivostním a valenčním pásem polovodiče. Polovodičové lasery jsou velmi malé, což má za následek větší divergenci výstupního svazku. Tyto lasery jsou velmi citlivé na změnu teploty. Laserový paprsek lze snadno modulovat pomocí změny budicího elektrického proudu. Lasery vynikají vysokou účinností až 50%, pracují jak v kontinuálním tak v pulsním režimu. Mohou dosahovat velkých výstupních výkonů. Uplatnění našly především ve výpočetní technice. Dnes se také používají pro čerpání pevnolátkových laserů. [8]

3.4 CO₂ laser

Jako aktivní částice se využívá lineární molekula CO₂, v níž dva atomy kyslíku jsou vázány na atom uhlíku a všechny atomy leží na jedné přímce. Atomy kyslíku mohou kmitat mnoha směry, tím pádem má bohaté spektrum vyzařovaných frekvencí. Nejintenzivnější frekvence jsou 9,5 μm a 10,6 μm . Tyto lasery se využívají např. při řezání železných nosníků. [27]



4 Základní typy interferometrů

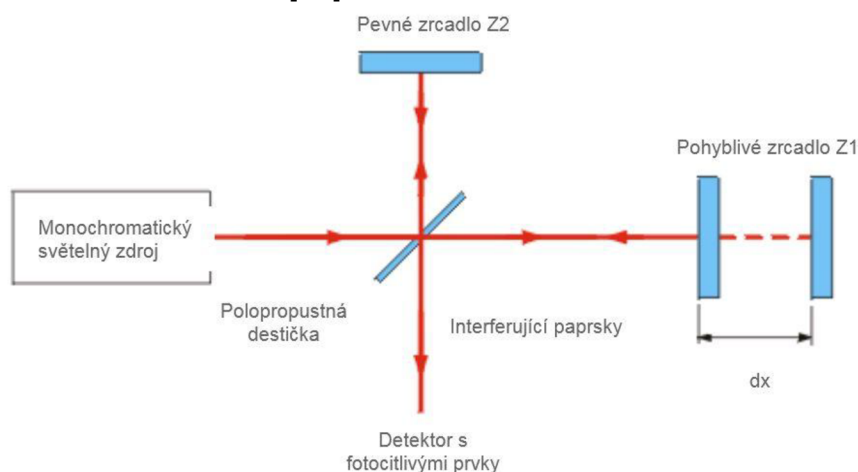
Interferometr je zařízení pro měření malých rozdílů délek. Dráhový rozdíl světelných paprsků určujeme z interferogramu. Tento interferogram (viz. obr. 4) vzniknul interferencí světla. Z interferogramu lze s velkou přesností určit dráhový posun. [22]



Obr. 4 Interferogram [24].

4.1 Michelsonův interferometr

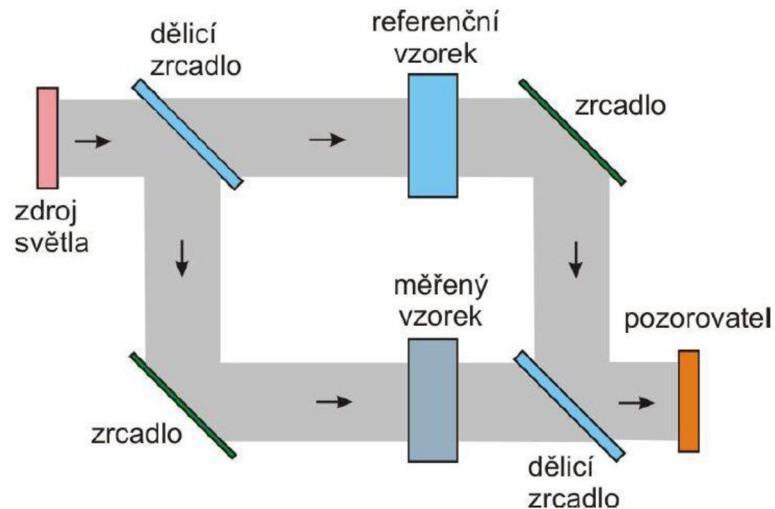
Michelsonův interferometr (viz. obr. 5) patří mezi nejznámějšího představitelů interferometrů. Světelný zdroj vyšle světelnou vlnu. Tato vlna se na dělicím zrcadle rozdělí na vlnu referenční a měřicí. Tyto vlny se přes optiku (zrcadla) vrátí na dělicí zrcadlo. Zde se vlny sloučí do výsledné vlny. Z rozdílu délek ramen vzniká na výstupu interferometru interference. Používá se pro měření vzdálenosti, přímosti a testování rovinnosti. [13]



Obr. 5 Schéma Michelsonova interferometru [14].

4.2 Machův-Zehnderův interferometr

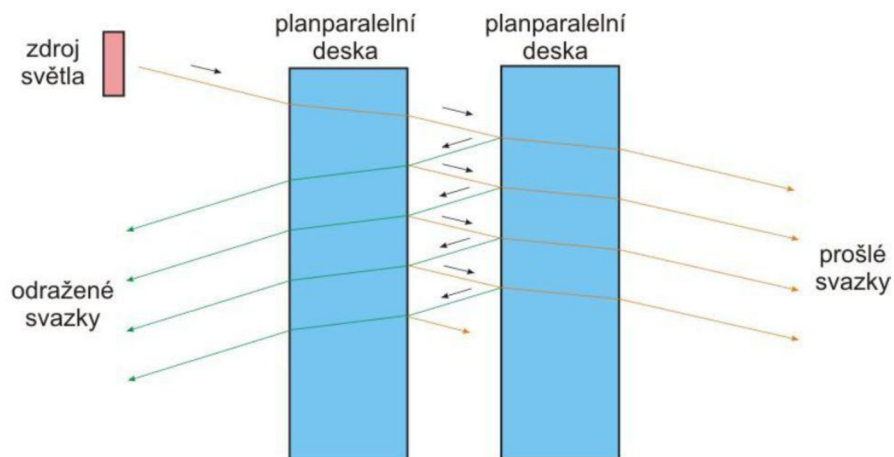
Machův-Zehnderův interferometr (viz. obr. 6) je tvořen dvěma zrcadly a dvěma dělicími zrcadly. Při průchodu prvním dělicím zrcadlem je světelná vlna rozdělena na dvě vlny (referenční a měřicí). Obě vlny se odrazí od zrcadla a na druhém dělicím zrcadle se vlny sloučí do jedné vlny. Pokud jsou obě trasy stejně dlouhé, vznikne na výstupu interferometru maximální amplituda interference (tzv. konstruktivní interference). Při různé délce ramen dojde k posuvu jedné fáze vlny a tím se změní amplituda interference. Je vhodný zejména pro zjištění nehomogenit indexu lomu. [13]



Obr. 6 Schéma Machova-Zehnderova interferometru [13].

4.3 Fabryův-Perotův interferometr

Jedná se o mnohosvazkový interferometr (viz. obr. 7). Interferometr je tvořen dvěma rovnoběžnými (planparalelními) deskami. Světelná vlna ze světelného zdroje dopadá na první planparalelní desku a po průchodu první deskou dopadá na druhou desku. U druhé desky dojde k částečnému odrazu vlny a částečnému průchodu vlny. Tento proces se neustále opakuje. Výsledkem je mnohonásobná interference, která je způsobena mnohonásobným odrazem od planparalelních desek. [13]



Obr. 7 Schéma Fabryova-Perotova interferometru [13].



5 Laserový systém ML10

Jedná se o starší laserový systém, s nímž pracovaly tisíce uživatelů. Kvůli podpoře uživatelů a přesnosti měření získal pozici jedničky na světovém trhu. Byl nejpřesnějším systémem svého druhu. [15]

5.1 Laserová hlavice ML10 (ML10 Gold Standard)

Laserová hlavice ML10 je vyobrazena na obrázku 8. Zaručená přesnost systému je 0,7 ppm a je zachována v celém rozsahu podmínek prostředí, tj. při teplotě 0 až 40 °C a tlaku 750 až 1150 mbar. Systém je schopen číst data při maximální rychlosti lineárního měření 1 m/s. Pro propojení systému s počítačem je potřeba interface laser – PC. S použitím stativu je zaměření laseru rychlé a pohodlné. Zaměřování může provádět i začátečník. K usnadnění zaměření se doporučuje využít zaměřovač paprsku LS350. Měření lze provádět na rozsahu 0 až 40 metrů při využití varianty Standard a 0 až 80 metrů ve variantě s delším rozsahem. [15]



Obr. 8 laserová hlavice ML10 Gold [25].

Tabulka č. 1 Podrobné technické parametry laserové hlavice ML10 Gold [15].

Přesnost kmitočtu	±0,05 ppm (μm/m)
Přesnost lineárního měření*	±0,7 ppm (v celém teplotním rozsahu)
Měřicí rozsah	0 až 40 metrů (standard) 0 až 80 metrů (varianta s delším rozsahem)
Rozlišení	1 nm
Maximální rychlost posuvu	±1,0 m/s
Pracovní teplota	0 °C až 40 °C
Provozní vlhkost	0% - 95% nekondenzující
Hmotnost	Maximálně 4,5 kg
Rozměry	335 × 176 × 75 mm
Napájení	nominální napětí 100 až 240 V, 50/60 Hz, automatická detekce (mezí rozpětí: 85–265 V)
Laserový zdroj	Helium-neonový (HeNe) laser (CLASS II)
Výkon laseru	<1 mW
Vlnová délka ve vakuu	632,990577 nm



* se zařízením EC10 Gold Standard

5.2 Laserový kompenzátor EC10

Kompenzační jednotka EC10 (viz. obr. 9) je vybavena několika snímači. V přední části kompenzátoru jsou integrovaná čidla pro měření tlaku a vlhkosti. Ke kompenzátoru je možno připojit další čidla na měření teploty vzduchu a materiálu. Čidla na měření teploty jsou dlouhá 5 metrů. [15]



Obr. 9 kompenzátor EC10 se snímači [14].

Tabulka č.2 Podrobné technické parametry kompenzátoru EC10 [15].

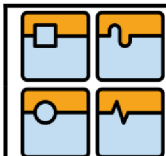
Přesnost kompenzace	$\pm 0,7$ ppm ($\mu\text{m}/\text{m}$) vlnové délky
Přesnost teploty	$\pm 0,2$ °C při rozsahu teploty vzduchu 0°C až 40°C
Přesnost tlaku	$\pm 1,0$ mbar při rozsahu vlhkosti vzduchu 750 až 1150 mbar **
Přesnost relativní	$\pm 15\%$ RH vlhkosti při rozsahu vlhkosti vzduchu 0 až 95% - nekondenzující
Přesnost teploty	$\pm 0,1$ °C při rozsahu teploty materiálu 0°C až 40°C
Hmotnost	4,0 kg
Rozměry	335 x 176 x 75 mm
Napájení	Přepínatelný duální režim 100 až 120 V, 200 až 240 V (nominální)

** přesnost lineárního měření s kompenzací prostředí

5.3 Software Laser 10

Software Laser 10 (viz. obr. 10) nabízí možnosti pro měření a analýzu. Obsahuje také moduly pro lineární měření, dynamické testování, měření rotačních os a balíky rozhraní.

Data získaná z testů lze analyzovat podle mezinárodních i státních norem:
ISO 230-2 ASME B89
VDI 2617 GB-10931-89
ASME B5.54 VDI 3441JIS-B6330

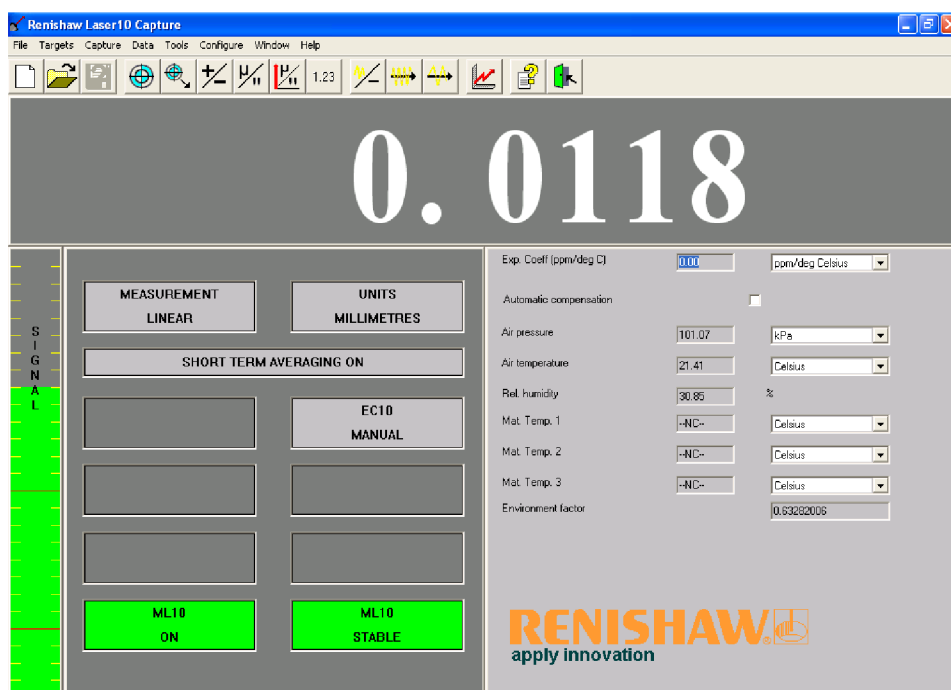


JIS-B6330

Tato data je možno prezentovat v předem definovaných formátech sestav nebo je lze vložit do jiných aplikací a vytvořit jejich profesionální prezentace.

Pomocí dat získaných z kalibračního cyklu lze vypočítat kompenzační hodnoty, které mohou být automaticky načteny do řídicí jednotky stroje. Program obsahuje průvodce řešením kompenzací a indikátory postupu, které dále zjednodušují kompenzaci odchylek os.

Při vyhodnocování zrychlení, vibrací, rychlosti a funkce servořízení může software pro získávání a analýzu dynamických dat pracovat se vzorkovacím kmitočtem až 5 kHz. Software také obsahuje integrovanou analýzu vibrací (FFT). [15]



Obr. 10 Software Laser10 [14].



6 Laserový systém XL-80

Nový laserový systém XL-80 je navržen pro maximální mobilitu, přináší vyšší přesnost a podstatně zlepšené parametry dynamického měření. Systém je rychlejší a snáze se používá. Zachovává si klíčové přednosti výrobků společnosti Renishaw a to přesnost, spolehlivost a odolnost při každodenním používání, tedy tam, kde na tom opravdu záleží. Základem nového systému je kompaktní laserová hlavice (XL-80) a samostatný kompenzátor podmínek prostředí (XC-80). [16]

6.1 Laserová hlavice XL-80

Laserová hlavice XL-80 (viz. obr. 11) vytváří velmi stabilní svazek laserového záření s vlnovou délkou odpovídající národním a mezinárodním normám. Stabilita frekvence vyzařované vlnové délky je $\pm 0,05$ ppm za 1 rok a $\pm 0,02$ ppm za 1 hodinu. Těchto vynikajících hodnot je dosaženo dynamickou teplotní stabilizací délky laserové trubice v řádu několika málo nanometrů.

Zaručená přesnost lineárního měření je $\pm 0,5$ $\mu\text{m}/\text{m}$ v celém rozsahu podmínek prostředí, tj. při teplotě $0\text{ }^{\circ}\text{C} - 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a tlaku $650\text{ mbar} - 1150\text{ mbar}$. Systém čte hodnoty s frekvencí 50 kHz i při maximální rychlosti lineárního měření 4 m/s . Dosahované lineární rozlišení 1 nm je zachováno v celém rozsahu rychlostí měření. Lze důvěřovat přesnosti všech naměřených dat, protože systém XL-80 využívá interferometrie při všech druzích měření.

Laser XL-80 má zabudován USB port a nepotřebujete tedy samostatný interface laser - PC. Laserová hlavice je standardně vybavena konektorem s výstupem pomocného analogového signálu. Z výroby je možno nastavit i výstup obdélníkového signálu. Je také možno připojit signál pro synchronizaci snímání dat.



Obr. 11 laserová hlavice XL-80 [16].

Sílu signálu a stav stabilizace nám ukazují signalizační LED diody, které jsou umístěny na těle laseru. Tyto diody také slouží jako podpora softwarových informačních návěstí. Díky uvedenému vybavení, době stabilizace kratší než 6 minut a možnosti přepnutí do režimu velkého dosahu ($40\text{ m} - 80\text{ m}$) se systém XL-80 snadno a rychle používá. [16]



Tabulka č.3 Podrobné technické parametry laserové hlavičky XL-80 [16]

Přesnost kmitočtu	$\pm 0,05 \mu\text{m/m}$
Přesnost lineárního měření*	$\pm 0,5 \mu\text{m/m}$
Měřicí rozsah	0 až 80 metrů
Rozlišení	1 nm (i při max. rychlosti)
Maximální rychlost posuvu	$\pm 4,0 \text{ m/s}$
Pracovní teplota	0 °C až 40 °C
Provozní vlhkost	0% - 95% nekondenzující
Hmotnost	1,85 kg
Rozměry	214 mm × 120 mm × 70 mm
Napájení	Vnější, 90 VAC – 264 VAC, automatická detekce napětí
Laserový zdroj	Helium-neonový (HeNe) laser (CLASS II)
Výkon laseru	<1 mW
Vlnová délka ve vakuu	632,8 nm

6.2 Laserový kompenzátor XC-80 a snímače

Klíčovými prvky pro zaručení přesnosti měření je kompenzátor XC-80 se snímači (viz. obr. 12). Tyto prvky zajišťují výjimečně přesné měření v celém rozsahu provozních podmínek a jsou navrženy pro každodenní používání, které bude běžné u většiny systémů. Snímače velmi přesně naměří hodnotu teploty vzduchu, tlaku vzduchu a relativní vlhkosti. Tyto hodnoty jsou následně zpracovány v kompenzátoru. Kompenzátor pomocí naměřených dat upravuje vlnovou délku laseru tak, aby do výpočtů stále vstupovala její správná hodnota, čímž prakticky eliminuje jakékoliv chyby měření vyplývající ze změn podmínek prostředí. [16]



Obr. 12 Kompenzátor XC-80 se snímači [16].

Snímače (viz. obr. 13) jsou „inteligentní“. Jejich integrované mikroprocesory analyzují a zpracovávají výstup snímačů před odesláním digitálních hodnot teploty



do kompenzátoru XC-80. To je klíčovým důvodem pro velikost kompenzátoru. Kompenzace je prováděna automaticky každých 7 vteřin. Snímače musí být mezi jednotlivými odečty odpojen, aby bylo sníženo tepelné vyzařování. Ke kompenzátoru lze připojit tři snímače teploty materiálu, aby bylo možno normalizovat lineární měření na standardní teplotu materiálu 20 °C. Kabely snímačů jsou dlouhé 5 m a lze je odpojit od čidla pro snadnou výměnu nebo spojovat dohromady a získat tak dostatečnou délku i při měření na delších strojích.



Obr. 13 detailní pohled na „inteligentní“ snímače [16]

Komunikace mezi prvky je indikována LED diodami umístěnými na tělech prvků. Stejně jako laser XL-80, je i kompenzátor připojen přímo k PC prostřednictvím USB portu, který také zajišťuje napájení kompenzátoru XC (není zapotřebí žádný samostatný zdroj napájení).

Tabulka č.4 Podrobné technické parametry kompenzátoru XC-80 [16].

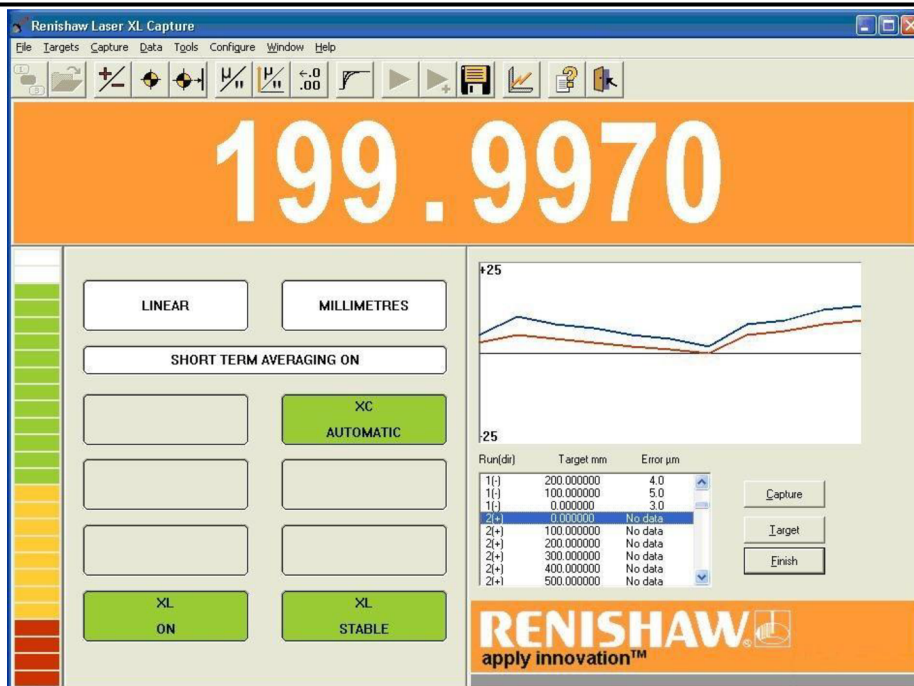
Přesnost kompenzace	$\pm 0,7$ ppm ($\mu\text{m}/\text{m}$) vlnové délky
Přesnost teploty vzduchu	$\pm 0,2^\circ\text{C}$ při rozsahu teploty vzduchu 0°C až 55°C
Přesnost tlaku	$\pm 1,0$ mbar při rozsahu vlhkosti vzduchu 650 až 1150 mbar
Přesnost relativní	$\pm 6\%$ RH vlhkosti při rozsahu vlhkosti vzduchu 0 až 95% - nekondenzující
Přesnost teploty materiálu	$\pm 0,1^\circ\text{C}$ při rozsahu teploty materiálu 0°C až 55°C
Hmotnost	0,49 kg
Rozměry	135 x 58 x 52 mm
Napájení	Vnější, 90 VAC – 264 VAC

6.3 Software

K laserovému systému XL-80 jsou dodávány dva počítačové programy - LaserXL™ a QuickViewXL™.

6.3.1. LaserXL™

Měřicí software LaserXL™ (viz. obr. 14) umožňuje kalibraci obráběcího stroje. Software obsahuje moduly pro lineární a úhlová měření, měření rotační osy, rovinnosti, přímosti, kolmosti a je možné i dynamické měření. Naměřená data lze analyzovat a tisknout podle mezinárodních norem pro kontrolu přesnosti strojů, např. ISO, ASME, VDI, JIS a GB.

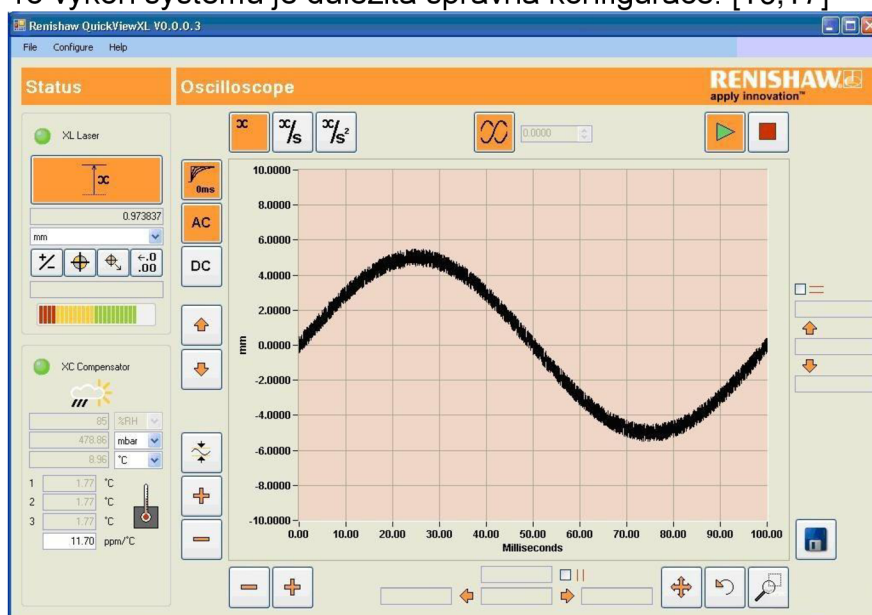


Obr. 14 Software LaserXL [18].

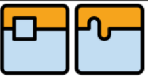

Při vyhodnocování údajů o polohování, rychlosti, zrychlení, vibrací může software pro získávání a analýzu dynamických dat pracovat se vzorkovací frekvencí 10 až 50 kHz. Je přednastaveno 12 hodnot vzorkovací frekvence. Pomocí doplňku programu pro kompenzaci lineárních chyb lze z naměřených dat vytvořit kompenzační hodnoty pro různé řídicí systémy CNC obráběcích strojů. Tím lze zlepšit přesnost polohování a opakovatelnost těchto strojů. [16]

6.3.2. QuickViewXL

Software pro dynamické měření QuickViewXL™ (viz. obr. 15) slouží pro zobrazování naměřených údajů laserového měření v reálném čase s frekvencí až 50 kHz. Tento software umožňuje rychlé a snadné posouzení a kontrolu charakteristik pohybových systémů. Pro výkon systému je důležitá správná konfigurace. [16,17]



Obr. 15 Software QuickViewXL [18].

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 23
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

7 Příslušenství k laserovým systémům

7.1 Měřicí optika

Stejnou optiku lze používat se systémy XL-80 nebo ML10, což zaručuje konzistenci nastavení měření a postupů. Všechna měření jsou interferometrická, a proto používají vlnovou délku laserového světla sledovatelného mezinárodního standardu, což umožňuje výsledkům bezpochyby věřit. [20]

Vlastnosti a výhody systému:

- **Možnost změny typu měření** – konstrukce optiky pro lineární a úhlové měření a měření přímosti umožňuje snadnou změnu typu měření bez nutnosti znovu laser vyrovnávat.
- **Pohodlí** – pohyblivá optika nemá žádné kabely, které by se někde zadrhnout a dosahuje tak nejvyšší přesnosti s bezproblémovým použitím.
- **Lehká hliníková optika** – optika je vyrobena z hliníku, proto je jejich nízká hmotnost obzvláště užitečná v případě, že měření chyby stoupání na vodorovném rameni souřadnicových měřicích strojů nebo pro dynamická měření.
- **Rychlé uzpůsobení prostředí** – některé systémy používají skříň optiky z erezové oceli. Jsou tedy mnohem těžší než hliníkové součásti optiky Renishaw a mají nižší tepelnou vodivost, proto jim přizpůsobení okolnímu prostředí v dílně trvá déle. [20]

Druhy optiky:

- **Univerzální clona (pro měření přímosti)**

Speciální sestava clony pro otáčení otvoru pro vracející se paprsek v cloně o 90°. Při použití s optikou pro měření přímosti tento kalibrátor umožňuje měření přímosti ve vertikální ose. [19]

- **Vyrovnávací terč**

Tento vyrovnávací terč (viz. obr. 19 b) o průměru 22 mm lze použít s lineární optikou, úhlovou optikou a optikou pro měření přímosti. Díky jeho pomoci lze vyrovnat interferometr a odrážedlo. [19]

- **Zaměřovač paprsku LS350**

Poskytuje snadné úhlové nastavení laserového paprsku ve vodorovné i svislé rovině. Toto patentované příslušenství eliminuje potřebu jemného přesouvání nebo otáčení laseru. Vyrovnání laserového systému je nyní jednostupňovým procesem. Zaměřovač laserového paprsku LS350 zrychluje lineární měření, měření úhlu a přímosti v jakékoli konfiguraci. [19]

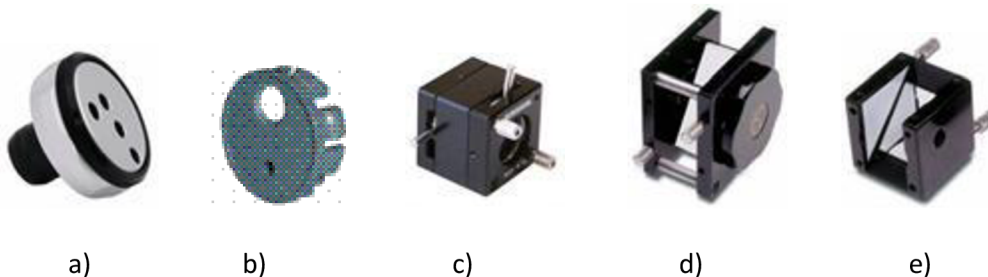
- **Otočné zrcadlo**

Umožňuje seřízení podél diagonál stroje nebo na skloněných osách. Otočné zrcátko může být použito pro vyrovnání diagonálního měření ANSI B5.54 a je také užitečné při měření soustruhů s šikmým ložem. Stavěcí šrouby umožňují snadné upevnění zrcadla k měřicí optice. [19]



- **Pevné zrcadlo 90°**

Toto zrcadlo odráží paprsek laseru v úhlu 90°. Stejně jako otočné zrcadlo může být připevněno k měřicí optice jako pomůcka pro seřízení a uplatnění nachází zejména v případech, kdy je omezen přístup k požadované ose měření.[11]



Obr. 19 Druhy optiky a) univerzální clona, b) vyrovnávací terč, c) zaměřovač paprsku LS350, d) Otočné zrcadlo, e) pevné zrcadlo [19].

Souprava pro montáž optických prvků se používá s veškerou optikou Renishaw. Slouží k upevnění měřicí optiky k testovanému stroji

7.2 Stativ a stolek

Pokud nepoužíváte laserový systém pouze jako součást speciálního zařízení, budete pravděpodobně potřebovat stativ a stolek pro nastavení polohy laseru vzhledem k požadované ose měření. Univerzální stativ poskytuje laseru stabilní základnu. Stolek stativu umožňuje přesné pootočení a posun laserové jednotky při ustavování a je navržen tak, aby mohl zůstat připevněn k laserové jednotce pro rychlé uložení i rozbalení systému. Upínací mechanismus stolku umožňuje rychlé a bezpečné upevnění na stativ.[11]

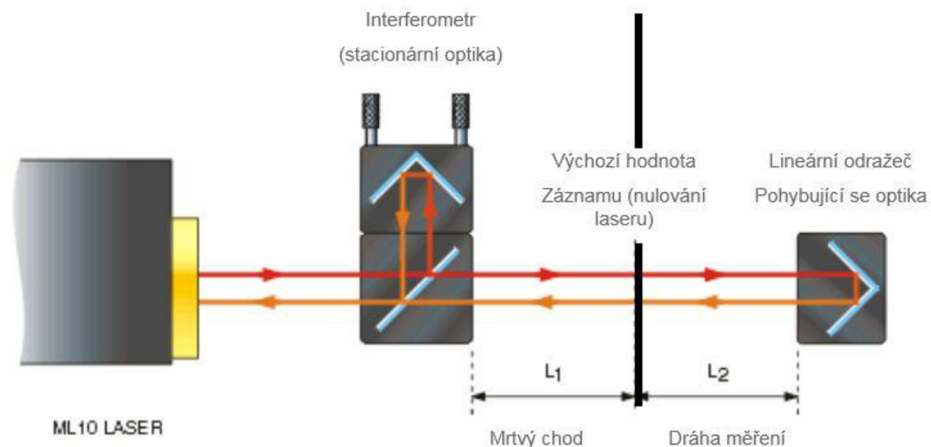
V aplikacích, kdy nevyhovuje instalace na stativ, např. při montáži přímo na stůl obráběcího stroje, lze stolek s laserem také uchytit na většinu standardních magnetických držáků pomocí adaptéru se závitem M8. Vzhledem k péči věnované konstrukci je možno umístit laser a optiku při kalibraci souřadnicového měřicího stroje přímo na jeho stůl (bez stolku na stativ). [11]



Obr. 20 stativ se stolkem [21].

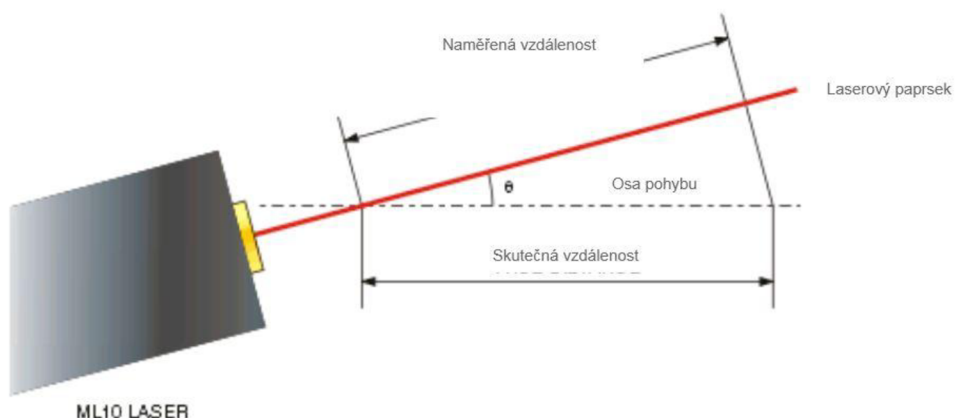
8 Faktor chyb ovlivňující lineární měření

- Nesprávná kompenzace vlnové délky**
 Přesnost měření lineárních poloh závisí na přesnosti, s jakou známe vlnovou délku laserového paprsku. Tato přesnost závisí především na parametrech okolního prostředí (teploty, tlak a relativní vlhkost vzduchu). Vlnová délka laserového záření vzroste o $1\mu\text{m}$ těmito změnami: nárůst teploty vzduchu o $1\text{ }^\circ\text{C}$, změna tlaku o 3,7 milibaru. [22]
- Nesprávná kompenzace tepelné roztažnosti materiálu**
 Velikost roztažnosti materiálu je vlivem tepelné změny u většiny materiálů velmi malá. Součinitelé tepelné udávají velikost, o kterou se daný materiál zvětší nebo zmenší pro každý stupeň, o který se teplota zvětší nebo zmenší. [22]
- Chyba mrtvé dráhy**
 Chyba mrtvé dráhy u laserového měření vzdálenosti L_2 je závislá na vzdálenosti mezi dvěma optickými prvky při nulování systému. Pokud nedochází k pohybu mezi interferometrem a reflektorem a mění se podmínky prostředí v okolí laserového paprsku, pak se vlnová délka bude měnit podél celé dráhy ($L_1 + L_2$), ale laserový měřicí systém ji bude kompenzovat pouze podél dráhy L_2 . Tím chyba mrtvé dráhy zavedena do paprsku na dráze L_1 nebude kompenzována. Nicméně tato chyba bude zanedbatelná, pokud se stacionární a pohyblivá optika dotýkají v době, kdy se provádí nulování. [14]



Obr. 21 Chyba mrtvé dráhy [14].

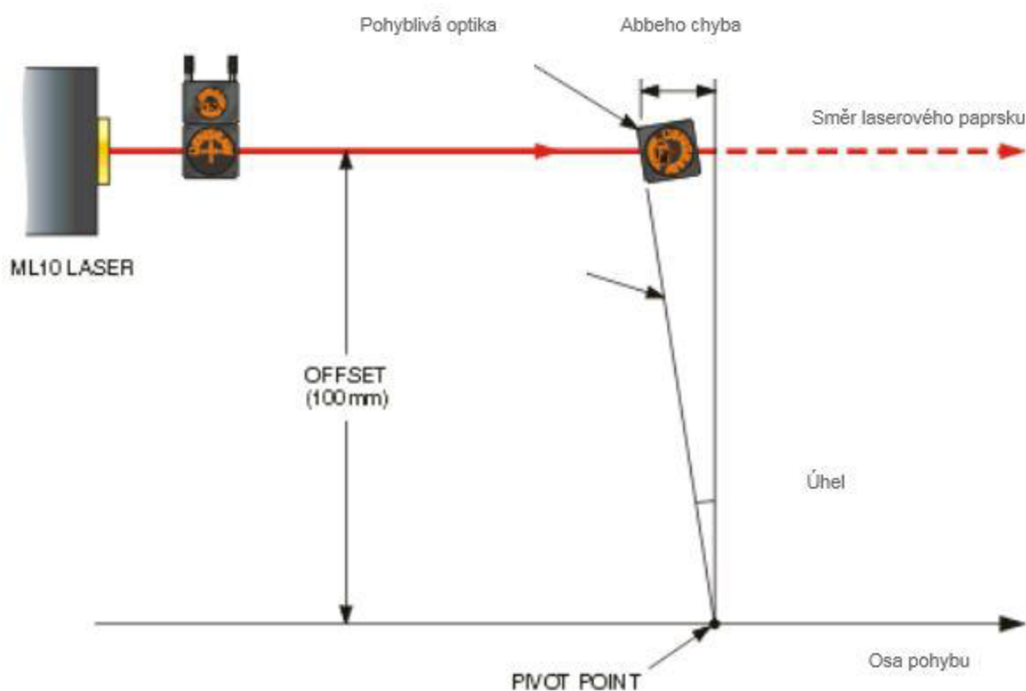
- Kosinova chyba**
 Když laserový měřicí systém měří mimo osu pohybu, pak následkem je Kosinova chyba, která způsobí, že naměřená vzdálenost je kratší než skutečná. Se vzrůstajícím úhlem se chyba zvětšuje. [22]



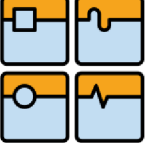
Obr.22 Kosinova chyba [14].

- Chyba způsobená Abbého aberací

Kdyby se měření provádělo paprskem sice seřízeným rovnoběžně, ale posunutým vzhledem k definované ose kalibrace, pak každé natočení pohyblivé optiky může zavést chybu způsobenou Abbého aberací. Pro zmenšení vlivu této chyby by laserový měřicí paprsek měl být totožný (nebo co nejvíc shodný) s linií, podél které je kalibrace prováděna. Pro každou arc sekundu natočení je uvedena chyba přibližně 0,005 m/mm posunu. Pokud je úhel konstantní, pak nenastává chyba způsobená Abbého aberací, jelikož pohyblivá optika zavede (nebo zpozdí) „bod otáčení“ o konstantní vzdálenost. Činnost systému bude založena na rozdílovém měření (to znamená z nulového bodu). [22]



Obr. 23 Chyba způsobená Abbého aberací [14].

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 27
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

- Chyba způsobená místními tepelnými zdroji
Teplo může způsobit roztažení optiky nebo turbulence vzduchu, které mohou ovlivňovat laserový paprsek. Proto by se optika a laserový paprsek neměly nacházet v blízkosti tepelných zdrojů. [22]
- Znečištění optiky
Je potřeba zajistit, aby optika interferometru a reflektoru byla udržována v nejčistším stavu. Znečištěné povrchy mají za následek ztrátu síly signálu, což vede ke komplikacím s kalibrací, a to zejména při měření dlouhých drah. [22]
- Nesprávná poloha snímačů teploty vzduchu
Pro zajištění tepelné stabilizace musí být snímač teploty vzduchu (teploměr) v okolí měření po dobu alespoň 15 minut před začátkem měření. Snímače by měly být umístěny co nejbliž dráze měřicího paprsku a v polovině této dráhy. Snímače by se neměly nacházet v blízkosti tepelného zdroje. [22]

9 Srovnání parametrů interferometrů

Z tabulek můžeme určit následující shody a rozdíly laserových hlavice:


- Shody:
 - provozní teplotu a vlhkost
- Rozdíly:
 - přesnost: Laserová hlavice XL-80 je přesnější o 0,7 ppm než laserová hlavice ML10 v lineárním měření.
 - délka měření - Pomocí laserové hlavice XL-80 je možno měřit délku 0 až 80 metrů. U laserové hlavice ML10 je nutno koupit variantu s delším rozsahem.
 - Rychlost posuvu - Laserová hlavice XL-80 je schopna měřit při maximální rychlosti posuvu 4 m/s.
 - Rozměry a váha - Laserová hlavice XL-80 má kompaktní rozměry a tím pádem váží pouze 1,85 kg (viz. obr. 24).



Obr. 24 porovnání laserových systémů [23]

Z tabulek můžeme určit následující shody a rozdíly kompenzátorů:

- Shody
 - Oba kompenzátory mají přesnosti kompenzace vlnové délky 0,7 ppm, teploty vzduchu 0,2 °C, teploty materiálu 0,1 °C, tlaku 1,0 mbar.
- Rozdíly
 - Přesnost - Kompenzátor XC-80 má přesnější přesnost relativní vlhkosti a to 6% RH.
 - Rozměry a váha - Kompenzátor XC-80 má menší rozměry a váhu která činí 0,49 kg (viz. obr. 24).

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 29
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Závěr

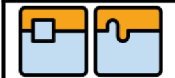

Z porovnání interferometrických systémů XL-80 a ML10 bych chtěl vyzdvihnout především ty vlastnosti, v nichž se systémy nejvíce liší.

Laserová hlavice XL-80 je cca 2,5 krát lehčí než laserová hlavice ML10.

Laserová hlavice XL-80 je schopna měřit při rychlosti 4 m/s, což je 4krát větší rychlost než u laserové hlavice ML10.

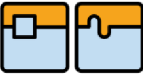

Laserový kompenzátor XC-80 je 8krát lehčí než laserový kompenzátor EC10.

Z výše uvedených skutečností je zřejmé, že měřicí technika a měření pomocí laseru prodělaly od svého prvopočátku do současné doby značné změny a vývoj. Měřicí přístroje jsou technicky dokonalejší – jsou přesnější (nejdůležitější požadavek), rychlejší, rozměrově menší a lehčí (usnadnění manipulace), jsou méně ovlivněny vnějšími vlivy (teplotou, tlakem, vlhkostí). Vývoj se zřejmě bude ubírat i nadále tímto směrem. Kde je hranice technické dokonalosti interferometrů a jejich praktického využití ukáže budoucnost.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 30
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Seznam použitých zdrojů

- [1] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. 1. vyd. Košice: Viena, 2000, 275 s. ISBN 80-709-9430-4.
- [2] Lasery: historie. *České Vysoké Učení Technické v Praze* [online]. [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT_9.pdf
- [3] Cesta k objevu. *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k12.htm>
- [4] Helium-neonový laser. *Univerzita Karlova* [online]. [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/txt_u315.pdf
- [5] Lampami buzený Nd:YAG laser. *MEGABLOG* [online]. [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>
- [6] VOJTA, Filip. Princip laseru. *Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích* [online]. [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://www.pf.jcu.cz/stru/katedry/fyzika/prof/Svadlenkova/Princip%20laseru.pdf>
- [7] Lasery. [Http://tc-pipa.wz.cz](http://tc-pipa.wz.cz) [online]. [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://tc-pipa.wz.cz/lasery.html>
- [8] ŠULC, Jan. Lasery a jejich aplikace. *PLS Laser Systems* [online]. 2002 [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://www.plslaser.cz/pdf/lasery.pdf>
- [9] PAVELEK, Milan. KOHERENCE ZÁŘENÍ. *Vysoké Učení Technické v Brně* [online]. Brno [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0206.htm>
- [10] Záření. [Http://ciselniky.dasta.mzcr.cz](http://ciselniky.dasta.mzcr.cz) [online]. [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://ciselniky.dasta.mzcr.cz/hypertext/200630/hypertext/AJBDN.htm>
- [11] Vlnová délka. *Univerzita Karlova v Praze* [online]. [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: http://fu.ff.cuni.cz/vyuka/akustika/1_zvuk.pdf
- [12] Interference. [Http://optics.mbhs.edu](http://optics.mbhs.edu) [online]. [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://optics.mbhs.edu/bubbles/interference.gif>
- [13/5] ČÍP, Ondřej, BUCHTA, Zdeněk. Přesné měření délek pomocí laserové interferometrie. [Http://www.crr.vutbr.cz/](http://www.crr.vutbr.cz/) [online]. 2011. Brno, 2002 - 2004 [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1110.pdf
- [14] PATA, Vladimír. *Úvod do laserinterferometrie*. 2005-2007.
- [15] Laserový systém ML10 Gold. *Renishaw* [online]. 2002 - 2004 [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://resources.renishaw.com/download.aspx?data=3192&lang=&showForm=true>
- [16] Laserový systém XL-80. *Renishaw* [online]. 2007 [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://resources.renishaw.com/download.aspx?data=15088&lang=&showForm=true>
- [17] Software pro laser XL-80. *Renishaw* [online]. [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/8480.aspx>

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 31
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

- [18] Software pro laser XL-80. *Http://www.idnovo.com.cn* [online]. [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: http://www.idnovo.com.cn/magazine/2009/0523/article_104.html
- [19] Optické příslušenství. *Http://www.renishaw.cz* [online]. [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/opticke-prislusenstvi-pro-laserove-merici-systemy--6807>
- [20] Měřicí optika. *Renishaw* [online]. [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/8427.aspx>
- [21] Stativy. *Renishaw* [online]. [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/obsluzne-programy--6809>
- [22] SAMEK, Krystyna. *Využití laserového interferometru renishaw ml10 pro kalibraci invarových nivelačních latí*. Dostupné z: http://www.fce.vutbr.cz/veda/dk2004texty/pdf/06_Geodezie%20a%20kartografie/6_01_Prakticke%20aspekty%20geodezie%20a%20kartografie/Samek_Krystyna.pdf
- [23] Porovnání laserových systémů. *Http://www.hellopro.co.uk/* [online]. [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://www.hellopro.co.uk/images/produit-2/4/4/1/browse-ml10-measurement-system-29144.jpg>
- [24] Interference a interferogram. *Gymnázium Ladislava Jaroše Holešov* [online]. [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: http://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/08_interf/08_interf.htm
- [25] Laserová hlavice ML10. In: *Tarus* [online]. [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.tarus.com/ckfinder/userfiles/images/laser.jpg>
- [26] Princip laseru. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>
- [27] *Lasery a koherentní svazky*. Praha: Academia, 1990. ISBN 80-200-354-1. Dostupné z: <http://people.fjfi.cvut.cz/sulcjan1/ult/Lasery%20a%20koherentni%20svazky.pdf>
- [28] Condition Monitoring & Maintenance Systems. *Divergence* [online]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.cmms.cz/ustavovani-a-vyvaovani/92-divergence-laseroveho-paprsku-.html>