



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

POSOUZENÍ GEOMETRICKÉ PŘESNOSTI OBRÁBĚCÍHO CENTRA POMOCÍ DIGITÁLNÍCH INKLINOMETRŮ

ASSESSMENT OF GEOMETRIC ACCURACY OF MACHINING CENTER USING DIGITAL INCLINOMETERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Únar

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing., Dipl.-Ing Michal Holub, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Bc. Jan Únar
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní stroje, systémy a roboty
Vedoucí práce:	Ing., Dipl.-Ing Michal Holub, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

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 diplomové práce:

Posouzení geometrické přesnosti obráběcího centra pomocí digitálních inklinometrů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem diplomové práce je navrhnout způsob měření geometrické přesnosti CNC obráběcího centra MCV 754 QUICK s využitím digitálních inklinometrů WYLER Bluesystem a Laser interferometr XL-80. Vyšetřována bude chyba přímosti lineární osy X stroje MCV a vzájemné srovnání výsledků ze zařízení WYLER a RENISHAW. Pro navržený postup vytvořit příslušnou dokumentaci.

Cíle diplomové práce:

Popis současného stavu techniky v oblasti nasazení inklinometrů.
Systémový rozbor problematiky, návrh a zdůvodnění zvoleného způsobu řešení zadaného úkolu.
Pro navržený postup naplánovat a provést experiment.
Statistické zpracování a vyhodnocení výsledku experimentu.
Vlastní závěry popisující vhodnost nasazení navrženého postupu.
Doporučení pro výuku.

Seznam doporučené literatury:

MAREK, J. a kol., MM Průmyslové spektrum: Konstrukce CNC obráběcích strojů IV. 2018. Speciální vydání. Dostupný z WWW: ISBN 978-80-906310-8-3.

WECK, M., Brecher, Ch. Werkzeugmaschinen: Konstruktion und Berechnung. 2006. überarb. Auflage. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2006. 701 s. ISBN 3-540-22502-1.

HOLUB, M. Geometric Accuracy of Machine Tools. In Measurement in Machining and Tribology. Springer, Cham, 2019. p. 89-112. ISBN: 978-3-030-03821-2.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá posouzením geometrické přesnosti obráběcího centra MCV 754 QUICK. Pro měření přesnosti byly použity digitální inklinometry BlueSYSTEM od firmy WYLER AG, laserový interferometr XL-80 od firmy RENISHAW, Ballbar QC20-W od firmy RENISHAW a samonaváděcí laserový interferometr LaserTRACER od firmy ETALON AG. Posuzovala se odchylka přímosti Z ve směru osy X.

V první části práce je popsána geometrická přesnost stroje, aktuální dostupné přístroje pro měření geometrické přesnosti a vysvětlení pojmu přímost. V druhé části je návrh měření, experiment, následné vyhodnocení a zpracování výsledků a doporučení pro výuku.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with assessment of geometric accuracy of machining center MCV 754 QUICK. BlueSYSTEM digital inclinometers from WYLER AG, XL-80 laser interferometer from RENISHAW, Ballbar QC20-W from RENISHAW and LaserTRACER self-guiding laser interferometer from ETALON AG were used to measure accuracy. Error of the X straightness in the direction of the Z axis was assessed.

The first part of the paper describes the geometric accuracy of the machine, currently available instruments for measuring geometric accuracy and an explanation of straightness. The second part consists of the design of measurements, experiment, evaluation and comparison of results and recommendations for teaching.

KLÍČOVÁ SLOVA

Přesnost obráběcího stroje, Měření přímosti, Laser interferometry, Ballbar, Digitální inklinometry

KEYWORDS

Machine tool accuracy, Straightness measurement, Laser interferometers, Ballbar, Digital inclinometers

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ÚNAR, Jan. *Posouzení geometrické přesnosti obráběcího centra pomocí digitálních inklinometrů*. Brno, 2021. 101 s. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134994>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Ing., Dipl.-Ing Michal Holub, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing., Dipl.-Ing Michal Holub, Ph.D. za cenné připomínky, rady, trpělivost a čas, které mi věnoval při vypracovávání této diplomové práce.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing., Dipl.-Ing Michala Holuba, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 21.5.2021

.....

Jan Únar

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ	17
2.1	Přesnost obráběcích strojů	17
2.1.1	Geometrická přesnost	18
2.1.2	Přesnost polohování.....	19
2.1.3	Přesnost kruhové interpolace.....	20
2.1.4	Teplotní dilatace	20
2.1.5	Pracovní přesnost.....	21
2.1.6	Volumetrická přesnost.....	21
2.2	Přístroje pro měření geometrické přesnosti	22
2.2.1	Laser interferometry	22
2.2.2	Laserový systém XK10	26
2.2.3	Ballbar	30
2.2.4	LaserTRACER.....	32
2.2.5	Laser Tracker	33
2.2.6	Digitální inklinometry	35
2.3	Měření přímosti.....	38
2.4	Technická specifikace stroje MCV 754 QUICK	41
2.5	Kompenzace na řídicím systému Siemens 840D sl	42
3	NÁVRH MĚŘENÍ NA STROJI MCV	45
3.1	Postup měření přímosti interferometrem Renishaw XL-80.....	47
3.2	Postup měření přímosti WYLER Bluesystemem	59
3.3	Postup měření přímosti LaserTRACEREM	62
3.4	Postup měření přímosti Ballbarem QC20-W	64
4	EXPERIMENT	67
4.1	Měření s přístrojem Renishaw XL-80	67
4.2	Měření s přístrojem WYLER Bluesystem	70
4.3	Měření s přístrojem Ballbar QC20-W	74
4.4	Měření s přístrojem LaserTRACER	75
5	STATISTICKÉ ZHODNOCENÍ	77
6	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	80
7	ZÁVĚR	83
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	84
9	SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	89
9.1	Seznam tabulek	89
9.2	Seznam obrázků.....	89
10	SEZNAM PŘÍLOH	93

1 ÚVOD

Vývoj v oblasti obráběcích strojů je velmi rychlý, což způsobuje neustálou změnu požadavků na tyto stroje. Jeden ze základních požadavků je přesnost obráběcích strojů. Se zvyšujícími se požadavky na výrobní přesnost a s požadavky na zachování výkonu, vysoké produktivity a nákladové efektivity, se návrh obráběcích strojů stává velmi složitým úkolem.

Existuje mnoho způsobů, jak požadované přesnosti u obráběcích strojů dosáhnout. Jednotlivé metody se od sebe liší potřebnými náklady, časem a efektivností. Jedním ze základních způsobů, jak dosáhnout požadované přesnosti, je ovlivnění samotné výroby a následné montáže obráběcího stroje vhodnou volbou konstrukce a způsobu výroby jednotlivých částí stroje. Další možností, jak zvýšit přesnost, je numerická kompenzace, která se provádí již na smontovaném a ustaveném stroji.

V současnosti rychle se vyvíjející metodou pro zvýšení přesnosti je volumetrická kompenzace. Spočívá v odhalení chyb v místě pracovního prostoru stroje a následné minimalizaci těchto chyb. Na trhu je několik zařízení, která lze pro odhalení chyb použít. Výběr vhodného zařízení vychází z mnoha faktorů jako jsou např. typ stroje, požadovaná přesnost nebo velikost stroje. Nejvíce používané postupy pro kontrolu geometrické a pracovní přesnosti se řídí normou ISO 230 u tříosých strojů a ISO 10791 u pětiosých strojů.

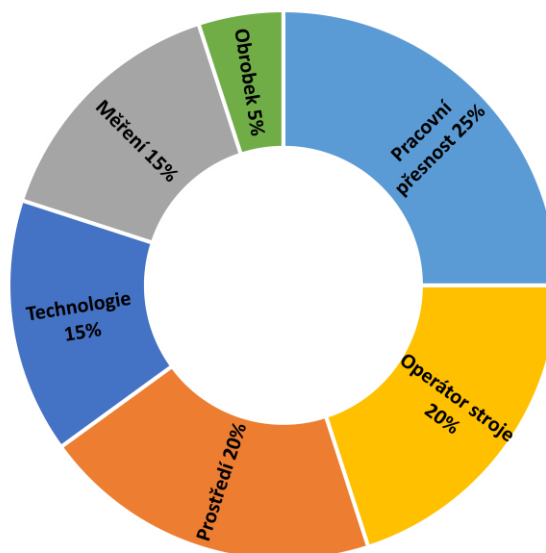
Tato práce je zaměřena na posuzování geometrické přesnosti, a to konkrétně přímosti pomocí digitálních inklinometrů BlueSYSTEM od firmy WYLER AG, laserového interferometru XL-80 od firmy RENISHAW, Ballbaru QC20-W od firmy RENISHAW a samonaváděcího laserového interferometru LaserTRACER od firmy ETALON AG. Všechny tyto přístroje byly nasazeny na posouzení chyby přímosti na stroji MCV 754 QUICK od firmy KOVOSVIT MAS.

Předmětem práce je zhotovit postup měření přímosti lineární osy X, provést řadu experimentů, porovnat jednotlivé metody měření a statisticky je vyhodnotit.

2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

2.1 Přesnost obráběcích strojů

Přesnost obráběcích strojů je jedním ze základních aspektů při hodnocení stroje. Na přesnost jsou kladeny vysoké nároky za účelem dosažení předepsaných geometrických a rozměrových tolerancí. Přesnost výrobního stroje je ovlivněna geometrií stroje, kinematikou stroje, teplotními, deformačními a dynamickými chybami a chybami v řídicích systémech. [1]



Obr.: 2.1 Vlivy na přesnost výroby obrobků [1]

Abychom byli schopni srovnávat a hodnotit jednotlivé obráběcí stroje, existují mezinárodní normy. Zkoušky pro obráběcí centra se řídí normami řady ČSN ISO 230 (Tab.: 2.1) a ČSN ISO 10791. Pro číslicově řízené soustruhy a soustružnická centra je určena norma ČSN ISO 13041.

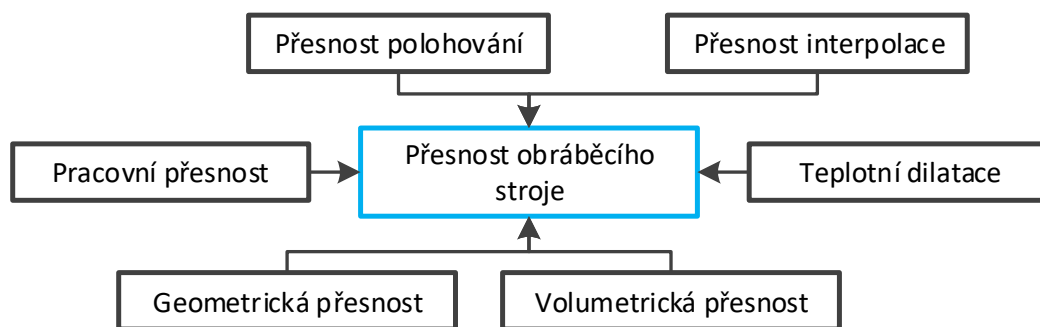
Tab.: 2.1 Zkoušky obráběcích strojů dle ČSN ISO 230 [2]

Označení	Popis normy
ČSN ISO 230-1	Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za kvazistatických podmínek
ČSN ISO 230-2	Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách
ČSN ISO 230-3	Určení tepelných vlivů
ČSN ISO 230-4	Zkoušky kruhové interpolace u číslicově řízených strojů
ČSN ISO 230-5	Určení emise hluku
ČSN ISO 230-6	Určení přesnosti nastavení polohy na diagonálách tělesa a stěn
ČSN ISO 230-7	Geometrická přesnost os otáčení
ČSN ISO 230-8	Určení úrovně vibrací
ČSN ISO 230-9	Určení nejistoty měření pro zkoušky obráběcích strojů podle série 230
ČSN ISO 230-10	Určení měřicích vlastností snímacích systémů číslicově řízených obráběcích strojů

Měření obráběcích strojů se provádí vždy několikrát, aby došlo k přesnějšímu výsledku a výsledek nebyl tolik ovlivněn náhodnou chybou. Avšak velký počet opakování může způsobit, že se měření stává méně přesným, protože může dojít k porušení podmínek měření. Dalším faktorem, proč není vhodný velký počet opakování, jsou vzniklé ztráty, když stroj není k dispozici pro obrábění.

Výsledky měření se vyhodnocují pomocí statistických metod. Chybou v oblasti přesnosti obráběcích strojů rozumíme odchylku naměřené hodnoty od hodnoty skutečné (teoretické). Naměřená hodnota se nikdy nemůže rovnat skutečné hodnotě, protože neexistuje ideálně přesné měřidlo a nelze stanovit ideální podmínky pro měření. Pokud je výsledek měření vztažen k pravé hodnotě, hovoříme o chybě absolutní. V případě, že je podíl chyby vztažen pouze k teoretické hodnotě, hovoříme o chybě relativní udávané v procentech. Chyby můžeme rozdělit do dvou kategorií. Tou první jsou chyby systematické, do kterých spadá například chyba v dělení v měřicích systémech, zahřívání stroje nebo geometrické chyby. Tyto chyby jsou za určitých podmínek opakovatelné a pohybují se v okrajových hodnotách. Druhá kategorie jsou chyby náhodné, u kterých nelze predikovat hodnotu a nejsou opakovatelné. Nejčastější příčinou těchto chyb bývají vůle v ložisku, otupení nástroje nebo vibrace. [2]

Obráběcí stroje jsou v dnešní době složitá zařízení, na která jsou kladeny nejrůznější požadavky. Přesnost obráběcích strojů je tak složitou problematikou, do které vstupuje mnoho parametrů, viz Obr.: 2.2.



Obr.: 2.2 Rozdělení přesnosti obráběcích strojů [2]

2.1.1 Geometrická přesnost

Geometrickou přesnost ovlivňuje struktura obráběcího stroje. Pomocí geometrické přesnosti je možné vyhodnotit vlastnosti funkčních částí stroje. Pro určení geometrické přesnosti existuje norma ČSN ISO 230-1. Ověřují se jednotlivé rozměry, tvary a plochy součástí a jejich vzájemné ustavení. Měří se rovinnost, kolmost, přímmost, sousost, rovnoběžnost a protínání os. Před zkouškou, je potřeba mít stroj kompletně smontován a ustaven na kvalitních základech. Zkouška se provádí v nezátíženém stavu, v některých případech může probíhat při podmínkách pro dokončovací operace. Okolí stroje by mělo být podobné podmínkám, které budou v běžném provozu. Zejména by uživatel stroje měl zajistit přijatelné teplotní podmínky (ideálně 20 °C) bez větších kolísání od stanovené hodnoty. [1]

Třiosé obráběcí stroje mají 21 geometrických chyb, přičemž každá osa má 3 chyby translační (polohování, přímmost) a 3 chyby úhlové. Podrobněji jsou znázorněny v Obr.: 2.3 a Tab.: 2.2. Další tři chyby jsou od vzájemných kolmostí os. Pro pětiosé stroje přibývá dalších 22 chyb, což ve výsledku znamená 43 geometrických chyb. Všechny chyby se projeví na celkové přesnosti obráběných dílů. [2]

2.1.3 Přesnost kruhové interpolace

Zkouška kruhové interpolace (Obr.: 2.4) je efektivní způsob pro odhalení různých druhů chyb (reverzační špičky, lokální ohřev, vůle v osách, prodleva servopohonu, chyba v odměřování, kolmosti atd.). Spočívá ve vzájemném pohybu dvou os po kruhové dráze. Vyhodnocuje se odchylka naměřené dráhy od dráhy teoretické, naprogramované v řídicím systému. Tímto získáme dobrou a rychlou představu o přesnosti stroje. Musí být splněna podmínka měření části kruhu o rozsahu alespoň 90°. Měření se řídí normou ISO 230-4, přičemž platí, že stroj musí být plně funkční, temperován na provozní teplotu a v prostředí s konstantní teplotou, ideálně 20 °C. [2]



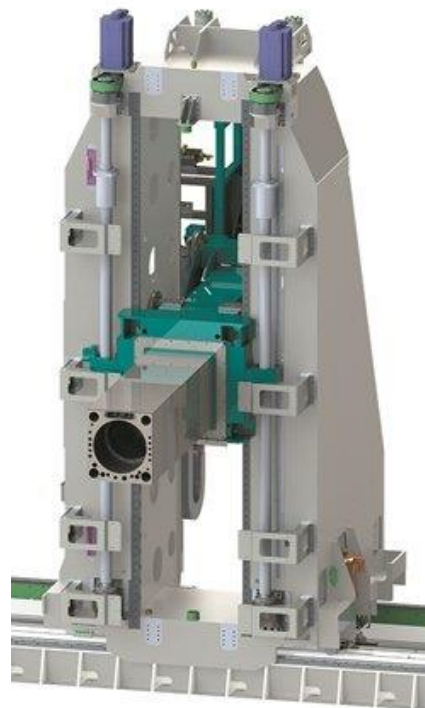
Obr.: 2.4 Testování stroje pomocí kruhové interpolace [4]

Výsledkem zkoušky jsou hodnoty kruhové hystereze, úchytky kruhovitosti a radiální úchytky kruhové dráhy. Aby se vyloučil účinek chyby nastavení, měření se transformuje do středu kruhu pomocí metody nejmenších čtverců. Pro měření kruhové interpolace se používá Double Ballbar, který se skládá ze dvou přesných magnetických kuliček a senzoru pro měření jejich relativní vzdálenosti. Více o tomto zařízení je v kapitole 2.2.3. [5]

2.1.4 Teplotní dilatace

Teplota má na přesnost výrobních strojů zásadní vliv. Teplotní vlivy lze rozdělit na vnější, u kterých je stroj ovlivněn od okolního prostředí stroje, a vnitřní, které vznikají od tření jednotlivých částí stroje o sebe, od pohonů a řezného procesu. Velký teplotní proud je ve stroji způsoben i u částí s kuličkovým šroubem. Při vysokých rychlostech se vlivem tření šroub rychle zahřívá a toto teplo se šíří do dalších částí stroje. Při zahřívání stroje je typická rychlost zvětšování částí 100 $\mu\text{m}/\text{m}$ za 20 minut, a to může výrazně ovlivnit odchylky na obrobku. Pro zkoušku teplotních deformací existuje norma ISO 230-3. Spočívá v použití přístroje například SEA (Spindle Error Analyzer), který je vybaven řadou kapacitních čidel. Pomocí tří takových čidel jsme schopni změřit posunutí všech os. [6] [7]

Prvků pro snížení nepřesností na obrobku od teplotních vlivů je v moderních strojích mnoho. Aktivní chlazení částí, kde vzniká nejvíce tepla, nebo symetrická konstrukce stroje (Obr.: 2.5) jsou u dnešních strojů velmi časté. [6]



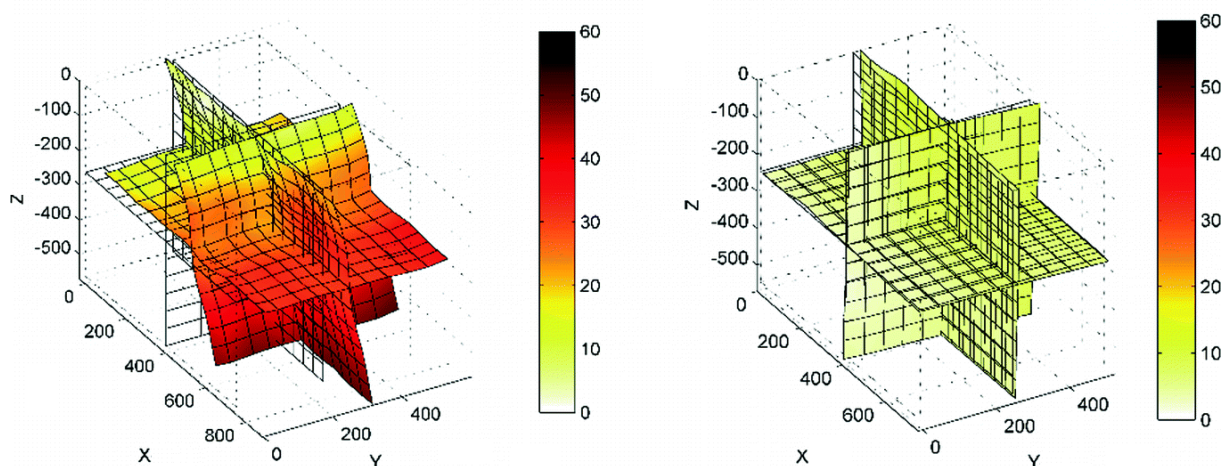
Obr.: 2.5 Tepelně symetrická konstrukce [6]

2.1.5 Pracovní přesnost

Pracovní přesnost popisuje, s jakou přesností a produktivitou jsme na daném stroji schopni zhotovit zkušební obrobek nebo sadu zkušebních obrobků. Je ovlivněna geometrickou přesností stroje, přesností najetí nástroje do určité polohy, obsluhou stroje, odolností vůči teplotním vlivům, volbou řezných podmínek a odolností stroje vůči deformacím, které jsou vyvolány řezným procesem. Před zkouškou je potřeba ustálit teplotu prostředí stroje a provést několik zahřívacích cyklů. Je potřeba mít na mysli, že obrobek může stroj mírně deformovat. Deformace může nastat i na obrobku při upínání. Vyhodnocení přesnosti testovacího obrobku se zpravidla provádí na přesnějším stroji, nejčastěji na souřadnicovém měřicím přístroji. [3]

2.1.6 Volumetrická přesnost

Často používanou metodou při měření přesnosti obráběcích strojů je volumetrická přesnost a její následná kompenzace (Obr.: 2.6). Volumetrická přesnost je ovlivněna od všech chyb geometrické přesnosti. Předmětem kompenzace je snižovat chyby najetí nástroje do jakéhokoliv bodu v pracovním prostoru nazývaném TCP prostor. Podstata metody spočívá v určení vektorových odchylek v určitých bodech TCP prostoru a jejich kompenzaci. Interpolací se zjistí odchylky ve všech bodech prostoru a tato informace se pošle do řídicí jednotky stroje. Pro dosažení velké přesnosti a jednoduchosti je interpolace založena na metodě Gaussových procesů (GPR). [2] [8]



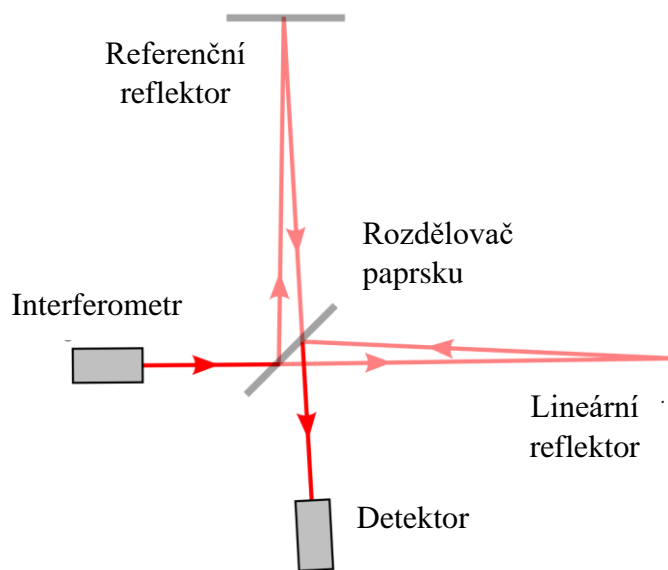
Obr.: 2.6 Volumetrická mapa chyb před a po kompenzaci [9]

V normě ISO 230-1 je volumetrická přesnost popsána jako maximální relativní rozsah mezi skutečnou a ideální pozicí ve směru X, Y, Z a maximální rozsah orientace pro směry os A, B, C pro pohyby X, Y, Z v určeném prostoru. Zkouška ISO 230-6 umožňuje odhadnout volumetrickou přesnost diagonálního přestavení. Měřit volumetrickou přesnost na stroji je složité a zdoluhavý proces, proto byly vymyšleny zkoušky diagonálního přestavení, které nejsou tak složité, nenahrazují však plně jiné zkoušky. Volumetrickou přesnost lze měřit například LaserTrackerem, který byl pro tento účel vyvinut. [2] [8]

2.2 Přístroje pro měření geometrické přesnosti

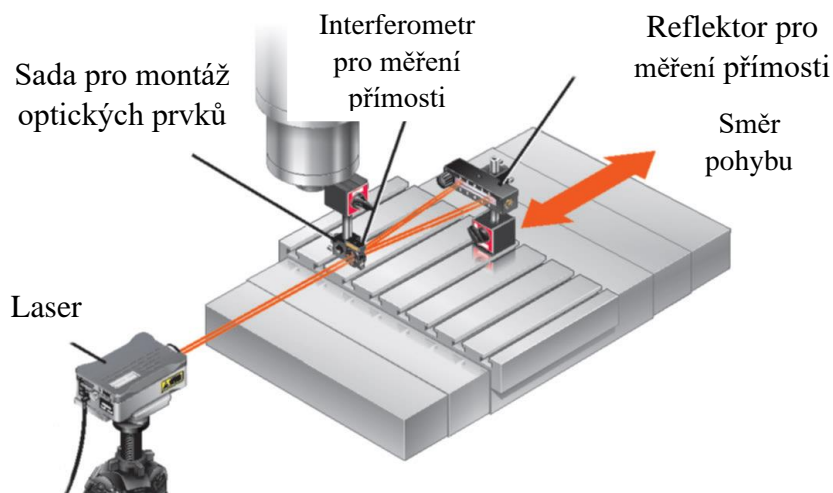
2.2.1 Laser interferometry

Roku 1887 vědec Abraham Michelson navrhl a sestavil Michelsonův interferometr. Dnes se toto zařízení používá pro přesné měření vzdálenosti pomocí několika zrcadel a odražečů. Princip tohoto interferometru je založen na štěpení paprsku koherentního světla na dva stejné paprsky. Paprsek vycházející z interferometru je stabilizován s vlnovou délkou $0,633\mu\text{m}$. Jeden z paprsků je referenční a je odražen do reflektoru, který je součástí rozdělovače paprsků. Druhý je nasměrován na lineární reflektor a vrací se zpět do rozdělovače. Oba paprsky se opět v rozvaděči spojí a interferují na reflektor. Rozdílné vzdálenosti drah paprsků způsobí, že se vytvoří fázový posun, který se na detektoru vyhodnotí. Princip je znázorněn na Obr.: 2.7. [10]



Obr.: 2.7 Princip Michelsonova interferometru [41]

Reflektory zajistí, že paprsky budou rovnoběžné u referenční i měřicí větve. V momentě spojení paprsků dochází k vzájemné destrukci nebo konstrukci paprsku. Při konstrukci mají paprsky stejnou fázi a zesilují se. U destrukce mají paprsky rozdílnou fázi a zeslabují se. Při měření lineárních vzdáleností se jedna část (nejčastěji část s přímým reflektorem) pohybuje ve směru měřené osy a druhá část je statická (Obr.: 2.8). [2]



Obr.: 2.8 Princip měření rovinnosti interferometrem [11]

Vlnová délka paprsku je závislá na indexu lomu vzduchu. Index se mění v závislosti na tlaku, teplotě a relativní vlhkosti. Pokud by nebyla vlnová délka kompenzována, vznikaly by velké chyby, až 50 ppm. Proto se používá kompenzátor prostředí, pomocí kterého zjistíme index lomu. Laser se pak v závislosti na tomto indexu přenastaví. [2]

Mezi nejvíce používané interferometry pro měření přesnosti strojů patří Laser interferometr XL-80 od společnosti Renishaw. Základní parametry tohoto přístroje jsou v následující tabulce (Tab.: 2.3).

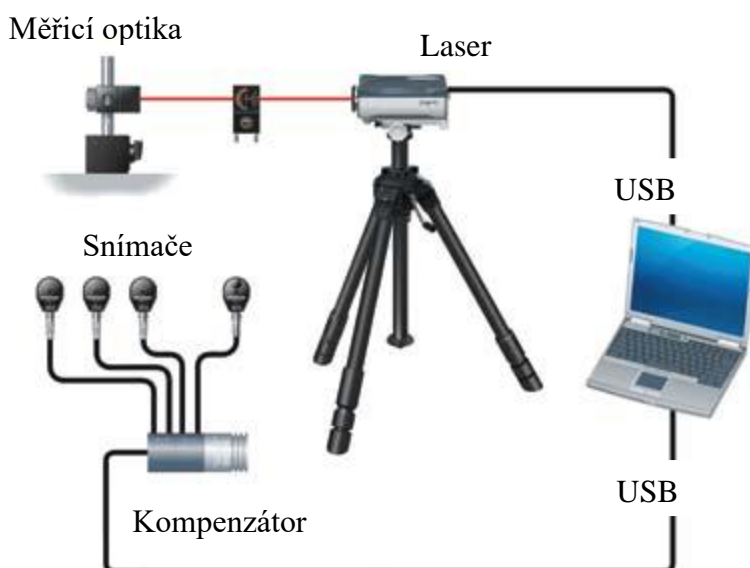
Tab.: 2.3 Základní parametry Renishaw XL-80 [11]

Parametr	Hodnota
Přesnost frekvence laseru	$\pm 0,05 \text{ ppm}$
Přesnost lineárního měření	$\pm 0,5 \text{ } \mu\text{m/m}$
Maximální rychlost posuvu	4 m/s
Lineární rozlišení	1 nm
Frekvence dynamického snímání dat	10 Hz - 50 kHz
Rozsah lineárního měření	0 - 80 m
Interface	USB port
Doba stabilizace	6 minut
Pracovní teplota	0 °C - 40 °C
Tlak vzduchu	650 - 1150 hPa
Hmotnost celého zařízení	17 kg

Laser má pro přenos dat zabudovaný USB port. Zapojení přístroje je znázorněno na Obr.: 2.9. Laserová hlavička má konektor s analogovým výstupem. Signál lze nastavit na obdélníkový. Součástí vybavení XL-80 je i kompenzátor (Obr.: 2.10), který se stejně jako laser připojuje k PC pomocí USB portu, jenž zároveň slouží k jeho napájení. Před odesláním dat do kompenzátoru jsou signály zpracovávány integrovaným mikroprocesorem. Je možné připojit až tři snímače teploty, díky kterým lze normalizovat teplotu na 20 °C. [11]

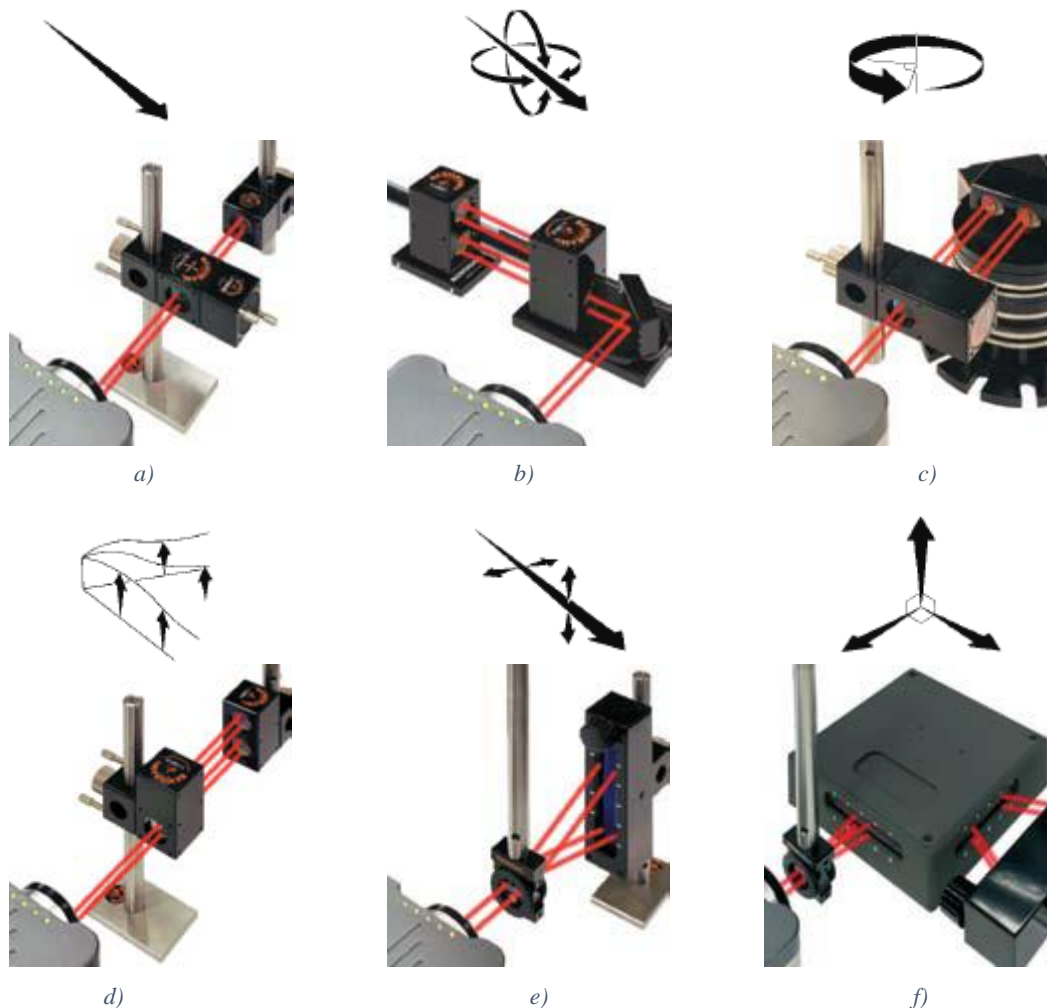


Obr.: 2.10 Kompenzátor XC-80 [12]



Obr.: 2.9 Systém zapojení [13]

S Renishaw XL-80 a pomocí měřicí optiky lze provádět měření lineární a úhlové (včetně rotačních os), měření kolmosti, přímosti a rovinnosti (Obr.: 2.11). Pro měření lze použít několik softwarů. Často používaným je LaserXL nebo XCal-View. Zpracování dat je prováděno podle norem ISO, ASME, JIS, VDI a GB. [12]



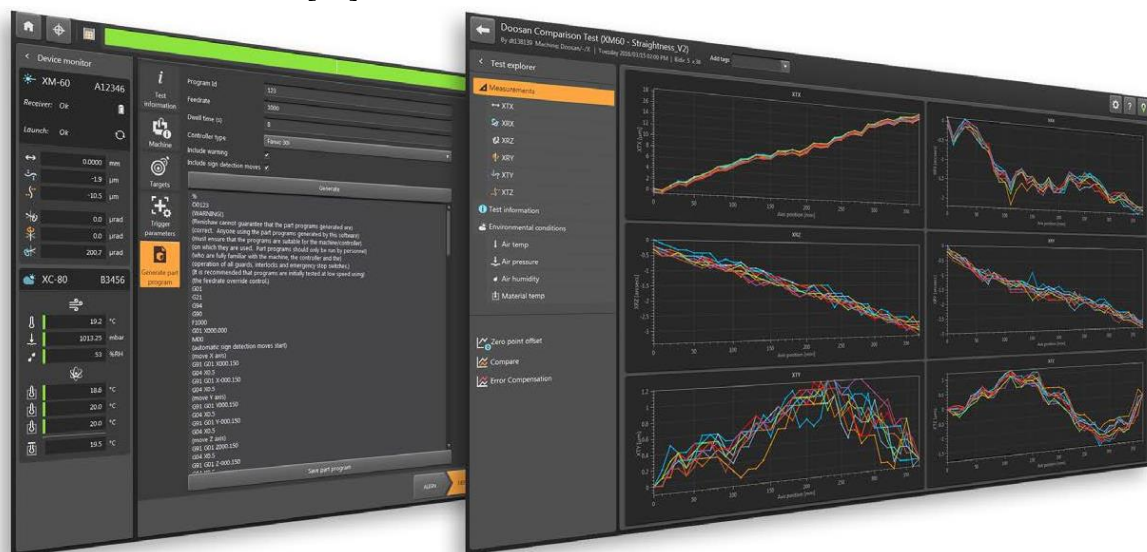
Obr.: 2.11 Optika interferometru pro měření [13]

- a) Polohy (EXX, EYY, EZZ)
- b) Úhlu ($EAY, EAZ, EBX, EBZ, ECX, ECY$)
- c) Rotačních os (ECC)
- d) Rovinnosti
- e) Přímosti ($EYX, EZX, EXY, EZY, EXZ, EYZ$)
- f) Kolmosti ($A0Z, B0Z, C0Y$)

Další a velmi efektivní zařízení pro měření geometrické přesnosti je Renishaw XM-60 (Obr.: 2.13). Představuje výkonnou kontrolu všech stupňů volnosti najednou při jediném nastavení. To významně ušetří čas a současně umožňuje získat rychlou představu o geometrické přesnosti stroje.

Každý předmět má šest stupňů volnosti a podobně lze definovat vztah mezi obrobkem a nástrojem. Chyby v jednotlivých rovinách způsobují geometrické a tvarové odchylky. XM-60 je schopno změřit všech šest chyb stupňů volnosti, a tím identifikovat přímé zdroje chyb. Je mnohem efektivnější než metody založené pouze na lineárním měření. XM-60 je navrženo jako přímé měření vyrovnáním paprsku s osou stroje. Celý systém se skládá z laseru (vysílací

jednotky), přijímače a kompenzátoru prostředí XC-80. Přijímač údaje přenáší pomocí integrovaného bezdrátové připojení. Pro systém XM-60 existuje software CARTO (Obr.: 2.12), který slouží pro celý proces od nastavování testů až po analýzu dat. I přes složitost zařízení je software velmi intuitivní. [14]



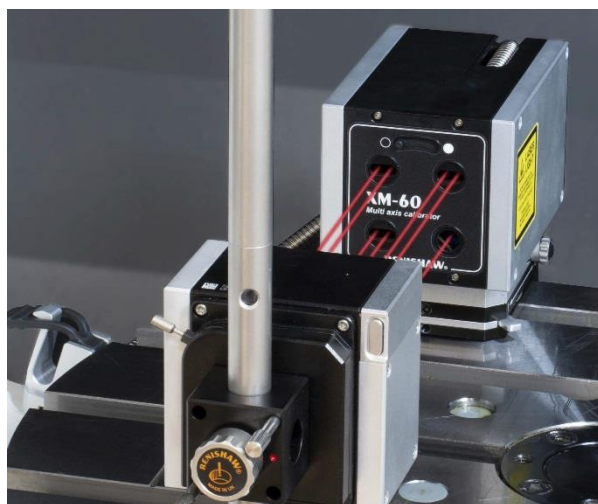
Obr.: 2.12 Software CARTO [14]

Následující tabulka zobrazuje technické parametry při měření lineárního polohování, úhlových měření, měření přímosti a válcovitosti.

Tab.: 2.4 Parametry Renishaw XM-60 [15]

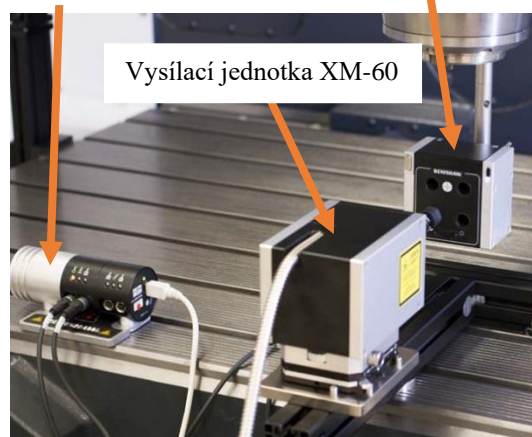
	Přesnost	Rozlišení	Rozsah
Lineární polohování	$\pm 0,5 \text{ ppm}$	1 nm	$\pm 0,5 \text{ } \mu\text{m/m}$
Úhlová měření	$\pm 0,004 A \pm (0,5 \text{ } \mu\text{rad} + 0,11M \text{ } \mu\text{rad})$	0,03 μrad	$\pm 500 \text{ } \mu\text{rad}$
Přímost	Typický rozsah: $\pm 0,01 A \pm 1 \text{ } \mu\text{m}$ Rozšířený rozsah: $\pm 0,01 A \pm 1,5 \text{ } \mu\text{m}$	0,25 μm	$\pm 50 \text{ } \mu\text{m}$ $\pm 250 \text{ } \mu\text{m}$
Válcovitost	$\pm 0,01 A \pm 6,3 \text{ } \mu\text{rad}$	0,12 μrad	$\pm 500 \text{ } \mu\text{rad}$

A = zobrazovaná chyba při čtení (μm), M = měřená vzdálenost (m)



Kompenzátor prostředí XC-60

Přijímač XM-60



Obr.: 2.13 Kalibrační zařízení XM-60 [14]

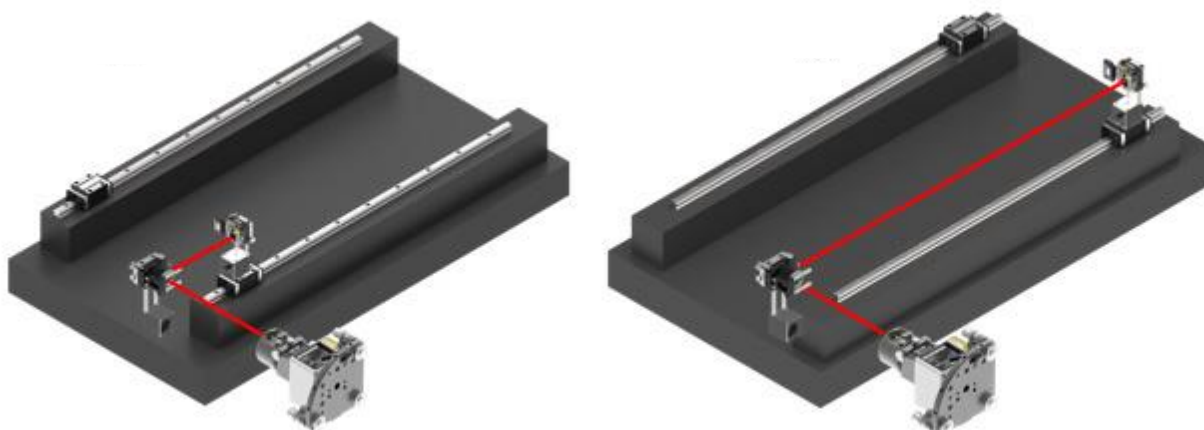
2.2.2 Laserový systém XK10

Vyrovnávací laserový systém XK10 (Obr.: 2.14) byl vyvinut za účelem měření geometrické přesnosti obráběcích strojů. Je vhodný pro měření všech typů obráběcích strojů i s rotačními osami. Stejně jako s kalibračním zařízením XM-60, jsme schopni měřit několik geometrických chyb při ustavení systému. Proto je zařízení vhodné použít během ustavování stroje a měřit chyby s okamžitým vyhodnocením. [16]



Obr.: 2.14 Laserový systém XK10 [17]

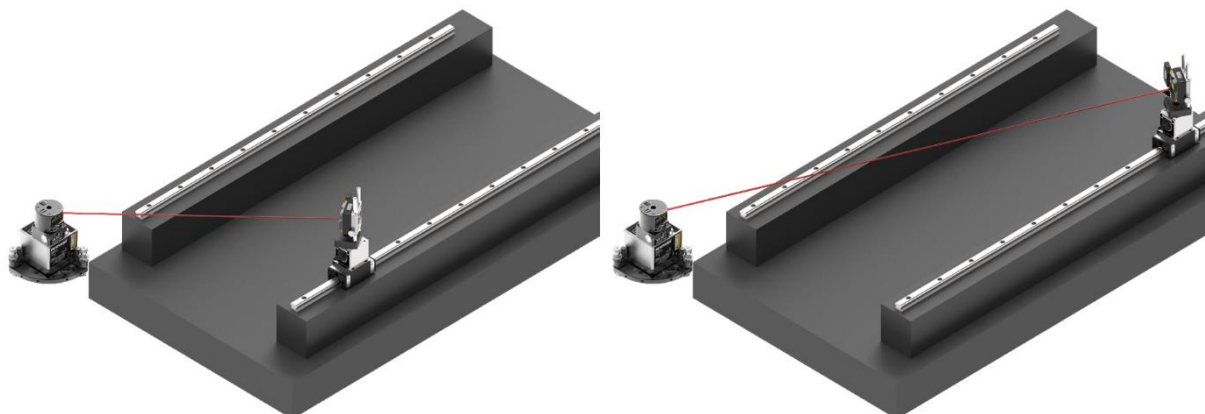
Mezi častou aplikaci tohoto přístroje se řadí měření přímosti a rovnoběžnosti lineárních vedení. U pohyblivých částí obráběcích strojů, které mají standardně dvě rovnoběžná vedení, se tímto přístrojem měří rovnoběžnost a paralelní přímost v horizontálním (Obr.: 2.15) a vertikálním pohledu (Obr.: 2.16). [18]



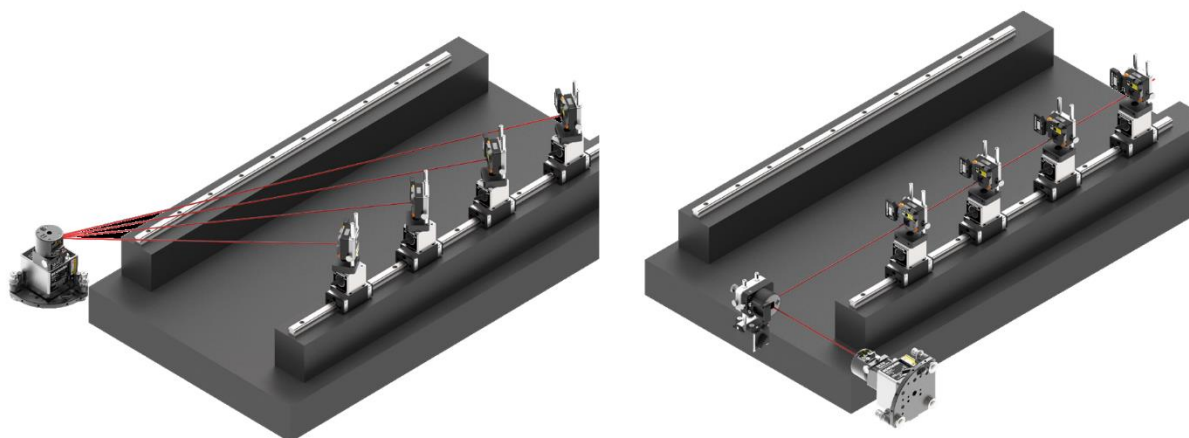
Obr.: 2.15 Horizontální měření rovnoběžnosti vedení [18]

Z laserového vysílače je vyslán paprsek na statickou jednotku, která odráží paprsek na pohyblivou jednotku. Na začátku a konci vedení se zaznamená bod, pomocí kterého se vypočítá vodorovný úhel. Měření se provede i na druhém vedení a získáme další úhel. Pomocí těchto dvou úhlů se získá horizontální rovnoběžnost vedení. Měření přímostí v horizontálním směru je obdobné s tím rozdílem, že neměříme pouze začátek a konec vedení, ale několik bodů po určitém kroku. Pro měření rovnoběžnosti ve vertikálním směru se používá nastavení systému,

které je stejné jako u měření rovinnosti. Skládá se pouze z laserového vysílače a pohyblivé jednotky. Měření přímostí ve vertikálním směru se určí přes několik bodů po určitém kroku. [18]



Obr.: 2.16 Vertikální měření rovnoběžnosti vedení [18]



Obr.: 2.17 Měření rovinnosti vedení [18]

Obecně lze s tímto přístrojem měřit s rozsahem $\pm 5 \text{ mm}$. Při větších rozdílech zařízení přestane plnit svou funkci. Přesnosti pro jednotlivé typy měření jsou na následující tabulce. [18]

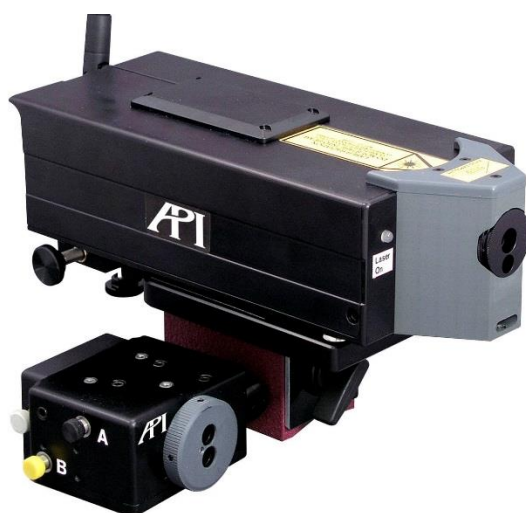
Tab.: 2.5 Přesnosti pro určité aplikace přístroje XK10 [17]

Typ měření	Hodnota
Přímost	$\pm 0,01 A \pm 1 \mu\text{m}$
Kolmost	$\pm 0,01 X/M \pm 2/M \pm 10/M \mu\text{m}$
Rovinnost	$\pm 0,01 A \pm 1 \pm (1 + 1,1 X) \mu\text{m}$
Rovnoběžnost - úhel mezi vedeními	$\pm 0,01 A/N \pm 2/N \pm 4 \mu\text{m}/m$
- geometrická tolerance vztažena k bodu	$\pm 0,01 A \pm 2 \pm 4 N \mu\text{m}/m$
Osa vřetena	$\pm 3 \mu\text{m} / 300 \text{ mm}$
Souosost	$\pm 1 \mu\text{m} / 100 \text{ mm}$

X = zobrazená hodnota přímosti nejvzdálenějších bodů (μm), A = zobrazená hodnota přímosti (μm),
 M = délka kratší osy (m), N = délka měřené osy (m)

Stejně jako u přístroje XM-60 se pro nastavování a vyhodnocování měření používá software CARTO.

Kromě Renishaw je předním výrobcem v oblasti laser interferometrických systémů i společnost API (Application Programming Interface), která nabízí řadu systémů od základních XD-1 pro měření délek až po systémy XD-6D, které jsou schopny měřit až 6 stupňů volnosti. Všechny systémy existují ve dvou variantách, se standardní přesností a zvýšenou přesností. Přenos dat jednotlivých komponentů je zajištěn bezdrátově. Systém XD-6D (Obr.: 2.18) se skládá pouze z přijímacího vysílače a přijímací jednotky. Odpadá nutnost používat přídatná zrcadla jako u běžných interferometrických systémů. Systém XD-6D je jedním z mála zařízení, se kterým lze měřit parametr “roll“, “pitch“, “yaw“ a zároveň měřit linearitu. Dalším již zmíněným systémem, který je schopen toto měřit je Renishaw XK10. Velkou výhodou těchto systémů je okamžité vyhodnocení výsledků. Oproti ostatním systémům se dosáhne výrazné úspory času. Měření, které normálně trvá několik dní, jsou schopny tyto systémy zvládnout za několik hodin. Měření je i přesnější, neboť se ve výrobních prostředích většinou nedaří udržovat konstantní teplotu několik dnů. [19] [20]



Obr.: 2.18 API Laser XD-6D [21]

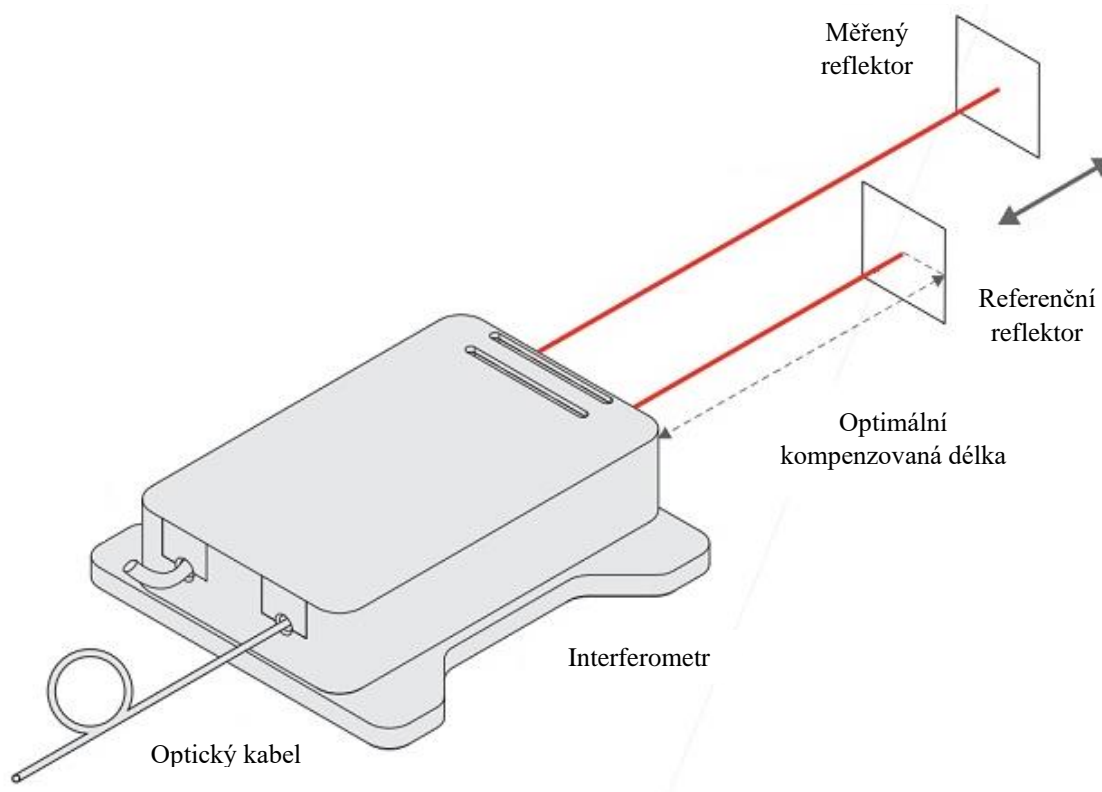
Dalším předním výrobcem je společnost SIOS. V nabídce má interferometry s jedním až třemi paprsky a speciální kalibrační zařízení. Jednopaprskový interferometr je určený pouze pro měření vzdálenosti. Dvou a třípaprskové interferometry jsou určené pro měření polohy, přímosti a náklonu. Nejpresnějším dostupným zařízením od této společnosti je kalibrační



Obr.: 2.19 Kalibrační interferometr SP 15000 C5 [22]

interferometr SP 15000 C5 (Obr.: 2.19), který je schopen měřit až 5 stupňů volnosti. Kromě zjišťování chyb u obráběcích strojů, se zařízení používá na kalibraci měřících CMM přístrojů. Je určen i pro měření linearitu dlouhých vedení. Přístroj měří s lineárním rozlišením 20 pm a úhlovým rozlišením až 0,0004". [22]

Dále společnost nabízí interferometr SP 5000 DI založený na diferenčním odměřování, který minimalizuje dead path (nevyužité optické dráhy). Měřený objekt může být ve velké vzdálenosti a dochází k pouze minimálnímu ovlivnění rozlišení. Princip je zobrazen na Obr.: 2.20. Hlavním rozdílem oproti standartním laserovým interferometrům je v pozici referenčního zrcadla, které je umístěno mimo hlavu senzoru. Zařízení je schopno měřit s lineárním rozlišením 20 pm a s úhlovým rozlišením 0,001". [23]



Obr.: 2.20 SIOS SP 5000 DI [24]

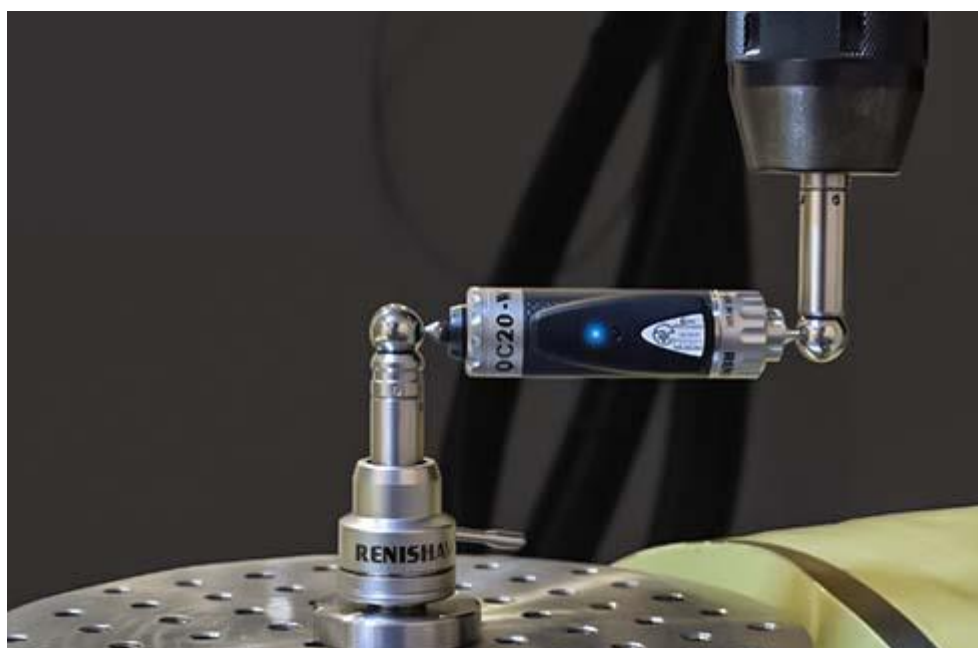
Nejistota měření typicky závisí na opakovatelnosti měření a na kalibraci reflektoru pro měření přímosti. Jakákoliv nerovnost v zrcadle reflektoru způsobí nepřesnosti, které se negativně projeví na přesnosti měření. Následující tabulka znázorňuje vliv prostředí na nejistotu měření.

Tab.: 2.6 Vliv prostředí na nejistotu měření [22]

Podmínky	Změna	Vliv na nepřesnost
Teplota vzduchu	1 °C	1 μm/m
Tlak vzduchu	1 hPa	0,3 μm/m
Relativní vlhkost vzduchu	10 %	0,1 μm/m
Obsah CO ₂	100 mg/l	14 nm/m

2.2.3 Ballbar

Ballbar (Obr.: 2.21) je lineární snímač, který si společnost Renishaw nechala patentovat. Používá se k měření kruhové interpolace na CNC obráběcích strojích v souladu s uznávanými mezinárodními normami, jako jsou ISO 230-4, ASME B5.54/57 a GB 17421.4. Princip spočívá v tom, že jedna část je upevněna na stole obráběcího stroje a druhá část ballbaru je ve vřetenu obráběcího stroje, který koná naprogramovanou kruhovou dráhu. Kruhová dráha může být o rozsahu 360°, nebo jen jako část kruhové dráhy o rozsahu 220° (Obr.: 2.22). Teoretická naprogramovaná dráha se pak porovnává se skutečnou naměřenou dráhou, kterou vykonává stroj. Ballbar se skládá ze dvou vysoce přesných magnetických kuliček a teleskopické tyče mezi nimi. V tyči je umístěn snímač polohy, který funguje jako lineární diferenciální transformátor. Při změně vzdálenosti kuliček dochází k pohybu cívek, což způsobuje změnu indukčnosti. Zpracování signálu se provede v ballbaru a pomocí Bluetooth (u starších verzí USB) je poslán do počítače s nainstalovaným softwarem. Ballbar je napájen standartními lithiovými bateriemi CR2, jejichž stav ukazuje LED indikátor na pouzdru ballbaru. [25] [26]



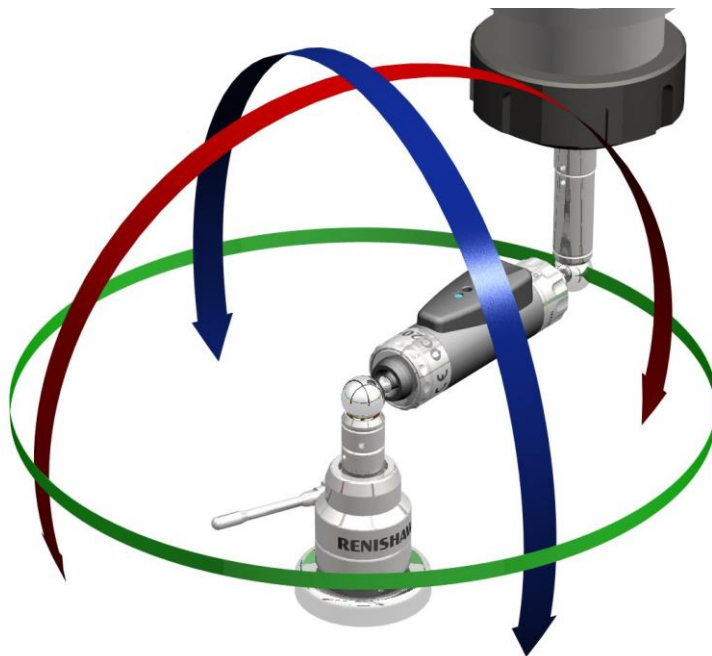
Obr.: 2.21 Ballbar QC20-W [27]

Tab.: 2.7 Základní parametry Ballbar QC20-W [27]

Parametr	Hodnota
Přesnost snímače ballbaru (při 20 °C)	$\pm 0,5 \mu m$
Přesnost měření systému (při 20 °C)	$\pm 1,25 \mu m$
Rozsah měření snímačem	$\pm 1,0 mm$
Rozlišení snímače	$1 \mu m$
Maximální rychlost snímačem	1000 kHz
Pracovní teplota	0 °C - 40 °C
Pracovní dosah signálu	10 m
Hmotnost kufříku	3,75 kg

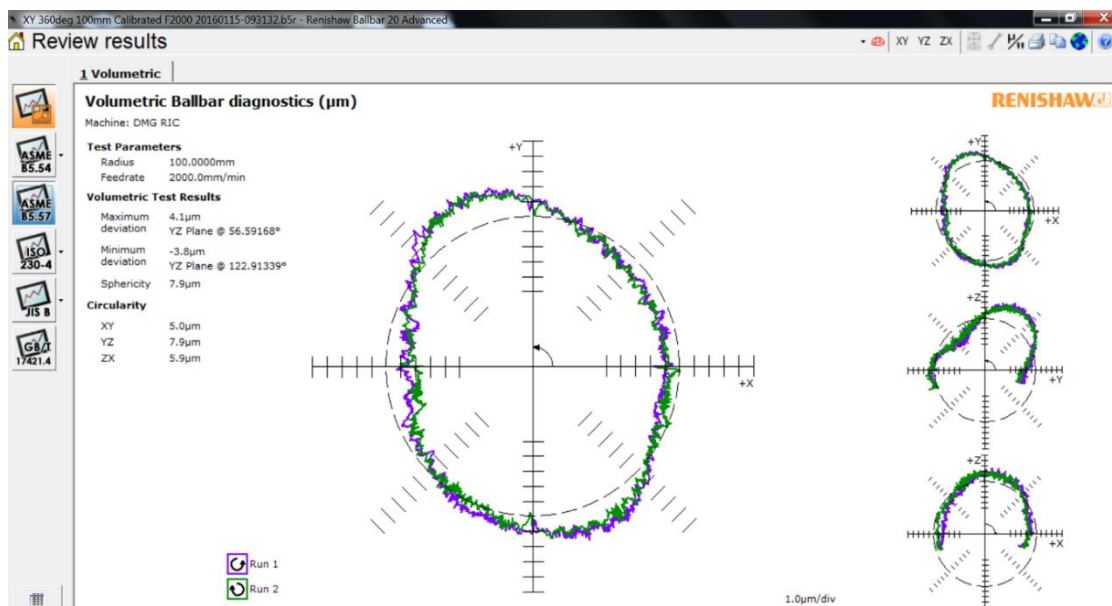
Pro získání výsledku v absolutní hodnotě, které jsou potřeba pro zkoušky ISO 230-4 a ASME B5.54/57, se používá kalibrátor. Kalibrátor se vyrábí z materiálu s téměř nulovou hodnotou teplotní roztažnosti.

Ballbar se běžně používá pro měření o poloměru 100 mm. Při sestavení s různými prodlužovacími nástavci, lze měřit i dráhy o poloměru 150, 250, 300, 400, 450, 550 až do 1350 mm. Větší poloměr může být použit pro zvýšení citlivosti na chybu geometrie, jako je pravouhlost, což se u malého průměru nemusí moc projevit. V takovém případě se naopak výrazněji projeví reverzační špičky. [2]



Obr.: 2.22 Naprogramované dráhy při testování s Ballbarem [28]

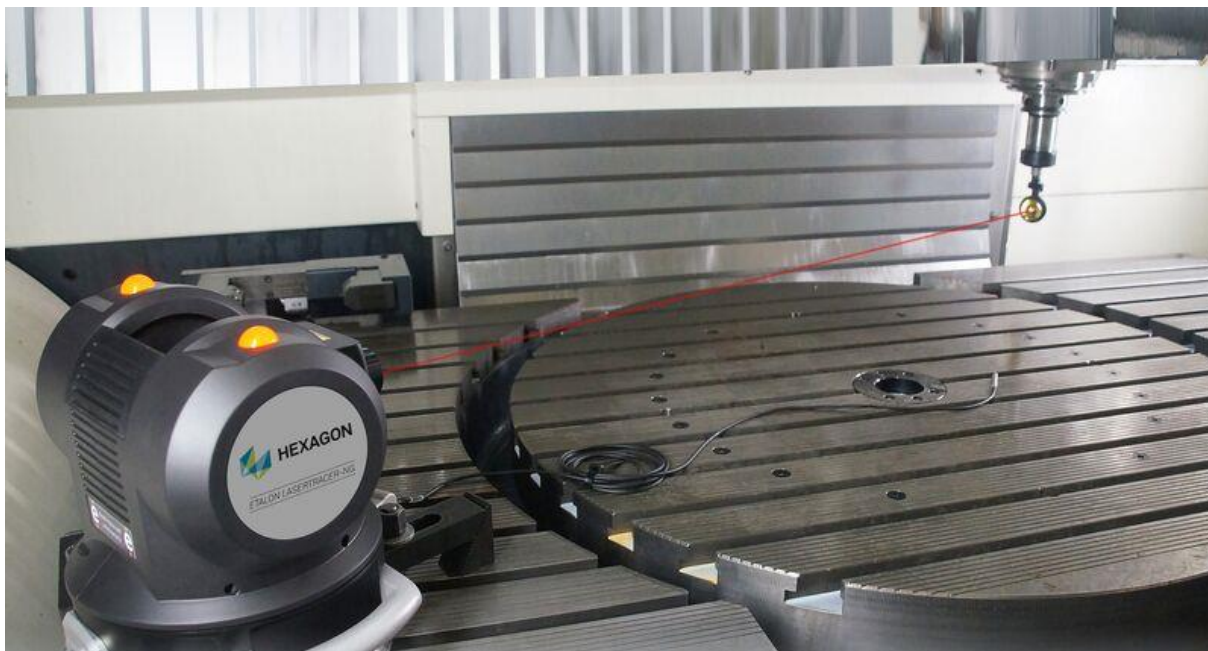
Měření obvykle trvá 10 až 15 minut. Měřit lze v celém kruhu nebo pouze jeho část v rovinách XY, XZ, nebo YZ. Software (Obr.: 2.23) pro vyhodnocení dokáže zjistit až 15 zdrojů chyb a seřadí je podle vlivu na celkovou přesnost stroje. Podle grafického tvaru výsledku jsme schopni zjistit, jaká část stroje se podílí na chybě nejvíce. [26]



Obr.: 2.23 Software Ballbar 20 [29]

2.2.4 LaserTRACER

LaserTRACER (LTc) (Obr.: 2.24) byl vyvinut pro monitorování a zvyšování přesnosti měřicích a obráběcích strojů. Jedná se o samonaváděcí laserové zařízení, které funguje na principu sekvenční multilaterace a interferometrického HeNe laseru. LTc je velmi efektivní, není totiž potřebné příliš přesné ustavování jako u jiných přístrojů pro měření přesnosti strojů. Operátor umístí LTc do pracovního prostoru stroje a upevní reflektor na sondu nebo nástroj. [30]



Obr.: 2.24 ETALON LaserTRACER-NG [31]

Aplikace LTc u obráběcích strojů je založena na měření vzdálenosti přístroje a reflektoru. Paprsek je vyslán i na referenční kouli, která zajišťuje vysokou přesnost zařízení. Referenční koule musí být vyrobena velmi přesně s maximální kulovitostí 30 nm. Přesnost zařízení je daná následujícím vztahem [32]:

$$U_{(k=2)} = 0,2 + 0,3 \cdot \frac{L}{1000} \quad [\mu m] \quad (2.1)$$

Pro $k = 2$ platí, že úroveň spolehlivosti je 95%.

L je měřená vzdálenost v mm.

Jediný výrobce přístroje tohoto druhu je výrobce ETALON a nese název LaserTRACER-NG. V některých případech je možné nahradit přístrojem Laser Trackerem. Následující tabulka popisuje základní vlastnosti zmíněného přístroje. [32]

Tab.: 2.8 Základní parametry ETALON LaserTRACER-NG [31]

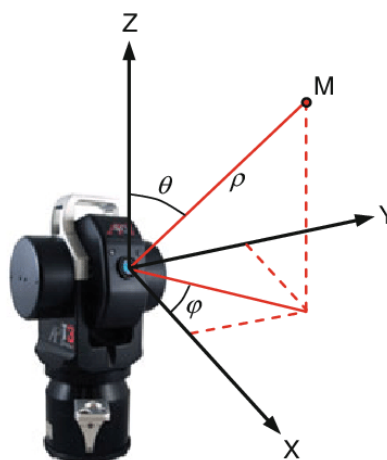
Parametr	Hodnota
Rozlišení snímače	0,001 μm
Měřicí rozsah	0,2-20 m
Úhlový rozsah (azimutu)	-225° až 225°
Úhlový rozsah (elevace)	-35° až 85°
Hmotnost	8,5 kg
Maximální možné zrychlení	3 m/s ²

Pro kompenzaci prostředí je vhodné použít sadu s názvem TESTO, která je kompatibilní s vyhodnocovacím softwarem Trac-Cal. Tento software umožňuje i vygenerovat kód pro volumetrickou kompenzaci ve formátu vhodném pro stroje od několika výrobců. Protože LTC dokáže měřit pouze vzdálenost a stanovení geometrických chyb vyžaduje znalost jednotlivých bodů v souřadném systému, používá se tzv. multilaterace. Je to metoda, kdy měříme body z více pozic, LTC je tedy přestaveno do jiné polohy. Stejná metoda je používána v GPS navigačních systémech. [32]

2.2.5 Laser Tracker

Laser Tracker je mobilní zařízení pro měření různých objektů pomocí laserového paprsku. Byl vyvinut v roce 1987 v americkém Národním institutu standartů a technologie NIST. Problematika tohoto zařízení je popsána v normě ČSN EN ISO 10360-10. Své uplatnění nachází i v oblasti obráběcích strojů a obrobků zpravidla větších rozměrů, kde je obtížné použít jiné metody. Jedním ze dvou principů, podle kterých Laser Trackery fungují, je Michelsonova Interference (IFM), kde je jeden paprsek rozdělen na referenční a druhý se odráží od reflektoru v určité vzdálenosti. Při přerušení paprsku dojde ke ztrátě informace, tudíž se měření musí vrátit k referenčnímu bodu a systém je třeba kalibrovat. Druhá metoda zaznamenává dobu dopadu paprsku, pomocí které zjistíme absolutní hodnotu vzdálenosti. U této metody může dojít k přerušení paprsku, avšak není tolik přesná jako IFM (Obr.: 2.25).

Zařízení sleduje reflektor a pomocí vzdálenosti a dvou rotačních úhlů se určí sférické souřadnice, které jsou přepočítány na polohu v kartézském systému (x, y, z). První úhel sleduje natočení azimutu (svislé osy), který je osou přístroje, a druhý představuje horizontální natočení hlavy přístroje. [3]



Obr.: 2.25 Princip IFM (elevační úhel θ , azimut φ , vzdálenost ρ) [33]

Vysoké uplatnění tyto přístroje nacházejí při kontrole rozměrných obrobků až do několika desítek metrů, které by bylo velmi složité měřit jinou metodou. Obrobek lze v některých případech měřit i upnutý na stroji, takže není potřeba demontovat a znovu ustavovat před další operací.

Před měřením se musí tracker zahřát na pracovní teplotu, což trvá 10 až 20 minut. K úplnému ustálení teploty ale dojde až po zhruba dvou hodinách, s ohledem na délku měření však není možné tak dlouhou dobu čekat. Kvalitu při měření ovlivňuje mnoho faktorů, jsou jimi například vibrace z okolí, teplota prostředí, tlak a vlhkost. S rostoucí vzdáleností tracker-obrobek vznikají lineární chyby. Ideální případ nastane, je-li tracker umístěn na upínací desce

stroje. Ty díky základům stroje potlačují vibrace. V některých případech se používají zástěny, které omezí proud vzduchu kolem stroje. [3]

Momentálně je na trhu široké množství laser trackerů od různých výrobců. Následující tabulka porovnává parametry používaných trackerů od předních výrobců.

Tab.: 2.9 Srovnání parametrů dostupných laser trackerů [34] [35] [36]

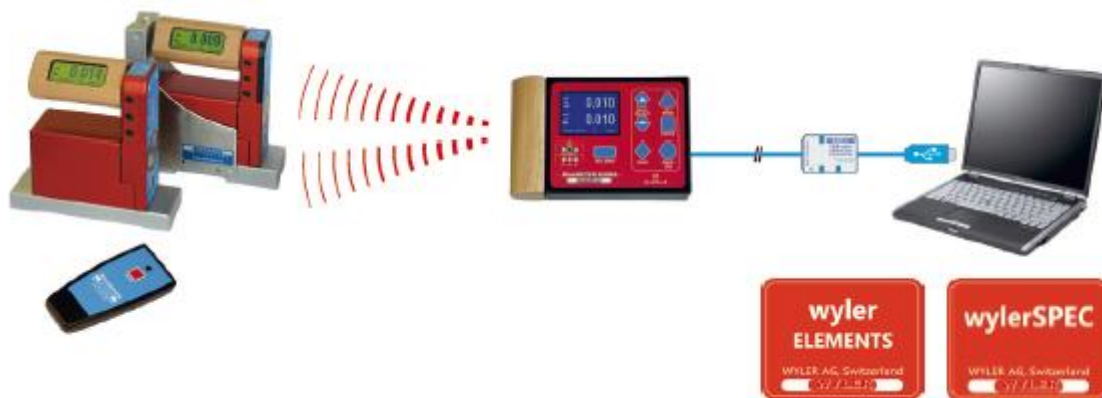
	API RADIAN PRO	LEICA AT960	FARO VANTAGE S6
Úhlová přesnost	$\pm 10 \mu\text{m} + 5 \mu\text{m}/\text{m}$	$\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m}$	$\pm 20 \mu\text{m} + 5 \mu\text{m}/\text{m}$
Délková přesnost	$\pm 15 \mu\text{m} + 0,7 \mu\text{m}/\text{m}$	$\pm 10 \mu\text{m} + 0,5 \mu\text{m}/\text{m}$	$\pm 16 \mu\text{m} + 0,8 \mu\text{m}/\text{m}$
Rozlišení	$0,5 \mu\text{m}$	$0,5 \mu\text{m}$	$0,5 \mu\text{m}$
Rozsah horizontální	$\pm 320^\circ$	<i>Nekonečno (360°)</i>	<i>Nekonečno (360°)</i>
Rozsah vertikální	$-59^\circ - +79^\circ$	$\pm 145^\circ$	$-52,1^\circ - +77,9^\circ$
Maximální rozsah	40 m	40 m	80 m
Pracovní teplota	$-10^\circ\text{C} \dots +45^\circ\text{C}$	$0^\circ\text{C} \dots +40^\circ\text{C}$	$-15^\circ\text{C} \dots +50^\circ\text{C}$
Výstupní rychlost dat	$1000 \text{ bodů}/\text{s}$	$1000 \text{ bodů}/\text{s}$	$1000 \text{ bodů}/\text{s}$
Úhlová rychlost	$180^\circ/\text{s}$	$180^\circ/\text{s}$	$180^\circ/\text{s}$
Úhlové zrychlení	$180^\circ/\text{s}^2$	$360^\circ/\text{s}^2$	$860^\circ/\text{s}^2$
Hmotnost trackeru	9 kg	$13,8 \text{ kg}$	$13,4 \text{ kg}$



Obr.: 2.26 Leica AT960 [42] [43]

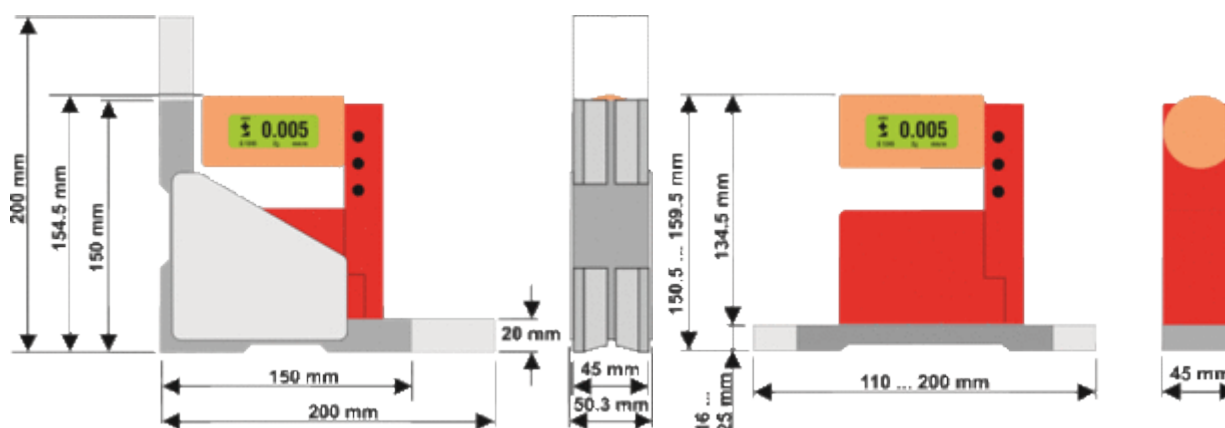
2.2.6 Digitální inklinometry

Digitální inklinometry (také nazývané libely) jsou efektivní přístroje k měření přesnosti obráběcích strojů. Jeden z předních výrobců je švýcarská společnost WYLER AG. Nabízí inklinometry v různých provedeních a přesnostech, podle potřeb zákazníka. Jelikož je součástí této diplomové práce měření s přístrojem nazývaným BlueSYSTEM (Obr.: 2.27), bude v této části podrobněji popsán. Dalšími předními výrobci vysoce přesných digitálních inklinometrů jsou společnosti TESA SA a PRUFTECHNIK. [37]



Obr.: 2.27 WYLER AG BlueSYSTEM [37]

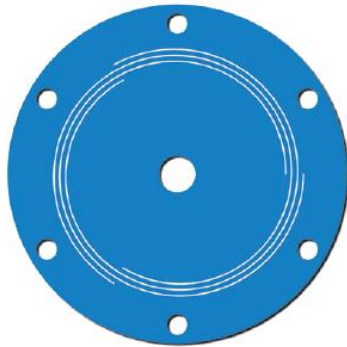
BlueSYSTEM se používá zejména pro měření přímosti, rovinnosti, kolmosti, pravouhlosti a geometrie obráběcích strojů. Obvykle skládá ze dvou digitálních inklinometrů (Obr.: 2.28) s názvem BlueLEVEL. Mají samostatný displej a je možné je používat i odděleně. V závislosti na aplikaci se dále používá ovládací jednotka BlueMETER SIGMA, ze které lze posílat informace do PC pomocí vyhodnocovacího softwaru. Přenos signálu mezi měřicím přístrojem a jednotkou BlueMETER SIGMA je bezdrátový pomocí Bluetooth (lze zakoupit i systém s kabelovým přenosem). Přenos mezi jednotkou BlueMETER SIGMA a PC je přes USB kabel. Dosedací plochy inklinometrů jsou nemagnetické, jinak by je bylo obtížné udržovat. K dispozici jsou s inklinometry s horizontální nebo úhlovou základnou. [37] [38]



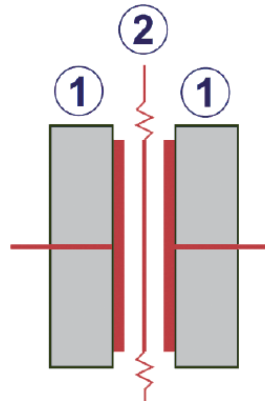
Obr.: 2.28 Digitální inklinometry BlueMETER SIGMA [44]

Funkce digitálních inklinometrů je založena na vlastnostech kyvadla, které je o hmotnosti menší než jeden gram. Kyvadlo je upevněné s nulovým třením. Dvoufázová frekvence o hodnotě 4,8kHz (Obr.: 2.30) je dodávána na dvě elektrody (1), které společně s kyvadlovým diskem (2) tvoří diferenciální kondenzátor. Disk je umístěn v odstíněné a prachu vzdorné mezeře mezi elektrodami. Signál o sklonu je zjišťován na kyvadle. Snímač je dokonale symetrický, a proto

má sklon kolmý k měřené ose nevýznamný vliv na výsledek měření. Senzor je stíněn, není citlivý na magnetické a elektrické pole. [39]

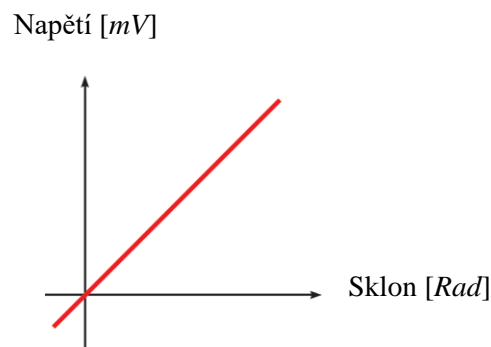


Obr.: 2.29 Kyvadlo [38]

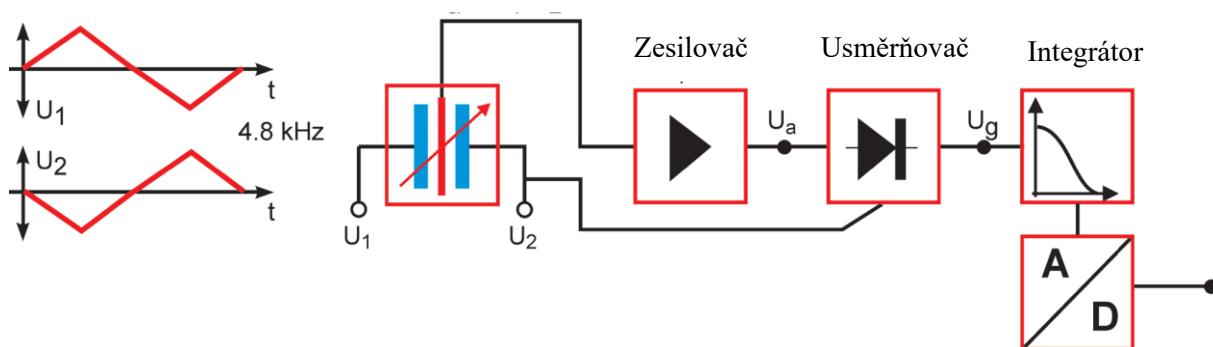


Obr.: 2.30 Diferenciální kondenzátor [39]

BlueLEVEL inklinometry fungují na analogovém principu (analog measuring principle). Při zvýšení sklonu inklinometru dojde ke zvýšení napětí (Obr.: 2.31). Výstupní signál je zesílen a usměrněn na stejnosměrný proud. K dispozici na výstupu je pak velikost napětí v mV nebo digitální A/D signál. [39]

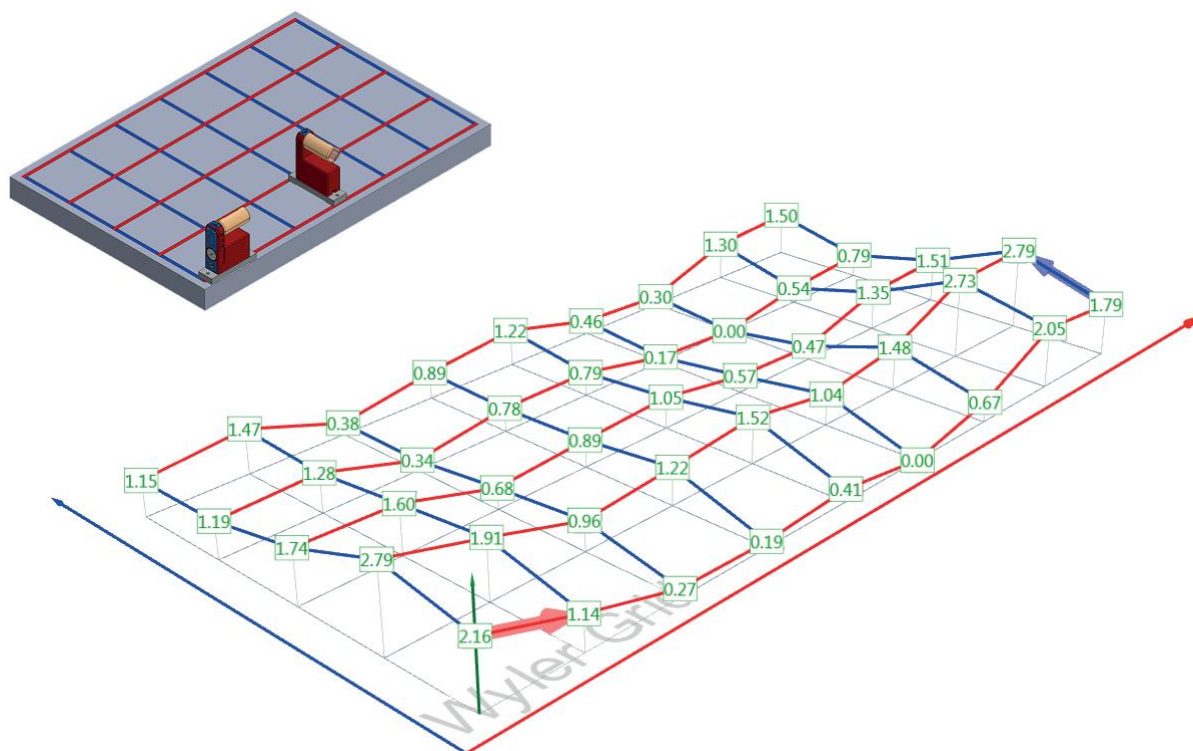


Obr.: 2.31 Analogový princip měření [38]



Obr.: 2.32 Princip činnosti inklinometrů BlueLEVEL [39]

Pro měření základních geometrických úloh se používá software LevelSoft Pro. Speciální verzi přímo pro obráběcí stroje je software MT-Soft, který umožňuje navíc měření úloh jako jsou kolmosti os nebo proměřování lineárních a rotačních vedení. Příkladem měření je měření rovinnosti, které je znázorněno na Obr.: 2.33. [37]



Obr.: 2.33 Měření rovinnosti se softwarem MT-Soft [40]

Tyto programy umožňují předdefinovat úlohy a graficky připravit strategii pro dané měření. Hodnoty jsou zapisovány okamžitě. Výsledky jsou vyhodnocovány v relativním, absolutním nebo diferenčním módu. Absolutní odměřování se provádí na granitové desce při ustálené teplotě. Relativní měření nepotřebuje absolutní nulu. Jeden měřicí přístroj je umístěn na předmět a hodnota na displeji se změní na nulu. Potom se přístroj přemístí na další předmět, kde se změří úhlová odchylka mezi těmito dvěma povrchy. Pokud je u druhého předmětu také nula, předměty jsou rovnoběžné v dané toleranci zařízení. Důležité u tohoto typu měření je, aby byl přístroj umístěn ve shodném směru na obou měřených předmětech. Měření v diferenčním módu spočívá v odečítání hodnot první libely od druhé a eliminují se tak nízkofrekvenční vibrace nebo nestabilita systémů a objektů. V principu se jedná o zvláštní případ relativního měření. Jedna libela je statická a její osa je orientována ve směru měření a na druhé se provádí měření. V případě, že měříme poddajné části, tak se tato metoda stává nevhodnou. [38]

Tab.: 2.10 Srovnání parametrů často používaných inklinometrů. [37] [41] [42]

	Wylér BlueLEVEL	PRUFTECHNIK INCLINEO	TESA CLINOBEVEL 3
Rozlišení	0,00006° (0,2")	0,0003° (1")	1" (2") (5") ¹
Měřicí rozsah	± 1,15°	± 10°	± 1° (± 10°) (± 60°)
Mezní hodnoty chyb ² a = měřená vzdálenost		0,005 %	3,6" + (0,06 % a)
Sdílení dat	USB/RS 485/RS485 port, Bluetooth	Bluetooth	USB/RS 485 port
Pracovní teplota	0 °C ... +40 °C	-10 °C ... +60 °C	0 °C ... +40 °C
Skladovací teplota	-30 °C ... +70 °C	-40 °C ... +85 °C	-20 °C ... +70 °C
Displej		LCD displej, 132x32 pixels	LCD displej
Zdroj napájení	Baterie typu C	AA baterie	Baterie typu LR14

1 Výrobce TESA udává rozdílné hodnoty rozlišení v závislosti na velikosti měřeného rozsahu. Pokud je velikost měřeného rozsahu pouze ±1°, rozlišení je 1". V případě měřeného rozsahu ±10° je rozlišení 2" a při ±60° má hodnotu ±5°.

2 Uvedení hodnota platí v celém rozsahu měření



Obr.: 2.34 PRUFTECHNIK INCLINEO [46]

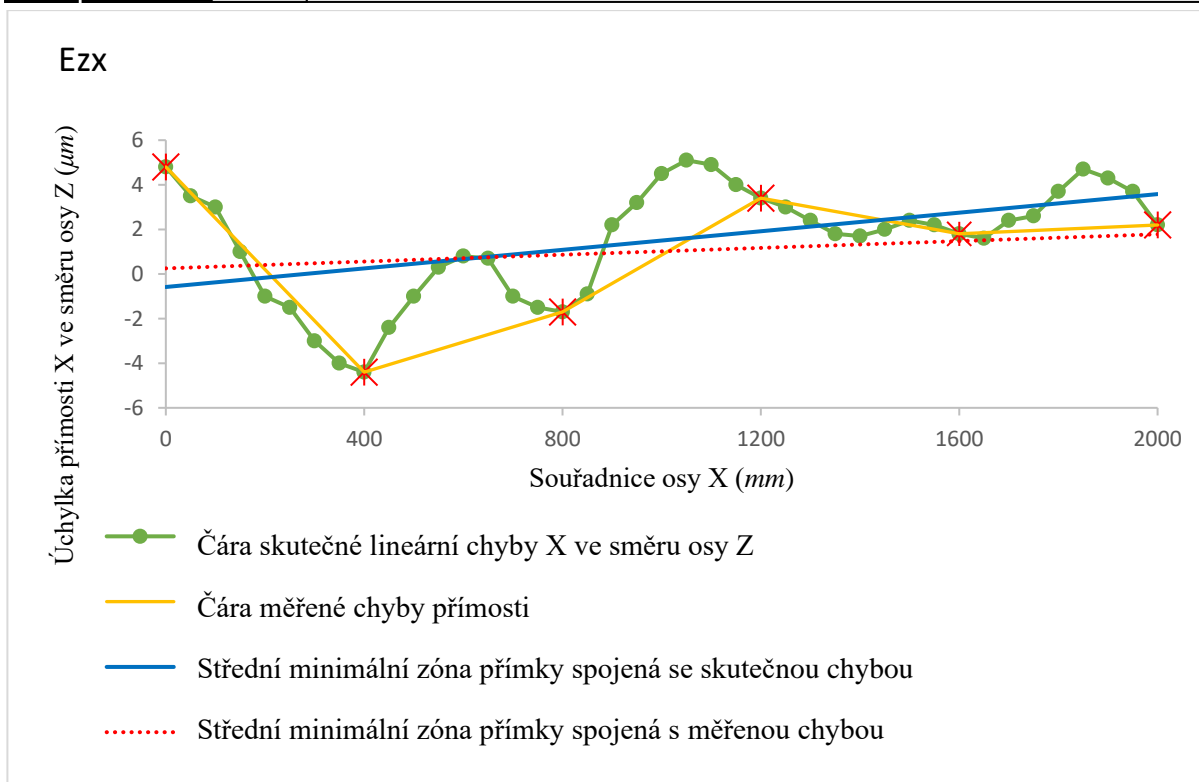


Obr.: 2.35 TESA CLINOBEVEL 3 [41]

2.3 Měření přímosti

Chyby přímosti jednotlivých částí obráběcího stroje významně přispívají k celkové chybě, proto se tyto chyby snažíme co nejvíce eliminovat. Měřením přímosti u obráběcích strojů se zabývá norma ISO 230-1. Měření se provádí zejména u lineárních vedeních, u vodících ploch, u loží soustruhů nebo portálů. Pomocí měření přímosti u obráběcího stroje zjistíme i průhyb elementů, například průhyb příčnicku u portálového obráběcího stroje. Nesouososti u obráběcích strojů jsou způsobeny opotřebením, špatnými základy stroje nebo nehodou na stroji. V současné době pro měření přímosti existuje řada zařízení, běžně se používají především libely, autokolimátory a laserové interferometry. [1]

Chyba přímosti (Obr.: 2.36) je definována jako nechtěný pohyb v jednom ze dvou ortogonálních směrů při pohybu po přímkové dráze.



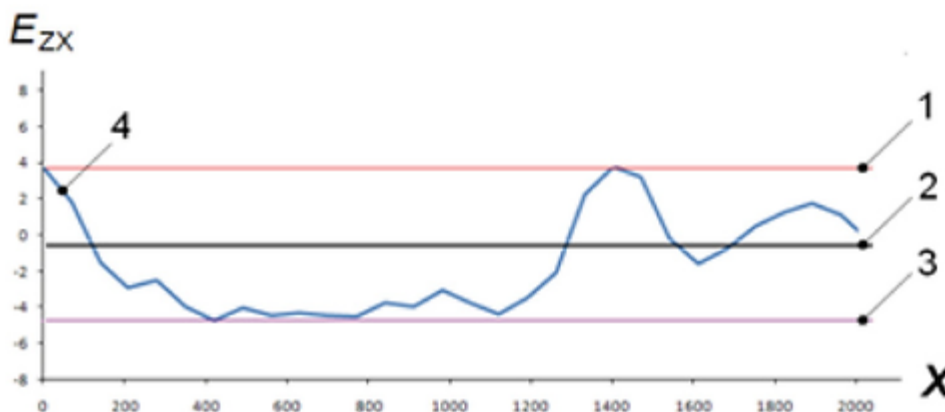
Obr.: 2.36 Příklad chyby přímosti ve směru Z pro pohyb v osy X

Úchylka přímosti lze pochopit jako vzdálenost funkčního bodu od referenční přímky, která spadá do trajektorie, měřeného v jednom ze dvou směrů, který je kolmý na směr předpokládané trajektorie. [43]

Metody měření a vyhodnocení

Vyhodnocení výsledků v grafech lze pomocí následujících metod:

- Střední minimální zóna referenční přímky – metoda založena na výpočtu aritmetického průměru ze dvou rovnoběžných přímek v přímé rovině uzavírající měřenou odchylku přímosti a zároveň mají nejmenší vzdálenost od sebe. [43]



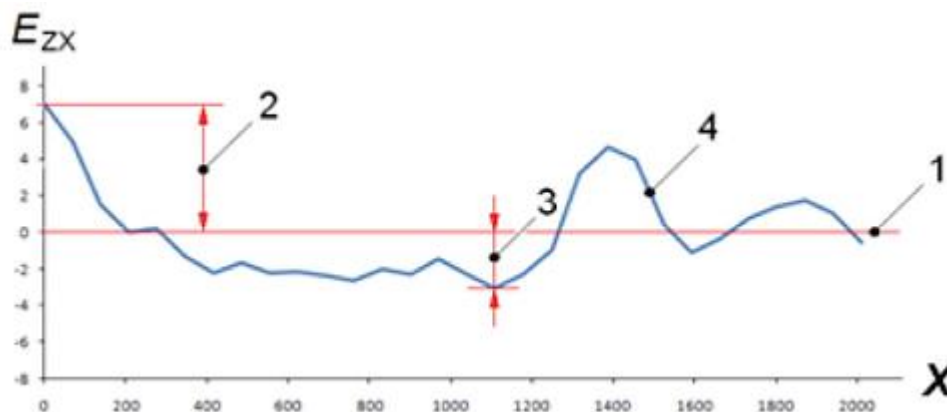
Obr.: 2.37 Příklad střední minimální zóny referenční přímky [43]

E_{ZX} úchylka přímosti X ve směru osy Z (μm), X – souřadnice osy X (mm), 1 – horní zóna referenční přímky, 2 – střední minimální zóna referenční přímky, 3 – spodní minimální zóna referenční přímky, 4 – měřená úchylka přímosti

- Referenční přímka metodou nejmenších čtverců (metodou lineární regrese) – tato metoda představuje aproximaci hodnot pomocí metody nejmenších čtverců. Obecně platí, že odměřené body neleží na jedné přímce a snahou je najít nejpřesnější matematický model tak, aby body ležely co nejbližně referenční přímce. To znamená, že se hledají koeficienty a , b z rovnice o obecném tvaru:

$$y = a \cdot x + b \quad [\mu m] \quad (2.2)$$

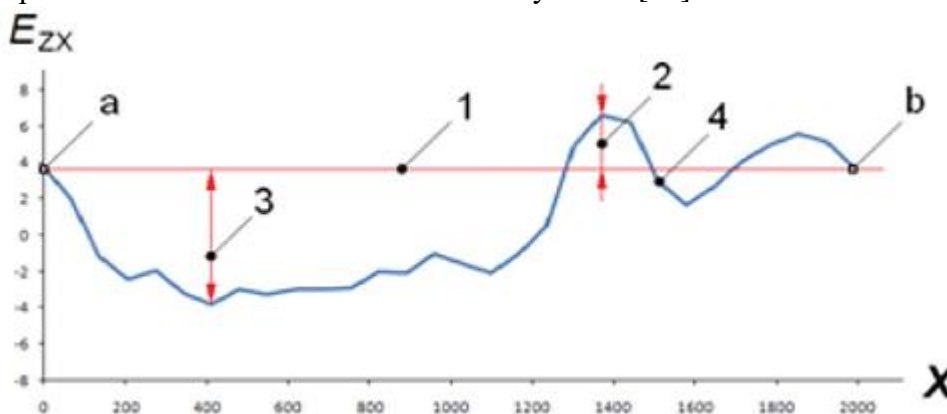
Kde y je hodnota naměřené úchytky přímosti a x je hodnota souřadnice X . Po stanovení referenční přímky se přímka rovnoběžně vyrovná s osou X . [43]



Obr.: 2.38 Příklad referenční přímky metodou nejmenších čtverců [43]

E_{zx} úchytky přímosti X ve směru osy Z (μm), X – souřadnice osy X (mm), 1 – referenční přímka metodou nejmenších čtverců, 2 – největší kladná úchytky od referenční přímky, 3 – největší záporná úchytky od referenční přímky, 4 – měřená úchytky přímosti

- Metoda koncových bodů (ENDPOINTS) – v této metodě je první a poslední bod měření spojen přímkou a celé měření se horizontálně vyrovná. [43]



Obr.: 2.39 Příklad referenční přímky metodou nejmenších čtverců [43]

E_{zx} úchytky přímosti X ve směru osy Z (μm), X – souřadnice osy X (mm), 1 – referenční přímka metodou koncových bodů, 2 – největší kladná úchytky od referenční přímky, 3 – největší záporná úchytky od referenční přímky, 4 – měřená úchytky přímosti, a – první měřený bod, b – poslední měřený bod

2.4 Technická specifikace stroje MCV 754 QUICK

Stroj pro měření této diplomové práce je MCV 750 QUICK (Obr.: 2.40) vyroben společností Kovosvit MAS. Stroj se nachází v budově strojní fakulty na Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky v místnosti s označením C1/118. Jedná se o tříosé vertikální obráběcí centrum s tvarem rámu ve tvaru C. Pro stroj existuje možnost zvýšení počtu os, a to konkrétně na 4 nebo 5, pomocí využití přídatného otočného a sklopného stolu. Stroj používá řídicí systém Siemens Sinumerik 840D sl. Následující tabulka popisuje základní technická data.



Obr.: 2.40 MCV 750 QUICK [44]

Tab.: 2.11 Technická data MCV 750 QUICK [44]

Stůl	Upínací plocha	[mm]	1000 x 500
	Maximální zatížení stolu	[kg]	400
Pracovní rozsah	Osa X	[mm]	754
	Osa Y	[mm]	500
	Osa Z	[mm]	550
	Vzdálenost čela vřetene od upínací plochy stolu	[mm]	100-650
Vřeteno	Maximální otáčky	[min ⁻¹]	10 000
Posuv	Pracovní posuv	[mm/min]	1 – 30 000
	Rychloposuv	[m/min]	30
Přesnost dle ČSN ISO 230-2	Odměrování	-	Přímé
	Přesnost najetí do polohy	[mm]	0,012
	Opakovatelnost najetí do polohy	[mm]	0,005
Rozměry	Délka x Šířka x Výška	[mm]	2320 x 2590 x 2560

2.5 Kompenzace na řídicím systému Siemens 840D sl

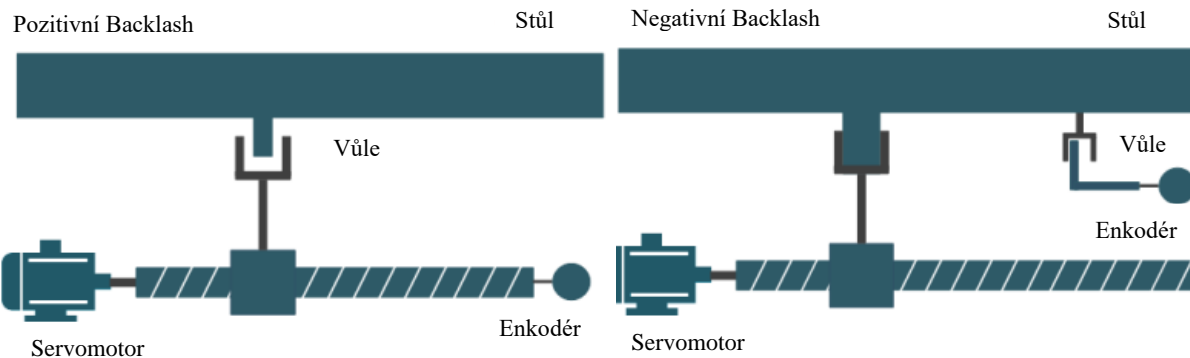
Pro obráběcí stroje jsou vyvinuty řídicí systémy od různých výrobců. Mezi přední výrobce patří Siemens, Fancu, Bosch, Heidenhain, Fagor, Fidia, Beckhoff a Mitsubishi. Každý výrobce si dále vytváří nadstavby systému, vlastní výpočet korekcí nebo způsob interpolace. Proto je v této práci popsáno zavádění korekce pouze u řídicího systému Siemens Sinumerik 840D sl (Obr.: 2.41), který je zaveden na stroji MCV 750 QUICK.



Obr.: 2.41 Siemens 840D sl [45]

Systém Sinumerik 840D sl je integrován do pohonů s názvem Sinamics S120 a používá automatizační systém Simatic S7-300, pomocí kterého se stroj hodí na střední a vysoký výkonový rozsah. Systém Sinumerik 840D sl lze používat pro mnoho různých operací jako je vrtání, soustružení, broušení, frézování, laserové řezání, vysekávání, pro výrobu forem a nástrojů atd. Je vhodný u malosériové i velkosériové výroby. Systém je velmi flexibilní a má jednoduchou strukturu programování a vizualizací. [46]

Do systému Sinumerik 840D sl, lze zadat kompenzaci několika způsoby. Prvním způsobem je zavedení konstantní hodnoty Backlash do vybrané osy. Zapsat ho do systému je možné parametrem MD32450 \$MA_BACKLASH. Tato kompenzace je vhodná pro vymezení vůle, která vzniká mezi pohonem a pohybující se částí stroje nebo vůli mezi enkodérem a pohybující se částí stroje (Obr.: 2.42, Obr.: 2.43). Při přesném nastavení bez vůle by docházelo k velkému vzniku tepla a opotřebení, toto nastavení ani z hlediska konstrukčního není možné.



Obr.: 2.42 Pozitivní Backlash [51]

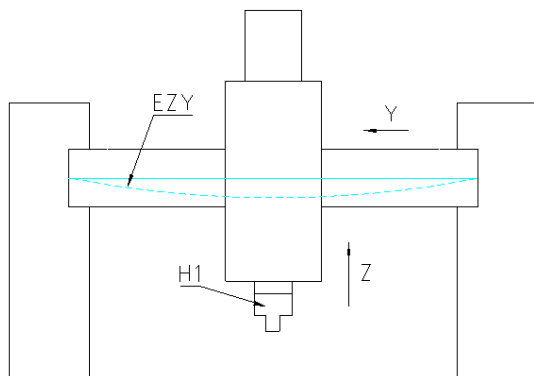
Obr.: 2.43 Negativní Backlash [52]

Možným přístupem, jak kompenzovat lineární a rotační osy se systémem Sinumerik 840D sl je pomocí interpolační kompenzace. V řídicím systému jsou chyby popsány jako MSEC

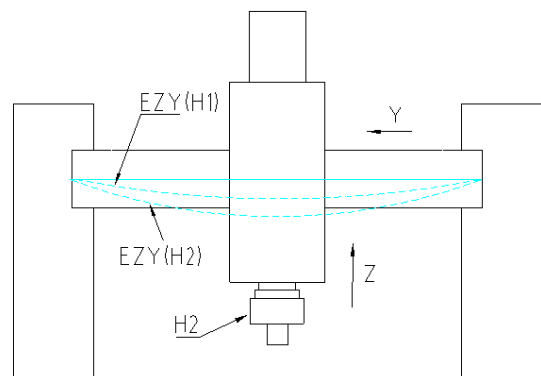
(measuring system error compensation) a LEC (leadscrew error compensation). Hodnoty těchto chyb lze zapsat buďto zadáváním jednotlivých hodnot ručně nebo různými podprogramy pro vygenerování a zapsání kódu do řídicího systému. MSEC se do systému zadává pod zkratkou ENC_COMP. Tuto kompenzaci lze provést pouze jednosměrně a v případě, že je potřeba kompenzovat ještě vůli, je možnost zároveň zavést kompenzaci Backlash. Postup nastavení kompenzace ENC_COMP spočívá v následujících krocích. Začne se zápisem parametru definující počet kompenzovaných bodů MM_ENC_COMP_MAX_POINTS [] Pak se určí specifické parametry [1]:

- \$AA_ENC_COMP [] – vypočtená kompenzační hodnota
- \$AA_ENC_COMP_STEP [] – vzdálenost mezi interpolačními body
- \$AA_ENC_COMP_MIN [] – začátek kompenzace
- \$AA_ENC_COMP_MAX [] – konec kompenzace

MSEC umožňuje kompenzovat pouze jednu osu. Ve většině případů se zavádí korekce dvou závislých os, a proto se používá tzv. Ságová kompenzace. Zavádí se, pokud hmotnost jednotlivých částí stroje způsobuje posunutí a sklon pohyblivých částí, což se projeví na chybě v polohování. Korekční hodnoty se získají pomocí norem nebo na základě algoritmů a do řídicího systému se zavádí pomocí kompenzační tabulky. Pro každou dráhu pak existuje základní osa a osa po kompenzaci. V případě, že osa Z není v souvislé dráze osy X a osy Y, kompenzace se provede na dráze X. Na Obr.: 2.44 je tato skutečnost znázorněna na portálovém obráběcím stroji s výměnnou hlavou H1 o hmotnosti 450 kg. Při posuvu saní na příčnici dochází k jeho průhybu. Pokud hlavu H1 vyměníme za hlavu H2 o hmotnosti 1450 kg (Obr.: 2.45), dojde ke zvětšení průhybu příčnice. V tomto případě kompenzace bude provedena na ose Z. [1]



Obr.: 2.44 Kompenzace průhybu



Obr.: 2.45 Kompenzace s více kompenzačními tabulkami

Tento typ kompenzace používá tabulky CEC, která se aktivuje příkazem \$MA_CEC_ENABLE [] a \$SN_CEC_TABLE_ENABLE [] pro aktivaci tabulky. Dalším krokem je určení specifických parametrů:

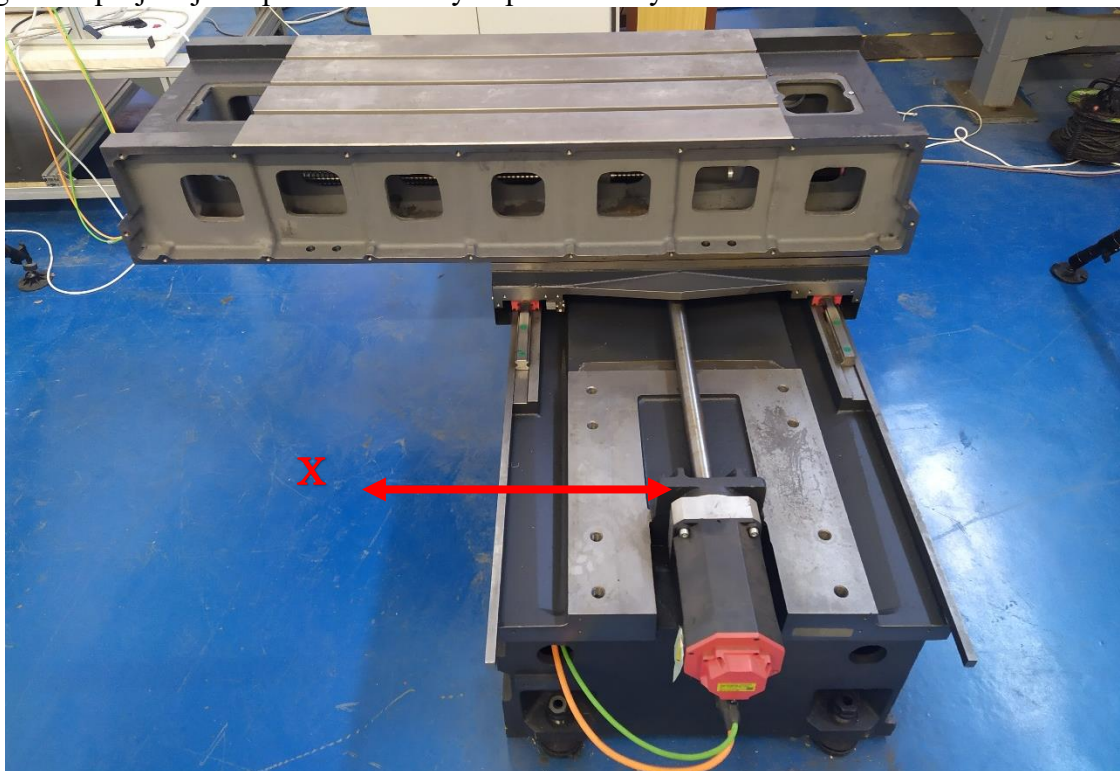
- \$MN_MM_MAX_POINTS [] – počet kompenzovaných bodů
- \$AN_CEC [] – kompenzační hodnota
- \$AN_CEC_INPUT_AXIS [] – nastavení základní osy
- \$AN_CEC_OUTPUT_AXIS [] – nastavení vedlejší osy
- \$AN_CEC_STEP [] – velikost kroku
- \$AN_CEC_MIN [] – začátek kompenzace
- \$AN_CEC_MAX [] – konec kompenzace
- \$AN_CEC_DIRECTION [] – směr základní osy pro kompenzaci

SAG kompenzaci lze použít i pro kompenzaci chyby kolmosti. Do tabulky se zapíše osa základní a druhá, které je kompenzována. Další možností je volumetrická kompenzace (VCS). Cílem této kompenzace je snižovat chyby v každém bodě prostoru. Odchylka ideální polohy od polohy skutečné se nazývá volumetrická chyba. V kapitole 2.1.6 je tento typ kompenzace popsán více. [1]

3 NÁVRH MĚŘENÍ NA STROJI MCV

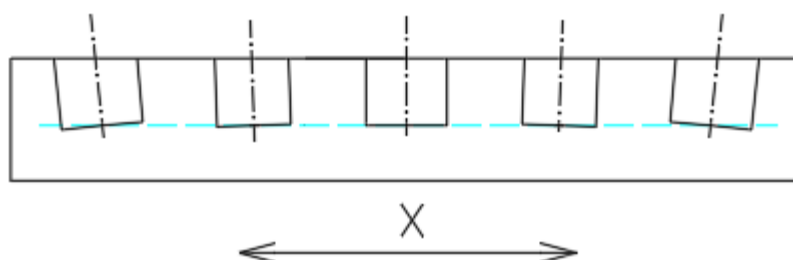
Cílem měření je zjistit výsledky o přímosti osy X na tříosém obráběcím centru a porovnat výsledky z různých metod měření za účelem zjištění ideální metody pro daný stroj.

Měření bude probíhat v areálu FSI na Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky v místnosti C1/118 na tříosém obráběcím centru MCV 754 QUICK (stroj popsán v kapitole 2.4). Na Obr.: 3.1 je model stolu 1:1 stroje, na kterém je vyznačený směr měřené osy X. U této konstrukce se musí počítat s tím, že stůl má z důvodu gravitace tendenci se ohýbat v ose X. Tento jev se negativně projevuje na posuzované chybě přímosti osy.



Obr.: 3.1 Stůl stroje MCV 754 QUICK

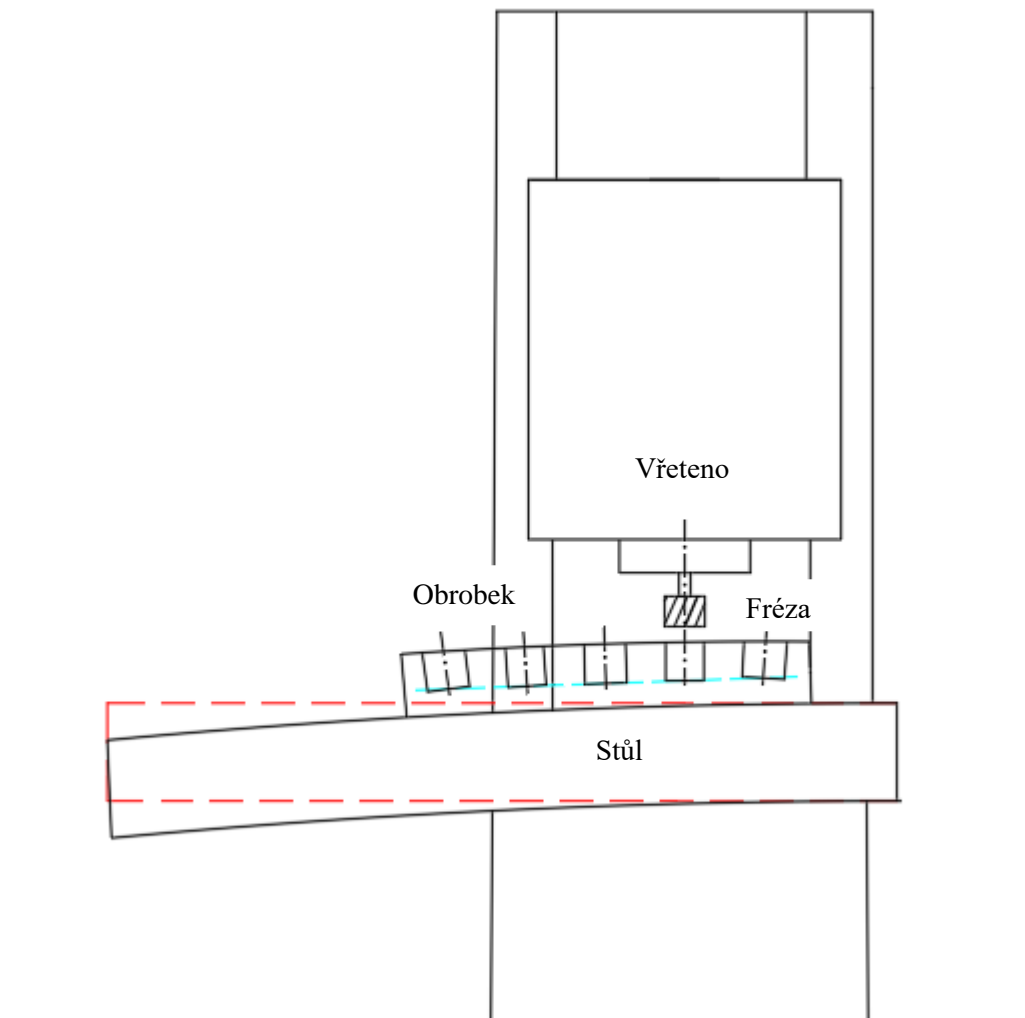
Na Obr.: 3.2 je znázorněn obrobek, do kterého jsou vyfrézovány otvory podél osy X. Pokud tento obrobek umístíme na přesnou desku, třeba na souřadnicový odměřovací stroj (CMM), středy dna jednotlivých otvorů zůstanou stejné, avšak změní se úhel, pod kterými jsou obrobny.



Obr.: 3.2 Obrobek po frézování

Pro představu je tento obrobek nakreslen na stroji (Obr.: 3.3). Ideální stůl, u kterého by nedocházelo k ohybu je vyznačen červenou barvou. V reálné situaci však vždy dochází k určitému průhybu stolu. Na obrázku je pro názornost ohyb stolu velký, běžně se ohyb

pohybuje v řádech jednotek a desítek mikrometrů. Tento jev bude v DP práci předmětem zkoumání.



Obr.: 3.3 Obrobek při frézování

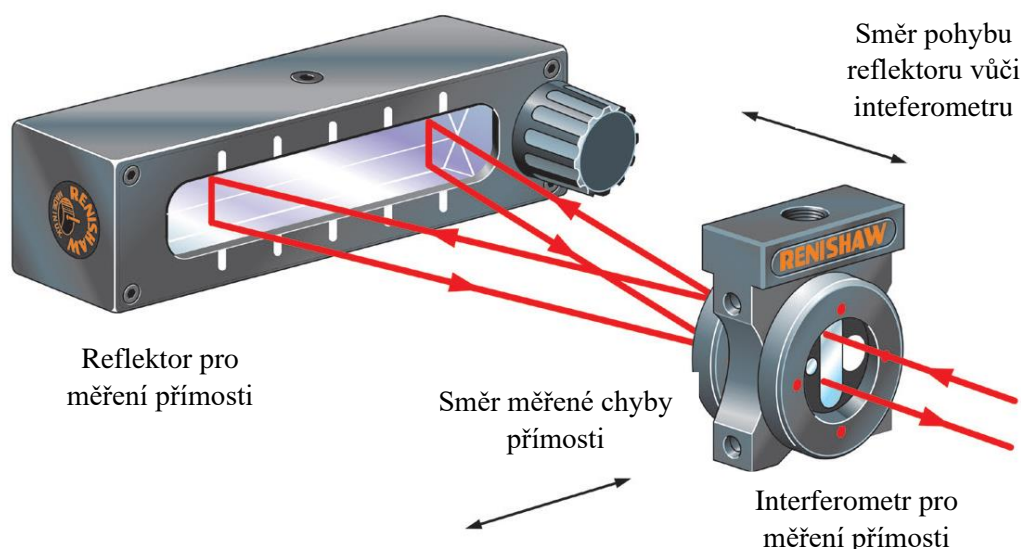
Na stroji se bude zkoumat chyba přímostí Z ve směru osy X pomocí dostupných přístrojů:

- Laser interferometr Renishaw XL-80 s optikou pro měření přímosti
- Laser interferometr Renishaw XL-80 s optikou pro měření úhlu
- Digitální libela WYLER Bluesystem
- Ballbar Renishaw QC20-W
- Samonaváděcí interferometr LaserTRACER

Postup nastavení stroje a okolí je následující. Před začátkem měření je potřeba nastavit obráběcí centrum. Začne se vypnutím všech kompenzací, pokud jsou na stroji nastaveny. Konkrétně se vypnou kompenzace ENC, CEC a VCS. Dalším krokem je zahřátí stroje na provozní teplotu pomocí programu uloženého v řídicím panelu systému. V panelu se tento program najde pomocí tlačítka „program manager“ a zapne se stisknutím tlačítka „execute“. Proces zahřívání probíhá při běhu stroje naprázdno. Zahřívací program běží zhruba 30 minut. Teplota okolí stroje by měla být blízká 20 °C.

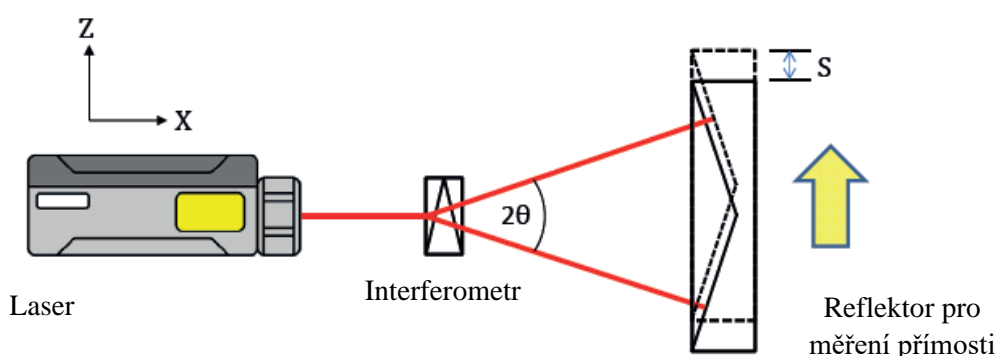
3.1 Postup měření přímosti interferometrem Renishaw XL-80

Měření přímosti s XL-80 lze provést dvěma způsoby, buď měřením založeném na principu získávání informací o vzdálenosti nebo získáváním informací o úhlu. Pro měření vzdálenosti se používá systém s interferometrem a reflektorem pro měření přímosti. Z laseru je na interferometr vrhán paprsek, který se rozdělí na dva paprsky s úhlem 2θ (úhel θ je předdefinovaný, závisí na použité optice). Z reflektoru se paprsky odráží zpátky do interferometru, kde se sbíhají, a paprsek se vrací do laserové hlavy, kde interferuje. Na Obr.: 3.4 je tento princip znázorněn. Pokud by se reflektor pohyboval po dokonalé přímce, hodnoty paprsků by byly před vstupem do laserové hlavy stejné. Pokud se ale reflektor pohne o určitou vzdálenost S (Obr.: 3.5), kolmou na směr pohybu reflektoru, dojde k tomu, že jedno rameno paprsku se prodlouží o $2 \cdot S \cdot \sin(\theta)$ a druhé se zkrátí o $2 \cdot S \cdot \sin(\theta)$. Software tuto informaci vydělením $4 \cdot \sin(\theta)$ převede na přímost. [47]



Obr.: 3.4 Nastavení reflektoru a interferometru pro měření přímosti [47]

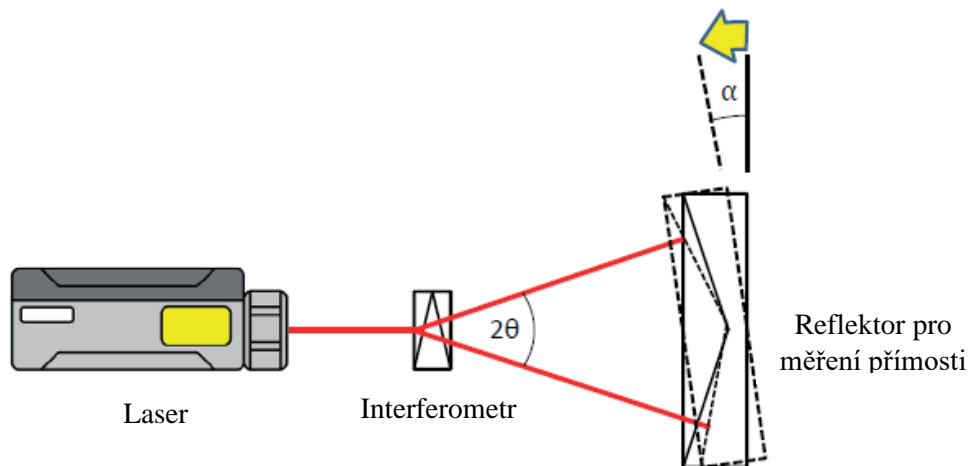
Přímost lze definovat jak pro horizontální, tak pro vertikální směr. Pro změření obou směrů, se provede první měření a pro druhé měření se reflektor a interferometr otočí o 90° .



Obr.: 3.5 Princip měření přímosti [47]

Pokud je reflektor sklopen o malý úhel α (Obr.: 3.6), hovoříme o chybě sklonu (slope). Tato chyba způsobí stálou změnu hodnoty přímosti. Jedno rameno se stává kratším o $2 \cdot L \cdot \sin(\theta) \cdot \text{tg}(\alpha)$ a druhé je o tuto hodnotu delší, takže celkový rozdíl drah je $4 \cdot L \cdot \sin(\theta) \cdot \text{tg}(\alpha)$. Pokud software laseru vydělí relativní vzdálenosti drah $4 \cdot \sin(\theta)$, výsledek bude $L \cdot \text{tg}(\alpha)$. Tedy pokud změníme úhel reflektoru, změní se i výsledky měření

přímosti. Tato chyba je způsobena špatným ustavením optické osy přístroje a měřené osy stroje. [47]

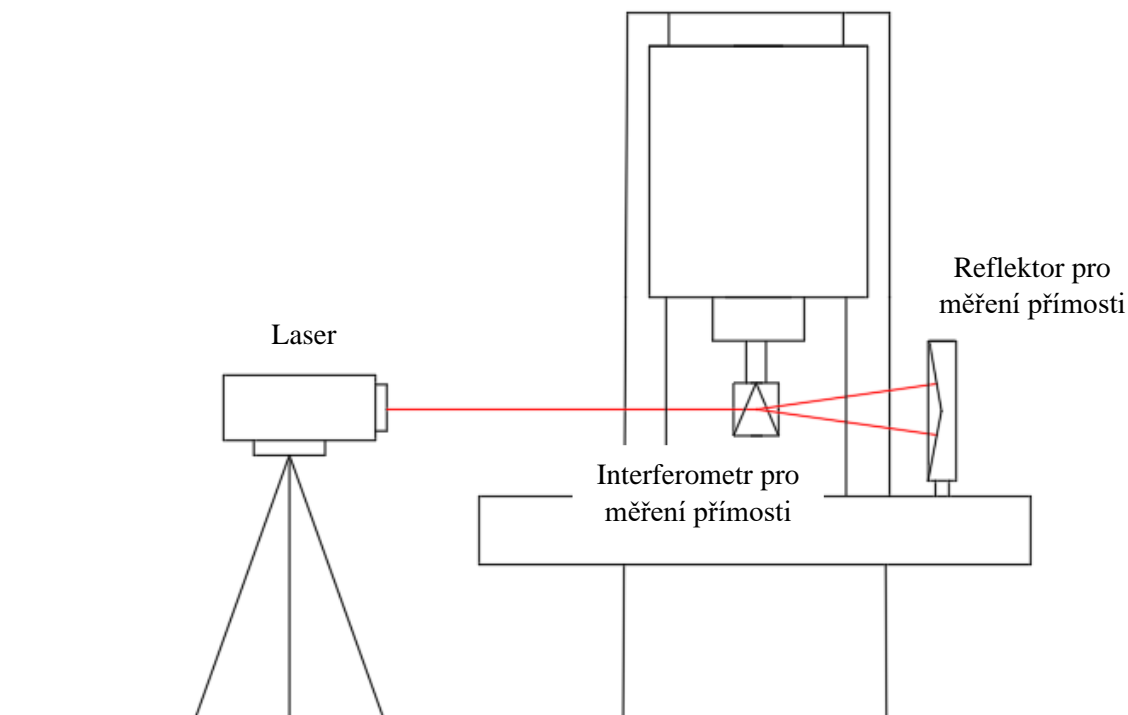


Obr.: 3.6 Úhlová chyba reflektoru [47]

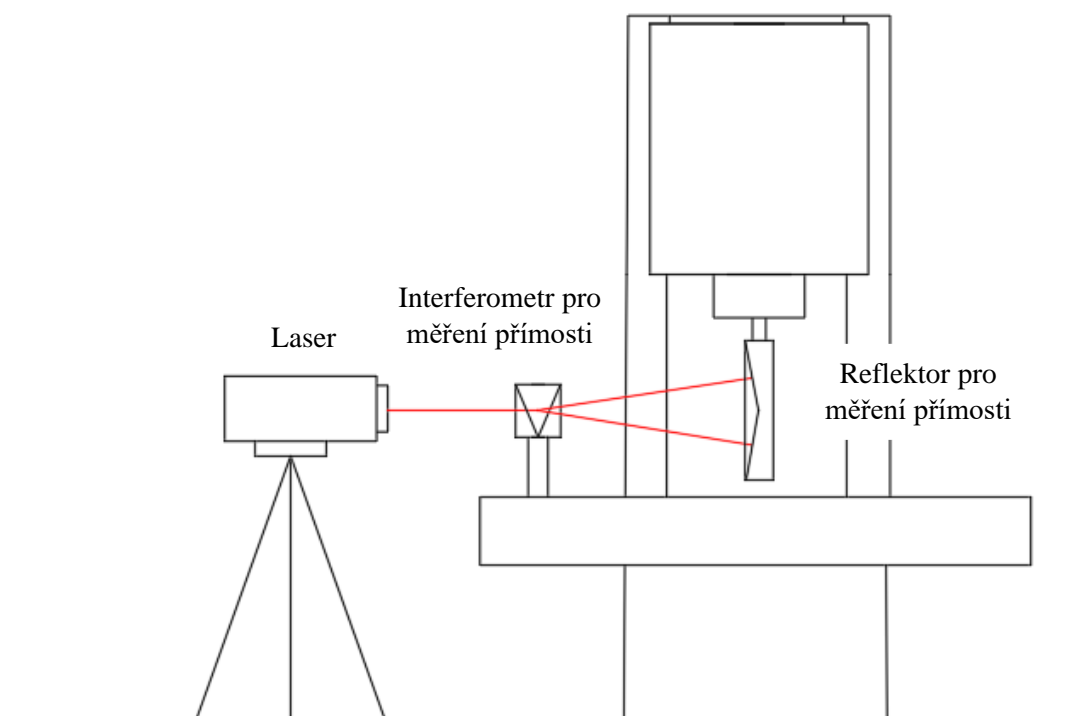
V případě, že je interferometr otočen o malý úhel α , vliv na výsledek měření to bude mít velmi malý.

U metody měření úhlů a přepočítání na přímost se používá úhlová optika. Princip tohoto přístupu je popsán v kapitole 2.2.1. Pokud by software nepřepočítal změřené úhly na přímost, změřila by se chyba klopení (pitch) a chyba natočení (yaw). Kompenzace prostředí není nutná, protože oba paprsky jsou stejně ovlivněny prostředím.

Měření lze provést dvěma způsoby. První způsob A (Obr.: 3.7) je takový, že interferometr je upnut ve vřetení, které se nepohybuje a reflektor je upnutý na pohybujícím se stole. U druhého způsobu B (Obr.: 3.8) je reflektor upnut ve vřetení, které se nepohybuje a interferometr je upnut na pohybujícím se stole. Způsob A je vhodný při kontrole přesnosti mezi vřetenem a obrobkem a dává tak představu o přesnosti dílů, které bude stroj vyrábět. Tento způsob je doporučen v normě ASME B5.54 pro kontrolu pohyblivých částí strojů. Druhý způsob B (Obr.: 3.8) je vhodný pro kontrolu pohybu jednoho bodu na stroji. Tento bod se pak porovná se souřadnicovým systémem a poskytne tak představu o kvalitě konstrukce stroje. Avšak nedává představu o tom, jak přesně se budou obrobky vyrábět. [1] [47]



Obr.: 3.7 Měření přímosti způsobem A

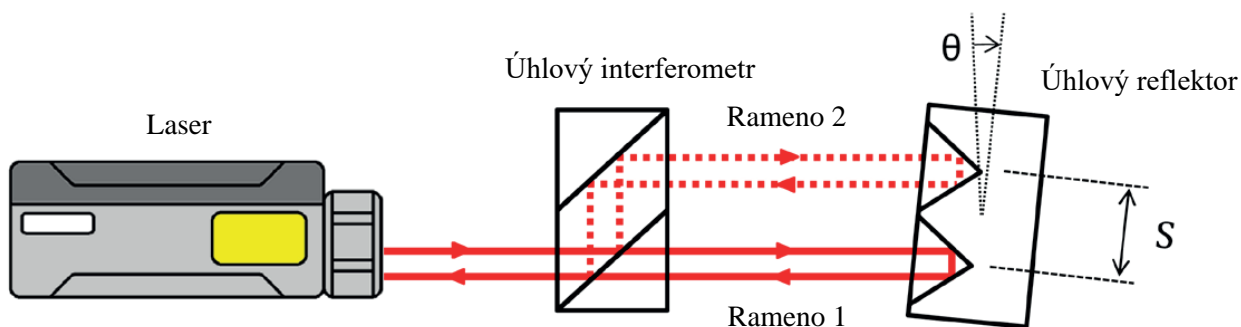


Obr.: 3.8 Měření přímosti způsobem B

Obě ustavení budou na stroji MCV 750 QUICK změřeny a porovnány s předpokladem, jak by se přímost EZX měla chovat.

Druhou již zmíněnou možností, jak měřit přímost, je pomocí optiky pro měření úhlů. Princip je založený na rozdělení paprsku v úhlovém interferometru na dvě samostatná ramena. Rameno 1 pokračuje ve spodní části rovně do úhlového reflektoru. Rameno 2 se odráží směrem nahoru a

potom o 90° ven, stejným směrem jako rameno 1. Oba paprsky se v úhlovém odražeči odráží zpět do detekční jednotky do laserové hlavy, kde interferují. Laserový systém měří úhel na základě změny délky ramen ΔL_1 . Princip je znázorněn na Obr.: 3.9, kde se předpokládá, že se pohybuje úhlový reflektor a úhlový interferometr je statický. [48]



Obr.: 3.9 Schéma úhlové optiky, kde se pohybuje reflektor [48]

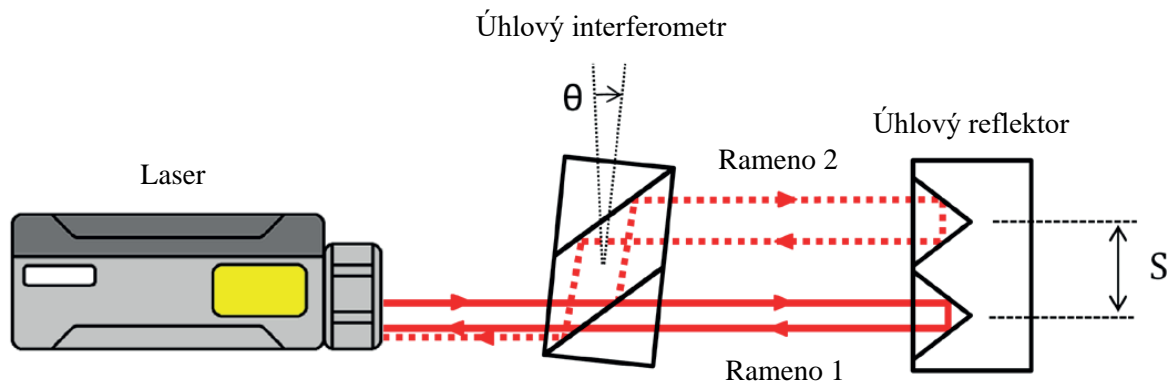
V případě, že se reflektor nakloní o úhel θ , délka ramene 2 se zvětší o $\frac{1}{2} \cdot S \cdot \sin(\theta)$ a rameno 1 se o tuto hodnotu zmenší. Kde konstanta S je vzdálenost středů jednotlivých reflektorů uvnitř úhlového reflektoru. Rozdíl délek ramen ΔL_1 je dán vztahem [48]:

$$\Delta L_1 = \text{Rameno 2} - \text{Rameno 1} = S \cdot \sin(\theta) \quad [\mu m] \quad (3.1)$$

Změna délky ΔL_1 je vypočítána systémem uvnitř detekční jednotky v laseru. Systém převede délku ΔL na úhel θ pomocí vztahu [48]:

$$\theta = \arcsin(\Delta L_1/S) \quad [^\circ] \quad (3.2)$$

Opačný případ, kde se pohybuje a naklápí interferometr a reflektor zůstává statický je na Obr.: 3.10.



Obr.: 3.10 Schéma úhlové optiky, kde se pohybuje interferometr [48]

Rozdíl ramen ΔL_2 , se v tomto případě při naklonění interferometru o úhel θ vypočítá vztahem [48]:

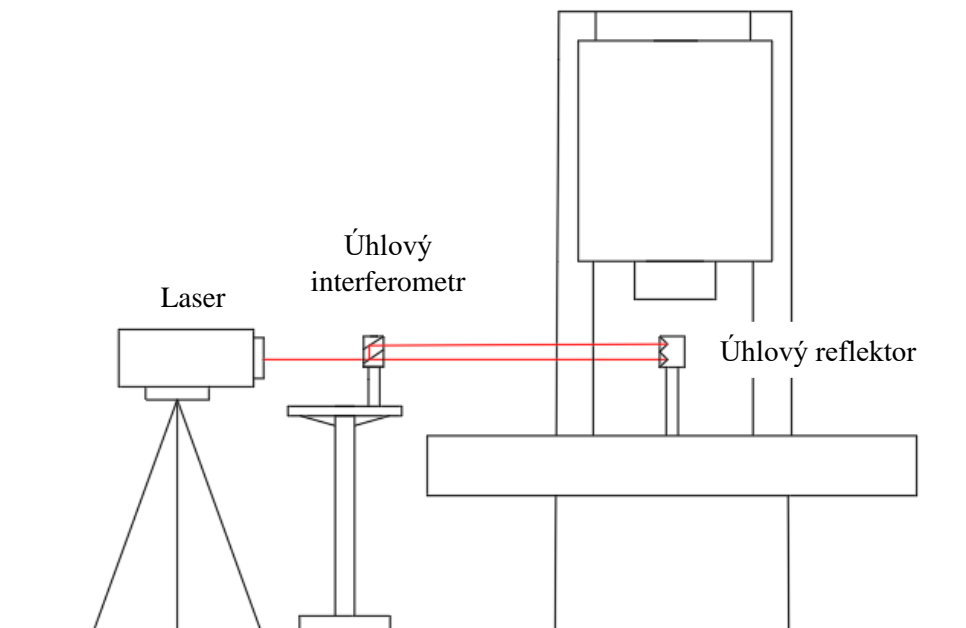
$$\Delta L_2 = S \cdot \sin(\theta) + 4 \cdot S \cdot (1 - \cos(\theta))/3 \quad [\mu m] \quad (3.3)$$

Stejně jako v případě naklonění reflektoru se v tomto případě vypočítá dráha $S \cdot \sin(\theta)$, avšak v tomto případě se musí ještě počítat s chybou, která vznikla skloněním periskopu v interferometru. To způsobí zvětšení ramena 2 o velmi malou hodnotu, která se přibližně vypočítá $2 \cdot S \cdot n \cdot (1 - \cos(\theta/n))$, kde n je index lomu světla ve skle. Celkový rozdíl dráhy ramene 2 a ramene 1 se vypočítá přibližně jako $-2 \cdot S \cdot \sin(\theta) + 2 \cdot S \cdot n \cdot (1 - \cos(\theta/n))$.

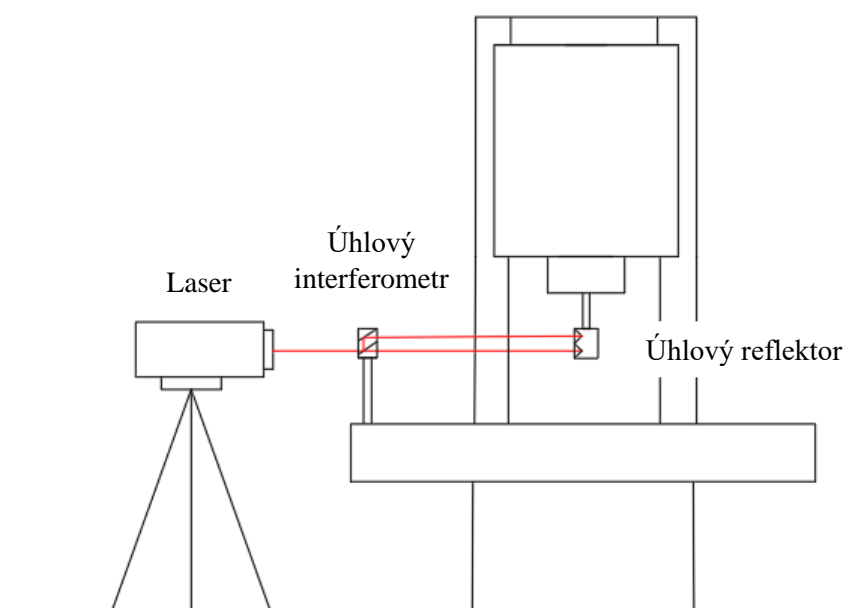
Tato velmi malá chyba není v systému laseru počítána, a proto se tímto způsobem zavádí velmi malá chyba. Při měření úhlu $0,1^\circ$ se projeví jako chyba měření 0,06 %. [48]

V programu CARTO je možnost přepočítání úhlu na námi požadovanou přímost.

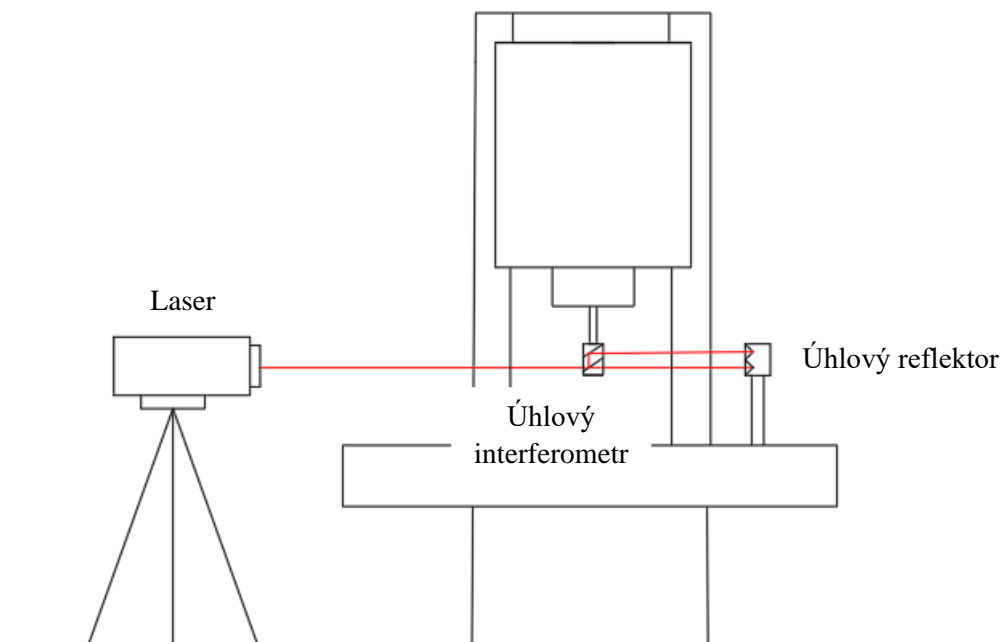
Pro samotné měření na stroji MCV 750 QUICK budou kromě dvou ustavení s optikou pro měření přímosti provedeny další tři ustavení s optikou pro měření úhlů. V ustavení optiky C (Obr.: 3.11) bude úhlový interferometr umístěn mimo stroj na podstavci před laserem a reflektor uprostřed stolu na stroji. Ustavení optiky D (Obr.: 3.12) má interferometr na rohu stolu a reflektor upnutý ve vřetení. Ustavení optiky E (Obr.: 3.13) je opak ustavení D, tedy interferometr je ve vřetení stolu a reflektor rohu stolu.



Obr.: 3.11 Měření přímosti úhlovou optikou, ustavení C



Obr.: 3.12 Měření přímosti úhlovou optikou, ustavení D



Obr.: 3.13 Měření přímosti úhlovou optikou, ustavení E

Postup měření přímosti interferometrem Renishaw XL-80

Pro měření přímosti systémem Renishaw XL-80 je potřeba:

- Laserová hlavy XL-80
- Stativ pro upevnění laserové hlavy
- Interferometr pro měření přímosti
- Optika pro měření přímosti/úhlu
- Prvky pro ustavení optiky
- Notebook se softwarem Renishaw CARTO
- Vodováhu pro ustavení laserové hlavy

Začne se ustavením laserové hlavy na stativ a seřízením do vodorovné polohy pomocí vodováhy (Obr.: 3.14).

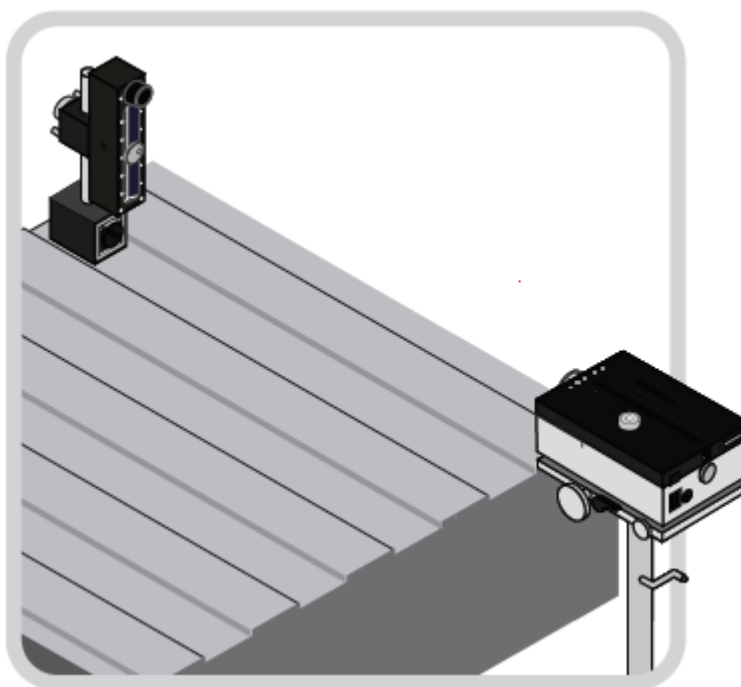


Obr.: 3.14 Vyrovnávání laserové hlavy

Laserová hlava se ustaví ve směru měřené osy. Všechny seřizovací prvky na laserové hlavě a stativu se nastaví do středních rozsahů, aby bylo možné s nimi pohybovat ve všech směrech. Následně se zapne tlačítkem na zadní straně. Na vrchní straně hlavy začne blikat dioda signalizující, že se zařízení stabilizuje. Stabilizace trvá 6 minut. Současně se propojí hlava s kompenzátorem prostředí XC-80 a notebookem se softwarem CARTO. Následuje ustavování optiky, které je časově dost náročné a vyžaduje velkou pečlivost.

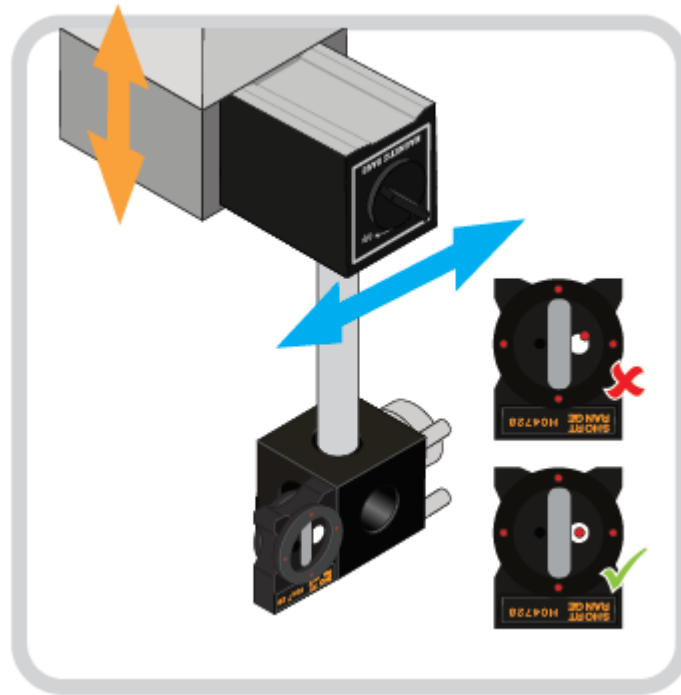
Postup nastavení optiky pro měření přímosti

1. Na Laserové hlavě se připevní závěrka pro měření přímosti (straightness shutter). S laserovou hlavou se natočí tak, aby došlo k zúžení paprsku laseru. Toto natočení se použije pro ustavování optiky.
2. Reflektor se ustaví na stůl stroje (do vřetena) a připevní se na něho terčík s bílou tečkou (Obr.: 3.15). Reflektor by se měl ustavit v co největší vzdálenosti od hlavy. Pro měření přímosti ve horizontálním směru se reflektor otočí o 90°. Paprsek z laseru by měl v celém rozsahu měření směřovat do bílé tečky v terčíku. Paprsek se ustaví pomocí jemného nastavení u laserové hlavy, případně zvýšením nebo snížením celého laseru na stativu laseru. S reflektorem se jezdí do krajních poloh, dokud není paprsek v terčíku po celou dobu.



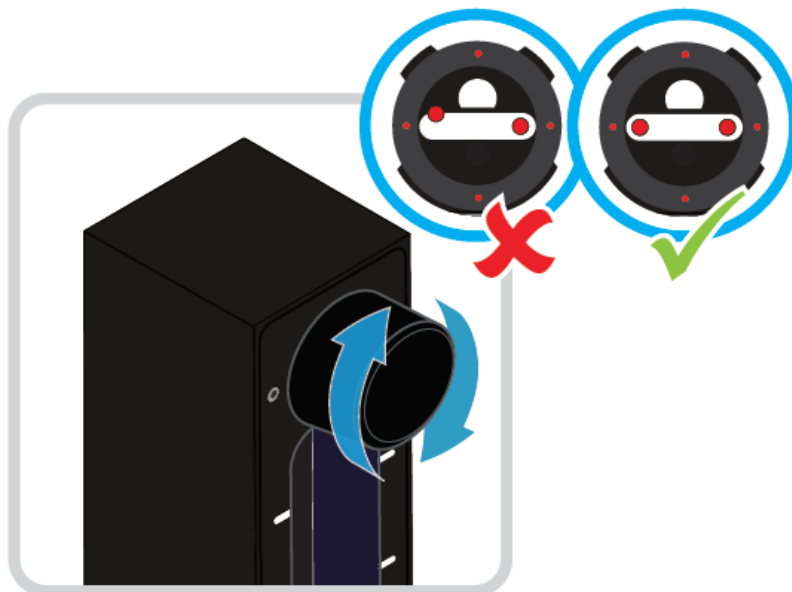
Obr.: 3.15 Ustavení reflektoru pro měření přímosti [55]

3. Na vřeteno stroje se ustaví interferometr. Je třeba dbát na to, aby měl stejnou orientaci jako reflektor. V případě, že se jedná o ustavení B, tak se ustavení provede naopak. Reflektor se ustaví na vřeteno a interferometr se ustaví na stůl v ose měření. Následně se ustavuje poloha, dokud není paprsek v bílém terčíku interferometru (Obr.: 3.16). Paprsek musí být v terčíku po celou měřenou dráhu, proto se postupně odjíždí od interferometrem k reflektoru (pouze pro případ, že je interferometr upnut na stůl stroje). Pokud se začne vychylovat z terčíku je nutné laserovou hlavu ustavit stejně jako v bodě 2, dokud není paprsek opět uprostřed terčíku. Po dojetí interferometru k reflektoru se měření provede znovu opačným směrem. Kontrola se několikrát opakuje, dokud není paprskem v terčíku podél měřené osy.



Obr.: 3.16 Ustavení interferometru pro měření přímosti [55]

4. Po ustavení se hlava interferometru otočí o 90°, paprsek pak prostupuje do reflektoru. Z reflektoru se vyjme terčik pro ustavení paprsku. Paprsek by měl dopadnout na reflektor přibližně 6 mm od středu delší osy.
5. Paprsek, který se vrací do laserové hlavy se ustavuje pomocí otočného knoflíku na reflektoru, pokud není ustaven ve středu interferometru (Obr.: 3.17).



Obr.: 3.17 Ustavení odražeče pro měření přímosti [49]

6. Otočíme laserovou závěrku do polohy pro měření (Obr.: 3.18).

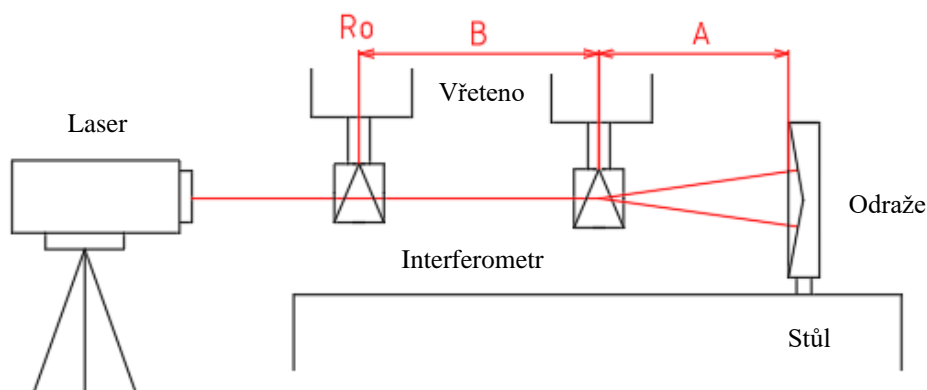


Obr.: 3.18 Natočení laserové závěrky pro měření [55]

7. Na laserové hlavě jsou diody, které slouží jako detekce signálu. Zařízení ustavujeme do té doby, dokud nesvítí zelené diody oznamující dostatečný signál, což znamená, že je možné začít měřit.
8. Dalším krokem je snížení chyby sklonu, která vzniká z nerovnosti mezi osou dráhy stroje a optiky. Při použití optiky s krátkým dosahem by se chyba měla snížit pod $20 \mu\text{m}$. Pro snížení chyby sklonu se postupuje podle následujících kroků (Obr.: 3.19):
- Odražeč a interferometr k sobě přiblížíme co nejvíce a změříme vzdálenost A
 - Odražeč a interferometr oddálíme co nejvíce a změříme vzdálenost B, hodnota B je velikost měřené osy (v našem případě 750 mm)
 - Nastavíme odražeč tak, aby se hodnota na displeji počítače změnila na hodnotu R_c , která se spočítá pomocí následujícího vztahu:

$$R_c = -\frac{A \cdot R_o}{B} \quad [\mu\text{m}] \quad (3.4)$$

Kde R_o je naměřená hodnota z kroku c) v μm , A je vzdálenost, jsou-li optiky nejblíže k sobě v mm , a B je vzdálenost, jsou-li optiky se nejdál od sebe v mm .

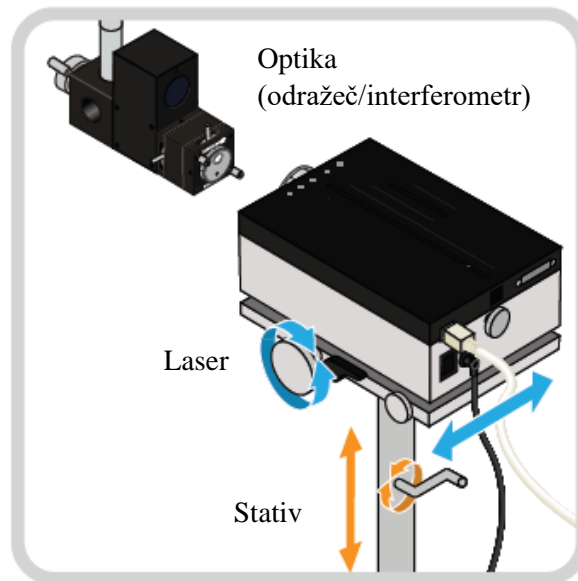


Obr.: 3.19 Schéma pro eliminaci chyby sklonu

Postup nastavení s úhlovou optikou

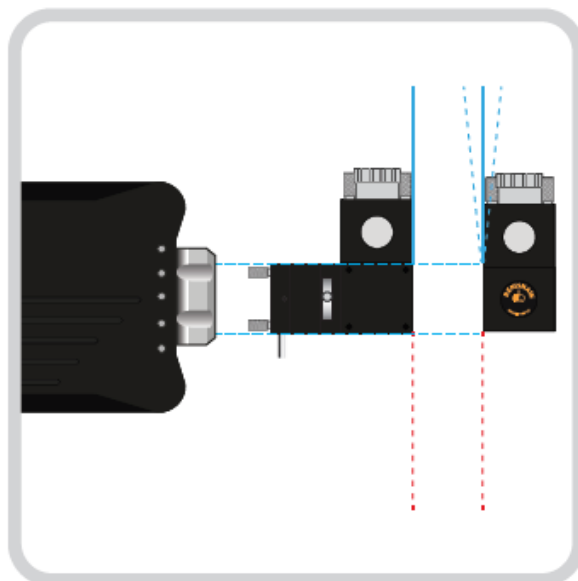
Ustavení s úhlovou optikou je obdobné jako u ustavení s optikou pro měření přímosti.

1. Na vřeteno se připevní interferometr pro měření „pitch“ úhlu horizontální osy, v tomto případě pro měření osy X. Na laserovou hlavu se zašroubuje závěrka a natočí se do pozice se zúženým paprskem pro ustavení.
2. Na stůl se ustaví jedna část optiky a připevní se na něj terčik s bílou tečkou. Paprsek z laseru by měl v celém rozsahu měření směřovat do bílé tečky v terčiku. Paprsek se ustaví pomocí jemného nastavení u laserové hlavy, případně zvýšením nebo snížením celého laseru na stativu laseru (Obr.: 3.20). S reflektorem se jezdí do krajních poloh, dokud není paprsek v terčiku po celou dobu.



Obr.: 3.20 Ustavení laseru vůči optice [49]

3. Následně ustavíme stacionární optiku paralelně s optikou na stole (Obr.: 3.21). Dojedeme do krajní polohy měření, aby byly optiky co nejbliže sobě. Na stacionární optiku se připevní terčik. Stacionární optika se ustaví, aby paprsek byl ve středu terčiku.

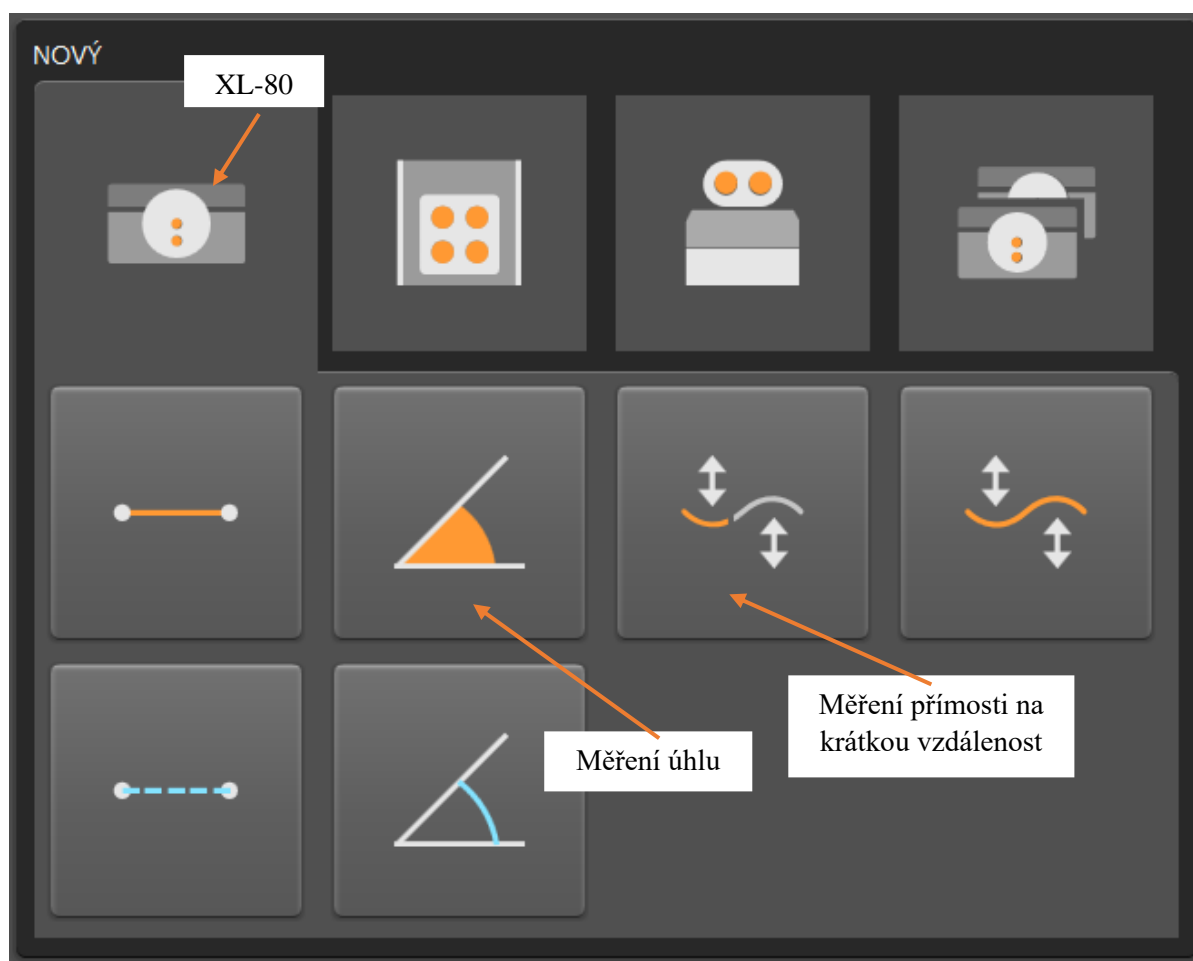


Obr.: 3.21 Ustavení stacionární optiky [55]

4. Jezdíme s osou do krajních poloh a z displeje notebooku nebo diod na horní části laseru zjišťujeme, zda je signál v celém rozsahu dostatečný.
5. Dalším krokem zkontrolujeme, jestli je zpětný paprsek v terčiku laserové hlavy a případně dostavíme.
6. V posledním kroku otočíme s laserovou závěrkou o 90° do otevřené polohy připravené pro měření.

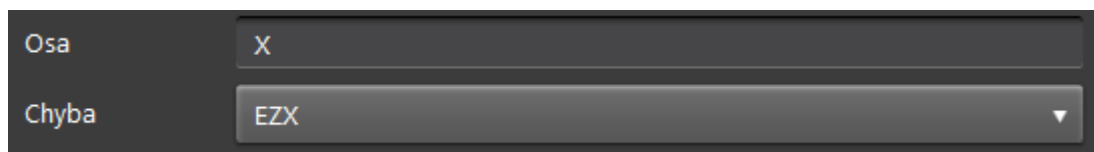
Postup nastavení programu CARTO Capture

Po spuštění programu se objeví domovská stránka (Obr.: 3.22), kde výběrem jedné z ikon nastavíme nový test. V našem případě se použijí ikony pro měření úhlu a přímosti na krátkou vzdálenost.



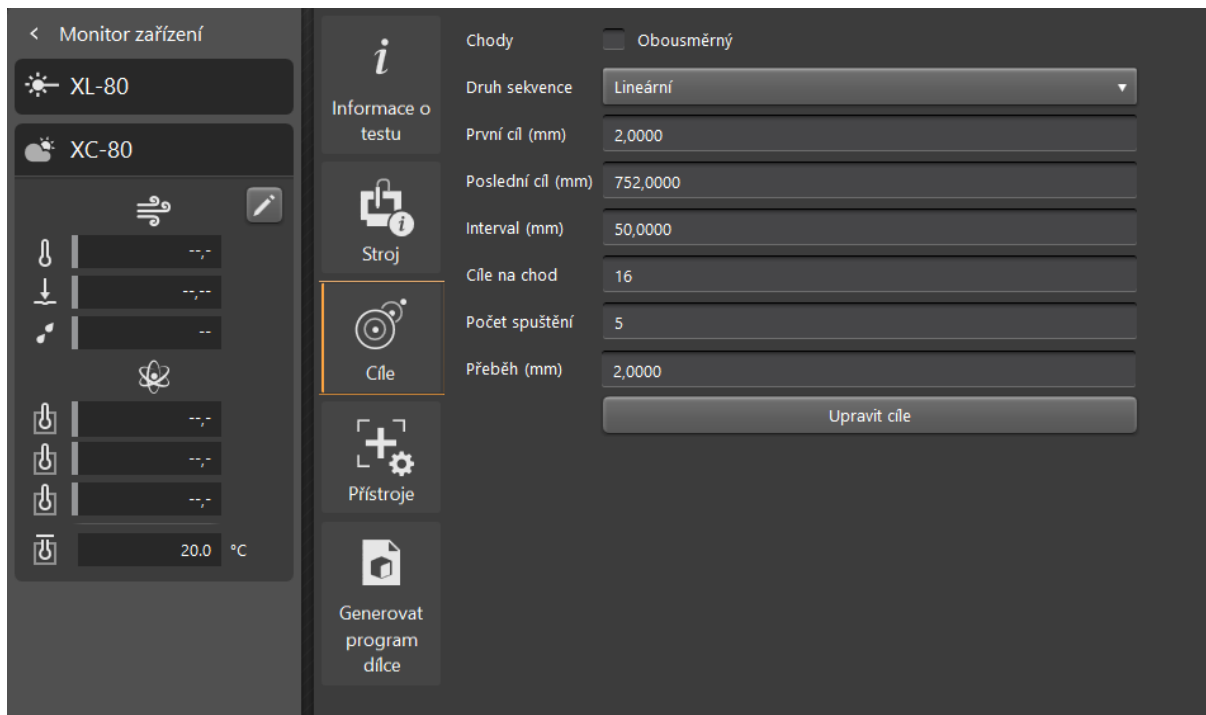
Obr.: 3.22 Domovská stránka CARTO – Capture

Následně nastavíme základní informace o testu, jako je název nebo jméno obsluhy. V dalším kroku definujeme posuzovanou chybu. V našem případě zvolíme chybu EZX (Obr.: 3.23), tedy chybu přímosti Z ve směru osy X.



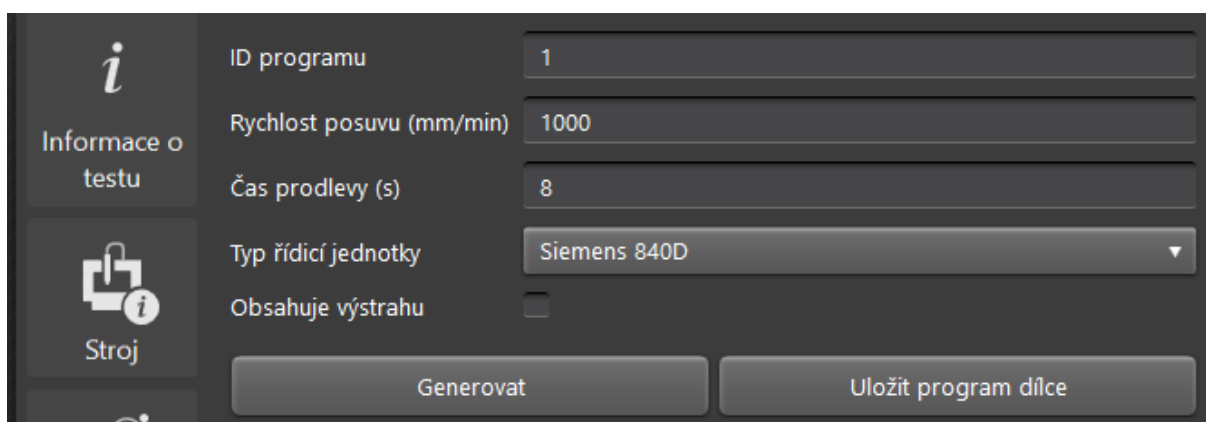
Obr.: 3.23 Nastavení typu chyby

V dalším kroku definujeme stroj. Důležitým nastavením je nastavení cílů (Obr.: 3.24), jelikož podle tohoto bodu se nám vygeneruje NC program. Rozsah osy X je na stroji MCV 754 QUICK 754 mm. Abychom ale nenajížděli do krajních poloh stroje, první bod byl zvolen na 2 mm a poslední 752 mm. Intervalů bude nastaveno několik (50 mm, 125 mm a 250 mm), jelikož provedeme několik měření s různým krokem pro zjištění vlivu kroku na velikost přímosti. Počet spuštění nastavíme na 5 aby bylo možné vyhodnotit podle normy ISO 230-1, kde je potřeba alespoň 5 opakování.



Obr.: 3.24 Nastavení cílů

V posledním kroku se v záložce „generovat program dílce“ nastaví rychlost posuvu, čas prodlevy a typ řídicí jednotky (Obr.: 3.25). Čas prodlevy značí dobu, po kterou bude stroj stát v jednotlivých bodech, aby byl dostatečný čas na zaznamenání hodnoty a ustálení kmitání stroje po předchozím posuvu jeho částí. Typ řídicí jednotky zvolíme Siemens 840D a vygeneruje NC kód, který si uložíme na flash disk a vložíme do stroje.

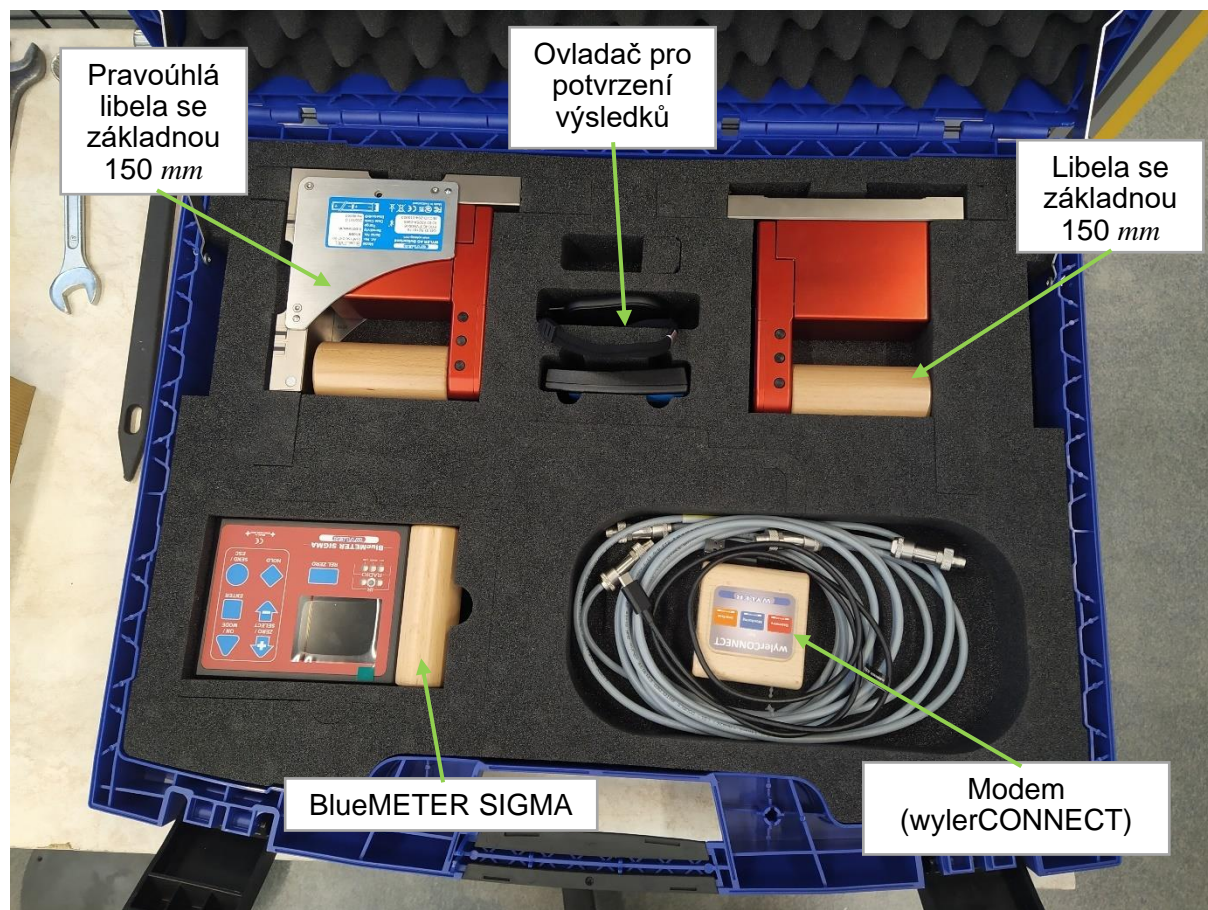


Obr.: 3.25 Nastavení NC programu

NC program v řídicí jednotce stroje najdeme v záložce „program manager“ a spustíme ho tlačítkem „execute“. Jednotlivé body se zaznamenávají potvrzením klávesy F9.

3.2 Postup měření přímosti WYLER Bluesystemem

Systém, který je k dispozici pro měření, se skládá ze dvou digitálních libel o velikosti základen 150 mm, modemu pro připojení počítače s libelami a ovladače (wylerTRIGGER) pro potvrzování výsledků. Počítač lze nahradit zařízením BlueMETER SIGMA. Pro měření však bude použit počítač se softwarem WylerSOFT. Na Obr.: 3.26 je kufřík s komponenty a příslušenstvím.



Obr.: 3.26 kufřík Wyler Bluesystem

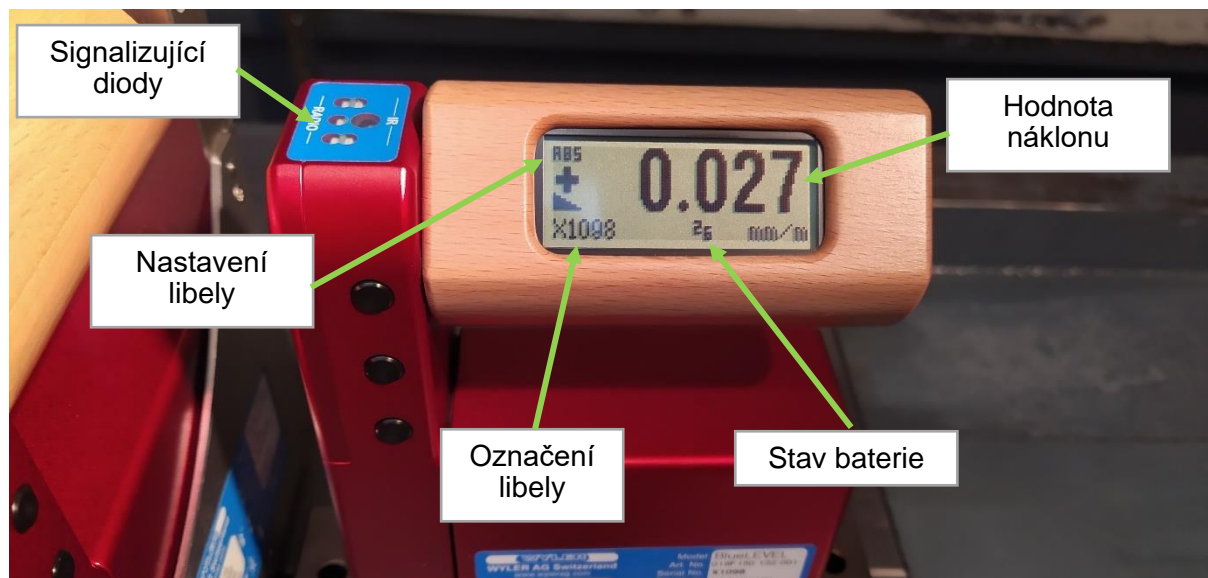
Pro samotné měření jedna libela slouží jako měřicí a druhá jako referenční. Lze použít pouze měřicí libelu. Při měření s referenční libelou se výsledná hodnota sklonu vypočítá jako rozdíl sklonů jednotlivých libel. Libely lze dále nastavit do absolutního módu nebo módu relativního. V této práci budou změřeny všechny nastavení, aby se zjistilo chování jednotlivých nastavení. Aby bylo možné statisticky výsledky zpracovat, jeden typ měření se zopakuje pětkrát při kroku 125 mm.

Postup nastavení:

1. Připojení modemu wylerCONNECT k počítači pomocí USB portu a vyčkání, než začne na modemu svítit zelená barva
2. Ustavení libel na stůl stroje
3. Spuštění libel tlačítkem ON/MODE, dokud nezačnou svítit všechny diody a na displeji se zobrazí SYSTEM TEST (tlačítka ON/MODE, ENTER a další se nachází na boční straně libel)

4. Nastavení typu měření (relativní nebo absolutní), opakované stisknutím tlačítka ON/MODE, než se na displeji zobrazí požadované nastavení a potvrzení tlačítkem ENTER
5. Nastavení a spuštění programu wylerSOFT
6. Podle postupu v programu provést měření

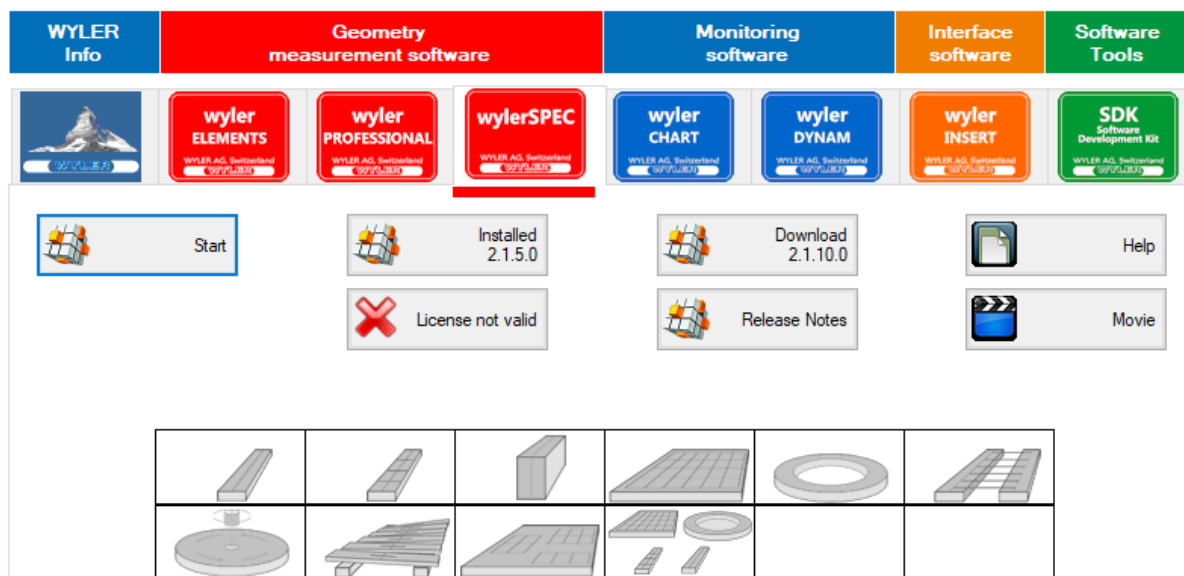
V případě, že bude napětí v baterii menší napětí než 1,7 V, na displeji začne blikat symbol a je nutno baterii vyměnit. Následující obrázek popisuje displej digitální libely.



Obr.: 3.27 Displej digitální libely

Postup nastavení programu wylerSOFT

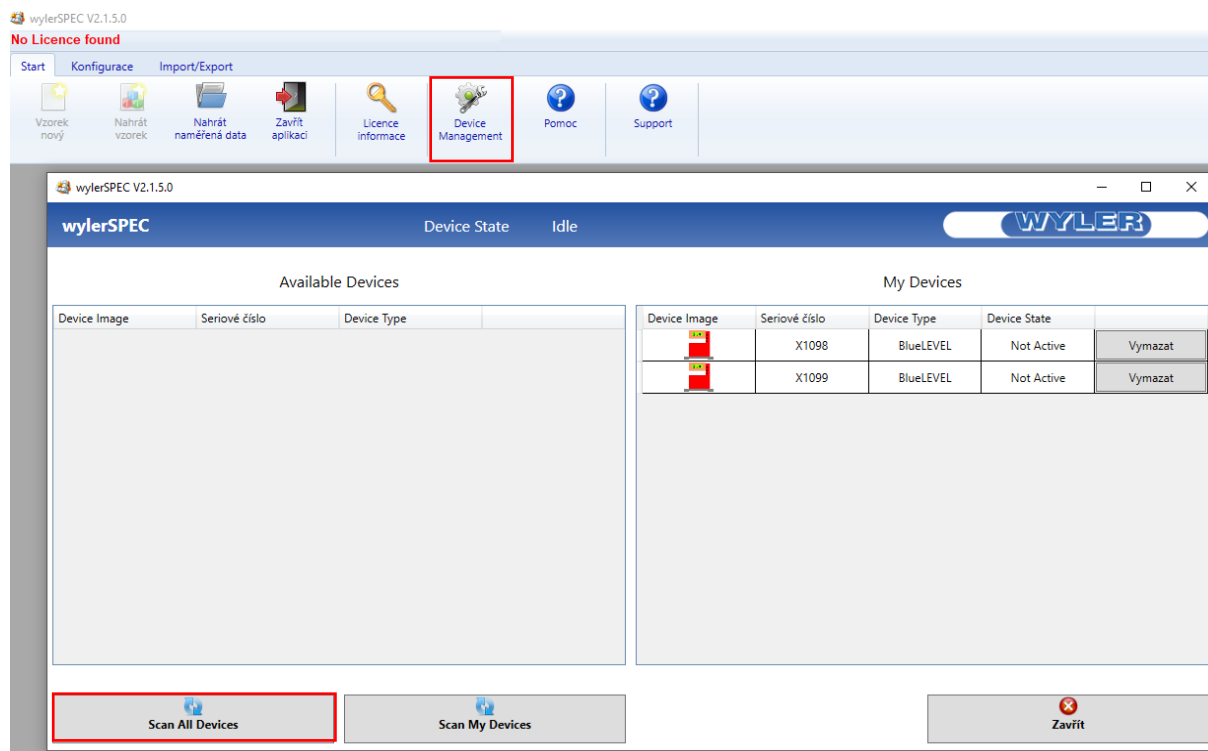
Po spuštění programu se objeví vstupní menu, kde zvolíme jednu z možností „wylerSPEC“, „wylerELEMENTS“ nebo „wylerPROFESSIONAL“ (Obr.: 3.28).



Obr.: 3.28 Spuštění programu wylerSOFT

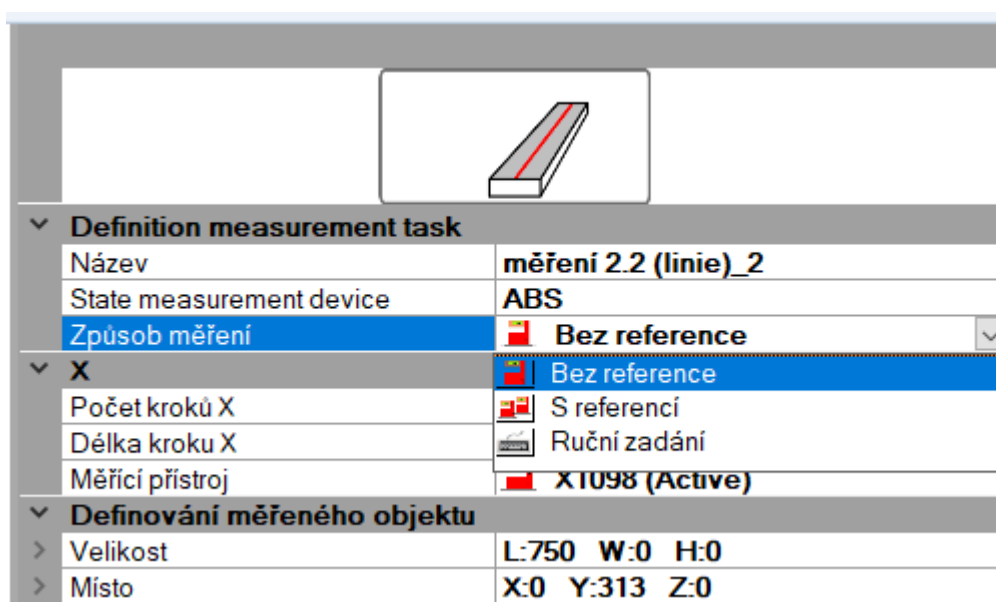
Všechny možnosti umožňují měření přímosti a rovinnosti, přičemž wylerSPEC je nejkompexnější program, který nabízí nejvíce typů měření. Po spuštění jednoho z programů se jako první věc musí provést propojení libel s počítačem. (Obr.: 3.29) Klikneme na ikonku

„device management“, počkáme na vyhledání daných libel, které se následně potvrdí. Modem wylerCONNECT zvládá připojení až sedmi libel najednou.



Obr.: 3.29 Připojení libel s počítačem (wylerSOFT)

Po připojení libel s počítačem můžeme přejít na nastavení měření. Na horní liště klikneme na ikonu „vzorek nový“ a zvolíme měření přímosti. Na pravé straně se objeví tabulka, kde definujeme měření. (Obr.: 3.30) V prvním kroku vyplníme název, nastavení měření (relativní nebo absolutní) a způsob měření (bez reference, s referencí nebo ruční zadání).



Obr.: 3.30 Nastavení testu pro měření přímosti (wylerSOFT)

Bez reference znamená, že pro měření použijeme pouze jednu libelu. Následně zadáme počet kroků, délku kroku a výběr, která libela bude měřicí, případně referenční. V posledním kroku vyplníme velikost měřeného objektu a místo kde se začne měřit. Po tomto nastavení začneme

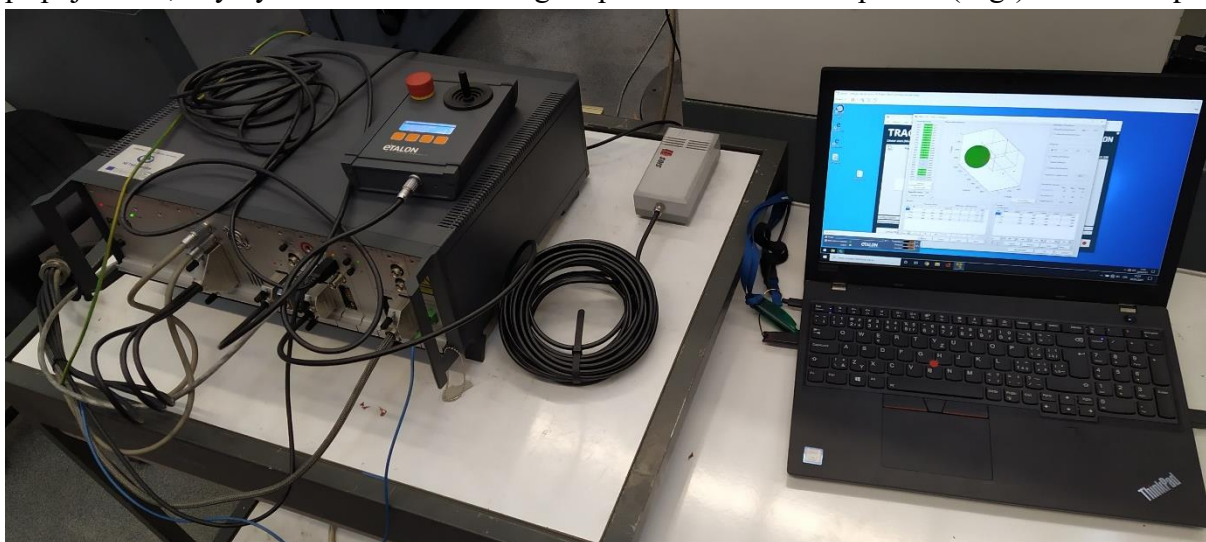
měření kliknutím na ikonku „zahájit měření“. Začíná se reverzním měřením pro zjištění odchylky přístroje. Měřicí libelu nastavíme do požadované pozice a ovladačem potvrdíme hodnotu. Libelu následně otočíme o 180° ve směru kolmém na základnu libely a znovu potvrdíme hodnotu. Libelu pak vrátíme do původní polohy. Jelikož měříme přímost osy a ne stolu, budeme pohybovat po krocích se strojem pomocí příkazu G91. Následující obrázek znázorňuje průběh měření (Obr.: 3.31). V levém horním rohu je velikost náklonu a chyby přímosti v jednotlivých bodech měření.



Obr.: 3.31 Průběh měření přímosti (wylerSOFT)

3.3 Postup měření přímosti LaserTRACEREM

Začne se připojením řídicí jednotky (Obr.: 3.32). Řídicí jednotka slouží k převodu signálu od laseru, zpracovává data z teplotních čidel, řídí LTc a slouží jako rozhraní mezi výpočetní technikou (softwarem). LTc je s řídicí jednotkou připojen pomocí optických vláken. Počítač s nainstalovaným softwarem TRAC-CAL se propojí s řídicí jednotkou. Do řídicí části stroje se připojí kabel, aby bylo možné dostávat signál po každém změření pozice (trigr). Reflektor pro



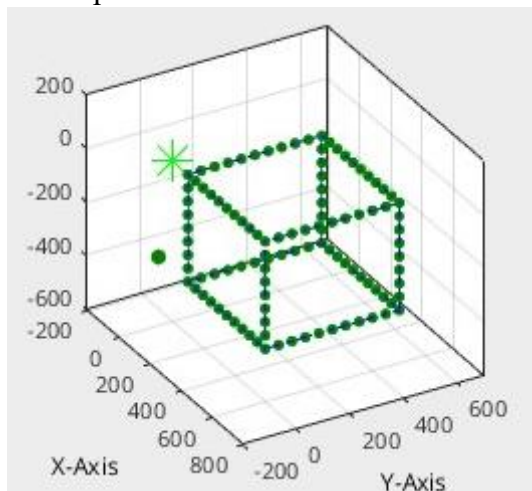
Obr.: 3.32 Připojení řídicí jednotky

měření použijeme s úhlem 160° , který je určený pro měření malých strojů. Teplotu jednotlivých os do systému zapíšeme následně z naměřených dat.

Postup nastavení programu TRAC-CAL

Postup nastavení měření v programu TRAC-CAL spočívá v následujících krocích:

1. Nastavíme správnou kinematiku stroje (X-Y-Z)
2. Nastavíme rozměry měřeného prostoru



Obr.: 3.33 Měřený prostor

3. Nastavíme počet kompenzovaných bodů
4. Nastavíme pozice a to tak, aby nejistoty měření byla co nejmenší. Pro měření použijeme celkově 6 pozic LTC v prostoru stroje (Tab.: 3.1). Hodnoty jednotlivých nejistot jsou na Obr.: 2.34

Tab.: 3.1 Pozice LaserTRACERU

Pozice	Souřadnice (mm)			Sklon (°)	Offset reflektoru (mm)		
	No.	X	Y		Z	X	Y
1	-210	70	-480	0	0	0	-122
2	-210	300	-480	0	0	0	-122
3	900	300	-480	0	0	0	-122
4	900	200	-480	0	0	-127	-50
5	900	70	-480	0	127	0	-50
6	900	70	-480	0	0	0	-122

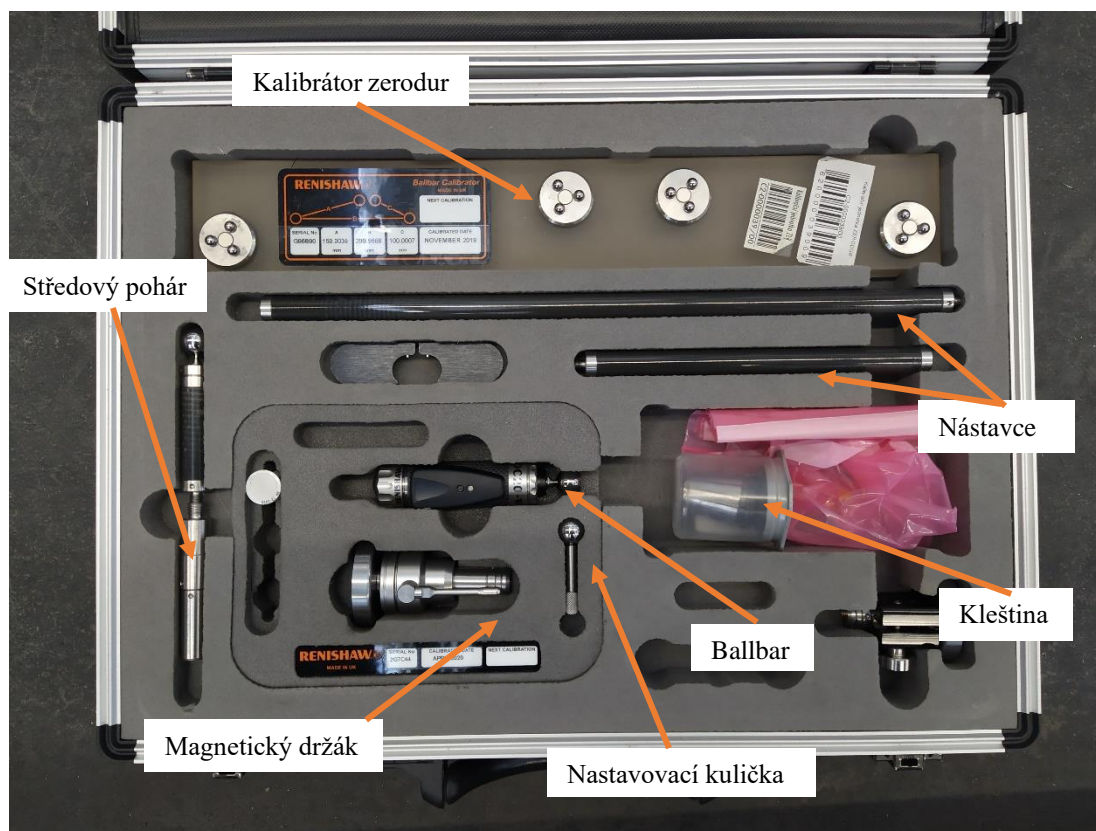
5. V záložce „measure“ vygenerujeme CNC kód, pro řídicí systém SIEMENS 840D sl s typem měření trigr
6. Vygenerovaný CNC vložíme do řídicího systému stroje.
7. Software TRAC-CAL propojíme s přístrojem přes záložku „carry out measurement“

Uncertainties	
EXX	0.1 μm
EYX	0.4 μm
EZX	0.2 μm
EXY	0.1 μm
EYY	0.4 μm
EZY	0.2 μm
EXZ	0.2 μm
EYZ	0.2 μm
EZZ	0.9 μm
EAX	0.9 μrad
EBX	0.3 μrad
ECX	0.2 μrad
EAY	0.8 μrad
EBY	0.2 μrad
ECY	1.1 μrad
EAZ	1.7 μrad
EBZ	2.0 μrad
ECZ	1.2 μrad
C0Y	0.6 μrad
B0Z	0.6 μrad
A0Z	0.5 μrad
EAYZ	---
EZYZ	---
EAXZ	---

Obr.: 3.34 Hodnoty nejistot

3.4 Postup měření přímosti Ballbarem QC20-W

Na Obr.: 3.35 je kufřík s vyznačeny komponenty a příslušenstvím.



Obr.: 3.35 Kufřík s Ballbarem QC20-W

Měření s přístrojem Ballbar QC20-W lze rozdělit do následujících bodů:

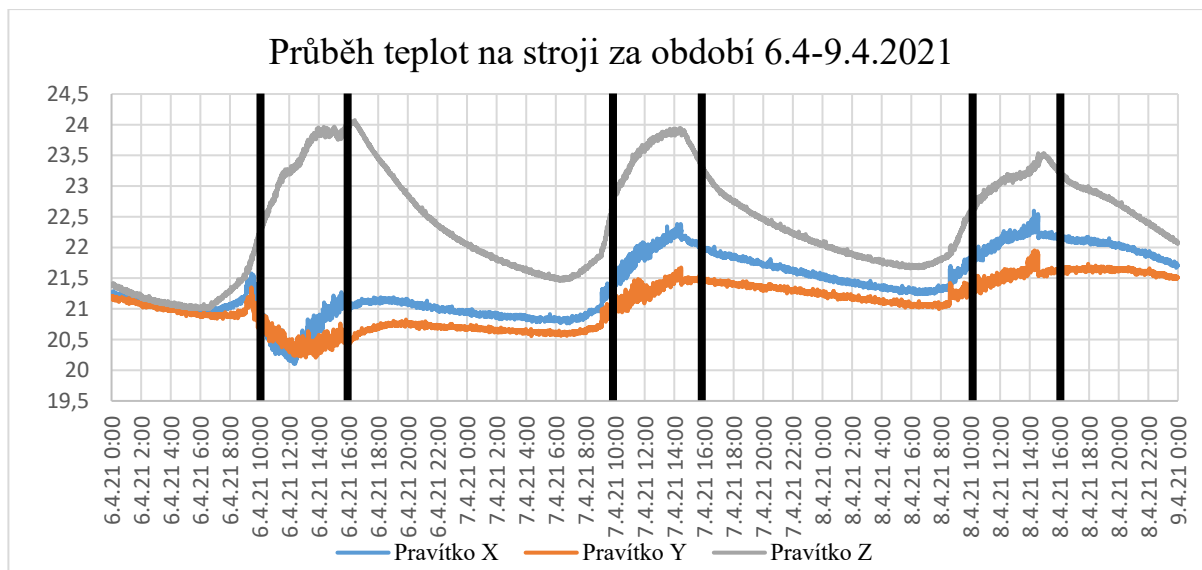
1. Vložíme baterii do Ballbaru
2. Ballbar připojíme k počítači pomocí Bluetooth přes program Ballbar 20
3. Zkalibrujeme Ballbar na zerodurové desce
4. Upneme středový upínač do vřetena stroje
5. Ustavíme magnetický míč na plochu stolu
6. Vložíme nastavovací kuličku určenou k ustavení do držáku ve vřeteni
7. Srovnáme středový pohár a magnetický držák v ose X a Y a pomalu přibližujeme držáky v ose Z, než dojde k uchycení s magnetickým držákem. Magnetický držák zafixujeme a na stroji nastavíme nulovou pozici
8. Na Ballbar namontujeme nástavce a připneme do magnetického držáku a středového poháru
9. Načte se NC kód z řídicího systému vygenerovaného programem ballbar 20 a spustíme test tlačítkem „execute“

Postup nastavení programu Ballbar 20

Pro zaznamenávání a nastavení strategie se používá program Ballbar 20. Prvně se nastaví typ stroje, rovina testu, poloměr testu a rychlost posuvu. V dalším kroku se nastaví údaje o úhlu snímání dat, úhlu přejezdu a směru měření. Konkrétní nastavení je na Obr.: 3.36 a Obr.: 3.37.

4 EXPERIMENT

Experiment proběhl na již zmíněném stroji MCV 754 QUICK v laboratoři C1/118 na Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky. Experiment proběhl ve dnech 6.4.2021-13.4.2021. Na Obr.: 4.1 je průběh teplot za období 6.4.-9.4.2021. Všechna měření proběhla v rozmezí od 10:00 až 16:00 hodin. Ve dnech 6.4-7.4.2021 se začalo s měřením na přístroji Renishaw XL-80. Ve dnech 7.4-8.4.2021 pak proběhlo měření s WYLER Bluesystemem a 8.4.2021 se měřilo s přístrojem Ballbar QC-20-W. Poslední měření s LaserTRACEREM proběhlo dne 13.4.2021.

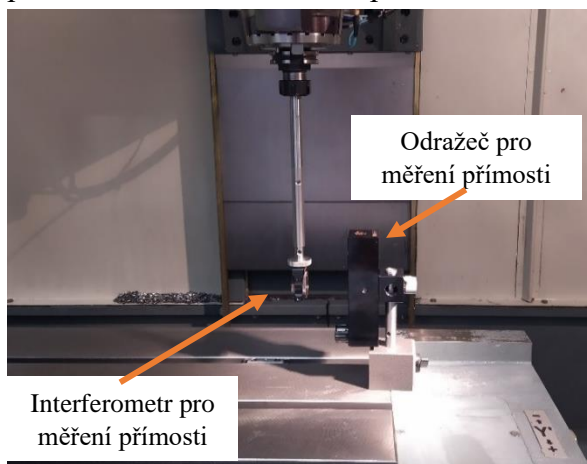


Obr.: 4.1 Průběh teplot na stroji

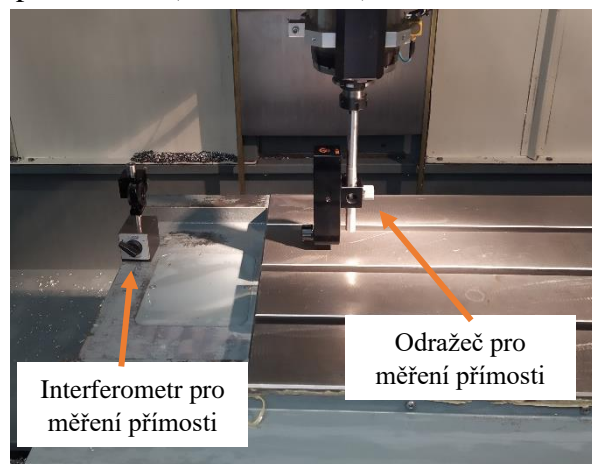
Rozdíly teplot v časech, kdy probíhala měření jsou poměrně malé (do 2 °C). Na výsledky přímosti to nemá významný vliv, jako je tomu například u měření polohování, a proto můžeme výsledky jednotlivých měření porovnávat. Pro všechny výsledky platí, že kladná hodnota chyby přímosti je směrem dolů do základů stroje (stejně jako záporný směr osy Z).

4.1 Měření s přístrojem Renishaw XL-80

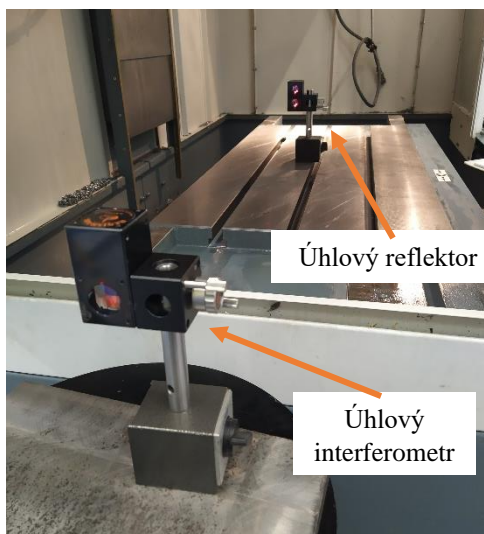
Začalo se měřit s přístrojem Renishaw XL-80, kde se použily optiky pro měření přímosti a pro měření úhlu. Celkem se použilo 5 ustavení optik A až E (Obr.: 4.2 - 4.6).



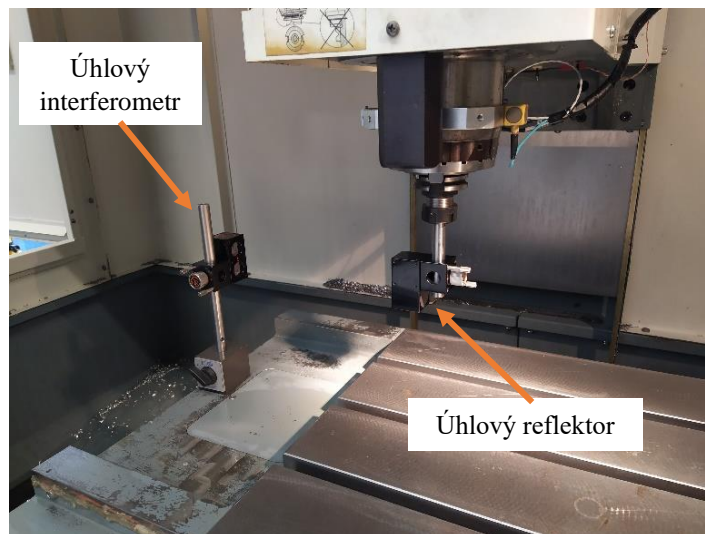
Obr.: 4.2 Ustavení optiky A na stroji MCV 754 QUICK



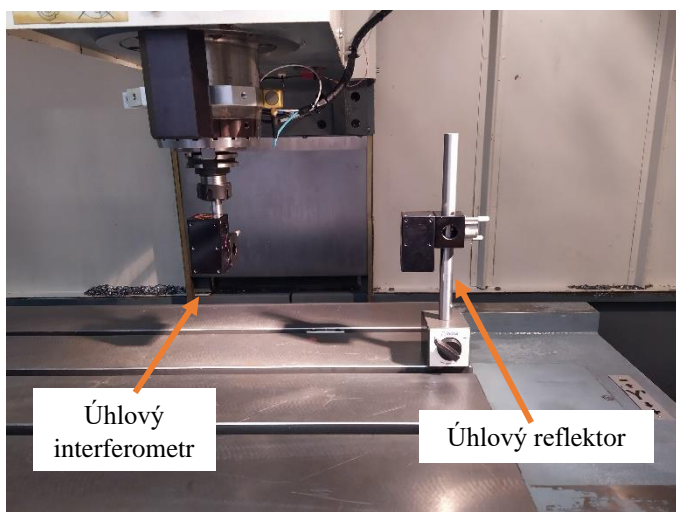
Obr.: 4.3 Ustavení optiky B na stroji MCV 754 QUICK



Obr.: 4.5 Ustavení optiky C na stroji MCV 754 QUICK



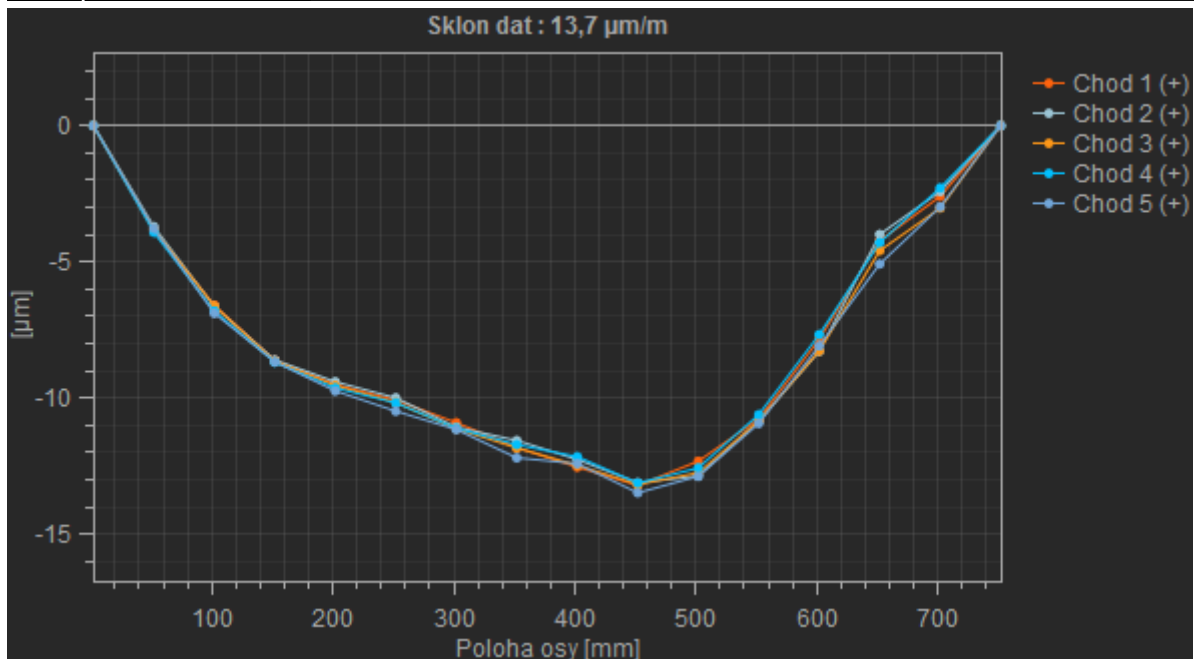
Obr.: 4.4 Ustavení optiky D na stroji MCV 754 QUICK



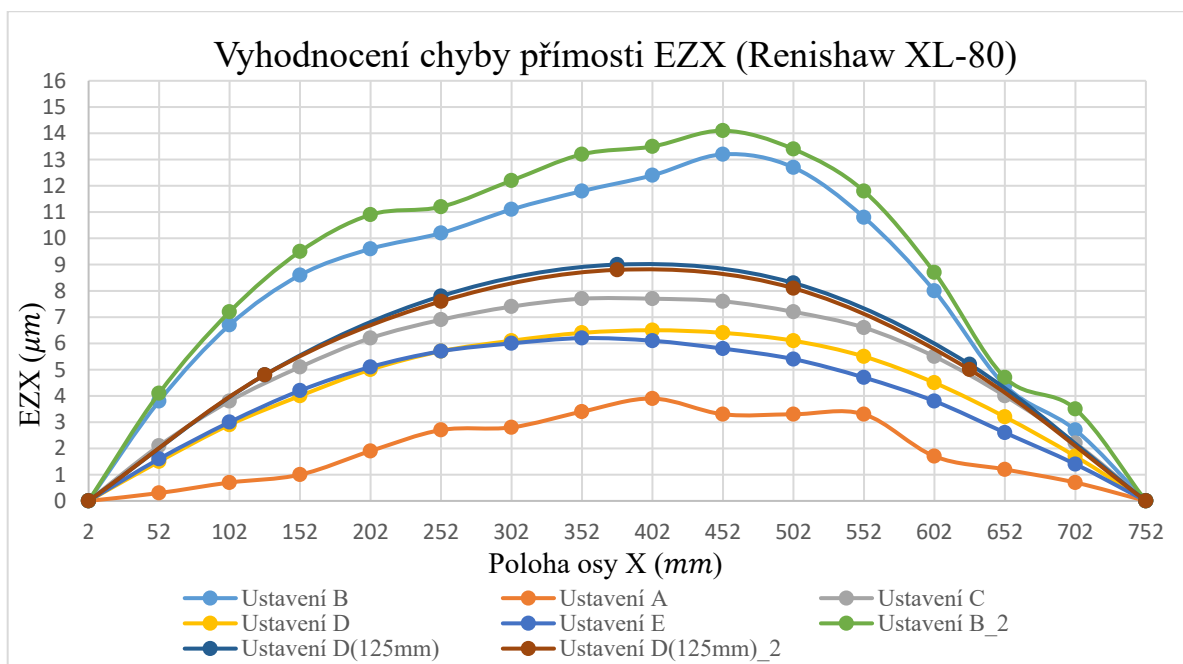
Obr.: 4.6 Ustavení optiky E na stroji MCV 754 QUICK

Všechna měření se opakovala pětkrát a provedla se jako jednosměrná, byly tedy zaznamenávány údaje o přímosti pouze v jednom směru. Krok měření byl nastaven na 50 mm. Osa X stroje MCV 754 QUICK má rozsah 754 mm. Aby se nezajíždělo do krajních poloh, měření se provedlo od 2 mm do 752 mm. Celkový měřený rozsah tak byl 750 mm.

Pro vyhodnocení se použil program CARTO Explore, který nabízí několik variant vyhodnocení výsledků. Výsledky měření se v programu vyhodnotily metodou nejmenších čtverců, aby se eliminovala chyba sklonu. Na Obr.: 4.7 je ukázka vyhodnocení z prvního měření při ustavení optiky typu A. Osa Y v grafu představuje chybu přímosti Z ve směru osy X (EZ_X) v μm a osa X je poloha v mm. Při porovnávání výsledků různých typů ustavení je vhodné jednotlivé chody nejprve převést na průměrnou hodnotu. U některých měření je velikost chyby se záporným znaménkem (dáno nastavením programu), avšak pro porovnání jsou výsledky v absolutních hodnotách. Směr chyby je stejný jako záporný směr osy Z, která směřuje dolů do základů stroje. Porovnání výsledků je na Obr.: 4.8. Kromě měření s krokem 50 mm se ještě pro některá ustavení provedla měření s krokem 125 mm a 250 mm, aby se posoudil vliv kroku na výsledek měření. Výsledky ze všech měření jsou v příloze této práce.



Obr.: 4.7 Vyhodnocení výsledků v programu CARTO Explore



Obr.: 4.8 Vyhodnocení měření přímosti (XL-80)

Velikost chyby při ustavení A (Obr.: 4.2) je podle předpokladů nejmenší $3,9 \mu\text{m}$. Naopak největší chyba při ustavení B (Obr.: 4.3), kde se projevuje padání interferometru, a měří se tak chyba na konci stolu. Velikost chyby je $14,1 \mu\text{m}$. Hodnotu, o kterou se stůl nakloní vlivem gravitační síly, lze brát jako rozdíl ustavení A, a ustavení B. Velikost této chyby je $10,2 \mu\text{m}$. Při použití úhlových optik výsledky leží mezi hodnotami z ustavení A a B. Obecně lze říct, že druh ustavení úhlových optik nemá takový vliv na výsledek měření. Výsledky měření dosahují hodnot od 6 do $9 \mu\text{m}$. I zde však platí pravidlo, že pokud umístíme interferometr na konec stolu a reflektor do vřetene, projeví se to větší chybou z důvodu naklonění stolu.

4.2 Měření s přístrojem WYLER Bluesystem

Na začátku měření se zjišťoval vliv nastavení libel na výsledky měření. V následujících dvou tabulkách jsou jednotlivé módy s označením.

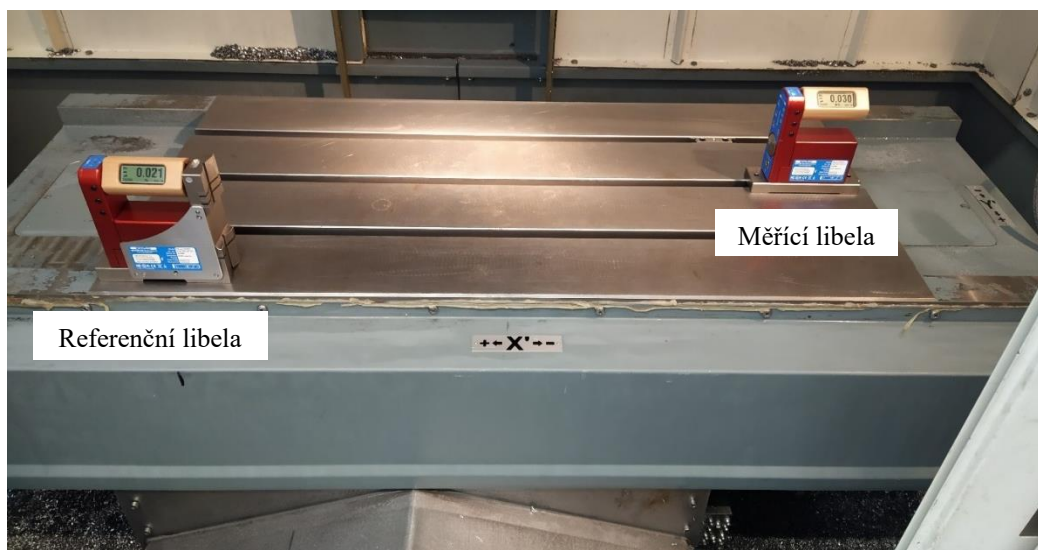
Tab.: 4.1 Relativní nastavení

1. Relativní nastavení libely			
1.1 S referenční libelou		1.2 Bez referenční libelou	
1.1.a Bez nulování libely	1.1.b S nulováním libely	1.2.a Bez nulování libely	1.2.b S nulováním libely

Tab.: 4.2 Absolutní nastavení

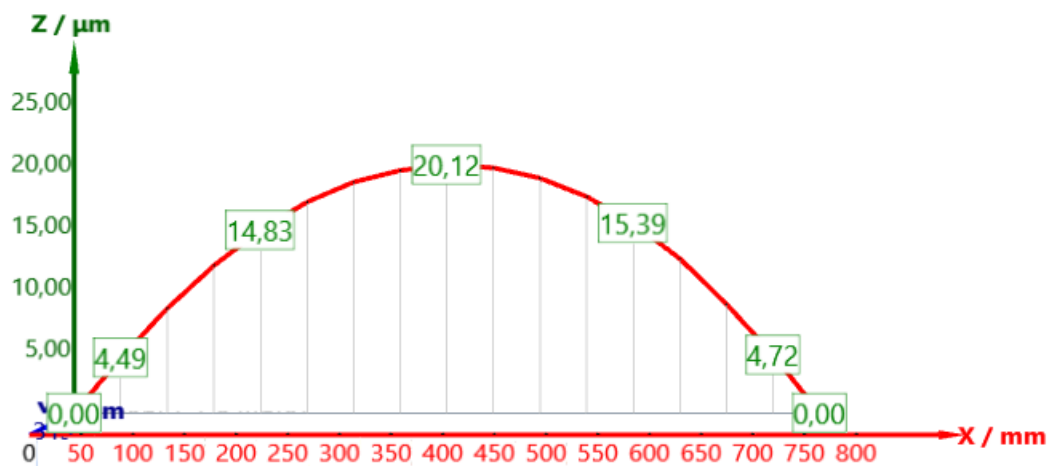
2. Absolutní nastavení libely	
2.1 S referenční libelou	2.2 Bez referenční libelou

Referenční libela byla umístěna na rohu stolu a měřicí libela uprostřed stolu ve směru Y na konci stolu (Obr.: 4.9).



Obr.: 4.9 Rozložení libel na stole

Výsledky byly vyhodnoceny metodou koncových bodů v programu wylerSPEC (Obr.: 4.10).



Obr.: 4.10 Vyhodnocení měření metodou koncových bodů (1.1.a)

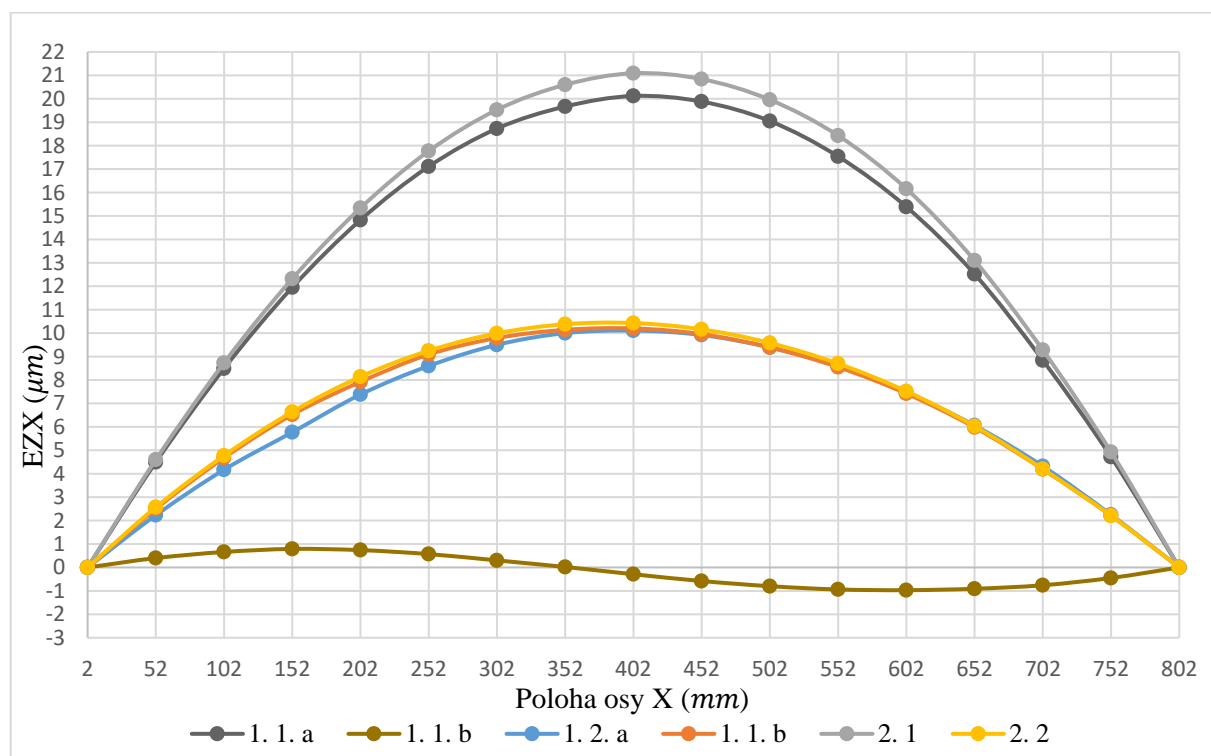
Kde Osa Y v grafu představuje chybu přímosti Z ve směru osy X (EZX) v μm a osa X je poloha v mm . Měřilo se s krokem 50 mm . Jednotlivá měření probíhala při jednom chodu. Stejně jako u měření s interferometrem XL-80 se ani nyní nezajíždělo do krajních poloh. Měření se provedlo od 2 mm do 752 mm . Celkový měřený rozsah tak byl 750 mm . Pohyb stolu ve směru osy X byl nastaven pomocí příkazu G91 (inkrementální zadávání hodnot).

Srovnání výsledků všech měření při různých nastaveních libel bylo provedeno v excelu.

V Tab.: 4.3 jsou výsledky měření a na Obr.: 4.11 je grafické srovnání.

Tab.: 4.3 Výsledky měření z různých nastavení libel v μm

Cíle (mm)	1.1.a	1.1.b	1.2.a	1.2.b	2.1.	2.2.
2	0	0	0	0	0	0
52	4,49	0,4	2,23	2,5	4,6	2,57
102	8,49	0,66	4,17	4,68	8,73	4,77
152	11,95	0,79	5,77	6,52	12,32	6,64
202	14,83	0,74	7,38	7,92	15,34	8,14
252	17,11	0,57	8,6	9,09	17,77	9,25
302	18,73	0,3	9,5	9,79	19,53	9,99
352	19,67	0,02	10	10,14	20,6	10,38
402	20,12	-0,29	10,11	10,2	21,09	10,43
452	19,88	-0,58	9,92	9,96	20,84	10,16
502	19,05	-0,8	9,39	9,39	19,96	9,58
552	17,54	-0,94	8,59	8,55	18,43	8,7
602	15,39	-0,97	7,47	7,42	16,16	7,52
652	12,52	-0,91	6,06	5,98	13,1	6,03
702	8,84	-0,76	4,32	4,19	9,28	4,2
752	4,72	-0,45	2,25	2,21	4,93	2,21
802	0	0	0	0	0	0

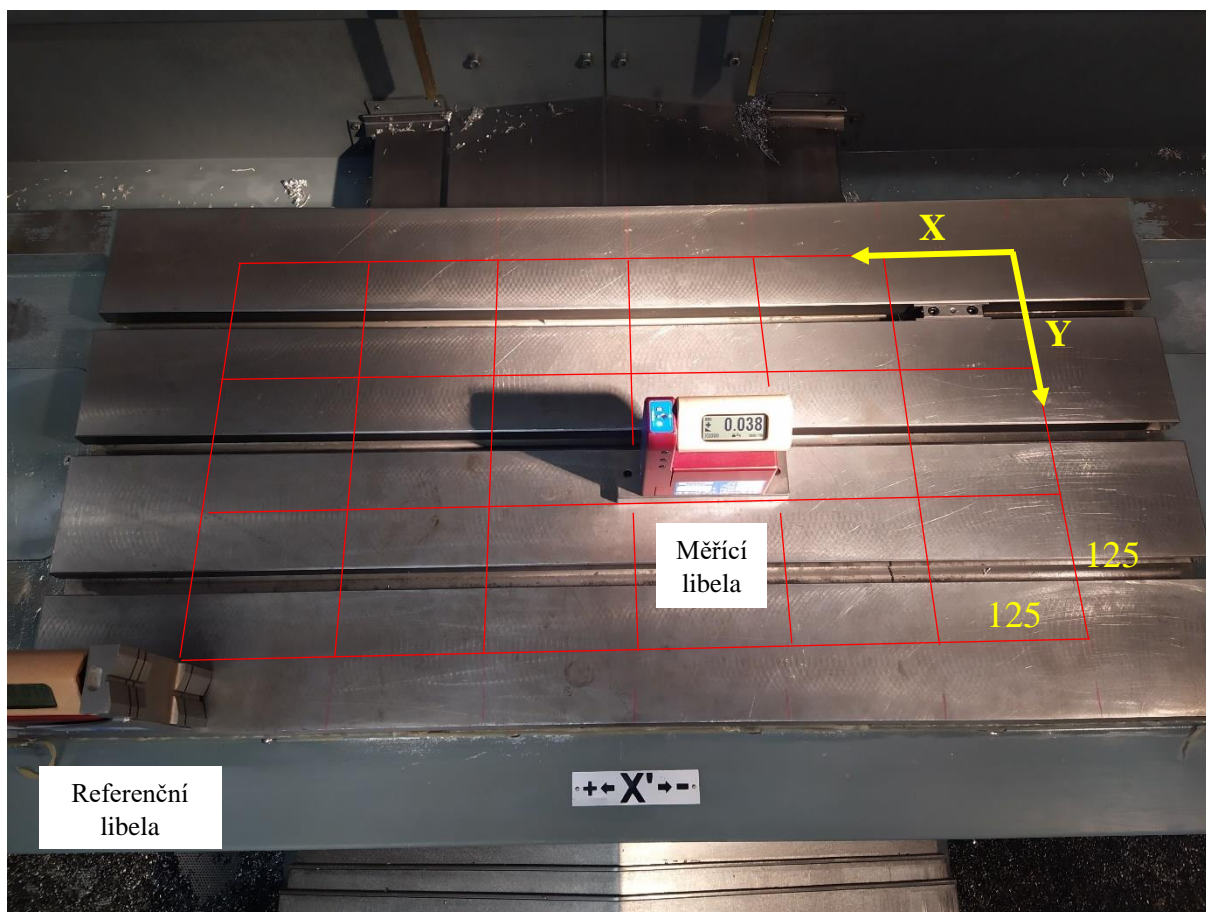


Obr.: 4.11 Vyhodnocení různých nastavení libel

Z výsledků lze vyčíst, že pokud nepoužijeme referenční libelu (1.2.a, 1.1.b a 2.2), výsledky jsou si téměř rovny. Pokud použijeme referenční libelu, která byla umístěna na rohu stolu, výsledek měření se dvakrát zvětší, protože se náklony obou libel sečtou. V případě 1.1.b se hodnoty náklonů odečtou a výsledek je téměř nulový.

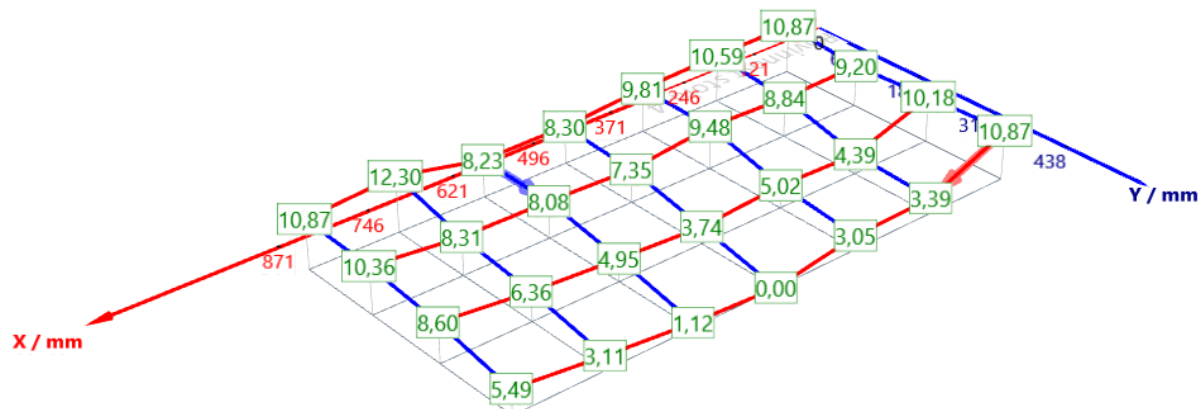
Po odměření různých nastavení libel se měřila rovinnost stolu (Obr.: 4.12). Celkové rozměry stolu jsou $500 \times 1000 \text{ mm}$. Měřilo se s dvěma libelami, přičemž jedna sloužila jako referenční. Krok libel byl nastaven na 125 mm . Jelikož se měřila rovinnost stolu, pohybovalo se s libelou na stole, se strojem se nepohybovalo. Stůl byl nastaven do středové pozice, kde souřadnice X byla 374 mm a souřadnice Y byla 313 mm . Síť byla umístěn na prostředek stolu o celkových rozměrech $375 \times 750 \text{ mm}$.

Postup měření byl následovný. Na stůl se nakreslila síť, která sloužila pro určení ustavení libely v jednotlivých krocích. Začalo se měřit v pravém horním rohu s osou základny natočenou ve směru osy X. Po odměření všech bodů v ose X se libela natočila a odměřil se sklon v osy Y v jednotlivých bodech.

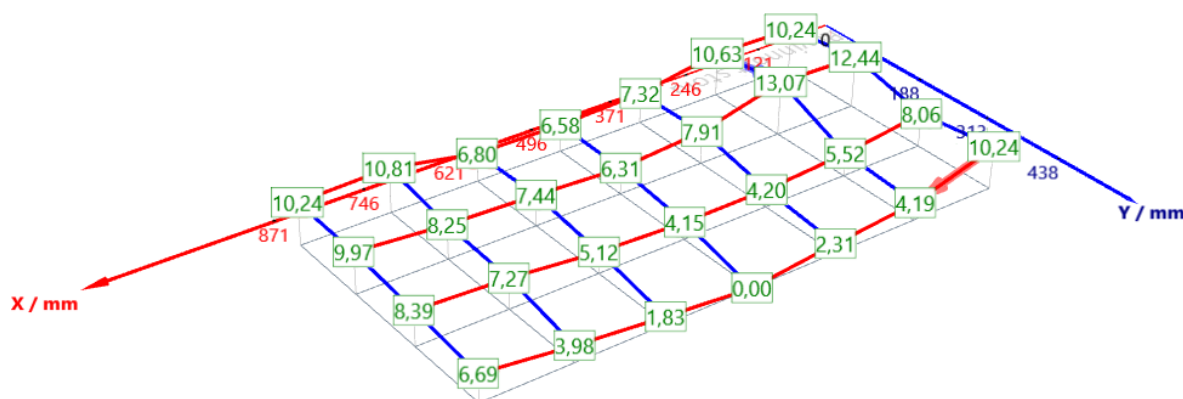


Obr.: 4.12 Nastavení sítě na stole při měření přímosti

Měření se pro kontrolu provedlo dvakrát. Vyhodnocení výsledků proběhlo v programu WYLERsoft metodou koncových bodů. Výsledky měření s jednotlivými hodnotami jsou na Obr.: 4.13 a Obr.: 4.14. Zelené hodnoty jsou odchylky v μm .



Obr.: 4.13 Výsledky z prvního měření rovinnosti stolu



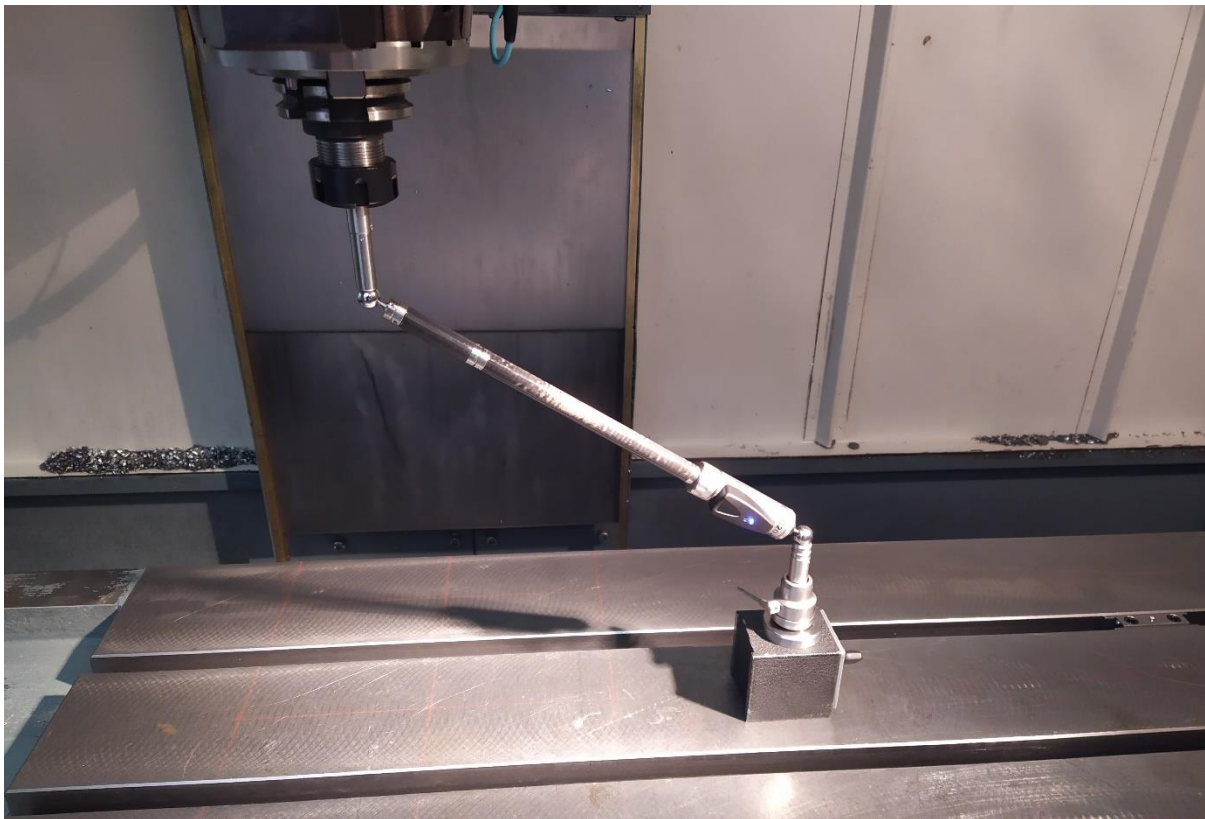
Obr.: 4.14 Výsledky z druhého měření rovinnosti stolu

Výsledky se od sebe liší v některých případech až o 3-4 μm . Tyto rozdíly mohou být způsobeny tím, že stůl není ideálně hladký, a to se projeví na náklonu libel. Pokud najedeme do rozdílné pozice než u předchozího měření. Dalším faktorem jsou nečistoty na stole. I když byl stůl od nečistot od obrábění očištěn, jakákoliv nečistota se negativně projeví na výsledku, jelikož libely pracují s velmi vysokou přesností.

Dalším měřením bylo měření přímosti EZX. Aby bylo možné porovnávat výsledky s interferometrem XL-80, je nutné podle normy ISO 230-1, 2014 provést měření alespoň pětikrát. Výsledky budou statisticky zhodnoceny a porovnány v následující kapitole. Měření se provedlo při nastavení libely v absolutním módu bez referenční libely.

4.3 Měření s přístrojem Ballbar QC20-W

Měření se provedlo jako klasický test kruhové interpolace. Použil se ballbar s nastavci o poloměru 300 mm (Obr.: 4.15). Na stroji tak bylo možné provést měření přímosti v rozsahu 600 mm.



Obr.: 4.15 Nastavení Ballbaru QC20-W na stroji

Výsledek z měření je na následujícím obrázku (Obr.: 4.17).

Ballbar diagnostika (%)

ZX 220stup 300mm Kalibrován 20210408-142950

Obsluha: Jan Únar

Datum: 2021-dub-08 14:29:50

RENISHAW

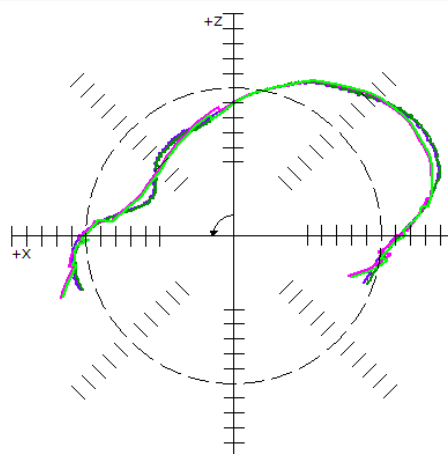
Stroj: Rychlý test

QC20-W: 2G7C44, Datum poslední kalibrace: 2020-04-16

87%	Kolmost	145,4 μ m/m
6%	Zpoždění serva X	→ 2,9 μ m ← -2,7 μ m
2%	Amplituda cyklické chyby Z	↑ 1,0 μ m ↓ 1,1 μ m
1%	Amplituda cyklické chyby X	↑ 0,5 μ m ↓ 0,6 μ m
1%	Mrtvý chod X	→ -0,3 μ m ← -0,6 μ m

Nejllepší poloměr 300,0144mm
Kruhovitost 44,8 μ m

- Běh 1
- Běh 2
- Simulovaný běh 1
- Simulovaný běh 2



Obr.: 4.16 Výsledek měření (Ballbar QC20-W)

Námi hledanou chybu přímosti EZX program Ballbar 20 vyhodnotil jako maximální hodnotu, která vyšla 30 μ m. V poměru s ostatními měřidly se jedná o velkou hodnotu, i přestože rozsah měření je pouze 600 mm.

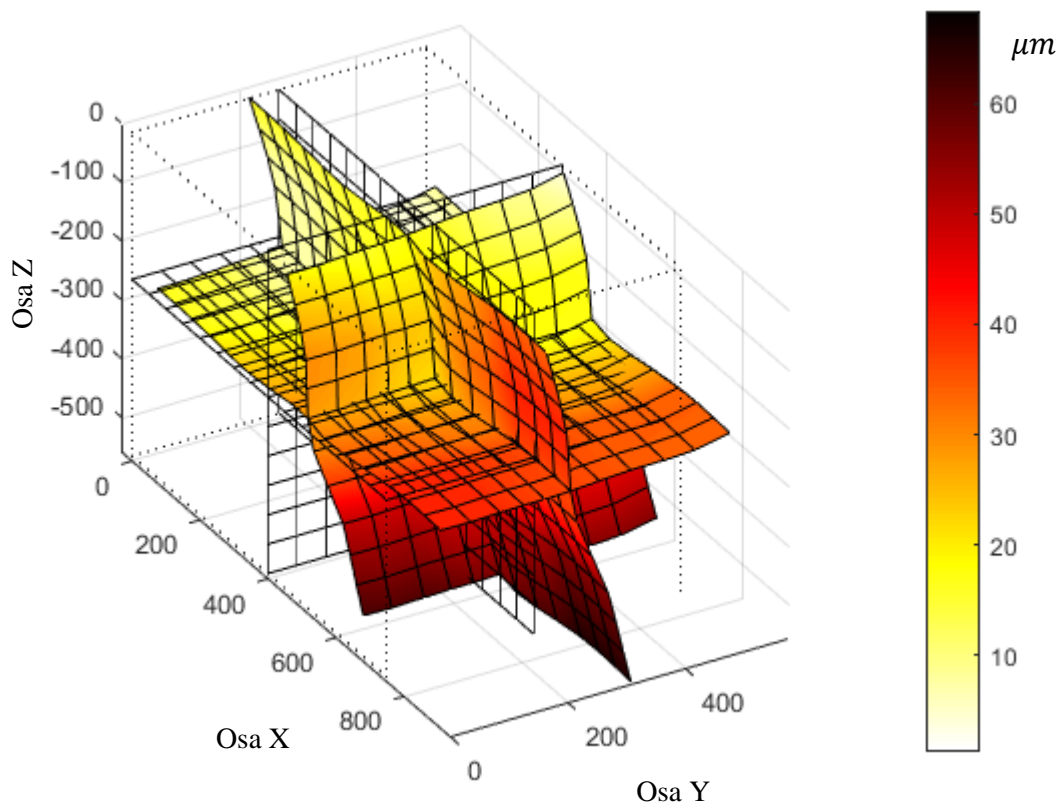
4.4 Měření s přístrojem LaserTRACER

Měření s LaserTRACEREM bylo provedeno 13.4.2021 podle postupu z kapitoly 3.3. Jelikož se jednalo o plný model, výsledkem je hodnota všech 21 geometrických chyb, které jsme schopni na daném stroji měřit. Na Obr.: 4.17 jsou ve sloupečku „result“ zobrazeny hodnoty jednotlivých chyb, kde koeficient rozšíření je 2. Koeficient 2 značí, že 95 % výsledků z měření bude ležet v intervalu U.

Name	Result	U (max)	Unit
EXX	36.7	0.3	μm
EYX	3.7	0.8	μm
EZX	2.0	0.3	μm
EXY	1.4	0.2	μm
EYY	13.9	0.6	μm
EZY	3.9	0.3	μm
EXZ	12.1	0.6	μm
EYZ	3.2	0.4	μm
EZZ	6.3	2.1	μm
EAX	8.8	1.9	μrad
EBX	46.1	0.6	μrad
ECX	24.1	0.5	μrad
EAY	18.8	1.3	μrad
EBY	13.5	0.4	μrad
ECY	36.7	2.4	μrad
EAZ	21.4	4.2	μrad
EBZ	44.4	9	μrad
ECZ	26.0	2.5	μrad
C0Y	45.2	1.4	μrad
B0Z	-97.7	2.1	μrad
A0Z	34.0	1.1	μrad

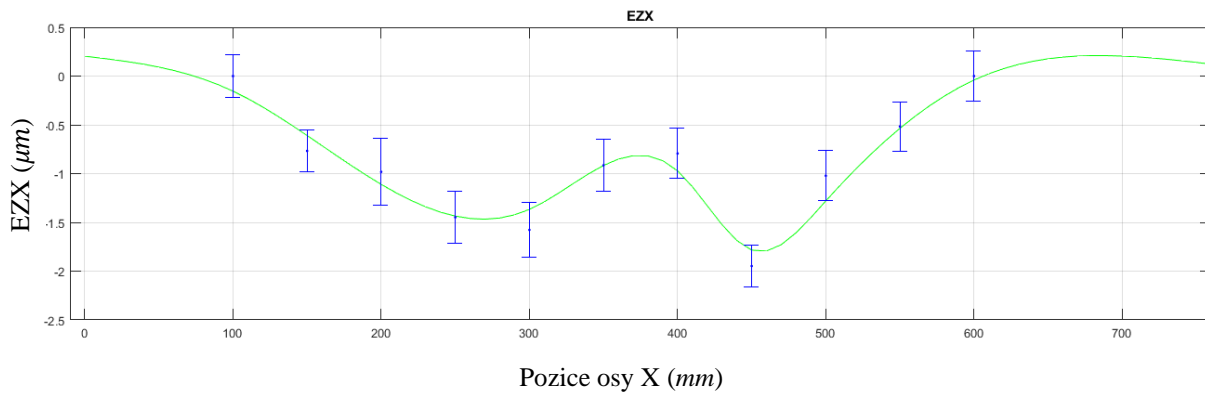
Obr.: 4.17 Výsledky z měření (LaserTRACER)

Grafické vyhodnocení volumetrické chyby v měřené oblasti stroje je na Obr.: 4.18.



Obr.: 4.18 Volumetrická chyba (LaserTRACER)

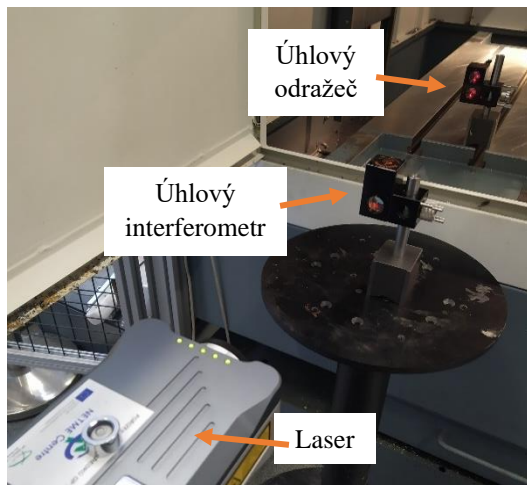
Námi hledána chyba EZX, je vyhodnocena na Obr.: 4.19. Maximální hodnota odchylky je $2 \mu\text{m}$.



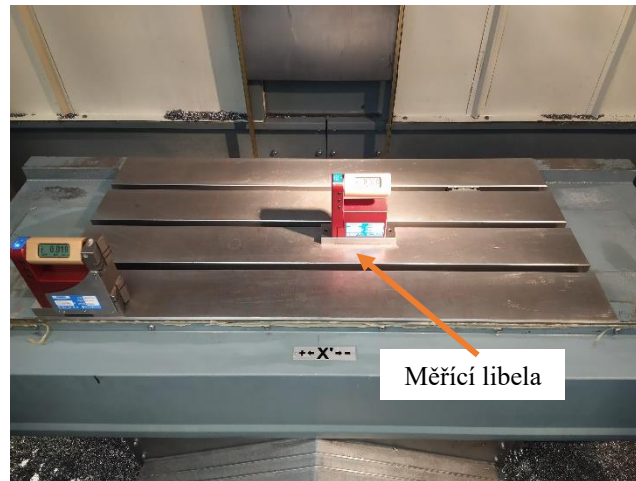
Obr.: 4.19 Vyhodnocení chyby EZX (LaserTRACER)

5 STATISTICKÉ ZHODNOCENÍ

Pro statistické zhodnocení a porovnání výsledků se použily výsledky z měření přímosti EZX. Celkem se provedlo pět jednosměrných měření s interferometrem XL-80 s optikou pro měření úhlu a typem ustavení D (Obr.: 5.2) a inklinometrem WYLER Bluesystem v absolutním nastavení bez použití referenční libely (Obr.: 5.1). Krok byl použit 125 mm , přičemž nastavení osy Y je v obou případech na středu rozsahu 313 mm .



Obr.: 5.2 Nastavení interferometru XL-80



Obr.: 5.1 Nastavení libel WYLER Bluesystem

U jednostranných zkoušek přímosti se vyhodnocuje:

Přesnost A

Rozdíl mezi maximem a minimem systematických odchylek s odhadem standartní nejistoty za použití koeficientu rozšíření 3.

$$A = (\bar{x} + 3\sigma) \max - (\bar{x} - 3\sigma) \min \quad [\mu\text{m}] \quad (5.1)$$

Kde \bar{x} je průměrná jednostranná úchylka v poloze, která se vypočítá:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad [\mu\text{m}] \quad (5.2)$$

Směrodatná odchylka σ se spočítá:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad [\mu\text{m}] \quad (5.3)$$

Přičemž n je počet měřených bodů a x_i jsou naměřené hodnoty.

Jednostranná opakovatelnost B_{rep}

Maximální hodnota z rozdílu maximálních a minimálních systematických odchylek s odhadem standartní nejistoty za použití koeficientu rozšíření 3.

$$U_{rep} = [(\bar{x} + 3\sigma)_i - (\bar{x} - 3\sigma)_i] \max \quad [\mu\text{m}] \quad (5.4)$$

Úchylka přímosti Se

Vznikne součtem maximálních a minimálních systematických úchylek přímosti

$$Se = |\bar{x}_{max}| + |\bar{x}_{min}| \quad [\mu m] \quad (5.5)$$

Výsledky jsou vyhodnoceny metodou koncových bodů. Pro statistické vyhodnocení byl použit program Excel. První se vyhodnotila data z měření s digitální libelou Wyler Bluesystem. Naměřená data a výsledky jsou zaznamenány v následujících třech tabulkách.

Tab.: 5.1 Výsledky měření v μm (Wyler Bluesystem)

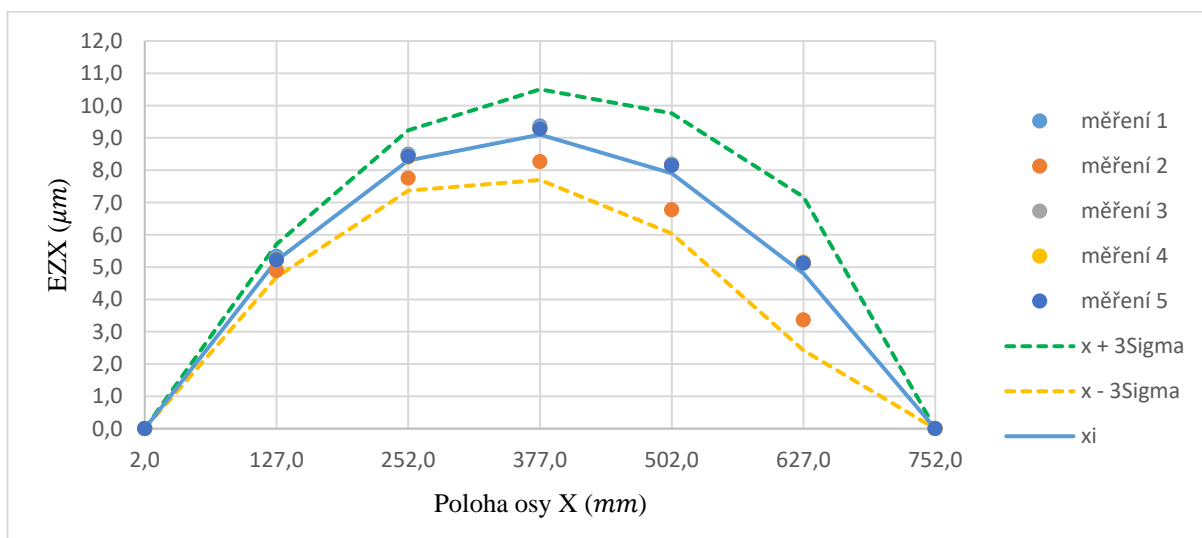
Cíle (mm)	měření 1	měření 2	měření 3	měření 4	měření 5
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
127	5,3	4,9	5,3	5,2	5,2
252	8,5	7,8	8,5	8,4	8,4
377	9,4	8,3	9,3	9,3	9,3
502	8,2	6,8	8,2	8,2	8,1
627	5,1	3,4	5,1	5,2	5,1
752	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tab.: 5.2 Průběžné výsledky v μm (Wyler Bluesystem)

		bod 1	bod 2	bod 3	bod 4	bod 5	bod 6	bod 7
Průměrná jednostranná úchylka	\bar{x} :	0,00	5,20	8,30	9,10	7,90	4,80	0,00
Odhad jednostranné nejistoty	σ	0,00	0,17	0,31	0,47	0,62	0,79	0,00
	3σ	0,00	0,51	0,93	1,40	1,86	2,37	0,00
Hranice odchylek	$\bar{x} + 3\sigma$	0,00	5,71	9,23	10,50	9,76	7,17	0,00
	$\bar{x} - 3\sigma$	0,00	4,69	7,37	7,70	6,04	2,43	0,00

Tab.: 5.3 Výsledky (Wyler Bluesystem)

Jednostranná opakovatelnost	Urep	4,75	μm
Přesnost	A	10,50	μm
Úchylka přímosti	Se	9,10	μm



Obr.: 5.3 Graf výsledků (Wyler Bluesystem)

Data a výsledky z měření s přístrojem Laser interferometr XL-80 (ustavení typu D) jsou uvedeny ve třech následujících tabulkách:

Tab.: 5.4 Výsledky měření v μm (XL-80)

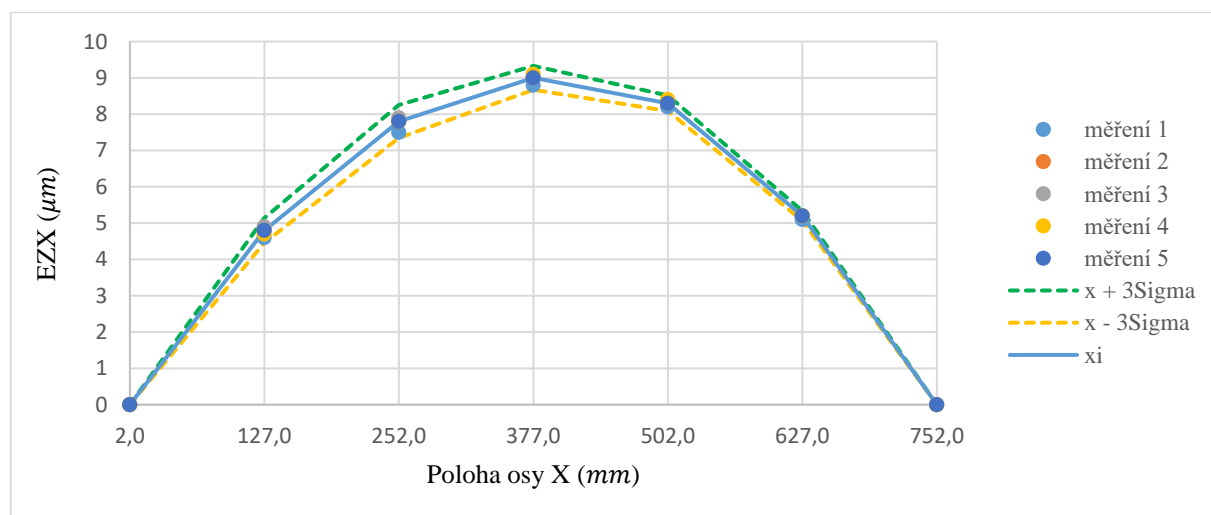
Cíle (mm)	měření 1	měření 2	měření 3	měření 4	měření 5
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
127	5,3	4,9	5,3	5,2	5,2
252	8,5	7,8	8,5	8,4	8,4
377	9,4	8,3	9,3	9,3	9,3
502	8,2	6,8	8,2	8,2	8,1
627	5,1	3,4	5,1	5,2	5,1
752	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tab.: 5.5 Průběžné výsledky v μm (XL-80)

		bod 1	bod 2	bod 3	bod 4	bod 5	bod 6	bod 7
Průměrná jednostranná úchylka	\bar{x} :	0,00	4,80	7,80	9,00	8,30	5,20	0,00
Odhad jednostranné nejistoty	σ	0,00	0,11	0,15	0,11	0,07	0,04	0,00
	3σ	0,00	0,34	0,45	0,33	0,21	0,13	0,00
Hranice odchylek	$\bar{x} + 3\sigma$	0,00	5,14	8,25	9,33	8,51	5,33	0,00
	$\bar{x} - 3\sigma$	0,00	4,46	7,35	8,67	8,09	5,07	0,00

Tab.: 5.6 Výsledky v μm (XL-80)

Jednostranná opakovatelnost	Urep	0,91	μm
Přesnost	A	9,23	μm
Úchylka přímosti	Se	9,00	μm

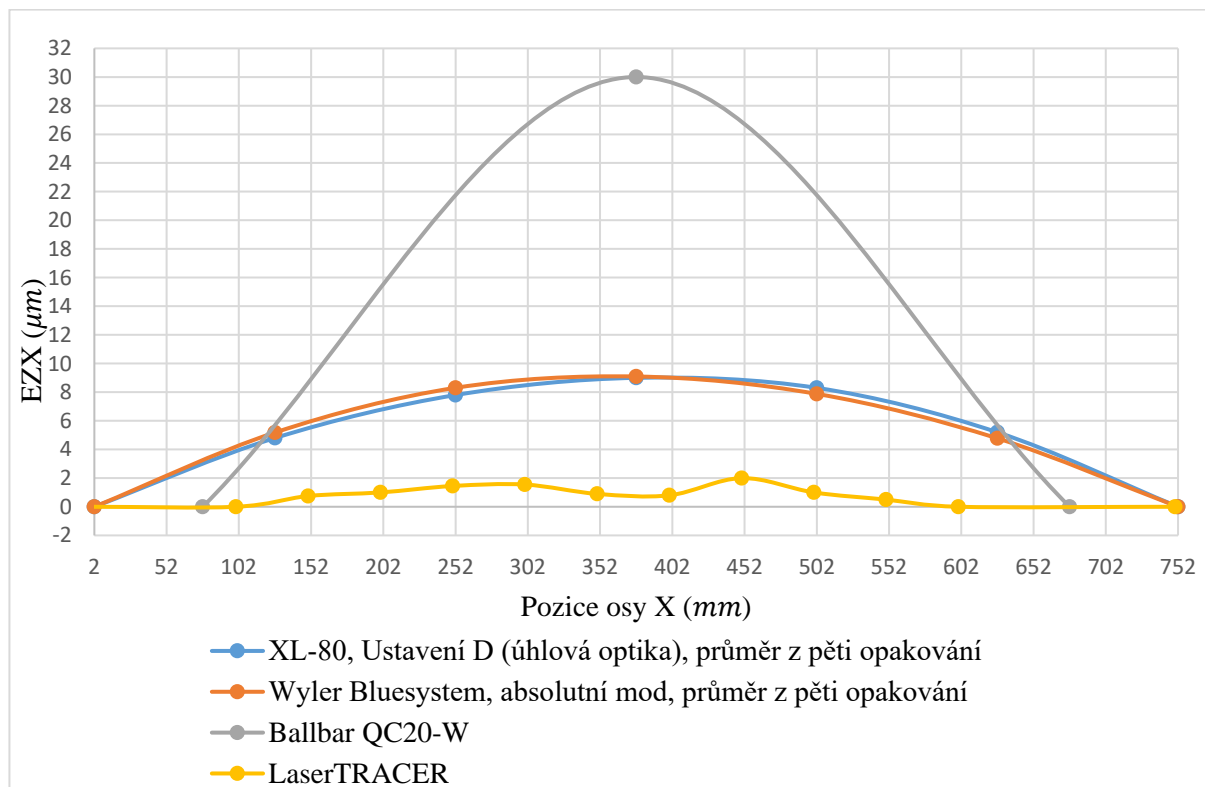


Obr.: 5.4 Graf výsledků (XL-80)

Velký rozdíl měřidel je zejména v hodnotě jednostranné opakovatelnosti Urep, která je u digitální libely 4,75 μm , u interferometru je hodnota pouhých 0,91 μm . Velikost této hodnoty u digitální libely je způsobena hlavně rozdílem hodnot u druhého měření, které se liší od ostatních měření o cca 1 μm uprostřed měřené osy X (377 mm). To může být způsobeno nečistotami ve vedení nebo mírným posuvem libely. Hodnota přesnosti A je srovnatelná (10,25 μm a 9,23 μm). To stejné platí pro úchylku přímosti Se (9,10 μm a 9 μm).

6 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Na následujícím grafu je srovnání jednotlivých měřicích přístrojů. Nejvyšší hodnotu chyby přímosti EZX dosahuje měření s přístrojem Ballbar QC20-W. Naopak nejmenší hodnota je naměřena s přístrojem LaserTRACER.



Obr.: 6.1 Porovnání výsledků z jednotlivých měření

Jedním z možných vysvětlení, proč je chyba přímosti s přístrojem Ballbar tak rozdílná od ostatních měřidel, je fakt, že zkouška se vztahovala k vřetení (posuvu osy Z). Zkouška probíhala pouze v rozsahu 220° a pro tento rozsah software nenabízí tuto chybu. Chybu bylo potřeba vytáhnout ze zdrojového kódu testu. Je velmi pravděpodobné, že pro tento typ zkoušky je výsledek přímosti nespolehlivý. S Ballbarem jsme navíc schopni měřit pouze rozsah 600 mm ($77\text{ až }677\text{ mm}$). Lze tedy usoudit, že ze všech použitých přístrojů, je Ballbar nejméně vhodný pro měření přímosti při daných podmínkách zkoušky.

Nejmenší chyba je naměřena přístrojem LaserTRACER. U tohoto měření je odrazeč upnut ve vřetení, a proto je výsledek vztažen k vřetení, stejně jako u Ballbaru. Výsledek je nejvíce podobný Laser interferometru XL-80 s ustavením A (velikost chyby je zde $3,9\text{ }\mu\text{m}$), kde se měří chyba v místě řezu, ne však chyba padání stolu v krajní poloze (vysvětleno v kapitole 3.1). Další faktor ovlivňující velikosti chyby je velikost intervalu, která je pouze 500 mm ($102\text{ až }602\text{ mm}$), namísto 750 mm , jako je tomu u měření s XL-80 a Wyler Bluesystem. Určité teplotní rozdíly u jednotlivých měření nebo ustavení LaserTRACERU na kovový přípravek mají rovněž vliv na výsledek měření. Ještě je potřeba zmínit že všechna ostatní měření přímosti byla měřena v určité poloze osy Y (konkrétně na středu osy), u LaserTRACERU toto neplatí, chyba je vyhodnocena pro měřený rozsah hodnot Y.

U Laser interferometru byl pro porovnání vybrán výsledek z ustavení D (kapitola 3.1), kde je použita úhlová optika. Aby bylo možné výsledky dále statisticky porovnat s digitální

libelou, byl použit krok 125 mm . Pro toto ustavení je velikost chyby téměř totožná s výsledkem s digitální libelou. Pro daný typ měření lze oba způsoby považovat za srovnatelné a lze očekávat podobné výsledky. Závěrem tedy je, že přístroje Laser interferometr XL-80 a digitální libely Wyler Bluesystem jsou vhodnější pro měření přímosti. Z hlediska časového jsou oboje měření srovnatelné. U laser interferometru nejdéle zabere ustavování optiky, avšak samotné měření je poměrně rychlé. U digitálních libel není nutné ustavování, ale každý bod je potřeba ručně potvrdit, proto je samotný proces měření o něco delší. Použití laser interferometru je velmi výhodné zejména z toho důvodu, že jsme schopni podle požadavků měřit přesnost mezi vřetenem a obrobkem (ustavení A, popsáno v kapitole 3.1), nebo jako kontrolu pohybu určitého bodu na stroji (ustavení B, popsáno v kapitole 3.1).

Ze statistického vyhodnocení se jeví, že laser interferometr má lepší opakovatelnost oproti digitálním libelám Wyler Bluesystem. Ostatní parametry (přesnost, úchylka přímosti) se jeví velmi srovnatelné. Více o vyhodnocení je popsáno v kapitole 5.

7 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout způsob měření přímosti osy X na třiosém obráběcím centru MCV 754 QUICK od firmy KOVOSVIT MAS. Podle návrhu se provedla řada měření, která se vzájemně srovnala a statisticky vyhodnotila. Pro měření byly použity digitální inklinometry BlueSYSTEM od firmy WYLER AG a laserový interferometr XL-80 od firmy RENISHAW. Pro další porovnání se ještě použily přístroje Ballbar QC20-W od firmy RENISHAW a samonaváděcí laserový interferometr LaserTRACER od firmy ETALON AG. Tyto přístroje ale pro měření potřebují posuv osy Z (vřetene), proto nejsou pro měření přímosti osy X tak vhodné jako digitální libely nebo laser interferometry.

V úvodní části práce je věnována pozornost problematice přesnosti obráběcích strojů a popisem dostupných přístrojů pro měření geometrické přesnosti. V závěru teoretické části je vysvětlení pojmu přímost, technické specifikace stroje MCV 754 QUICK a možnosti, jak kompenzovat řídicí systém Siemens 840D sl, který je na měřeném stroji.

Další část tvoří samotný návrh měření na stroji. Je zde popsán postup ustavení a zapojení jednotlivých měřidel včetně softwarového nastavení. Po této části je popsán experiment, který byl proveden podle postupů, s výsledky jednotlivých měření. Pro statistické vyhodnocení se použila data z měření na laser interferometru XL-80 a digitálních libelách. Aby bylo možné výsledky statisticky vyhodnotit, měření se opakovalo pětkrát. Po vyhodnocení úchylnosti přímosti s digitálními libelami vyšla $9,10 \mu\text{m}$ a pro laserový interferometr XL-80 vyšla $9 \mu\text{m}$. Podrobnější popis výsledků je v závěru kapitoly 5.

Srovnání výsledků ze všech přístrojů včetně Ballbaru a LaserTRACERU je v kapitole 6 a graficky na obrázku 6.1. Výsledky jsou vyhodnoceny metodou koncových bodů. Celkový rozsah osy X na stroji je 754 mm . U digitálních libel a laserového interferometru se měření přímosti osy X provedlo v rozsahu 750 mm , aby se nezajíždělo do krajních poloh. S přístrojem Ballbar se měření provedlo pouze s rozsahem 600 mm a u přístroje LaserTRACER se použil rozsah 500 mm . Měření o rozsahu 750 mm u těchto přístrojů nebylo možné provést. Z výsledků se došlo k závěru, že pokud chceme měřit přímost osy X s vysokou přesností, je lepší použít digitální libely nebo laser interferometr XL-80, jelikož výsledky nejsou vztaženy k vřetení.

Dalším předmětem zkoumání byl ohyb stolu. Na stroji je posuv osy X řešen pomocí křížového stolu, u kterého dochází k ohybu vlivem vlastní tíhy stolu (případně ještě vlivem tíhy obrobku). Podrobněji popsáno v kapitole 3. Tento jev byl zkoumán pomocí různého ustavení optik laserového interferometru XL-80. Podle teoretického předpokladu (popsáno v kapitole 3.1) se u jednoho typu ustavení ohyb projevil a u druhého se neprojevil. Po odečtení jednotlivých výsledků z měření se zjistilo, že ohyb stolu má v měřeném rozsahu velikost $10,2 \mu\text{m}$.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Geometric Accuracy, Volumetric Accuracy and Compensation of CNC Machine Tools*. 2020, , 19. Dostupné z:
[doi:https://www.researchgate.net/publication/340947369_Geometric_Accuracy_Volumetric_Accuracy_and_Compensation_of_CNC_Machine_Tools](https://www.researchgate.net/publication/340947369_Geometric_Accuracy_Volumetric_Accuracy_and_Compensation_of_CNC_Machine_Tools)
- [2] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. IV. Praha: MM publishing, 2018. MM speciál. ISBN 978-80-906310-8-3.
- [3] HOLUB, Michal, Josef KNOBLOCH a Jiří PERNIKÁŘ. *GTS - Testování obráběcích strojů [Podklady k výuce]*. VUT, Brno, 2015.
- [4] Renishaw QC20-W ballbar. In: *Renishaw* [online]. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z:
<http://resources.renishaw.com/gen/download/mereni-s-qc20-w--24466>
- [5] LEE, Kwang-II a Seung-Han YANG. Accuracy evaluation of machine tools by modeling spherical deviation based on double ball-bar measurements. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2013, **75**, 46-54 [cit. 2021-01-27].
- [6] Řešení pro náročné obrábění. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha, 2018, , s. 52 [cit. 2021-01-27]. ISSN 1212-2572. Dostupné z:
<https://www.mmspektrum.com/clanek/reseni-pro-narocne-obrabeni.html>
- [7] *Thermo-energetic design of machine tools: a systemic approach to solve the conflict between power efficiency, accuracy and productivity demonstrated at the example of machining production*. Editor Knut GROSSMANN. Cham: Springer International Publishing, 2015. Lecture notes in production engineering (Springer). ISBN 978-3-319-12624-1.
- [8] *Machining Accuracy of Machine Tools* [online]. , 6 [cit. 2021-01-27]. Dostupné z:
https://www.heidenhain.com/fileadmin/pdb/media/img/635399-22_Machining_Accuracy_of_Mach_Tools.pdf?fbclid=IwAR1Avn8QByDLExFdHs9a04ZHePGsOadU0NIyk6T_Zn_JK_iDv319wCQPhIE
- [9] Springer static. In: *Springer Nature* [online]. [cit. 2021-01-27]. Dostupné z:
https://media.springernature.com/original/springer-static/image/chp%3A10.1007%2F978-3-030-03822-9_3/MediaObjects/418571_1_En_3_Fig17_HTML.png
- [10] Interferometry. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2021-01-27]. Dostupné z:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Interferometry>
- [11] *XL-80 laser system* [online]. [cit. 2021-01-27]. Dostupné z:
<https://www.renishaw.com/en/xl-80-laser-system--8268>
- [12] *XC-80*. In: *Renishaw* [online]. [cit. 2021-01-27]. Dostupné z:
<https://www.renishaw.com/media/img/gen/46cfd5c8d99458eb953f7c087fba0b7.jpg>

- [13] *Laserový systém XL-80* [online]. , 14 [cit. 2021-01-27]. Dostupné z: [https://resources.renishaw.com/details/XL-80+laser+system+brochure\(28281\)](https://resources.renishaw.com/details/XL-80+laser+system+brochure(28281))
- [14] Víceosý kalibrátor XM-60. In: *Renishaw* [online]. 2019, s. 25 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://resources.renishaw.com/cs/details/brozura-viceosy-kalibrator-xm-60--112439>
- [15] XM-60 and XM-600 multi-axis calibrator. In: *Renishaw* [online]. 2019 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://resources.renishaw.com/en/details/flyer-xm-60-and-xm-600-multi-axis-calibrator--112314>
- [16] XK10 Vyrovnávací laserový systém. In: *Renishaw* [online]. 2019 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/xk10-vyrovnavaci-laserovy-system--44377>
- [17] XK10 – vyrovnávací laserový systém. In: *Renishaw* [online]. 2019 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://resources.renishaw.com/download.aspx?lang=cs&data=118934&btn=1>
- [18] Explaining XK10 parallelism. In: *Renishaw* [online]. 2019 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://resources.renishaw.com/download.aspx?lang=en&data=117477&btn=1>
- [19] XD Laser Interferometer. *TOPMES měřící přístroje* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <http://www.topmes.cz/cs/technologie/trackery/laserova-metrologie/108-xd-laser-interferometer>
- [20] XD LASER. In: *Apimetrology* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://apimetrology.com/xd-laser/>
- [21] Interferometer for automotive applications XD-Laser. In: *Directindustry* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: https://img.directindustry.com/images_di/photo-g/15655-15247507.webp
- [22] SP 15000 C5 Brožura. In: *Optixs* [online]. 2018, s. 6 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.optixs.cz/data/ke-stazeni/sp-15000-c5-brozura-d854.pdf>
- [23] SP 5000 DI Product information. In: *Optixs* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.optixs.cz/data/ke-stazeni/sp-di-brozura-d853.pdf>
- [24] SP 5000 DI/F. In: *Optixs* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.optixs.cz/obrazky/web/2100princip-mereni-pomoci-diferencialniho-interferometru-sp-di-2.jpg>
- [25] Ballbar QC20-W. In: *Renishaw* [online]. [cit. 2021-01-27]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/media/img/gen/dd8074a1b0db42e19956a2a48194299c.jpg>
- [26] *The In's and Out's of Ballbar Calibration* [online]. In: . [cit. 2021-01-27]. Dostupné z: <https://www.moldmakingtechnology.com/articles/the-in's-and-out's-of-ballbar-calibration>
- [27] *Ballbar QC20-W* [online]. In: . [cit. 2021-01-27]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/ballbar-qc20-w--11075>

- [28] Renishaw QC20-W ballbar, nový bezdrátový systém s funkcí volumetrického testování. In: *Renishaw* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/media/img/gen/302bbc2973db43f0bac1b323d9fd89b7.jpg>
- [29] Ballbar 20. In: *Renishaw* [online]. [cit. 2021-01-27]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/software-ballbar-20-pro-systemy-qc20-w-a-qc10--11076>
- [30] *Kontrola, kalibrace a kompenzace souřadnicových měřicích strojů zařízením LaserTracer od společnosti Etalon* [online]. In: . [cit. 2021-01-27]. Dostupné z: <https://www.merici-pristroje.cz/clanky/detail/kontrola-kalibrace-a-kompenzace-souradnicovych-mericich-stroju-zarizenim-lasertracer-od-spolecnosti-etalon.htm>
- [31] In: *Hexafonmi* [online]. [cit. 2021-01-27]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/fi-FI/products/machine-calibration-and-optimisation/etalon-lasertracer-ng>
- [32] GąSKA, Adam, Maciej GRUZA, Piotr GąSKA, Michał KARPIUK a Jerzy SŁADEK. IDENTIFICATION AND CORRECTION OF COORDINATE MEASURING MACHINE GEOMETRICAL ERRORS USING LASERTRACER SYSTEMS. *Advances in Science and Technology – Research Journal* [online]. 2013, 7(20), 22-27 [cit. 2021-01-27]. ISSN 2080-4075. Dostupné z: doi:10.5604/20804075.1073047
- [33] *Distributed large-scale dimensional metrology*. [online]. 2011 [cit. 2021-01-27]. ISBN 978-0-85729-542-2. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/265505143_Distributed_large-scale_dimensional_metrology_New_insights
- [34] *Leica AT960* [online]. In: . [cit. 2021-01-27]. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/www/hanekpav/K154/PDF/YSPG/Merici%20zarizeni%20pro%20strojirenstvi/Leica%20AT960.pdf>
- [35] Tech Sheet FARO Laser Tracker Vantage. In: *FARO* [online]. [cit. 2021-01-27]. Dostupné z: <https://pdf.directindustry.com/pdf/faro-europe/tech-sheet-faro-laser-tracker-vantage/21421-258835.html>
- [36] *2018-API-Radian-3D-Laser-Tracker-Systems-Brochure* [online]. In: . s. 5 [cit. 2021-01-27]. Dostupné z: <https://apimetrology.com/wp-content/uploads/2018/09/2018-API-Radian-3D-Laser-Tracker-Systems-Brochure.pdf>
- [37] BlueLEVEL - the ORIGINAL. In: *WylarAG* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.wylarag.com/en/products/measuring-instruments/bluesystem-modular/bluelevel-the-original/>
- [38] Manual BlueSYSTEM SIGMA BlueLEVEL – BlueMETER SIGMA - BlueTC. In: *WylarAG* [online]. s. 115 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: https://www.wylarag.com/fileadmin/pdf/manuel/BlueSYSTEM%20SIGMA_eng05.pdf
- [39] Kapazitives Messsystem. In: *WylarAG* [online]. Switzerland [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.wylarag.com/fileadmin/pdf/catalogue2019/Kapazitives%20Messsystem.pdf>

- [40] Software WylerSPEC. In: *Qualites* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://qualites.net/wp-content/uploads/2019/11/wylerspec-maquina.png>
- [41] INCLINEO® – Technical Data. In: *Pruftechnik* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: https://www.pruftechnik.com/fileadmin/Products-Services/Products/Alignment-Systems/Geometric/INCLINEO/Downloads/INCLINEO_Technical-Data.pdf
- [42] Digital inclinometer TESA CLINOBEVEL 3. In: *Tesatechnology* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: https://tesatechnology.com/en-gb/products/mesure-de-la-rectitude,-des-angles-et-de-l'inclinaison/clinometres-et-niveaux/digital-inclinometer-tesa-clinobevel-3_p47017.htm#/collapseSpecifications
- [43] ČSN ISO 230-1. *Zásady zkoušek obráběcích strojů: Geometrické přesnosti strojů pracujících bez zatížení nebo za dokončovacích podmínek obrábění*. Praha: Český normalizační institut, 2014.
- [44] MCV 754 QUICK. In: *Kovosvit* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.kovosvit.cz/mcv-754-quick-p3.html#technicaldata>
- [45] Siemens 840D Solution Line Operate. In: *Seiger* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: https://www.seiger.de/files/0524_p_nc01_xx_01400v.png
- [46] SINUMERIK 840D sl & SINAMICS – komplexní CNC řešení. *Technicky tydenik* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/sinumerik-840d-sl-sinamics-komplexni-cnc-reseni_21942.html
- [47] White paper: Interferometric straightness measurement and application to moving table machines. In: *Renishaw* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://resources.renishaw.com/download.aspx?lang=en&data=48145&btn=1>
- [48] White paper: Interferometric angle measurement and the hardware options available from Renishaw. In: *Renishaw* [online]. s. 18 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://resources.renishaw.com/download.aspx?lang=en&data=81981&btn=1>
- [49] XL laser system user guide. In: *Renishaw* [online]. s. 130 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://resources.renishaw.com/download.aspx?lang=en&data=114809&btn=1>
- [50] Interferometer. In: *Wikipedie* [online]. [cit. 2021-01-27]. Dostupné z: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e7/Interferometer.svg>
- [51] ATS600_02. In: *TOMAS TOKYO BOEKI GROUP* [online]. [cit. 2021-01-27]. Dostupné z: https://www.tbts.co.jp/Portals/0/images/product/ATS600_02.jpg
- [52] AT960_01. In: *TOMAS TOKYO BOEKI GROUP* [online]. [cit. 2021-01-27]. Dostupné z: https://www.tbts.co.jp/Portals/0/images/product/AT960_01.jpg
- [53] MEASURING BASES, OUTER DIMENSIONS. In: *WylerAG* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: https://www.wylerag.com/fileadmin/pdf/catalogue/measuring_bases.pdf
- [54] BacklashCompensation_Pic1. In: *Cache industry siemens* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z:

https://cache.industry.siemens.com/dl/files/673/109766673/img_260103/v1/109766673_S7-1500_BacklashCompensation_Pic1_en.png

BacklashCompensation_Pic2. In: *Cache industry siemens* [online]. [cit. 2021-05-20].

[55] Dostupné z:

https://cache.industry.siemens.com/dl/files/673/109766673/img_260105/v1/109766673_S7-1500_BacklashCompensation_Pic2_en.png

9 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

9.1 Seznam tabulek

Tab.: 2.1 Zkoušky obráběcích strojů dle ČSN ISO 230 [2].....	17
Tab.: 2.2 Popis chyb tříosé kinematiky [3]	19
Tab.: 2.3 Základní parametry Renishaw XL-80 [11].....	23
Tab.: 2.4 Parametry Renishaw XM-60 [15].....	25
Tab.: 2.5 Přesnosti pro určité aplikace přístroje XK10 [17]	27
Tab.: 2.6 Vliv prostředí na nejistotu měření [22].....	29
Tab.: 2.7 Základní parametry Ballbar QC20-W [27].....	30
Tab.: 2.8 Základní parametry ETALON LaserTRACER-NG [31].....	32
Tab.: 2.9 Srovnání parametrů dostupných laser trackerů [34] [35] [36].....	34
Tab.: 2.10 Srovnání parametrů často používaných inklinometrů. [37] [41] [42]	38
Tab.: 2.11 Technická data MCV 750 QUICK [44].....	41
Tab.: 3.1 Pozice LaserTRACERU	63
Tab.: 4.1 Relativní nastavení.....	70
Tab.: 4.2 Absolutní nastavení.....	70
Tab.: 4.3 Výsledky měření z různých nastavení libel v μm	71
Tab.: 5.1 Výsledky měření v μm (Wyler Bluesystem)	78
Tab.: 5.2 Průběžné výsledky v μm (Wyler Bluesystem)	78
Tab.: 5.3 Výsledky (Wyler Bluesystem).....	78
Tab.: 5.4 Výsledky měření v μm (XL-80)	79
Tab.: 5.5 Průběžné výsledky v μm (XL-80)	79
Tab.: 5.6 Výsledky v μm (XL-80)	79

9.2 Seznam obrázků

Obr.: 2.1 Vlivy na přesnost výroby obrobků [1].....	17
Obr.: 2.2 Rozdělení přesnosti obráběcích strojů [2]	18
Obr.: 2.3 Schéma odchylek u tříosé kinematiky stroje [3].....	19
Obr.: 2.4 Testování stroje pomocí kruhové interpolace [4]	20
Obr.: 2.5 Tepelně symetrická konstrukce [6].....	20
Obr.: 2.6 Volumetrická mapa chyb před a po kompenzaci [9]	21
Obr.: 2.7 Princip Michelsova interferometru [41]	22
Obr.: 2.8 Princip měření rovinnosti interferometrem [11].....	22
Obr.: 2.9 Systém zapojení [13]	23
Obr.: 2.10 Kompenzátor XC-80 [12]	23
Obr.: 2.11 Optika interferometru pro měření [13]	24
Obr.: 2.12 Software CARTO [14].....	25
Obr.: 2.13 Kalibrační zařízení XM-60 [14]	25
Obr.: 2.14 Laserový systém XK10 [17]	26
Obr.: 2.15 Horizontální měření rovnoběžností vedení [18]	26
Obr.: 2.16 Vertikální měření rovnoběžností vedení [18]	27
Obr.: 2.17 Měření rovinnosti vedení [18]	27

Obr.: 2.18 API Laser XD-6D [21]	28
Obr.: 2.19 Kalibrační interferometr SP 15000 C5 [22]	28
Obr.: 2.20 SIOS SP 5000 DI [24]	29
Obr.: 2.21 Ballbar QC20-W [27]	30
Obr.: 2.22 Naprogramované dráhy při testování s Ballbarem [28]	31
Obr.: 2.23 Software Ballbar 20 [29]	31
Obr.: 2.24 ETALON LaserTRACER-NG [31]	32
Obr.: 2.25 Princip IFM (elevační úhel ϕ , azimut θ , vzdálenost ρ) [33]	33
Obr.: 2.26 Leica AT960 [42] [43]	34
Obr.: 2.27 WYLER AG BlueSYSTEM [37]	35
Obr.: 2.28 Digitální inklinometry BlueMETER SIGMA [44]	35
Obr.: 2.29 Kyvadlo [38]	36
Obr.: 2.30 Diferenciální kondenzátor [39]	36
Obr.: 2.31 Analogový princip měření [38]	36
Obr.: 2.32 Princip činnosti inklinometrů BlueLEVEL [39]	36
Obr.: 2.33 Měření rovinnosti se softwarem MT-Soft [40]	37
Obr.: 2.34 PRUFTECHNIK INCLINEO [46]	38
Obr.: 2.35 TESA CLINOBEVEL 3 [41]	38
Obr.: 2.36 Příklad chyby přímosti ve směru Z pro pohyb v osy X	39
Obr.: 2.37 Příklad střední minimální zóny referenční přímky [43]	39
Obr.: 2.38 Příklad referenční přímky metodou nejmenších čtverců [43]	40
Obr.: 2.39 Příklad referenční přímky metodou nejmenších čtverců [43]	40
Obr.: 2.40 MCV 750 QUICK [44]	41
Obr.: 2.41 Siemens 840D sl [45]	42
Obr.: 2.42 Pozitivní Backlash [51]	42
Obr.: 2.43 Negativní Backlash [52]	42
Obr.: 2.44 Kompenzace průhybu	43
Obr.: 2.45 Kompenzace s více kompenzačními tabulkami	43
Obr.: 3.1 Stůl stroje MCV 754 QUICK	45
Obr.: 3.2 Obrobek po frézování	45
Obr.: 3.3 Obrobek při frézování	46
Obr.: 3.4 Natavení reflektoru a interferometru pro měření přímostí [47]	47
Obr.: 3.5 Princip měření přímosti [47]	47
Obr.: 3.6 Úhlová chyba reflektoru [47]	48
Obr.: 3.7 Měření přímosti způsobem A	49
Obr.: 3.8 Měření přímosti způsobem B	49
Obr.: 3.9 Schéma úhlové optiky, kde se pohybuje reflektor [48]	50
Obr.: 3.10 Schéma úhlové optiky, kde se pohybuje interferometr [48]	50
Obr.: 3.11 Měření přímosti úhlovou optikou, ustavení C	51
Obr.: 3.12 Měření přímosti úhlovou optikou, ustavení D	51
Obr.: 3.13 Měření přímosti úhlovou optikou, ustavení E	52
Obr.: 3.14 Vyrovnávání laserové hlavy	52
Obr.: 3.15 Ustavení reflektoru pro měření přímostí [55]	53
Obr.: 3.16 Ustavení interferometru pro měření přímostí [55]	54
Obr.: 3.17 Ustavení odražeče pro měření přímostí [49]	54
Obr.: 3.18 Natočení laserové závěrky pro měření [55]	55
Obr.: 3.19 Schéma pro eliminaci chyby sklonu	55

Obr.: 3.20 Ustavení laseru vůči optice [49]	56
Obr.: 3.21 Ustavení stacionární optiky [55].....	56
Obr.: 3.22 Domovská stránka CARTO – Capture	57
Obr.: 3.23 Nastavení typu chyby.....	57
Obr.: 3.24 Nastavení cílů	58
Obr.: 3.25 Nastavení NC programu	58
Obr.: 3.26 kufřík Wyler Bluesystem	59
Obr.: 3.27 Displej digitální libely	60
Obr.: 3.28 Spuštění programu wylerSOFT	60
Obr.: 3.29 Připojení libel s počítačem (wylerSOFT).....	61
Obr.: 3.30 Nastavení testu pro měření přímosti (wylerSOFT).....	61
Obr.: 3.31 Průběh měření přímosti (wylerSOFT)	62
Obr.: 3.32 Připojení řídicí jednotky	62
Obr.: 3.33 Měřený prostor.....	63
Obr.: 3.34 Hodnoty nejistot.....	63
Obr.: 3.35 Kufřík s Ballbarem QC20-W	64
Obr.: 3.36 Nastavení testu v programu Ballbar 20.....	65
Obr.: 3.37 Další nastavení testu v programu Ballbar 20	65
Obr.: 4.1 Průběh teplot na stroji	67
Obr.: 4.2 Ustavení optiky A na stroji MCV 754 QUICK	67
Obr.: 4.3 Ustavení optiky B na stroji MCV 754 QUICK.....	67
Obr.: 4.4 Ustavení optiky D na stroji MCV 754 QUICK	68
Obr.: 4.5 Ustavení optiky C na stroji MCV 754 QUICK.....	68
Obr.: 4.6 Ustavení optiky E na stroji MCV 754 QUICK.....	68
Obr.: 4.7 Vyhodnocení výsledků v programu CARTO Explore.....	69
Obr.: 4.8 Vyhodnocení měření přímosti (XL-80)	69
Obr.: 4.9 Rozložení libel na stole.....	70
Obr.: 4.10 Vyhodnocení měření metodou koncových bodů (1.1.a).....	70
Obr.: 4.11 Vyhodnocení různých nastavení libel.....	71
Obr.: 4.12 Nastavení sítě na stole při měření přímosti	72
Obr.: 4.13 Výsledky z prvního měření rovinnosti stolu.....	73
Obr.: 4.14 Výsledky z druhého měření rovinnosti stolu	73
Obr.: 4.15 Nastavení Ballbaru QC20-W na stroji	74
Obr.: 4.16 Výsledek měření (Ballbar QC20-W)	74
Obr.: 4.17 Výsledky z měření (LaserTRACER).....	75
Obr.: 4.18 Volumetrická chyba (LaserTRACER).....	75
Obr.: 4.19 Vyhodnocení chyby EZX (LaserTRACER).....	76
Obr.: 5.2 Nastavení libel WYLER Bluesystem	77
Obr.: 5.1 Nastavení interferometru XL-80.....	77
Obr.: 5.3 Graf výsledků (Wyler Bluesystem)	78
Obr.: 5.4 Graf výsledků (XL-80)	79
Obr.: 6.1 Porovnání výsledků z jednotlivých měření.....	80

10 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Měření s Renishaw XL-80, ustavení A	95
Příloha 2: Měření s Renishaw XL-80, ustavení B	96
Příloha 3: Měření s Renishaw XL-80, ustavení C	97
Příloha 4: Měření s Renishaw XL-80, ustavení D	98
Příloha 5: Měření s Renishaw XL-80, ustavení E	99
Příloha 6: Měření s Renishaw XL-80, ustavení D (krok 125 mm).....	100
Příloha 7: Měření s Renishaw XL-80, ustavení D (krok 125 mm)_2.....	100
Příloha 8: Měření s Renishaw XL-80, ustavení D (krok 250 mm).....	100
Příloha 9: Měření s Renishaw XL-80, ustavení B_2	101

PŘÍLOHY

Příloha 1: Měření s Renishaw XL-80, ustavení A

Měření proběhlo na Ústavu výrobních strojů, systému a robotiky na tříosém obráběcím centru MCV 754 QUICK. Podrobný postup měření je v kapitole 3.1. a informace o průběhu měření jsou v kapitole 4.1. Měření proběhlo dne 6.4.2021 v čase 14:26.

Tab.: 1 Výsledky s ustavením optiky A

Body	Osa X (mm)	Chod 1 Chyba (μm)	Chod 2 Chyba (μm)	Chod 3 Chyba (μm)	Chod 4 Chyba (μm)	Chod 5 Chyba (μm)
1	2	0	0	0	0	0
2	52	0,3	0,4	0,4	0,3	0,1
3	102	0,7	0,8	0,8	0,5	0,7
4	152	1,2	0,9	0,9	0,9	1
5	202	1,7	1,9	1,9	1,8	2
6	252	2,6	3	2,7	2,8	2,5
7	302	2,8	2,9	2,7	2,8	2,8
8	352	3,3	3,3	3,4	3,2	3,6
9	402	4	3,7	3,9	3,8	3,9
10	452	3,6	3,4	3,4	3	3,1
11	502	3,6	3,5	3,3	3,1	3,1
12	552	3,3	3,3	3,3	3,2	3,2
13	602	1,9	1,7	1,7	1,6	1,7
14	652	1,3	1,3	1,2	1,1	1
15	702	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
16	752	0	0	0	0	0

Příloha 2: Měření s Renishaw XL-80, ustavení B

Měření proběhlo na Ústavu výrobních strojů, systému a robotiky na tříosém obráběcím centru MCV 754 QUICK. Podrobný postup měření je v kapitole 3.1. a informace o průběhu měření jsou v kapitole 4.1. Měření proběhlo dne 6.4.2021 v čase 13:22.

Tab.: 2 Výsledky s ustavením optiky B

Body	Osa X (mm)	Chod 1 Chyba (μm)	Chod 2 Chyba (μm)	Chod 3 Chyba (μm)	Chod 4 Chyba (μm)	Chod 5 Chyba (μm)
1	2	0	0	0	0	0
2	52	3,9	3,7	3,8	3,9	3,8
3	102	6,6	6,6	6,6	6,8	6,9
4	152	8,6	8,6	8,6	8,7	8,7
5	202	9,5	9,4	9,5	9,6	9,7
6	252	10,1	10	10,2	10,2	10,5
7	302	10,9	11,1	11,1	11,1	11,1
8	352	11,8	11,5	11,8	11,7	12,2
9	402	12,5	12,2	12,5	12,1	12,4
10	452	13,2	13,1	13,2	13,1	13,5
11	502	12,3	12,9	12,7	12,6	12,9
12	552	10,8	10,8	10,8	10,6	10,9
13	602	7,8	8,3	8,3	7,7	8,1
14	652	4,2	4	4,6	4,3	5,1
15	702	2,6	2,4	3	2,3	3
16	752	0	0	0	0	0

Příloha 3: Měření s Renishaw XL-80, ustavení C

Měření proběhlo na Ústavu výrobních strojů, systému a robotiky na tříosém obráběcím centru MCV 754 QUICK. Podrobný postup měření je v kapitole 3.1. a informace o průběhu měření jsou v kapitole 4.1. Měření proběhlo dne 6.4.2021 v čase 15:05.

Tab.: 3 Výsledky s ustavením optiky C

Body	Osa X (mm)	Chod 1 Chyba (μm)	Chod 2 Chyba (μm)	Chod 3 Chyba (μm)	Chod 4 Chyba (μm)	Chod 5 Chyba (μm)
1	2	0	0	0	0	0
2	52	2,1	2,3	2	2,1	2,1
3	102	3,6	3,9	3,8	3,8	3,9
4	152	4,8	5,2	5,2	5,2	5,2
5	202	5,8	6,3	6,3	6,2	6,3
6	252	6,5	7,1	7	7	7
7	302	6,9	7,5	7,5	7,5	7,5
8	352	7,5	7,5	7,7	7,8	7,8
9	402	7,4	7,5	7,8	7,8	7,8
10	452	7,5	7,4	7,6	7,7	7,7
11	502	7,2	7,2	7,3	7,3	7,3
12	552	6,4	6,5	6,6	6,6	6,6
13	602	5,3	5,4	5,6	5,6	5,6
14	652	4,1	4	4,1	4,1	4
15	702	2,1	2,2	2,3	2,2	2,2
16	752	0	0	0	0	0

Příloha 4: Měření s Renishaw XL-80, ustavení D

Měření proběhlo na Ústavu výrobních strojů, systému a robotiky na tříosém obráběcím centru MCV 754 QUICK. Podrobný postup měření je v kapitole 3.1. a informace o průběhu měření jsou v kapitole 4.1. Měření proběhlo dne 6.4.2021 v čase 15:31.

Tab.: 4 Výsledky s ustavením optiky D

Body	Osa X (mm)	Chod 1 Chyba (μm)	Chod 2 Chyba (μm)	Chod 3 Chyba (μm)	Chod 4 Chyba (μm)	Chod 5 Chyba (μm)
1	2	0	0	0	0	0
2	52	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
3	102	2,9	2,8	2,9	2,9	2,9
4	152	4	4	4	4	4
5	202	5	5	5	4,9	5
6	252	5,7	5,6	5,7	5,6	5,7
7	302	6,1	6,1	6,2	6,1	6,1
8	352	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4
9	402	6,6	6,5	6,6	6,4	6,5
10	452	6,4	6,4	6,5	6,3	6,4
11	502	6,1	6,1	6,1	6	6,1
12	552	5,5	5,5	5,5	5,4	5,5
13	602	4,6	4,6	4,6	4,5	4,5
14	652	3,2	3,2	3,3	3,2	3,2
15	702	1,7	1,8	1,7	1,7	1,7
16	752	0	0	0	0	0

Příloha 5: Měření s Renishaw XL-80, ustavení E

Měření proběhlo na Ústavu výrobních strojů, systému a robotiky na tříosém obráběcím centru MCV 754 QUICK. Podrobný postup měření je v kapitole 3.1. a informace o průběhu měření jsou v kapitole 4.1. Měření proběhlo dne 7.4.2021 v čase 10:35.

Tab.: 5 Výsledky s ustavením optiky E

Body	Osa X (mm)	Chod 1 Chyba (μm)	Chod 2 Chyba (μm)	Chod 3 Chyba (μm)	Chod 4 Chyba (μm)	Chod 5 Chyba (μm)
1	2	0	0	0	0	0
2	52	1,6	1,6	1,6	1,6	1,7
3	102	3	3	3	3	3,1
4	152	4,2	4,2	4,1	4,1	4,3
5	202	5,1	5	5	5,1	5,2
6	252	5,7	5,6	5,6	5,7	5,8
7	302	6,1	6	6	6	6,1
8	352	6,2	6,1	6,1	6,2	6,3
9	402	6,1	6	6,1	6,1	6,2
10	452	5,8	5,7	5,8	5,8	5,9
11	502	5,4	5,3	5,3	5,4	5,4
12	552	4,7	4,7	4,7	4,7	4,8
13	602	3,8	3,8	3,8	3,8	3,9
14	652	2,6	2,6	2,6	2,6	2,7
15	702	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
16	752	0	0	0	0	0

Příloha 6: Měření s Renishaw XL-80, ustavení D (krok 125 mm)

Měření proběhlo na Ústavu výrobních strojů, systému a robotiky na tříosém obráběcím centru MCV 754 QUICK. Podrobný postup měření je v kapitole 3.1. a informace o průběhu měření jsou v kapitole 4.1. Měření proběhlo dne 7.4.2021 v čase 10:35. Jedná se o stejné ustavení optiky D, pouze jiný krok.

Tab.: 6 Výsledky s ustavením optiky D (krok 125 mm)

Body	Osa X (mm)	Chod 1 Chyba (μm)	Chod 2 Chyba (μm)	Chod 3 Chyba (μm)	Chod 4 Chyba (μm)	Chod 5 Chyba (μm)
1	2	0	0	0	0	0
2	127	4,6	4,8	4,9	4,7	4,9
3	252	7,5	7,8	7,9	7,8	7,9
4	377	8,8	9	9	9,1	9
5	502	8,2	8,3	8,3	8,4	8,3
6	627	5,1	5,2	5,2	5,2	5,2
7	752	0	0	0	0	0

Příloha 7: Měření s Renishaw XL-80, ustavení D (krok 125 mm)_2

Měření proběhlo na Ústavu výrobních strojů, systému a robotiky na tříosém obráběcím centru MCV 754 QUICK. Podrobný postup měření je v kapitole 3.1. a informace o průběhu měření jsou v kapitole 4.1. Měření proběhlo dne 7.4.2021 v čase 10:55. Jedná se o stejné ustavení optiky D, pouze jiný krok.

Tab.: 7 Výsledky s ustavením optiky D (krok 125 mm)_2

Body	Osa X (mm)	Chod 1 Chyba (μm)	Chod 2 Chyba (μm)	Chod 3 Chyba (μm)	Chod 4 Chyba (μm)	Chod 5 Chyba (μm)
1	2	0	0	0	0	0
2	127	4,7	4,8	4,8	4,8	4,8
3	252	7,5	7,6	7,8	7,7	7,7
4	377	8,6	8,8	8,8	8,8	8,8
5	502	8	8,1	8,2	8,2	8,1
6	627	5	5,1	5	5	5
7	752	0	0	0	0	0

Příloha 8: Měření s Renishaw XL-80, ustavení D (krok 250 mm)

Měření proběhlo na Ústavu výrobních strojů, systému a robotiky na tříosém obráběcím centru MCV 754 QUICK. Podrobný postup měření je v kapitole 3.1. a informace o průběhu měření jsou v kapitole 4.1. Měření proběhlo dne 7.4.2021 v čase 11:34. Jedná se o stejné ustavení optiky D, pouze jiný krok.

Tab.: 8 Výsledky s ustavením optiky D (krok 250 mm)

Body	Osa X (mm)	Chod 1 Chyba (μm)	Chod 2 Chyba (μm)	Chod 3 Chyba (μm)	Chod 4 Chyba (μm)	Chod 5 Chyba (μm)
1	2	0	0	0	0	0
2	252	7,6	7,6	7,6	7,6	7,7
3	502	8,2	8,2	8,3	8,2	8,3
4	752	0	0	0	0	0

Příloha 9: Měření s Renishaw XL-80, ustavení B_2

Měření proběhlo na Ústavu výrobních strojů, systému a robotiky na tříosém obráběcím centru MCV 754 QUICK. Podrobný postup měření je v kapitole 3.1. a informace o průběhu měření jsou v kapitole 4.1. Měření proběhlo dne 6.4.2021 v čase 11:42.

Tab.: 9 Výsledky s ustavením optiky B_2

Body	Osa X (mm)	Chod 1 Chyba (μm)	Chod 2 Chyba (μm)	Chod 3 Chyba (μm)	Chod 4 Chyba (μm)	Chod 5 Chyba (μm)
1	2	0	0	0	0	0
2	52	4,1	4,1	4	4,1	4,1
3	102	7,2	7,2	7,2	7,2	7,4
4	152	9,5	9,4	9,3	9,7	9,7
5	202	10,9	10,9	10,8	10,9	10,9
6	252	11,2	11,2	11,1	11,4	11,3
7	302	12,2	12	12	12,3	12,3
8	352	13,2	13,2	12,8	13,8	13,1
9	402	13,5	13,4	13,2	13,9	13,5
10	452	14,2	14,1	13,8	14,2	14,3
11	502	13,4	13,2	13,1	13,7	13,4
12	552	11,6	12	11,5	11,9	11,8
13	602	8,6	8,9	8,4	8,8	9
14	652	4,6	4,8	4,3	5,1	4,6
15	702	3,6	3,3	3,1	3,8	3,5
16	752	0	0	0	0	0