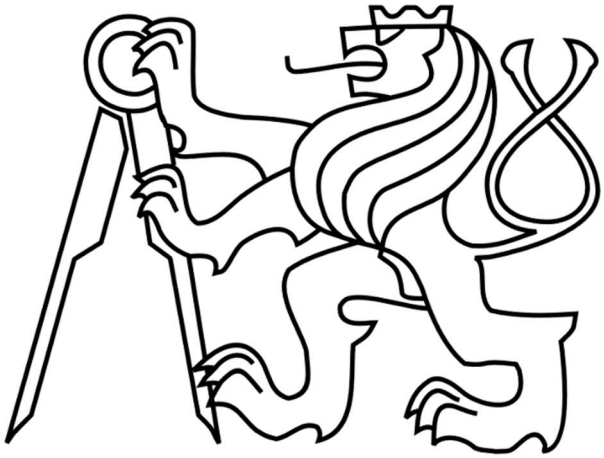
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

Zařízení pro zkoušku souřadnicového stroje nebo frézovacího stroje v konfiguraci s dotykovou obrobkovou sondou

2019 **Bc. Jaromír Hynek**

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v přiloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 20. 7. 2019 ……..

Podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce Ing. Janu Hornychovi Ph.D., který byl vždy ochoten si najít společný čas pro četné rady a konzultace nad řešením diplomové práce. Mezi další osoby, kterým bych rád poděkoval patří i kolegové Ing. Jakub Sýkora a Pavel Skalník, kteří byli vždy ochotni se podělit o své velice hluboké znalosti a vědomosti v oblasti metrologie. Velké poděkování patří také manželce, rodině a přátelům za podporu a trpělivost. Závěrem poděkování bych chtěl ocenit i podporu a vstřícnost ředitele ČMI LPM Praha Ing. Michala Bartoše a vedoucího oddělení technické délky Doc. Ing. Víta Zeleného, CSc. během celého studia.

Anotace

Autor:	Bc. Jaromír Hynek
Název DP:	Zařízení pro zkoušku souřadnicového měřicího stroje nebo frézovacího stroje v konfiguraci s dotykovou obrobkovou sondou
Rozsah práce:	75 str., 77 obr., 7 tab.
Školní rok vyhotovení:	2019
Škola:	ČVUT – Fakulta strojní
Ústav	U12135 - Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí diplomové práce:	Ing. Jan Hornych, Ph.D.
Konzultant:	doc. Ing. Vít Zelený, CSc.
Zadavatel:	Český metrologický institut
Využití:	Zkoušky souřadnicových měřicích strojů (SMS)
Klíčová slova:	měření přesnosti, souřadnicový měřicí stroj, zkouška SMS, laserový interferometr (LI), zařízení pro zkoušky SMS
Anotace:	Cílem této práce je návrh lineárního pojezdu měřeného laserovým interferometrem pro zkoušku souřadnicového měřicího stroje nebo frézovacího stroje v konfiguraci s dotykovou obrobkovou sondou.

Annotaition:

Author:	Jaromír Hynek
Title of thesis:	Verification device for tactile probe equipped coordinate measuring machine or milling machine
Extent:	75 p., 77 fig., 7 tab.
Academic year:	2019
University:	CTU – Faculty of Mechanical Engineering
Department:	U12135 – Department of Producting Machines
Supervisor:	Ing. Jan Hornych, Ph.D.
Consultant:	doc. Ing. Vít Zelený, CSc.
Submitter of the theme:	Czech Metrology Institute
Application:	Coordinate measurement machine (CMM) verification
Key words:	precise measurement, coordinate measuring machine, verification of CMM, laser interferometer (LI), CMM verification device
Annotation:	The aim is to design a linear guideway measured with laser interferometer for verification of coordinate measuring machines or milling machines equipped with tactile probe.

Obsah

1 Úvod 12

2 Cíl 12

3 Stav řešené problematiky 13

3.1 Souřadnicové měřicí stroje 13

3.2 Princip SMS 13

3.3 Konstrukce SMS 13

3.3.1 Výložníkový SMS s pevným stolem 14

3.3.2 Portálový SMS 14

3.3.3 Mostový SMS 15

3.3.4 Stojanový SMS (sloupový) 16

4 Zkoušky SMS a OS 17

4.1 Přejímací a periodické zkoušky 17

4.1.1 Měřicí zařízení a jeho poloha 17

4.1.2 Odsazení hrotu snímacího doteku od osy pinoly 19

4.1.3 Součinitel teplotní roztažnost (CTE) 19

4.1.4 Environmentální podmínky 20

5 Artefakty pro zkoušky SMS a OS 20

5.1 Artefakty 1D 20

5.1.1 Koncové měrky 20

5.1.2 Stupňové měrky 21

5.1.3 Ball bar 22

5.2 Artefakty 2D 23

5.2.1 Ball plate 23

5.3 Artefakty 3D 23

5.3.1 Ball cube 23

5.4 Laserový interferometr 24
5.4.1 Virtuální ball bar ČMI 26
5.4.2 Interferometrická stupňová měrka 27
5.5 Shrnutí dosažitelných nejistot 28
6 Vlastní zpracování 29
6.1 Požadované parametry 29
6.1.1 Obecné požadavky 29
6.1.2 Požadavky na přesnost 30
6.2 Varianty řešení 32
6.2.1 Varianta 1 32
6.2.2 Varianta 2 33
6.2.3 Srovnání a výběr vhodné varianty 34
7 Návrh zařízení 36
7.1 Popis konstrukce 36
7.2 Návrh nosného lože 37
7.2.1 Analýza MKP 37
7.2.2 Nosný profil O-O 38
7.2.3 Nosný profil OTO 38
7.2.4 Nosný profil W 39
7.2.5 Srovnání a výběr nosného profilu 39
7.2.6 Nosné lože 40
7.3 Kuličkový šroub 41
7.3.1 Uložení kuličkového šroubu 42
7.4 Lineární vedení 43
7.5 Pojezdový stolek 44
7.6 Laserový interferometr s optickými prvky 45
7.7 Ruční ovládání 45

8 Realizace 47

8.1 Výroba zařízení 47

8.1.1 Výroba nosného lože 47

8.1.2 Výroba kuličkového šroubu 48

8.1.3 Výroba drobných součástí 48

8.2 Montáž 48

9 Experiment 55

9.1 Metoda měření SMS 56

9.1.1 Vliv driftu 57

9.2 Verifikace metody 58

9.2.1 Rozpočet nejistoty 59

9.2.2 Vyhodnocení verifikace 62

9.3 Vyhodnocení experimentu 63

10 Závěr 68

Seznamy 70

Použitá literatura 70

Seznam obrázků 72

Seznam tabulek 75

Seznam použitého software 75

Příloha A - Výrobní dokumentace I

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam	Český význam
SMS		souřadnicový měřicí stroj
CMM	coordinate measurement machine	souřadnicový měřicí stroj
ČMI		Český metrologický institut
OS		obráběcí stroj
CNC	computer numerical control	počítačem řízený obráběcí stroj
LI		laserový interferometr
CTE	coeficient of thermal expansion	koeficient teplotní roztažnosti
PD	probing direction	směr snímání
1D		jednorozměrný
2D		dvourozměrný
3D		třírozměrný
USB	universal serial bus	univerzální sériová sběrnice
ISG	interferometric step guage	interferometrická stupňová měrka
MIKES		Finský metrologický institut
MKP		metoda konečných prvků
MPZ		mezilaboratoní porovnávací zkouška
KL		kalibrační list
MIG	metal inert gas	svařování kovů v ochranné atmosféře inertného plynu

Seznam použitých veličin

E_{MPE} [µm]	maximální dovolená chyba
E_N [-]	normalizovaná chyba
X_{lab} [mm]	naměřená hodnota chyby prověřované laboratoře
X_{ref} [mm]	referenční hodnota chyby
U [µm]	rozšířená nejistota měření
U_{lab} [µm]	rozšířená nejistota měření prověřované laboratoře
U_{ref} [µm]	rozšířená nejistota měření referenční laboratoře
$U_{celková}$ [µm]	celková rozšířená nejistota
U_{LI} [µm]	celková rozšířená nejistota laserového interferometru
u_{rel} [µm]	relativní část nejistoty
u_{abs} [µm]	absolutní část nejistoty
U_{rel} [µm]	relativní část nejistoty
U_{rel} [µm]	absolutní část nejistoty
k [-]	koeficient rozšíření
L [m]	měřená délka
U_{max} [µm]	maximální rozšířená nejistota
t_c [s]	celkový snímací čas

1 Úvod

Hlavní motivací pro vypracování diplomové práce byla potřeba provádění kontroly přesnosti velice přesných souřadnicových měřicích strojů (SMS). Tato potřeba vznikla ze strany Českého metrologického institutu (ČMI), který je zároveň zadavatelem této diplomové práce. V ČMI došlo v roce 2017 k zakoupení vysoce přesného souřadnicového měřicího stroje Zeiss XENOS. Maximální dovolená chyba (E_{MPE}) tohoto stroje je výrobcem stanovena na (0,3+1L) µm, kde L je v metrech. Pro zkoušky a kalibraci SMS Zeiss XENOS s takto nízkou specifikací bylo potřeba zajištění etalonu s nejnižší možnou nejistotou. Ačkoli je nové zařízení primárně určeno pro zkoušky SMS, lze je použít i pro zkoušku přesnosti odměřování pomocí dotykových obrobkových sond na obráběcích strojích (OS).

2 Cíl

Úvodní kapitoly práce jsou věnovány obecnému přehledu nejčastěji používaných konstrukcí SMS. Dále jsou v diplomové práci rozebrány způsoby zkoušek SMS a nejpoužívanější zkušební tělesa pro tyto zkoušky, což obnáší hmotné etalony, ale i zařízení využívající princip odměřování terče (koutového odražeče) pomocí laserového interferometru (Bod zadání 1. Rešerše podobných zařízení). Hlavní částí práce je vyhotovení více variant návrhu nového zařízení pro zkoušky SMS dle konstrukčních požadavků, srovnání a výběr vhodné varianty (Bod zadání 2. Návrh konstrukce nového zařízení). Návrh této varianty je následně podrobně rozpracován a je vytvořena příslušná výkresová dokumentace (Bod zadání 3. Vytvoření výrobní dokumentace).

Nad rámec zadání diplomová práce dále popisuje výrobu zařízení, které bylo po dokončení použito k provedení experimentu. V části práce, zabývající se tímto experimentem je uveden popis metody zkoušky, verifikace metody a výsledky samotné zkoušky SMS Zeiss XENOS. V závěrečné části diplomové práce je uvedeno vyhodnocení experimentu.

3 Stav řešené problematiky

Obsahem této kapitoly je stručný úvod do problematiky souřadnicové měřicí techniky za účelem získání přehledu o strojích, které budou pomocí navrhovaného zařízení zkoušeny.

3.1 Souřadnicové měřicí stroje

Souřadnicové měření se historicky vyvíjelo z jednoduchých měřicích strojů. S nástupem číslicového řízení výrobních strojů v 50. letech 20. století a následném nástupu počítačem řízených strojů (CNC) pro výrobu v letectví se výrobní stroje dostaly do oblasti větších přesností než měřicí stroje. Zásadním milníkem v oblasti souřadnicových měřicích strojů (SMS) byl vynález dotykové sondy, která umožňovala rychlé a přesné sejmutí bodu malou dotykovou silou. V kombinaci této sondy s přesným lineárním odměřováním pro CNC výrobní stroje byly položeny základy pro vývoj v SMS až do dnešní podoby.

3.2 Princip SMS

Měření pomocí souřadnicového měřicího stroje je založeno na získávání souřadnic bodů na povrchu měřeného objektu. Získané body dotyku jsou vztaženy k základnímu bodu definovaném na měřené součásti. V tomto bodě leží počátek lokálního souřadnicového systému. Jednou z výhod souřadnicového měřicího stroje je možnost umístění základního (nulového) bodu kamkoli do měřicího prostoru. Tím je umožněno získání rozměrové informace o měřeném objektu, které by u konvenčních metod nebylo možné. Naměřené body jsou následně využívány pro rekonstrukci elementů, jako jsou přímka, rovina, koule, válec, atd. Oproti měření pomocí konvenčních metod, umožňuje souřadnicový měřicí stroj měření a vyhodnocení složitých ploch obecných tvarů.

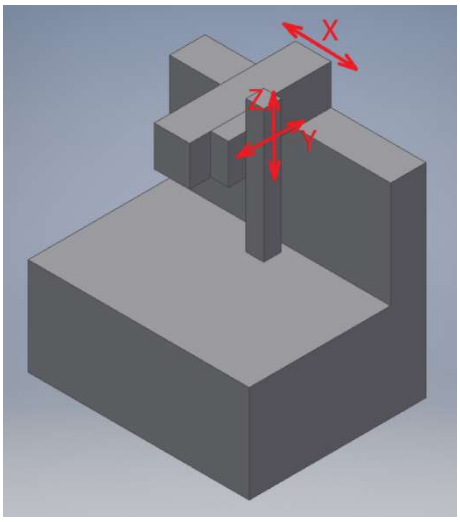
3.3 Konstrukce SMS

Souřadnicový měřicí stroj je zpravidla tvořen základní příměrnou deskou, ke které je připevněn odměřovacé mechanismus. Většinou jde o 3 číslicově řízené osy opatřené odměřováním. Tyto osy jsou vzájemně kolmé a slouží k unášení odměřovací sondy. Podle principu funkce sondy umístěné na pinole se souřadnicové stroje dělí na optické a dotykové. Tato práce se bude zabývat pouze dotykovými

souřadnicovými měřicími stroji. Další dělení souřadnicových měřicích strojů lze realizovat dle různých typů konstrukcí. Typy a vlastnosti nejpoužívanějších konstrukcí jsou shrnuty v kapitolách 3.3.1 až 3.3.4 [1].

3.3.1 Výložníkový SMS s pevným stolem

Výložníkový SMS (Obr. 1) [1] se skládá ze saní pohybujících se v ose *X* na kterých je upevněn výložník. Výložník nese saně pohybující se v ose *Y*. Na výložníku je upevněna pinola zajišťující pohyb ve svislé ose *Z*. Kladnou vlastností tohoto stroje je dobře přístupný pracovní prostor. Díky nízkým hmotám pohybujících se částí stroje je umožněn pohyb velkou rychlostí a zrychlením. Nevýhodou této konstrukce je nízká tuhost výložníku. Ta umožnuje jen malé vyložení v ose *Y*. Z toho vyplývá omezená velikost pracovního prostoru. Výložníkové SMS se používaí pro přesná měření menších objektů.

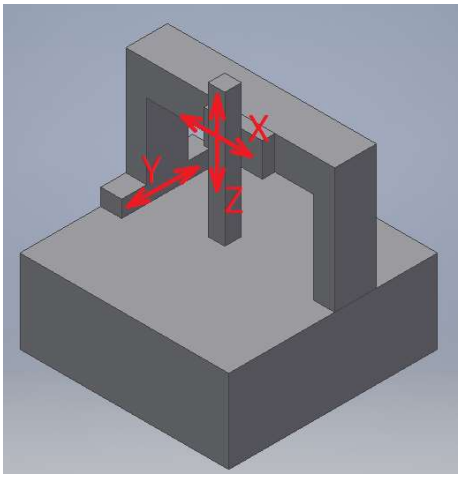


Obr. 1 Kinematické schéma výložníkového SMS

3.3.2 Portálový SMS

Jde o nejčastěji používanou konstrukci u dnešních souřadnicových měřicích strojů. Konstrukce (Obr. 2) je tvořena masivním portálem, který se pohybje po stole stroje (*osa Y*). Portál je opatřen příčnými saněmi umožňujícími pohyb v ose *X*. Na příčných saních je upěvněna pinola s možností pohybu v ose *Z*. Portálový souřadnicový měřicí stroj se často používá i ve variantě s pohyblivým stolem zajišťujícím pohyb v ose *Y*. Portál a lože stroje jsou spojeny v jeden celek. Pohyb v ose *Y* je zajištěm pomocí pohyblivého stolu. Portálový stroj disponuje vysokou tuhostí konstrukce s čímž souvisí i dobrá přesnost

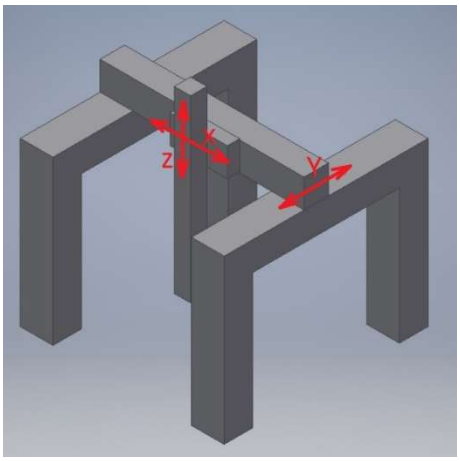
této konstrukce. Výhodou je také symetrie portálu a rovnoměrná tuhost. Nevýhodou portálového souřadnicového měřicího stroje je horší přístup a velikost pracovního prostoru [1].



Obr. 2 Kinematické schéma portálového SMS

3.3.3 Mostový SMS

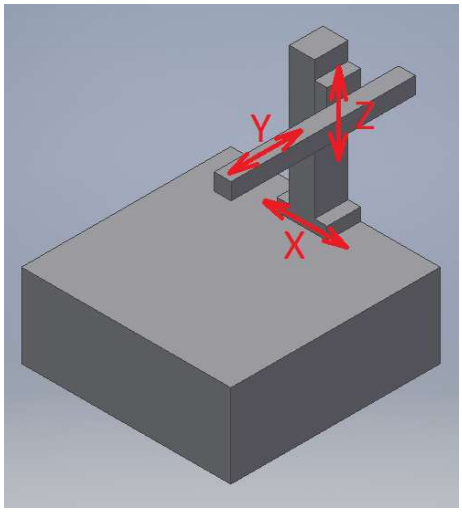
Konstrukce mostového SMS (Obr. 3) [1] je tvořena rámem z masivních sloupů. Po rámu se v ose *Y* pohybuje příčník opatřený saněmi, které umožňují pohyb v ose *X*. Pinola připevněná na příčných saních zajišťuje pohyb v ose *Z*. Mostový SMS je využíván pro měření velkých objektů.



Obr. 3 Kinematické schéma mostového SMS

3.3.4 Stojanový SMS (sloupový)

Konstrukce tohoto stroje (Obr. 4) je tvořena nosným sloupem pohybujícím se po statickém stole v ose *X*. Nosný sloup unáší vodorovně uložené rameno s možností pohybu v osách *Y* a *Z*. Pohyb v ose X bývá často řešen i pohyblivým stolem v kombinaci s pevně uložným nosným sloupem. Stojanový SMS [1] vyniká dobrým přístupem pracovního prostoru a rychlostí snímání. Tyto vlastosti jsou uplatňovány například při měření karoserií automobilů. Naopak nevýohdou tohoto systému je nízká dynamická tuhost konstrukce, která má za následek větší chyby měření. Jeden stůl SMS může být osazen i dvěma nosnými sloupy, což umožňuje měření objektu z obou stran současně.



Obr. 4 Kinematické schéma stojanového SMS

4 Zkoušky SMS a OS

Zkouška SMS je proces, pomocí kterého se kontroluje přesnost daného zařízení. Tato diplomová práce se bude zabývat pouze zkouškou chyby při měření délky, která se podle ISO 10360-2 označuje jako E_{MPE} [2]. Zkouška polohování OS se provádí podle ČSN ISO 230-2 [3], avšak tato norma postihuje problematiku měření dotykovou obrobkovou sondou jen okrajově. Proto bude práce vycházet hlavně z normy ISO 10360-2 pro zkoušky SMS.

4.1 Přejímací a periodické zkoušky

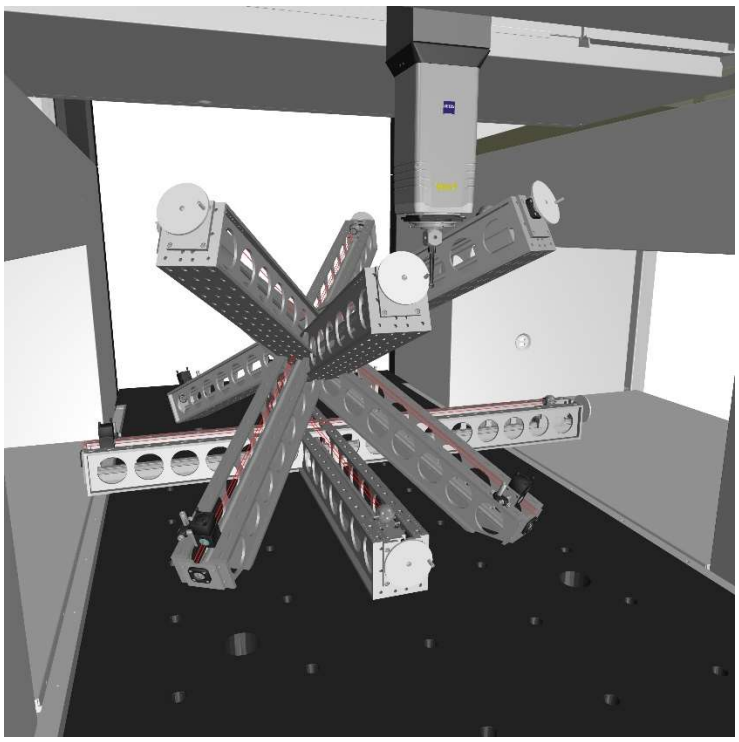
Postup a způsoby zkoušek SMS jsou podrobně popsány v řadě norem ISO 10360. Norma ISO 10360-2 [2] specifikuje přejímací a periodické zkoušky pro verifikaci způsobilosti SMS vybaveného dotykovým snímacím systémem. Přejímací zkouška slouží ke srovnání reálných vlastností SMS s vlastnostmi stroje deklarovaných výrobcem. Periodická zkouška slouží pro sledování těchto vlastností po určitém časovém úseku během provozu stroje. Princip zkoušky SMS spočívá v porovnávání kalibrovaných zkušebních délek s hodnotami délek naměřených zkoušeným SMS. Zkušební délky jsou reprezentovány kalibrovanými artefakty, které jsou podrobně popsány v kapitole 5.

4.1.1 Měřicí zařízení a jeho poloha

Na základě doporučení normy ISO 10360-2 je třeba měřený prostor pokrýt měřením kalibrovaného tělesa v sedmi různých polohách, přičemž kalibrované těleso v každé poloze musí být měřeno třikrát. Na Obr. 5 je znázorněno pokrytí pracovního prostoru SMS pomocí zkušebního artefaktu. Čtyři ze sedmi poloh zpravidla jsou prostorovými úhlopříčkami pracovního prostoru stroje. Uživatel může určit zbylé tři polohy rovnoběžné s měřicími osami stroje (Tab. 1). Zkušební těleso musí obsahovat 5 rovnoměrně rozdělených délek. To znamená, že při použití tělesa o délce 1000 mm je ideální, aby těleso obsahovalo tyto kalibrační délky: 200 mm, 400 mm, 600 mm, 800 mm a 1000 mm. Další podmínkou je splnění alespoň 66% maximálního měřicího rozsahu měřicí přímky SMS. Objem naměřených dat k vyhodnocení zkoušky čítá ve výsledku 105 měřených délek [2].

Tab. 1 Orientace kalibrovaného tělesa v měřicím prostoru SMS [2]

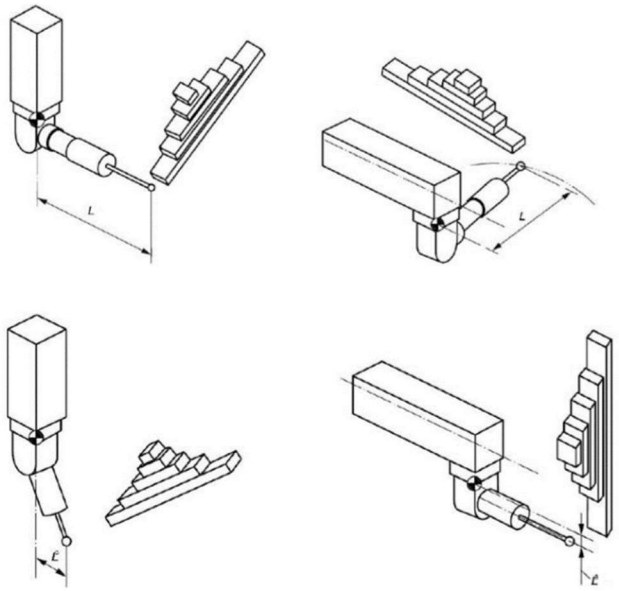
Č. polohy	Orientace v měřicím prostoru stroje	Požadovaný / Předem zvolený
1	Podél úhlopříčky prostoru z bodu (1, 0, 0) k bodu (0, 1, 1)	Požadovaný
2	Podél úhlopříčky prostoru z bodu (1, 1, 0) k bodu (0, 0, 1)	Požadovaný
3	Podél úhlopříčky prostoru z bodu (0, 1, 0) k bodu (1, 0, 1)	Požadovaný
4	Podél úhlopříčky prostoru z bodu (0, 0, 0) k bodu (1, 1, 1)	Požadovaný
5	Rovnoběžně s osou stroje z bodu (0, 1/2, 1/2) k bodu (1, 1/2, 1/2)	Předem zvolený
6	Rovnoběžně s osou stroje z bodu (1/2, 0, 1/2) k bodu (1/2, 1, 1/2)	Předem zvolený
7	Rovnoběžně s osou stroje z bodu (1/2, 1/2, 0) k bodu (1/2, 1/2, 1)	Předem zvolený
Pozn: Pro specifikace uvedené v této tabulce jsou zobrazovány protilehlé rohy měřicího objemu s (0,0,0) a (1, 1, 1) v souřadnicích (X, Y, Z)		



Obr. 5 Pokrytí pracovního prostoru SMS [2]

4.1.2 Odsazení hrotu snímacího doteku od osy pinoly

Na základě konstrukce snímací hlavy a použitého zkušebního artefaktu může být zavedeno tzv. odsazení hrotu. Odsazením hrotu snímacího doteku od osy pinoly se rozumí pravoúhlá vzdálenost mezi hrotem snímacího doteku a referenčním bodem v mm, viz. (Obr. 6) Referenční bod ležící zpravidla ve snímací hlavě, nebo její blízkosti je stanoven výrobcem. Podle velikosti odsazení jsou pak specifikovány hodnoty např. L=0, L=150 [2].



Obr. 6 Odsazením hrotu snímacího doteku

4.1.3 Součinitel teplotní roztažnost (CTE)

Etalony používané pro zkoušky SMS lze např. rozdělit do skupin dle velikosti hodnoty CTE označovaný jako koeficient teplotní roztažnosti $\alpha = (X)\ K^{-1}$. Znalost koeficientu teplotní roztažnosti etalonu má vliv na výslednou nejistotu provedení zkoušky. Pro SMS s velmi nízkou E_{MPE} bývá zkouška provedena zpravidla etalony s CTE blížící se $\alpha = 0\ K^{-1}$, jako je např, Zerodur nebo Robax. Důvodem je snížení příspěvku nejistoty zkoušky. Měření pomocí laserového interferometru je také klasifikováno jako měření artefaktu s nízkým CTE [2]. Pro vysoce a středně přesné SMS se používají etalony s kalibrovaným CTE. Díky tomu je opět dosaženo snížení příspěvku nejistoty zkoušky SMS. Třetí skupina je tvořena hmotnými etalony bez kalibrovaného CTE, vyrobenými převážně z oceli. Zkouška etalonem ze třetí skupiny má největší příspěvek k nejistotě měření vůči předchozím dvěma typům [2].

4.1.4 Environmentální podmínky

Z důvodu vysokého vlivu teploty, vlhkosti vzduchu a vibrací v místě měření musí být pro přejímací zkoušku výrobcem specifikovány mezní hodnoty environmentálních podmínek. Pro periodické zkoušky tyto mezní hodnoty stanovuje uživatel SMS [2].

5 Artefakty pro zkoušky SMS a OS

Artefaktem pro zkoušky SMS je ztělesněná míra (etalon), která poskytuje referenční hodnoty pro srovnání s hodnotami naměřenými pomocí SMS. U těchto artefaktů musí být doložen nepřerušený řetězec metrologické návaznosti na státní etalon. Artefakt musí být dostatečně tuhý tak, aby byl odolný proti deformaci způsobené vlastní hmotností, upnutím a měřicí silou. Funkční plochy používané při snímání bodů musí být opracovány s drsností, která nebude ovlivňovat výsledky měření. Artefakty pro použití při zkouškách SMS se dělí na *1D, 2D* a *3D*. Vybrané typy dnes běžně používaných etalonů budou podrobně popsány v kapitolách 5.1 až 5.4.

5.1 Artefakty 1D

5.1.1 Koncové měrky

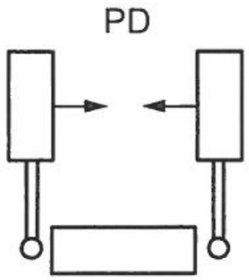
Koncové měrky (Obr. 7), jsou základním zkušebním artefaktem, jakým lze provádět zkoušky SMS. Jde o hranoly s obdélníkovým průřezem, jejichž čela jsou broušena a lapována na přesný rozměr. U koncových měrek rozlišujeme dva parametry přesnosti. Ty jsou děleny na:

A – dovolená odchylka délky měrky od jmenovité hodnoty

B – dovolená odchylka rovinnosti a rovnoběžnosti čelních ploch měrky.

Přesnost měrek dosahuje dle literatury [4] pro parametr *A* 0,20 µm a *B* 0,05 µm. Koncové měrky bývají používány zpravidla v sadě více kusů pro dodržení požadavku normy ISO 10360 měřit v každé ose měření minimálně 5 délek. Materiálem koncových měrek je nejčastěji ocel nebo keramika. Postup vyrovnání spočívá v sejmutí více bodů na jednom čele měrky, které poslouží ke konstrukci roviny. Kolmice k této rovině reprezentuje osu měrky. V této ose je při následném měření sejmut jeden bod na každém čele měrky. Vzdálenost těchto sejmutých bodů je porovnána s kalibrovanou délkou měrky. Koncové měrky nabízí pouze variantu měření z vnějších stran viz (Obr. 8). Zkoušky SMS pomocí koncových měrek mohou dosahovat nejistoty až $U = (0{,}100+0{,}400 \cdot L)\ \mu m$, kde L je v metrech [5].

Obr. 7 Sada koncových měrek Mitutoyo

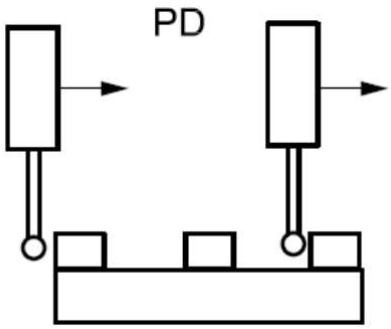


Obr. 8 Způsob měření koncových měrek [2]

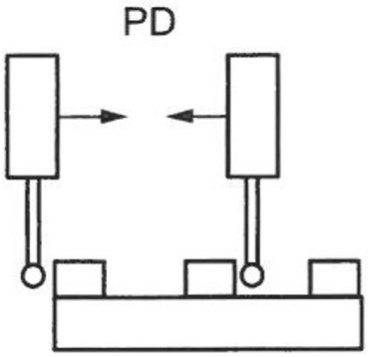
5.1.2 Stupňové měrky

Konstrukce stupňové měrky (Obr. 9) se skládá z nosného profilu, na kterém jsou pevně uchyceny záměrné elementy s přesně upravenými čely. Stupňové měrky je možné měřit z obou stran, jak je patrné z Obr. 10 a Obr. 11, což umožňuje důkladnější popsání vlastností snímání SMS. Tento způsob měření je oproti koncovým měrkám schopen podat informaci o hysterezi měřicího systému SMS. Postup pro vyrovnání stupňové měrky je stejný jako u koncových měrek, nebo je možné použít tzv. vyrovnání 3-2-1, kdy je na nosném profilu nasnímána rovina, přímka a bod, ze kterých lze sestavit souřadnicový systém artefaktu. Zkoušky SMS pomocí stupňových měrek mohou dosahovat nejistoty až $U = (0{,}060+0{,}160*L)\ \mu m$, kde L je v metrech [5].

Obr. 9 Stupňová měrka



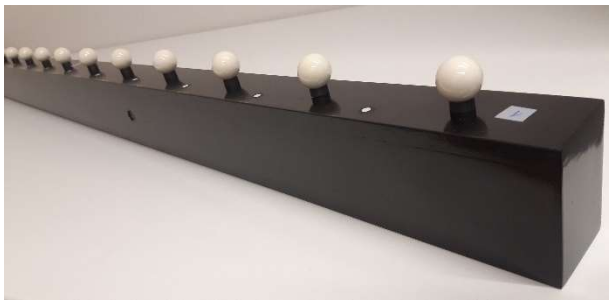
Obr. 10 Jednostranné měření [2]



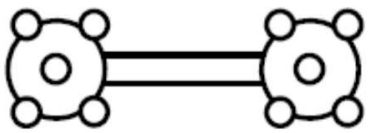
Obr. 11 Měření z vnějších stran [2]

5.1.3 Ball bar

Ball bar (Obr. 12) je zkušební artefakt tvořený dvěma nebo více koulemi pevně spojenými v jeden celek nosnou tyčí nebo deskou. Referenční hodnotou je v tomto případě vzdálenost středů koulí. Koule ball baru jsou přesně vyrobené a leštěné tak, aby dosahovaly minimálních hodnot drsnosti a chyby kulovitosti. Vyrovnání tohoto artefaktu se provádí sejmutím pěti bodů na každé kouli. Jeden bod každé koule musí být sejmut na vrchlíku koule (pól) a zbylé po obvodu koule (rovník) (Obr. 13). Naměřené středy koulí se proloží přímkou, která reprezentuje osu ball baru. Vzdálenost sejmutých bodů koulí je porovnán s kalibrovanou délkou ball baru. Zkoušky SMS pomocí tělesa ball bar mohou dosahovat nejistoty až $U = (0{,}300+0{,}600*L)\ \mu m$, kde L je v metrech [5].



Obr. 12 Ball bar



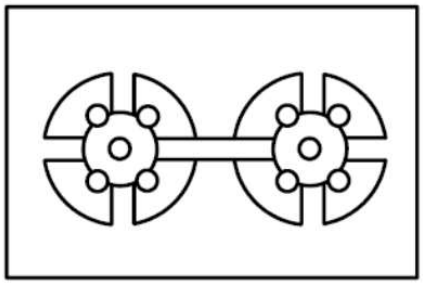
Obr. 13 Způsob měření tělesa ball bar [2]

5.2 Artefakty 2D

5.2.1 Ball plate

Ball plate je artefakt (Obr. 14), který se skládá ze základové desky, na které jsou připevněny přesné leštěné keramické koule. Tyto koule jsou na desce rozmístěny tak, aby tvořily většinou rovnoměrnou síť. Referenční středy koulí jsou následně porovnávány s naměřenými středy. Středy koulí jsou snímány analogicky k měření středů u artefaktu ball bar. Vyrovnání je provedeno naměřením tří středů vybraných koulí (koule v rozích artefaktu) tak, aby tvořily souřadnicový systém. Způsob snímání koulí je stejný, jako v případě tělesa ball bar (Obr. 13 a Obr. 15). Zkoušky SMS pomocí tělesa ball plate mohou dosahovat nejistoty až $U = (0{,}120+0{,}400*L)\ \mu m$, kde L je v metrech [5].

Obr. 14 Ball plate



Obr. 15 Způsob měření tělesa ball plate [2]

5.3 Artefakty 3D

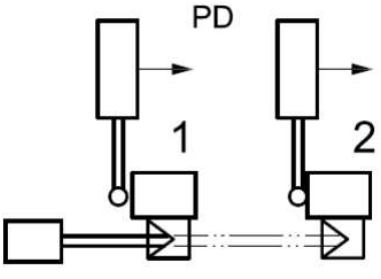
5.3.1 Ball cube

Jedním ze zástupců skupiny *3D* artefaktů je těleso Ball Cube. Toto těleso vychází z principu tělesa ball plate s tím rozdílem, že jde o konstrukci tvaru krychle tvořené profily z uhlíkového kompozitu. V každém rohu krychle je připevněna keramická koule. Princip snímání koulí je stejný, jako v případě těles ball bar a ball plate. Ball cube je využíván hlavně pro zkoušky SMS o velkých rozměrech. Zkoušky SMS pomocí tělesa ball cube mohou dosahovat nejistoty až $U = (0{,}800+1{,}000*10^{-6}*L)\ \mu m$, kde L je v metrech [5].

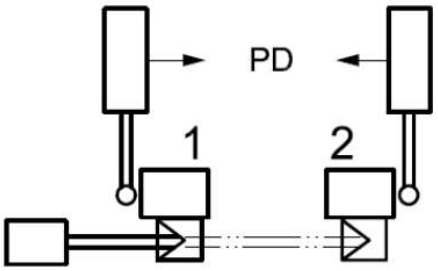
Obr. 16 Ball cube

5.4 Laserový interferometr

Kalibrovaná zkušební délka může být reprezentována laserovým interferometrem. Toto měření lze provádět podobně jako v případě použití stupňové měrky pro oba smysly (Obr. 17 a Obr. 18). Tento způsob měření skýtá mnoho výhod, jako například to, že měření pomocí laserového interferometru lze brát jako měření kalibrované délky s nulovým CTE. Další výhodou je vysoká přesnost měření a v neposlední řadě také mnohem větší rozsah měření v porovnání s ostatními artefakty pro zkoušení SMS. Měření laserovým interferometrem lze v současné době prohlásit za nejpřesnější metodu pro zkoušky v této oblasti.

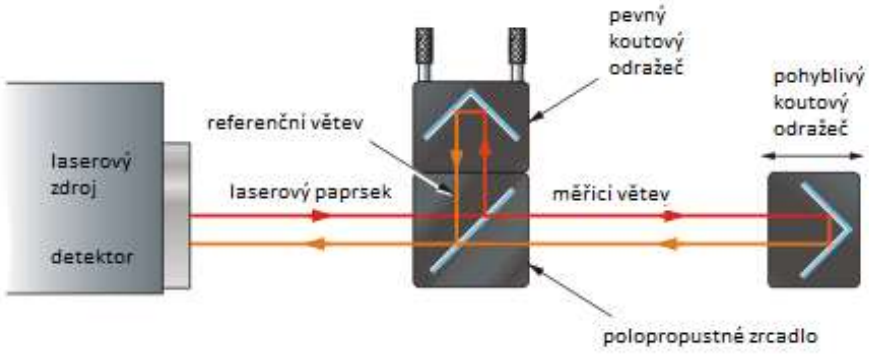


Obr. 17 Jednostranné měření pomocí LI [2]



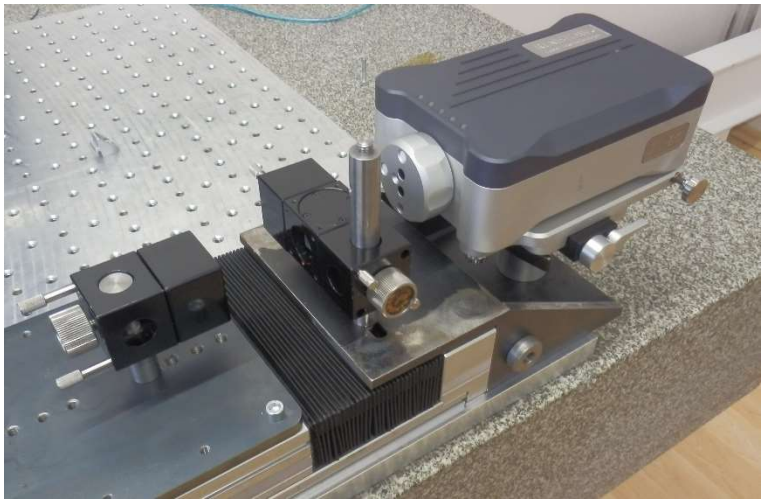
Obr. 18 Měření z vnějších stran pomocí LI [2]

Nejčastěji využívaný laserový interferometr funguje na principu Michelsonovy interferometrie (Obr. 19) [6]. Ten funguje tak, že paprsek vyslaný z laserového zdroje je pomocí polopropustného zrcadla rozštěpen na dva. Oba paprsky jsou pomocí svého vlastního koutového odražeče odraženy zpět do detektoru, kde vzájemně interferují. Paprsek, jehož koutový odražeč se nepohybuje, je brán jako referenční. Měřicí paprsek je odrážen pomocí pohyblivého koutového odražeče. Interference může být buď konstruktivní, nebo destruktivní. Konstruktivní interference nastává v případě, že oba paprsky jsou ve fázi a jejich amplitudy se vzájemně zesilují. Tím vytváří jasné pruhy. Destruktivní interference nastává, když paprsky ve fázi nejsou. Jejich amplitudy se tak vzájemně ruší a vytvářejí tmavé pruhy. Posunutím pohyblivého koutového odražeče měřicí větve interferometru o polovinu vlnové délky (632,8nm) dochází ke změně interferenčních pruhů z jasných na tmavé. Tyto změny jsou snímány na detektoru a pomocí čítače pulzu zaznamenány.



Obr. 19 Princip laserového interferometru [6]

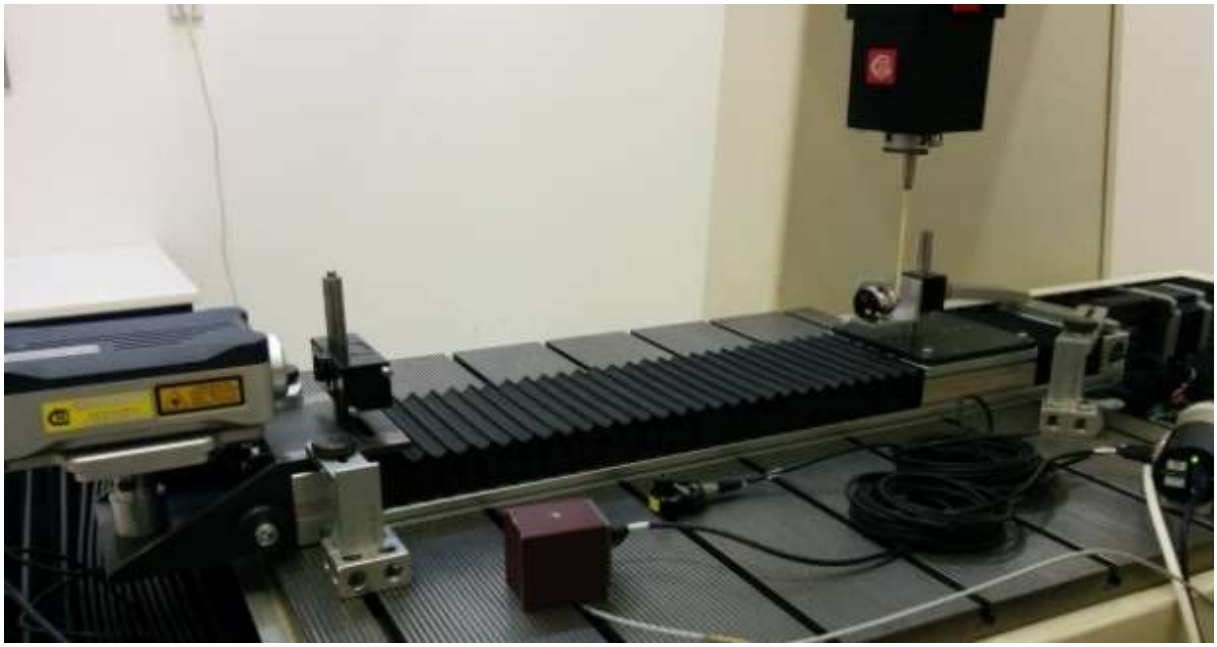
Jedním z nejrozšířenějších laserových interferometrů je produkt společnosti Renishaw (Obr. 20). Základní systém pro lineární měření je složen z laserové hlavice XL 80 a jednotky pro kompenzaci vlivu prostředí XC 80. Jednotka XC 80 obsahuje čidlo pro měření atmosférického tlaku, vlhkosti vzduchu a umožňuje připojení čtyř teplotních čidel. Tři teplotní čidla jsou určena pro měření teploty materiálu, čtvrté pro měření teploty vzduchu. Všechna čidla jsou opatřena magnety pro snadné upnutí na měřený objekt. Celé zařízení je možné připojit k počítači pomocí rozhraní USB. Systém umožňuje za použití různé konfigurace optických prvků a dalšího příslušenství měření přímosti, rovinnosti, kolmosti, úhlu, ale také dynamická měření rychlosti a zrychlení.



Obr. 20 Laserový interferometr Renishaw

5.4.1 Virtuální ball bar ČMI

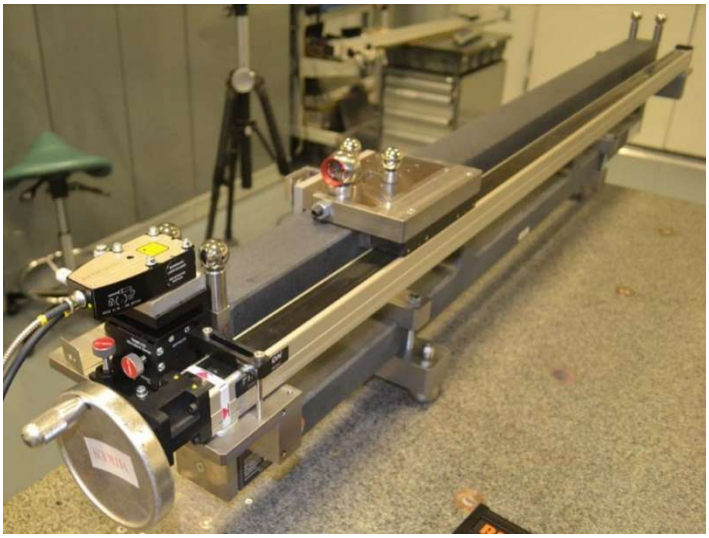
V rámci řešení Úkolu technického rozvoje 2014 [7] bylo v ČMI navrženo zařízení virtuální ball bar (Obr. 21) pro zkoušky SMS. Toto zařízení využívá principu laserového interferometru v kombinaci s kulovým koutovým odražečem, který se pohybuje spolu s unášecím stolkem po lineárním vedení. Koutový odražeč slouží jako optický prvek pro laserový interferometr a zároveň jako záměrný objekt SMS. Převod mezi hnacím rotujícím krokovým motorem a posouvajícím se unášecím stolkem je proveden kuličkovým šroubem. Základem celého zařízení je nosná duralová deska opatřená dvojicí kolejnic se čtyřmi kuličkovými hnízdy. Nevýhodou tohoto zařízení je nízká tuhost použitého nosného lože a přítomnost krokového motoru a laserové jednotky Renishaw XL 80, které jsou významnými zdroji tepla v měřicím prostoru. Kvůli nízké tuhosti nosného lože bylo třeba stanovit nejistotu zkoušky pro každou polohu měření v rámci pracovního prostoru SMS. Proto nebude nejistota měření tímto zařízením uvedena ve shrnutí nejistot (Tab. 2).



Obr. 21 Virtuální ball bar ČMI

5.4.2 Interferometrická stupňová měrka

Interferometrická stupňová měrka (ISG) (Obr. 22) byla v rámci projektu Traceable measurement of drive train components for renewable energy systems [8] vyvinuta finským metrologickým institutem MIKES. Jde o lineární vedení na granitovém loži o rozsahu 0 mm až 1200 mm opatřené pojezdovým stolkem. Na pojezdovém stolku je mimo koutového odražeče umístěna krátká koncová měrka, která slouží jako záměrný objekt (terč) pro dotykový snímací systém zkoušeného SMS. Pohyb stolku je konstrukčně řešen pomocí rotačního krokového motoru, jehož krouticí moment je převáděn na lineární pohyb pomocí kuličkového šroubu. Pohon je doplněn i o ruční ovládání. Odměřování polohy trče je zajištěno pomocí laserového interferometru Renishaw RLE 10, využívajícího vedení paprsku optickými vlákny. Nejistota měření vzdálenosti na 1 m tímto zařízením je uvedena jako $U = 0{,}4\ \mu m$.



Obr. 22 Interferometrická stupňová měrka MIKES [8]

5.5 Shrnutí dosažitelných nejistot

Porovnání nejistot zkoušek SMS pomocí zkušebních těles (5.1.1 až 5.4.2) je provedeno v Tab. 2. Pro názornost byly nejistoty *U* vyjádřeny pro měření vzdálenosti 1 m.

Tab. 2 Porovnání dosažitelných nejistot

Zkušební těleso	**Nejistoty měření délky 1 m [µm]**
Koncová měrka	0,155
Stupňová měrka	0,220
Ball bar	0,900
Ball plate	0,520
Ball cube	1,800
Laserový interferometr	0,400

Z Tab. 2 vyplývá, že nejnižší nejistoty vykazuje měření pomocí koncových a stupňových měrek. Je však zapotřebí vzít v úvahu fakt, že jde o metody, do kterých velmi výrazně vstupuje vliv teplotní roztažnosti materiálu. Z tohoto důvodu je nejvýhodnější použití laserového interferometru, u kterého je tento vliv eliminován.

6 Vlastní zpracování

Předmětem této kapitoly je pojmenování a sumarizace požadavků, které musí navržené zařízení splňovat. Na základě shrnutí požadavků budou předběžně navrženy varianty řešení, ze kterých bude vybrána jedna k podrobnému rozpracování.

6.1 Požadované parametry

Navrhované zařízení musí splňovat celou řadu požadavků daných způsobem a účelem jeho použití. Tyto lze dělit do dvou skupin, a to na obecné požadavky (6.1.1) a požadavky na přesnost měření (6.1.2).

6.1.1 Obecné požadavky

Do skupiny obecných požadavků spadá potřeba splnění vlastností, které musí systém vykazovat během každodenního použití při laboratorním měření i měření v náročných podmínkách prostředí v oblasti obráběcích strojů. Zařízení také musí umožňovat provedení zkoušek dle doporučení norem, které tyto zkoušky popisují. Dále je třeba přizpůsobit návrh zařízení stávající technické vybavenosti zadavatele. Tím se rozumí pokud možno co nejrozsáhlejší použití již v minulosti zakoupené měřicí techniky. Těmito požadavky jsou:

- **Možnost transportu zařízení** má umožnit použití při zkouškách strojů nejen v laboratořích zadavatele, ale i přímo na místě u jeho zákazníků. Je tedy nutné, aby bylo možné zařízení demontovat, naložit do osobního automobilu, transportovat na místo použití a následně co nejjednodušším způsobem uvést do provozu. Zařízení musí po opakovaném složení vykazovat stejné vlastnosti, jako před demontáží.

- **Snadná obsluha** je vyžadována z důvodu časově náročné procedury zkoušky strojů. Zařízení musí být navrženo s ohledem na ergonomii a bezpečnost práce obsluhy.

- **Montáž optických prvků** laserového interferometru Renishaw XL80 je vyžadována s ohledem na aktuální vybavenost laboratoří zadavatele. Využití již v minulosti zakoupených optických prvků přináší značnou finanční úsporu oproti nákupu nových.

- **Eliminace průhybu lože** je nutná z důvodu negativního vlivu průhybu na přesnost měření pomocí navrhovaného zařízení**.** Minimalizace průhybu lože zařízení bude realizována pomocí návrhu vhodného nosného profilu.

- **Možnost nastavení do různých poloh** v rámci pracovního prostoru stroje dle doporučení norem bude realizováno pomocí stavebnicového upínacího systému ALUFIX. Jde o přesný modulový systém vyrobený z vysokopevnostní hliníkové slitiny. Systém nabízí díky své vysoké variabilitě možnost nastavení a upnutí navrženého zařízení do pracovních prostorů různých strojů. Tímto systémem je laboratoř ČMI již vybavena a odpadá tak potřeba konstrukce nového univerzálního stojanu pro upínání navrženého zařízení.

- **Minimalizace vlivu vlastních zdrojů tepla navrhovaného zařízení** bude realizována jednak vyjmutím laserového interferometru z pracovního prostoru měřeného stroje a dále provedením pohonu zařízení.

6.1.2 Požadavky na přesnost

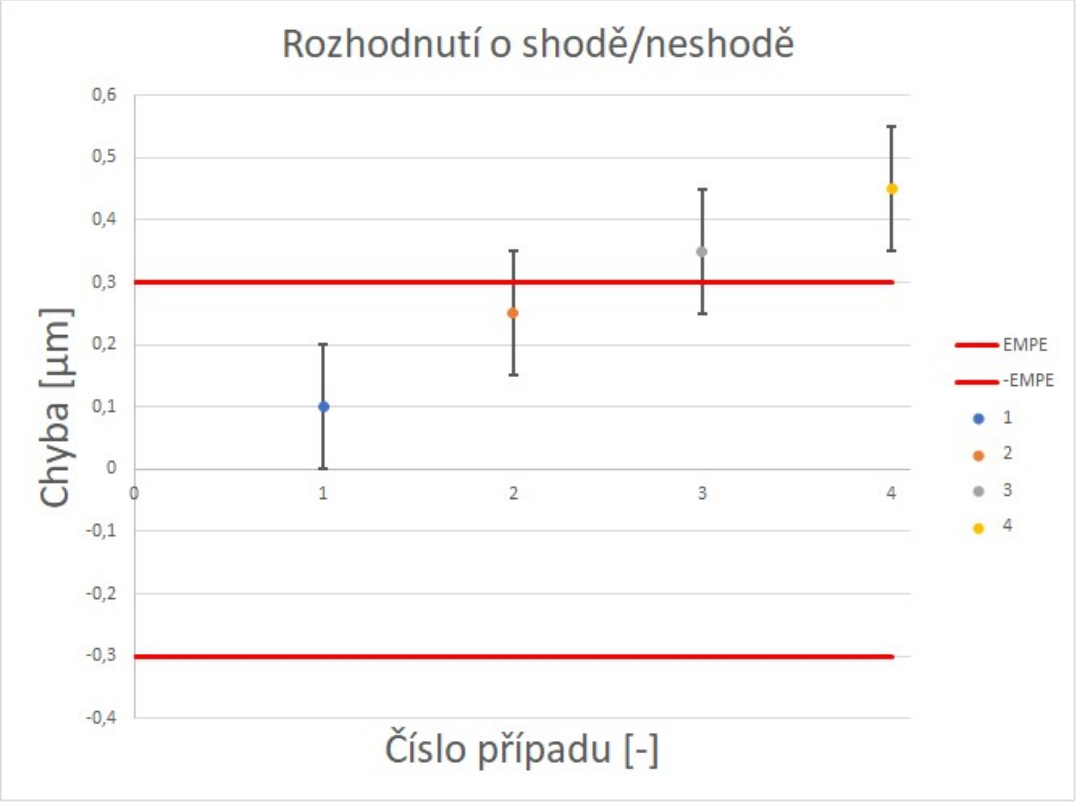
Požadavky na přesnost jsou odvozeny od potřeby provádění zkoušek souřadnicových měřicích strojů dosahujících nejvyšších přesností. Zkouška SMS bývá zakončena výrokem o shodě se specifikací [9], [10]. Tím se rozumí, že výsledky zkoušky jsou porovnány s údajem výrobce nebo uživatele zkoušeného stroje o velikosti maximální dovolené chyby E_{MPE}. Zkouška je tedy uzavřena výrokem, zda zkoušený SMS vyhovuje nebo nevyhovuje specifikaci. Příklad použití rozhodovacího pravidla o shodě resp. neshodě se specifikací je znázorněn na Obr. 23, kde jsou zobrazeny čtyři možné výsledky s nejistotami měření a nejistotami znázorněnými chybovými úsečkami. Pásmo shody se nalézá mezi červeně vyznačenými čarami E_{MPE} resp. $-E_{MPE}$. Pásmo neshody se pak nalézá vně intervalu specifikace stroje E_{MPE}.

- Případ 1 – výsledek měření je umístěn v pásmu shody včetně nejistoty měření

- Případ 2 – výsledek měření je umístěn v pásmu shody, avšak část nejistoty měření přesahuje pásma neshody. V tomto případě je možné, že se skutečná hodnota bude nacházet v pásmu neshody a dojde k chybnému přijetí výsledku.

- Případ 3 – je podobný případu 2, jen s tím rozdílem, že se výsledek nachází v pásmu neshody, avšak část nejistoty zasahuje do pásma shody. V tomto případě je možné, že se skutečná hodnota bude nacházet v pásmu shody a dojde k chybnému odmítnutí výsledku.

- Případ 4 – výsledek měření je umístěn v pásmu neshody včetně nejistoty měření



Obr. 23 Rozhodovací pravidlo shody/neshody

Z Obr. 23 je patrné, že čím bude menší nejistota (vyjádřená délkou chybových úseček) v porovnání se specifikací SMS (E_{MPE}), tím jednodušší bude i rozhodnutí o shodě, resp. neshodě. Pro případ provedení

zkoušky SMS Zeiss XENOS s E_{MPE} *= (0,3+1L) µm*, kde *L* je v metrech, bylo zadavatelem stanoveno, aby navrhované zařízení vykazovalo přibližně třikrát menší nejistotu měření, než je E_{MPE} zkoušeného stroje.

Maximální požadovanou nejistotou bude:

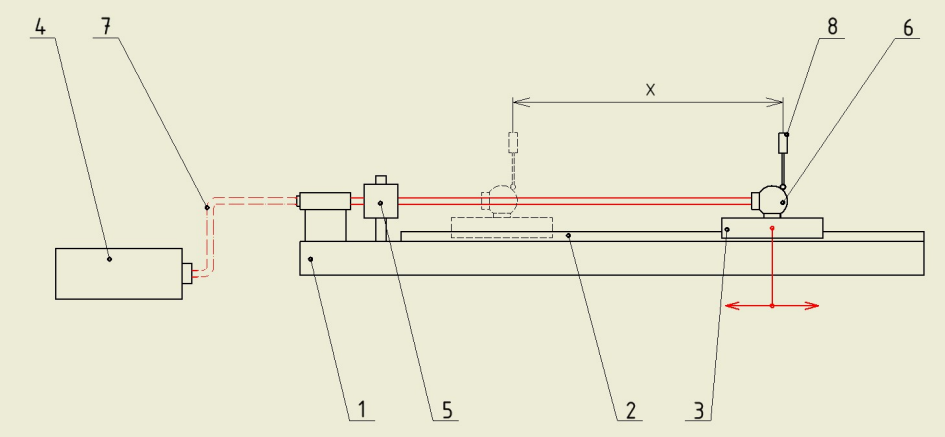
$$\boldsymbol{U_{max} = \ (0,1 + 0,35 \cdot L)\ [\mu m]} \qquad (1)$$

6.2 Varianty řešení

Zařízení bude fungovat na principu lineární osy umístěné na nosném loži. Vozík lineárního vedení se stolkem bude unášet koutový odražeč laserového interferometru umístěný v přesné lapované kouli, která má současně sloužit jako záměrný objekt (terč) pro měření zkoušeným strojem. V kapitole 7.2 je podrobně rozepsán výběr průřezu nosníku, který bude pro obě varianty společný. Dalším společným rysem předběžně volených variant byla rozvaha použití motorického, respektive ručního ovládání pojezdu stolku. Z důvodu snahy o omezení zdrojů tepla v měřicím prostoru bylo z užšího výběru (varianta 1 a varianta 2) vyloučeno použití motorického ovládání pojezdu stolku. Jediným odlišujícím prvkem variant zůstal způsob vedení signálu laserového interferometru (6.2.1 a 6.2.2).

6.2.1 Varianta 1

Varianta 1 využívá vedení signálu laserového interferometru pomocí optických vláken (Obr. 24). Toto řešení nabízí tu výhodu, že není třeba seřizovat paprsek LI při změně polohy zařízení v prostoru zkoušeného stroje. Nevýhodami jsou ztráta intenzity signálu, vyšší nejistota měření a díky nutnosti vřazení dalších optických prvků pro usměrnění světelného svazku do optických vláken i větší rozměry. Zvětšení optických prvků tedy zapříčiňuje zmenšení pracovního rozsahu zařízení. Hlavní nevýhodou je však fakt, že zvolení této varianty vyžaduje koupi laserového interferometru, který umožňuje použití optických vláken.

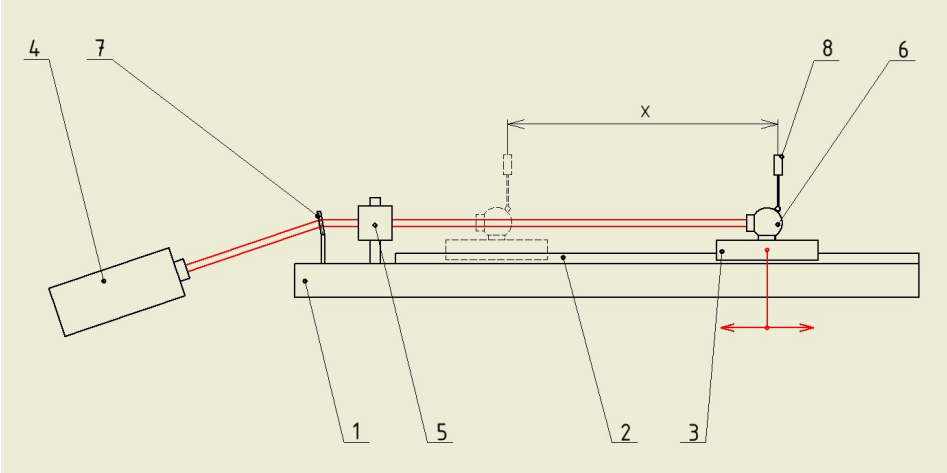


1 - lože
2 - lineární vedení
3 - stolek
4 - laserový interferometr
5 - dělič paprsku
6 - koutový odražeč
7 - optické vlákno
8 - sonda zkoušeného stroje
X - měřená vzdálenost

Obr. 24 Schéma varianty 1

6.2.2 Varianta 2

U varianty 2 (Obr. 25) je paprsek posílán oproti variantě 1 jen vzduchem. Výhodou tohoto řešení je, že odpadá příspěvek nejistoty měření a ztráta intenzity signálu vzniklá vedením optickým vláknem. Další výhodou je úspora prostoru, který u varianty 1 zabírá převodník signálu z optického vlákna do následujících optických prvků. Nejpodstatnější výhodou je využití laserového interferometru Renishaw, kterým je laboratoř ČMI již vybavena. Odpadá tedy nutnost vysoké investice do laserového interferometru, který je uzpůsoben k vedení signálu optickým vláknem. Oproti tomu je nevýhodou, že při každé změně polohy navrhovaného zařízení v rámci pracovního prostoru zkoušeného stroje je nutné znovu seřizovat paprsek laserového interferometru.



1 - lože
2 - lineární vedení
3 - stolek
4 - laserový interferometr
5 - dělič paprsku
6 - koutový odražeč
7 - zrcátko
8 - sonda zkoušeného stroje
X - měřená vzdálenost

Obr. 25 Schéma varianty 2

6.2.3 Srovnání a výběr vhodné varianty

Tab. 3 Srovnání variant návrhů

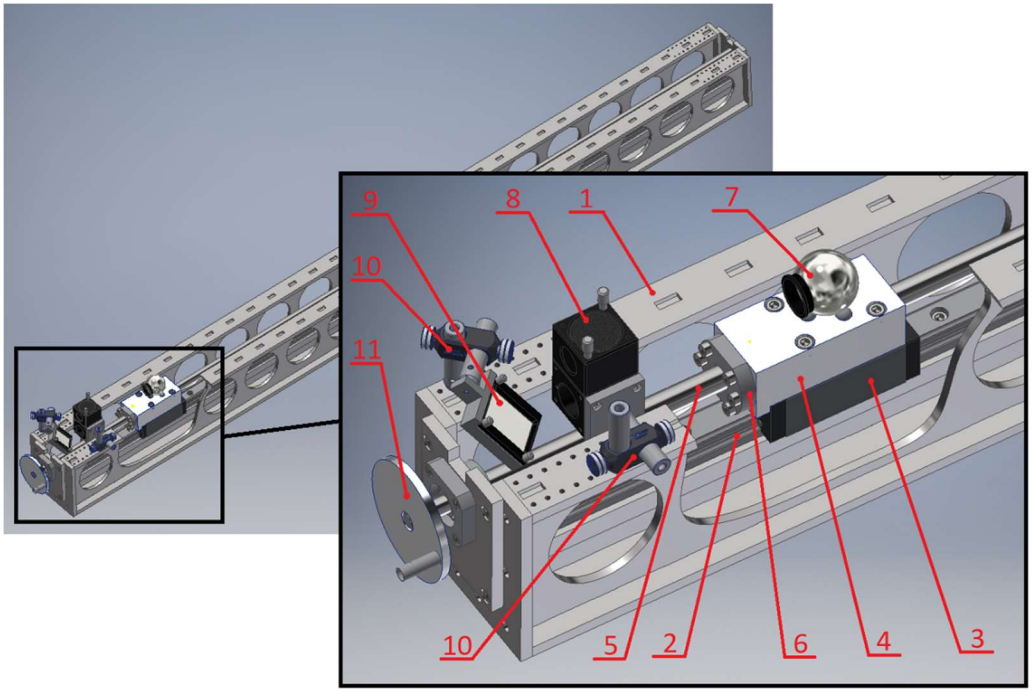
	Varianta 1 (optické vlákno)	**Varianta 2 (zrcátko)**
Výhody	-není potřeba seřízení paprsku LI pro každou polohu	-nižší nejistota -malé rozměry -nízká ztráta intenzity signálu -využití stávajícího LI Renishaw XL80
Nevýhody	-vyšší nejistota -ztráta intenzity signálu -nákup LI, který umožnuje vedení optickým vláknem -vyšší rozměry	-potřeba seřízení paprsku LI pro každou polohu

Z Tab. 3 vyplývá jako vhodnější výběr varianty 2, která používá vedení signálu laserového interferometru vzduchem (bez optického vlákna) se změnou směru paprsku pomocí zrcátka. Řešení vybrané varianty bude podrobně popsáno v následující kapitole.

7 Návrh zařízení

7.1 Popis konstrukce

Konstrukce zařízení pro zkoušky SMS a OS vybavených obrobkovou sondou je tvořeno nosným ložem, na kterém je umístěna vodicí kolejnice lineárního vedení. Po lineárním vedení pojíždí kuličkové hnízdo nesoucí pojezdový stolek. Rotační pohyb ručního pohonu je převáděn na posuvný pomocí kuličkového šroubu na matici připevněnou na stolek. Kuličkový šroub je na koncích lože uložen do valivých ložisek umístěných do ložiskových domků. Pojezdový stolek je vybaven lůžkem pro uchycení koutového odražeče. Lůžko je tvořeno třemi magnetickými koulemi vlepenými do otvorů ve stolku. Další optické prvky laserového interferometru (dělič paprsku, zrcátko) jsou připevněny k loži zařízení pomocí upínacích prvků Thorlabs [11] do otvorů se závity. Dílčí uzly zařízení a jednotlivé díly jsou podrobně popsány v kapitolách 7.2.6 až 7.7.



1 - lože
2 - lineární vedení
3 - kuličkové hnízdo
4 - pojezdový stolek
5 - kuličkový šroub
6 - kličková matice
7 – koutový odražeč LI
8 - dělič paprsku LI
9 - zrcadlo
10 - upínací prvky optiky
11 - ruční klička

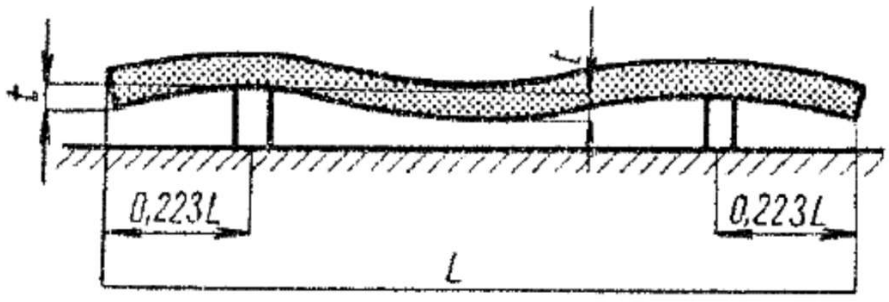
Obr. 26 Popis konstrukce

7.2 Návrh nosného lože

Základem konstrukce navrhovaného zařízení byl návrh nosného lože. Na základě níže uvedených požadavků na lože byly předběžně navrženy tři varianty průřezů nosníků (7.2.2 až 7.2.4). Každá z variant musela splňovat možnost montáže lineárního vedení a kuličkového šroubu způsobem, který bude zaručovat ochranu před mechanickým poškozením těchto součástí. Tím se rozumí zapuštění těchto důležitých uzlů mezi boční části nosného lože. Další vlastností, na kterou byl kladen důraz, byla maximální dovolená hmotnost zařízení. Ta byla stanovena na 50kg. Nejdůležitějším kritériem pro výběr průřezu nosného lože byla maximální eliminace průhybu nosníku. Předběžné návrhy byly vymodelovány pomocí software Autodesk Inventor Professional 2018 a byla posouzena jejich hmotnost. Metodou konečných prvků (MKP) v software Abaqus byla provedena analýza průhybů jednotlivých variant (7.2.2 až 7.2.4). V kapitole 7.2.5 je uvedeno srovnání těchto variant.

7.2.1 Analýza MKP

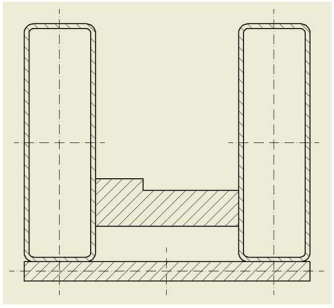
Pro analýzu pomocí metody konečných prvků (Obr. 29, Obr. 31 a Obr. 33) bylo nejprve třeba stanovit společné podmínky pro všechny varianty řešení nosného lože. Těmi bylo určení způsobu zatížení a volba okrajových podmínek. Vzhledem k faktu, že hmotnosti pohyblivých částí (kuličkový šroub, kuličková matice, pojezdový stolek a koutový odražeč) jsou oproti hmotnosti nosného lože zanedbatelné, nebyly tyto hmoty do analýzy MPK uvažovány. Analýza se tak zabývala jen spojitým zatížením od vlastní tíhy nosníku. Okrajové podmínky byly z důvodu zjednodušení MKP analýzy pro výběr vhodného průřezu definovány podepřením na koncích nosníků. U nosníku, který vykazoval nejmenší průhyb, byla analýza provedena i s podepřením v tzv. Besselových bodech (Obr. 27). Při podepření v Besselových bodech vykazuje nosník minimální průhyb.



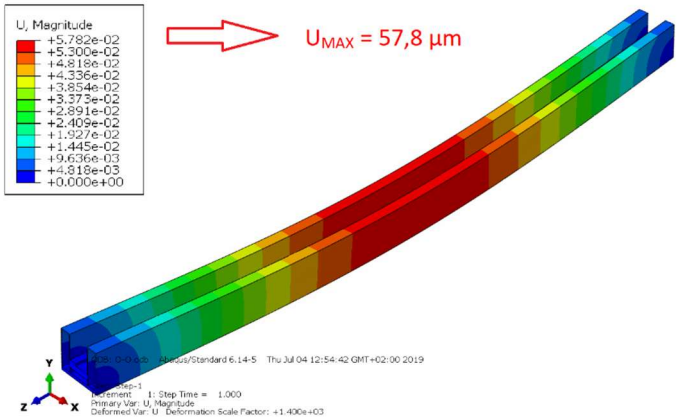
Obr. 27 Podepření v Besselových bodech [12]

7.2.2 Nosný profil O-O

Nosný profil O-O (Obr. 28) byl navržen jako svařenec základové desky, dvou bočnic tvořených dvěma trubkami obdélníkového průřezu a desky pro uložení kolejnice lineárního kuličkového vedení.



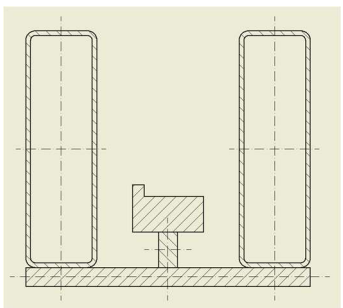
Obr. 28 Nosný profil O-O



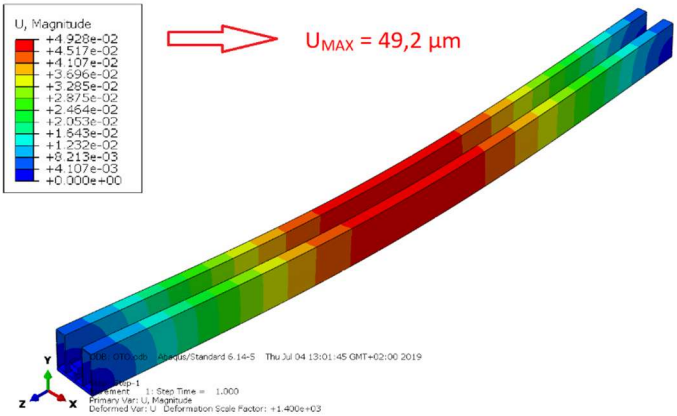
Obr. 29 MKP analýza nosného profilu O-O

7.2.3 Nosný profil OTO

Nosný profil OTO (Obr. 30) byl navržen jako svařenec základové desky, dvou bočnic tvořených dvěma trubkami obdélníkového průřezu a T-profilu pro uložení kolejnice lineárního kuličkového vedení.



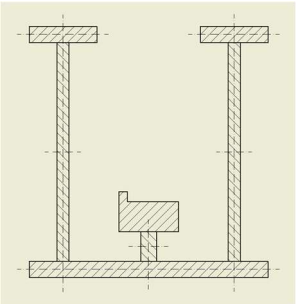
Obr. 30 Nosný profil OTO



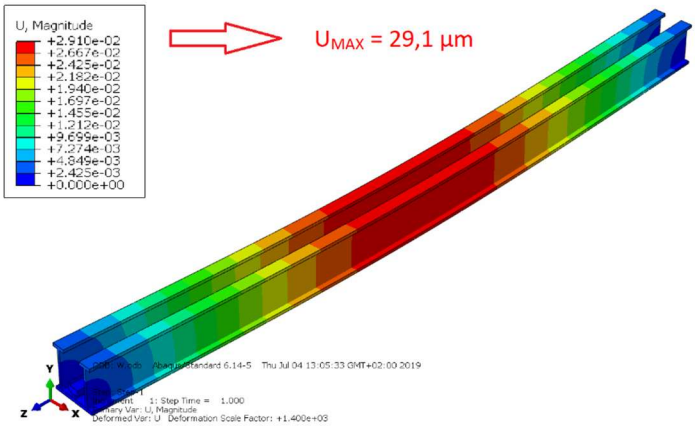
Obr. 31 MKP analýza nosného profilu OTO

7.2.4 Nosný profil W

Nosný profil W (Obr. 32) byl navržen jako svařenec bez využití dutých hutních polotovarů, jako v případě předešlých variant profilů.



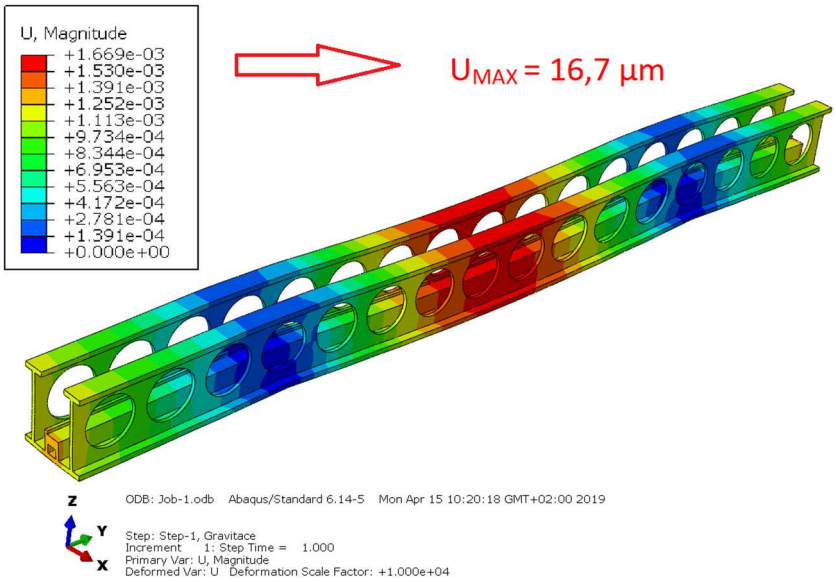
Obr. 32 Nosný profil W



Obr. 33 MKP analýza nosného profilu W

7.2.5 Srovnání a výběr nosného profilu

Z MKP analýzy byly získány hodnoty průhybů jednotlivých variant nosných profilů. Na základě srovnání těchto variant (Tab. 4) byl jako nejvhodnější zvolen profil W, který vykazoval výrazně nejmenší průhyb. Z důvodu nejvyšší hmotnosti tohoto nosníku bylo nutné vytvořit odlehčovací otvory v bočnicích nosníku a provést znovu analýzu průhybu pomocí MKP. Okrajové podmínky byly definovány podepřením v Besselových bodech, aby byl zjištěn průhyb, který bude nosný profil vykazovat během reálného provozu navrženého zařízení. Výsledek MKP analýzy finální verze nosného profilu W_{FIN} je znázorněn na Obr. 34.



Obr. 34 MKP analýza finální verze nosného profilu W

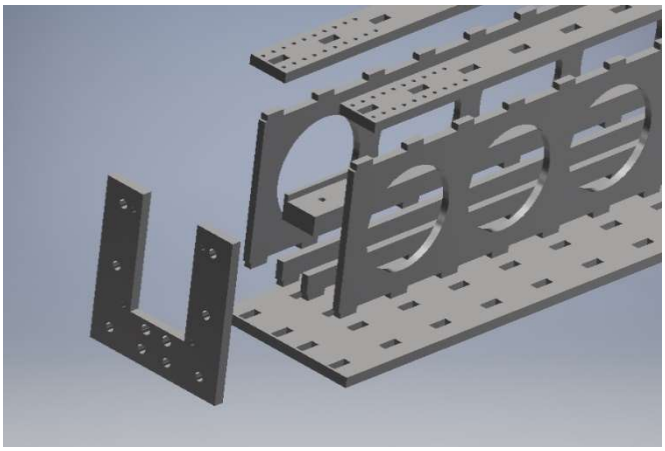
Tab. 4 Srovnání variant nosného profilu

Profil	Hmotnost [kg]	Maximální průhyb [µm]
OoO	45,6	57,8
OTO	39,3	49,3
W	52,8	29,1
W_{FIN}	43,5	16,7

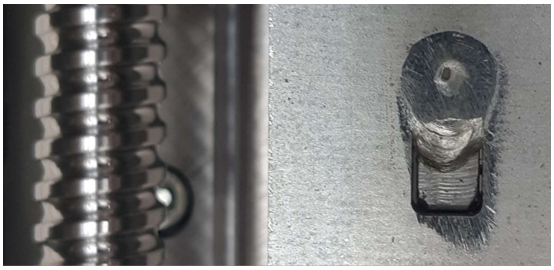
7.2.6 Nosné lože

Na základě MKP analýzy (7.2.1) byl pro nosné lože vybrán profil W (7.2.5). Ten byl navržen jako svařenec z ocelových plechů tloušťky 6 mm a 8 mm. Jednotlivé díly budou vyrobeny pomocí technologie laserového řezání. Součásti svařence byly koncipovány tak, aby se daly sesadit do celku pomocí zámků zapadajících do připravených otvorů protikusu (Obr. 35). Svaření nosného lože bude provedeno

technologií MIG. Bude použito děrových svarů v otvorech sesazovacích zámků. Nebude tedy použito koutových svarů, které by vedly k deformacím svařence. Díky využití děrových svarů (Obr. 36) bude také značně eliminováno zabrušování svařence. Povrchová úprava bude zajištěna galvanickým zinkováním. Práce na výrobě nosného lože bude dokončena obrobením funkčních ploch.



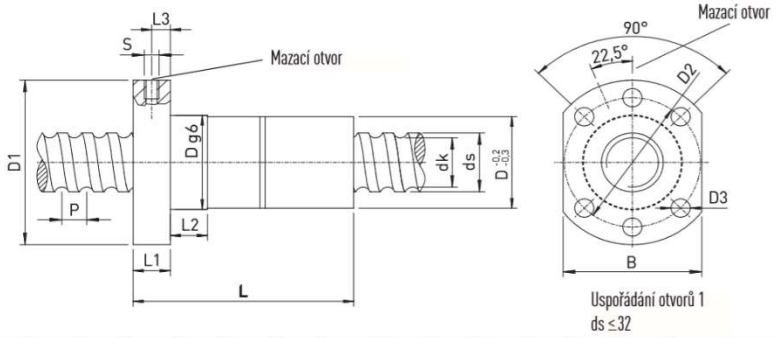
Obr. 35 Způsob sesazení nosného profilu před svařováním



Obr. 36 Detail svaru

7.3 Kuličkový šroub

Pro převod rotačního pohybu ručního ovládání na posuvný pohyb pojezdového stolku byl zvolen kuličkový šroub (Obr. 37) od firmy Hiwin s.r.o. Jde o přesně okružovaný kuličkový šroub [12] s dvojitou předepjatou přírubovou maticí o jmenovitém průměru 16 mm a stoupání 5 mm. Matice je vybavena maznicí pro připojení mazacího lisu. Díky odlehčovacím otvorům v bocích nosného lože je maznice dobře přístupná. Výrobcem kuličkového šroubu je doporučeno mazání tukem Hiwin PLO-05. Návrhové výpočty šroubu nebyly z důvodu jeho minimálního zatížení provedeny.

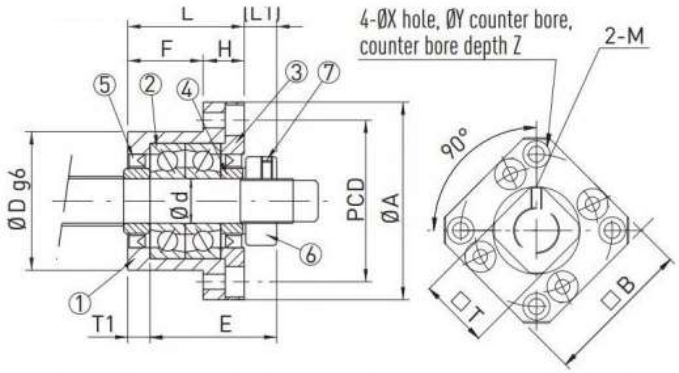


Označení	ds	P	D	D1	D2	D3	Uspořádání otvorů	L	L1	L2	L3	S	B	dk	C_{dyn} [N]	C_0 [N]	Hmotnost [kg]
DDB1605-R-3EF	16	5	28	48	38	5.5	1	80	10	10	5	M6	40	13.5	9600	12700	0.25

Obr. 37 Kuličkový šroub [12]

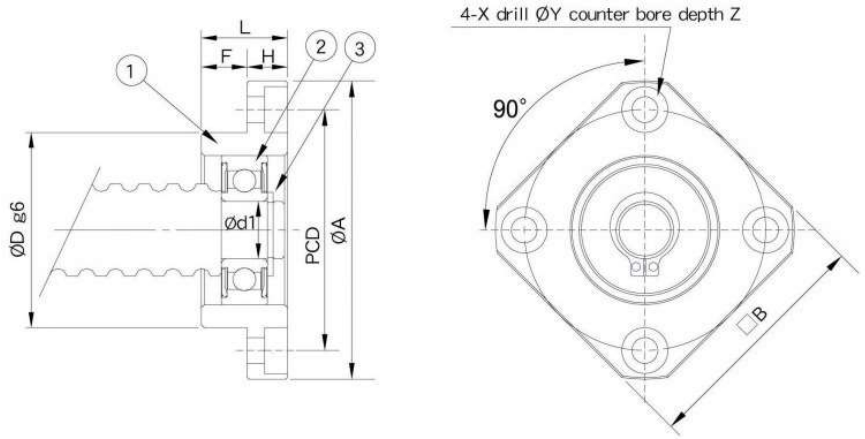
7.3.1 Uložení kuličkového šroubu

Pro uložení kuličkového šroubu byla zvolena na začátku dvojice axiálně upevněných kuličkových ložisek a na konci jedno kuličkové ložisko uvolněné v axiálním směru [13]. Pro uložení obou konců kuličkového šroubu bylo zvoleno použití zakrytovaných ložisek bez nutnosti dodatečného mazání. Parametry ložiskových domků a označení ložisek jsou uvedeny na Obr. 38 a Obr. 39.



Označení	Velikost šroubu	Ød1	L	H	F	E	ØDg6	ØA	PCD	B	L1	T1	L2	T2	X	Y	Z	M	T	Opracování konce	Ložisko
FK-12	16	12	27	10	17	29.5	36	54	44	44	7.5	5.0	8.5	6.0	4.5	8.0	4	M4	19	E2F-12	7001A

Obr. 38 Uložení začátku kuličkového šroubu [13]

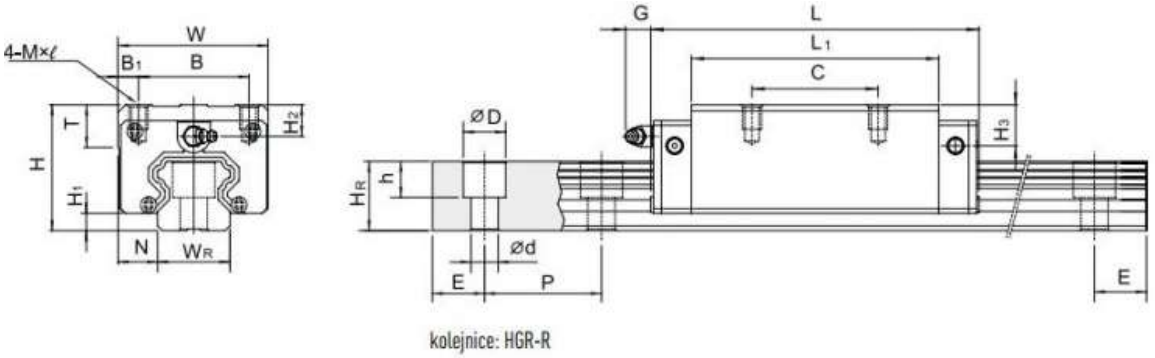


Označení	Velikost šroubu	Ød1	L	H	F	ØDg6	ØA	PCD	B	X	Y	Z	Opracování konce	Ložisko
FF- 12	16	10	15	7	8	34	52	42	42	4.5	8.0	4.0	E5F- 12	6000ZZ

Obr. 39 Uložení konce kuličkového šroubu [13]

7.4 Lineární vedení

Zajištění přesného přímočarého pohybu stolku zařízení bude realizováno pomocí lineárního kuličkového vedení (Obr. 40) se čtyřmi okruhy kuliček [14]. Velikost kolejnice vedení je 25 mm. Kuličkové hnízdo je výrobcem uzpůsobeno pro horní montáž. Výrobcem lineárního vedení je doporučeno mazání tukem Hiwin PLO-05. Maznice je dobře přístupná odlehčovacími otvory v bocích nosného lože. Návrhové výpočty, podobně jako v případě kuličkového šroubu, nebyly z důvodu minimálního zatížení provedeny.

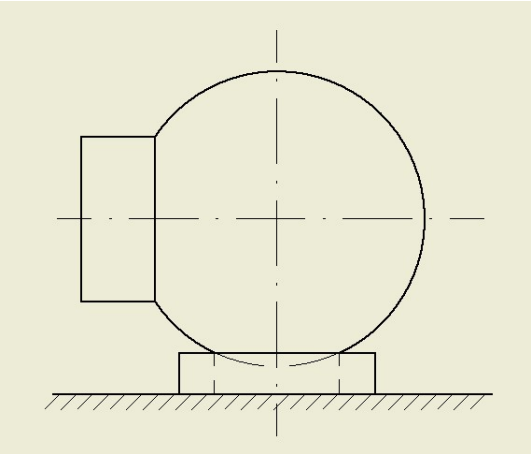


Označení	H	W	B	C	L	M x l	C_{dyn}[N]	C_{stat}[N]
HGH 25 HA	40	48	35	50	103,6	M6x8	32750	49440

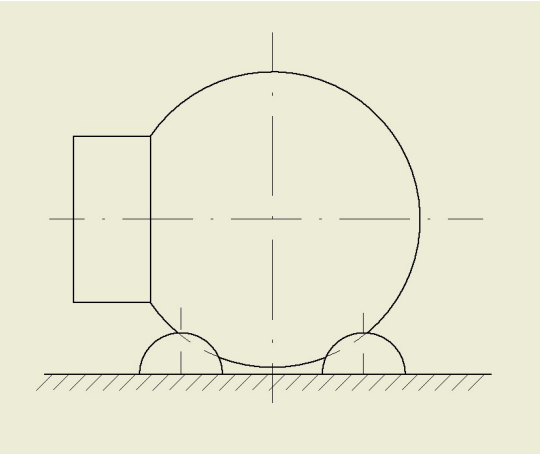
Obr. 40 Lineární kuličkové vedení [14]

7.5 Pojezdový stolek

Pojezdový stolek bude uzlem spojujícím matici kuličkového šroubu a kuličkové hnízdo lineárního vedení. Z důvodu snížení hmotnosti byl navržen jako díl frézovaný ze slitiny hliníku. Další funkcí pojezdového stolku je uložení koule koutového odražeče. Pro uložení koutového odražeče byly navrženy dvě varianty lůžek. První varianta (Obr. 41) byla reprezentována silným neodymovým magnetem tvaru kotouče s otvorem uprostřed. Koule koutového odražeče byla v tomto případě posazena do díry. Druhá varianta (Obr. 42) spočívala v připevnění tří neodymových kuliček po 120°, do kterých byla následně posazena koule koutového odražeče. Obě varianty byly pevně upnuty na stůl souřadnicového měřicího stroje Zeiss Xenos. Následně byly obě varianty podrobeny experimentu, jehož účelem bylo zjistit stabilitu uložení koutového odražeče v lůžku. Při experimentu byly pomocí souřadnicového měřicího stroje Zeiss Xenos snímány body z povrchu koule snímací silou dotekové sondy o hodnotě 150 mN a současně byly měřeny změny rychlosti pomocí laserového interferometru spuštěného v dynamickém režimu. Z tohoto experimentu vyšla lépe druhá varianta, při které byly zjištěny řádově menší změny rychlosti koutového odražeče vzniklé působením přítlačné síly doteku stroje.



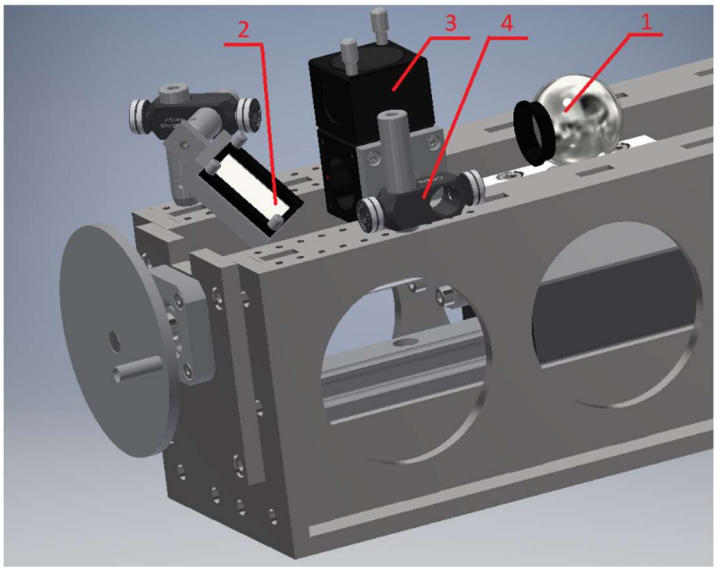
Obr. 41 Magnet s otvorem uprostřed



Obr. 42 Vybraná varianta - trojice magnetických kuliček

7.6 Laserový interferometr s optickými prvky

Pro odměřování na navrženém zařízení bude použit laserový interferometr Renishaw, složený z laserové hlavice XL 80 a jednotky pro kompenzaci vlivu prostředí XC 80. Tento systém bude doplněn optickými prvky pro lineární měření, které se budou upínat na navrhované zařízení pomocí upínacích prvků Thorlabs (Obr. 43) [11]. Optické prvky budou doplněny o zrcátko s možností přesného naklápění kolem dvou os a koutovým odražečem umístěným v přesné lapované kouli. Koule bude sloužit jako záměrný objekt (terč) pro dotykové snímání pomocí SMS a zároveň jako koutový odražeč laserového interferometru. Kulovitost koule je 1,2 µm a odchylka středu koutového odražeče od středu koule je 0,8 µm. Velkou výhodou použití záměrného objektu v kombinaci s koutovým odražečem je totožná osa měření SMS a LI. Zrcátko bude sloužit pro změnu směru paprsků laserového interferometru při měření prostorových úhlopříček v pracovním prostoru SMS.



1 – koutový odražeč v kombinaci s koulí

2 – zrcátko

3 – optické prvky Renishaw

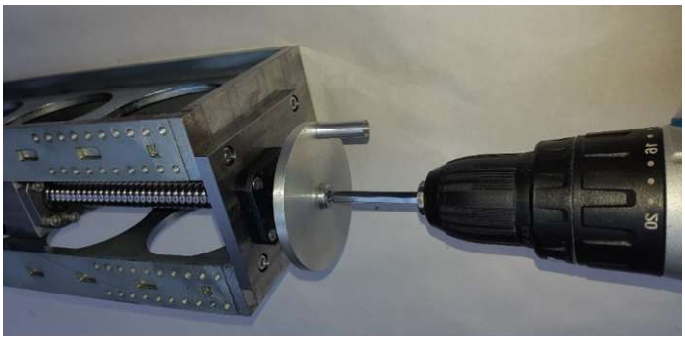
4 – upínací prvky Thorlabs

Obr. 43 Upnutí optických prvků

7.7 Ruční ovládání

Jak již bylo uvedeno v kapitole (3.2), bylo kvůli omezení vlivu tepla v prostoru měření upřednostněno ruční ovládání před variantou zabudování pohonu motorem. Při seřizování rovnoběžnosti paprsku laserového interferometru s lineárním vedením je potřeba opakovaně přejíždět ze začátku rozsahu zařízení na jeho konec, což je při použití ručního ovládání značně časově náročné. Z tohoto důvodu byla

navržena ruční klička s rozhraním pro rychlé připojení akumulátorové vrtačky (Obr. 44). Pohon akumulátorovou vrtačkou je však pouze pro účely seřizování paprsku laserového interferometru. V režimu měření tento způsob pohonu nebude z důvodu přenosu vibrací z akumulátorové vrtačky do zařízení přípustný.

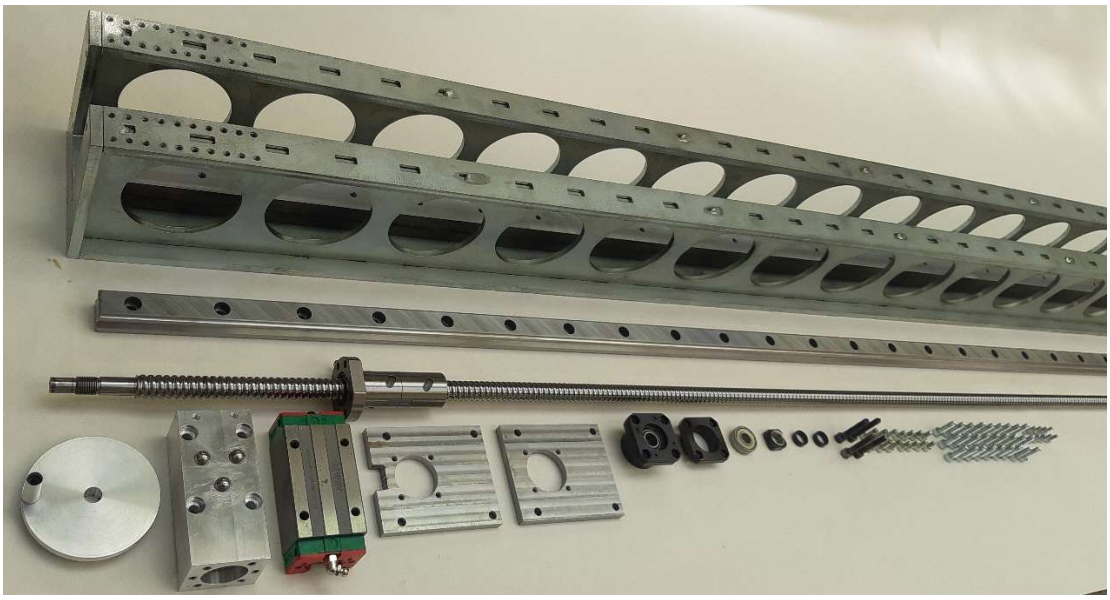


Obr. 44 Ruční klička s možností připojení pohonu

8 Realizace

8.1 Výroba zařízení

Při návrhu zařízení byl kladen důraz nejen na správnou funkci zařízení, ale i na jeho maximální jednoduchost a možnost výroby dostupnými technologiemi. Podrobný popis výroby součástí (Obr. 45) je rozepsán v kapitolách 8.1.1, 8.1.2 a 8.1.3.



Obr. 45 Součásti zařízení

8.1.1 Výroba nosného lože

Nosné lože bylo navrženo jako svařenec z ocelových pásnic. Ty byly získány pomocí technologie laserového řezání ve firmě Power Tech spol. s r.o. Následně byly tyto pásnice v zámečnictví Jaroslav Wildhaber sesazeny a svařeny pomocí svařovací technologie MIG. Povrchová úprava galvanickým zinkováním byla dodána firmou STS Praha-Hostivice s.r.o. Výroba nosného lože byla finalizována obrobením funkčních ploch na obráběcím centru ve Strojírně TYC, s.r.o.

8.1.2 Výroba kuličkového šroubu

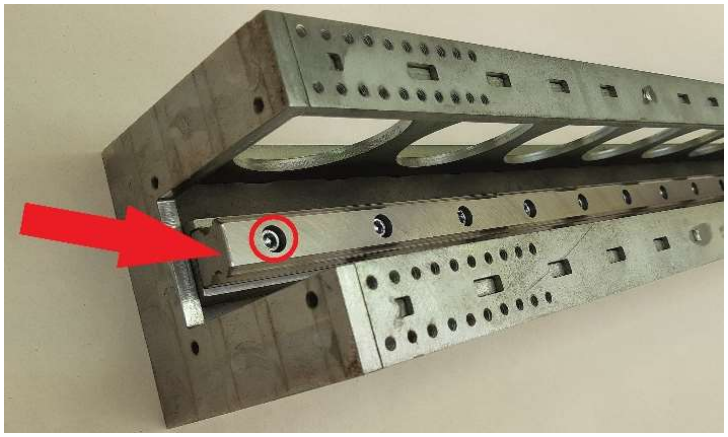
Kuličkový šroub byl objednán u firmy HIWIN s.r.o. Jde o přesně okružovaný kuličkový šroub. Na základě zvoleného uložení šroubu bylo dodavatelem provedeno opracování konců dle specifikace katalogového listu (Obr. 38 a Obr. 39).

8.1.3 Výroba drobných součástí

Výroba jednoduchých drobných dílů (ruční klička, upínací prvky optických prvků laserového interferometru) byla realizována pomocí konvenčních obráběcích strojů v dílnách ČMI. Složitější díly (pojezdový stolek, přední a zadní krytka), vyžadující CNC obrábění byly vyrobeny a dodány firmou ProfmultiTec s.r.o.

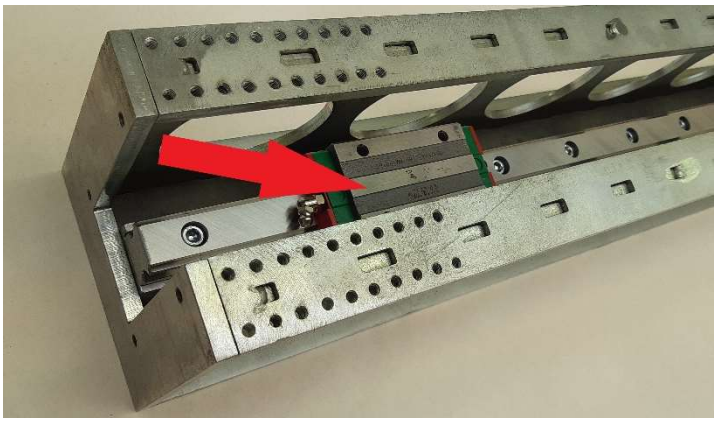
8.2 Montáž

Pro správný a přesný chod lineárního vedení a kuličkového šroubu navrženého zařízení je klíčový správný postup montáže. Jednotlivé kroky postupu jsou stručně shrnuty v obrazovém průvodci montáže (Obr. 46 až Obr. 64) ve sledu, jak byly provedeny v dílnách ČMI.



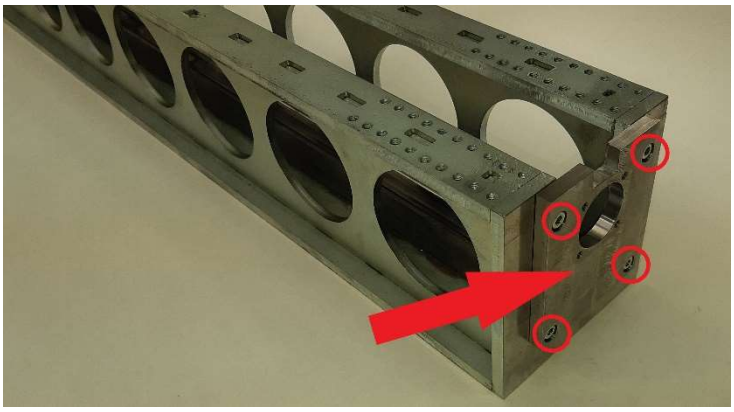
Upevnění kolejnice lineárního vedení na nosné lože pomocí 27 šroubů M6x30.

Obr. 46 Krok montáže 1



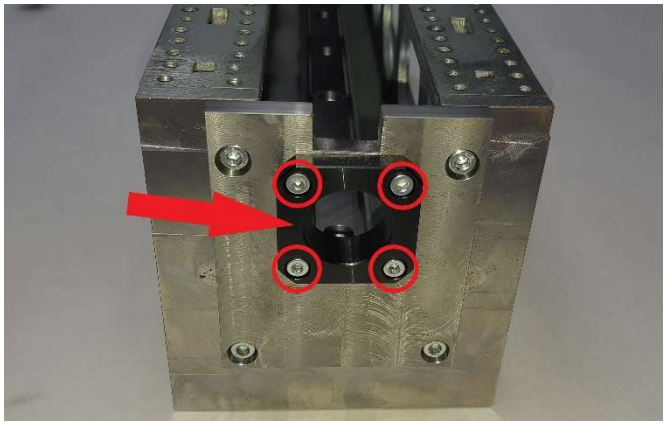
Navléknutí kuličkového hnízda lineárního vedení na kolejnici

Obr. 47 Krok montáže 2



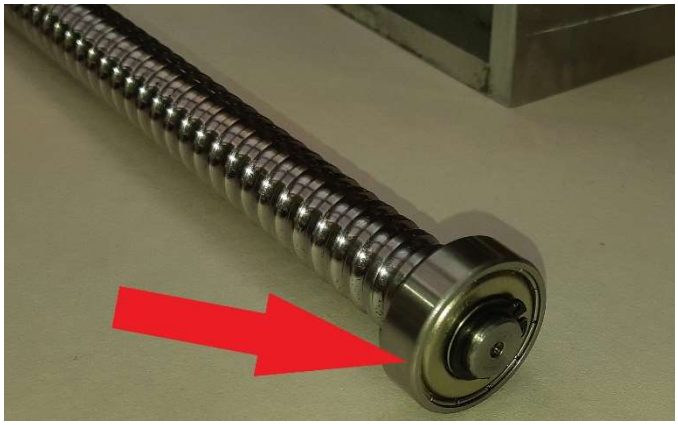
Volné přišroubování zadní krytky na nosné lože pomocí 4 šroubů M5x10

Obr. 48 Krok montáže 3



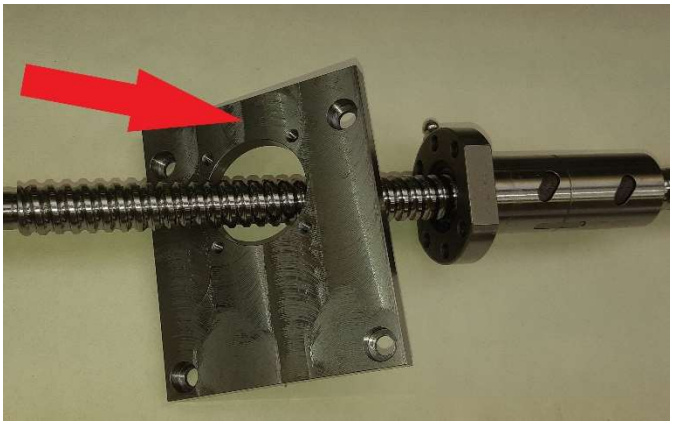
Přišroubování ložiskového domku do zadní krytky pomocí 4 šroubů M4x12

Obr. 49 Krok montáže 4



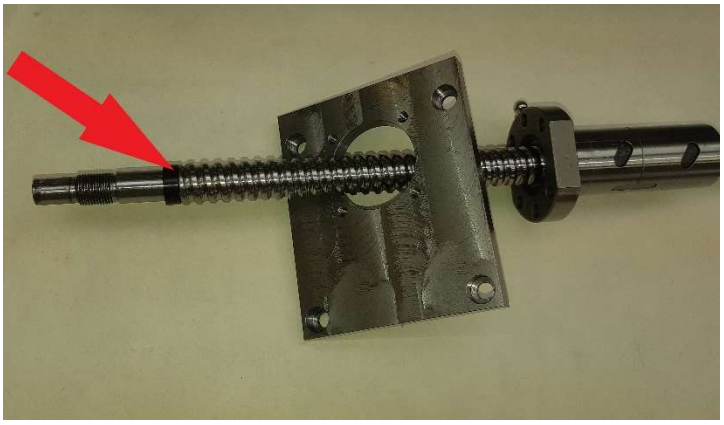
Nalisování zadního ložiska na kuličkový šroub a zajištění pojistným kroužkem

Obr. 50 Krok montáže 5



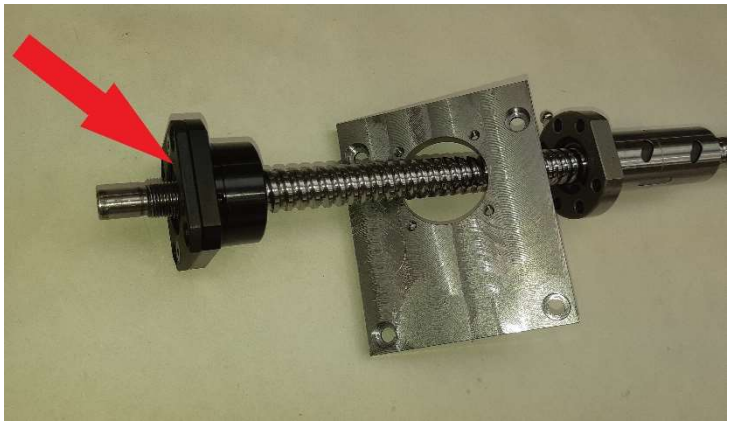
Navléknutí přední krytky na kuličkový šroub

Obr. 51 Krok montáže 6



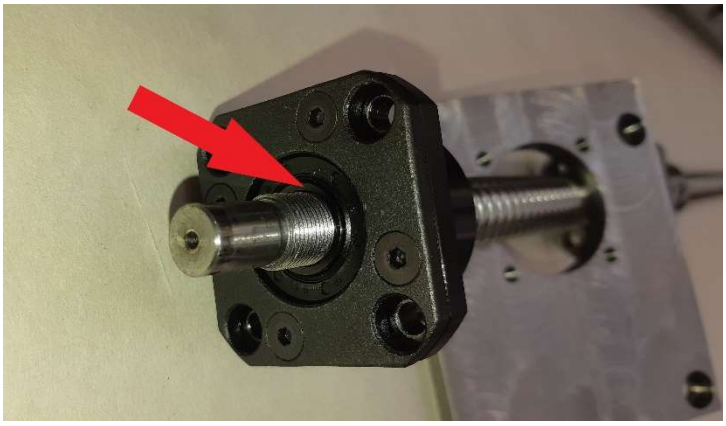
Nasazení distanční podložky po konec osazení kuličkového šroubu

Obr. 52 Krok montáže 7



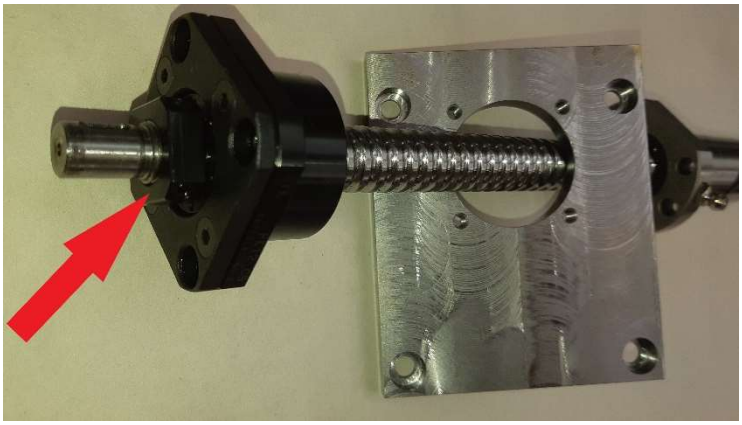
Nalisování předních ložisek s ložiskovým domkem na kuličkový šroub po distanční podložku

Obr. 53 Krok montáže 8



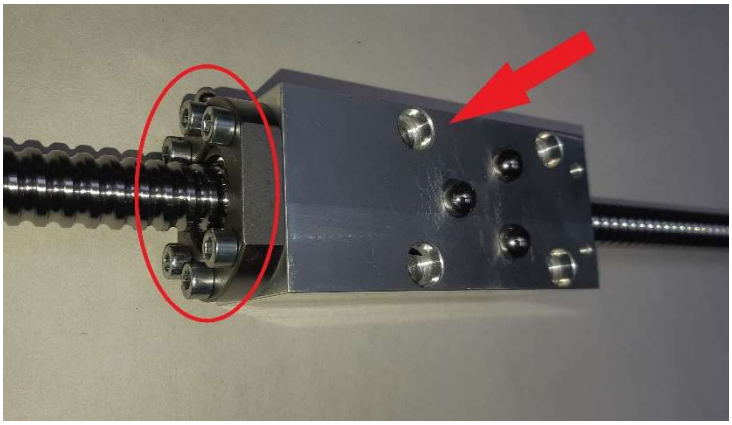
Nasazení distanční podložky na kuličkový šroub po vnitřní kroužek předního ložiska

Obr. 54 Krok montáže 9



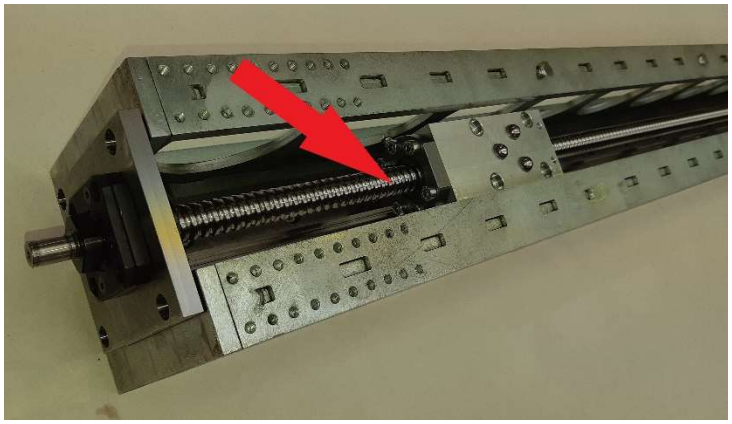
Našroubování pojistné matice kuličkového šroubu a její zajištění pomocí 2 stavěcích šroubů M4x5

Obr. 55 Krok montáže 10



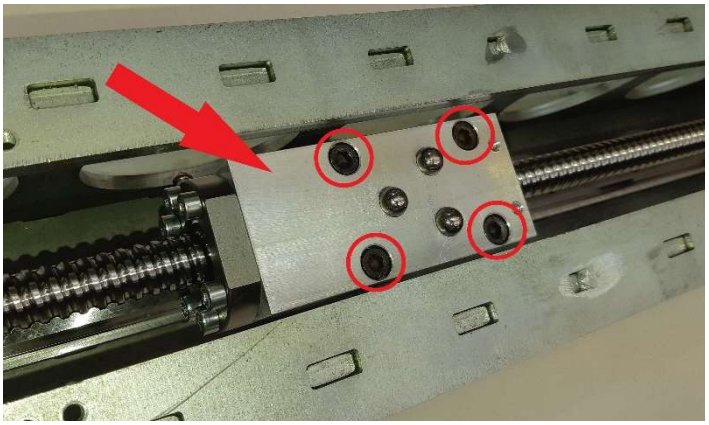
Navléknutí pojezdového stolku na matici kuličkového šroubu a přišroubování k přírubě pomocí 6 šroubů M5x20

Obr. 56 Krok montáže 11



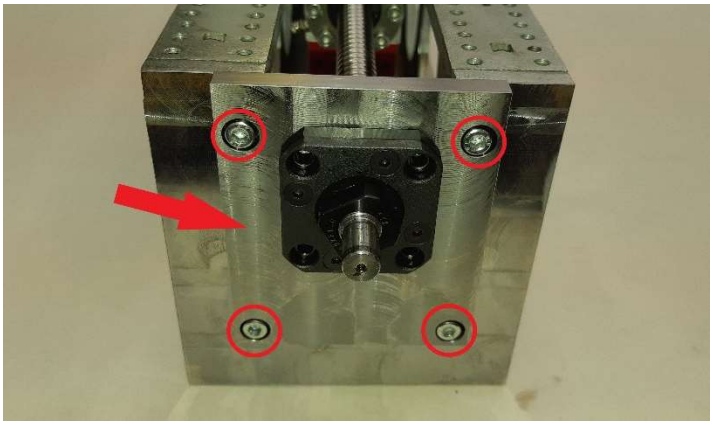
Vložní kuličkového šroubu do lože.

Obr. 57 krok montáže 12



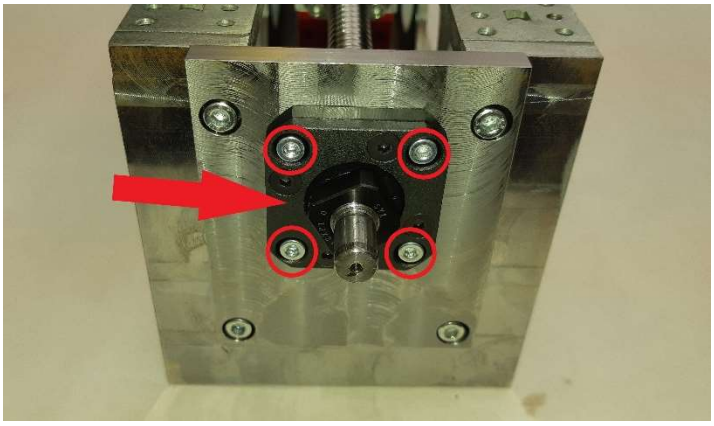
Přišroubování pojezdového stolku ke kuličkovému hnízdu lineárního vedení pomocí 4 šroubů M6x35

Obr. 58 Krok montáže 13



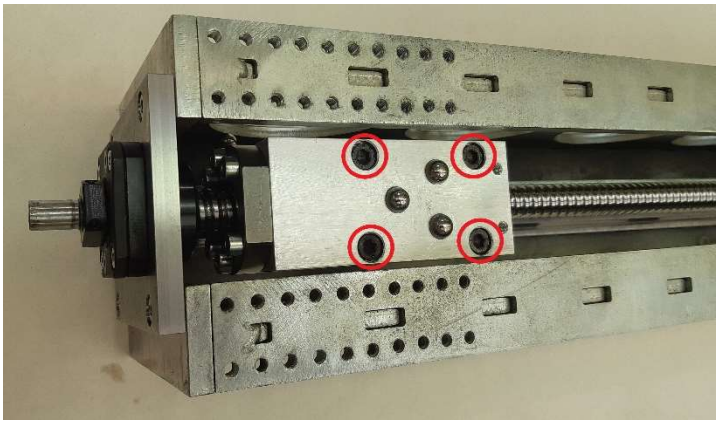
Volné přišroubování přední krytky na nosné lože pomocí 4 šroubů M5x10

Obr. 59 Krok montáže 14



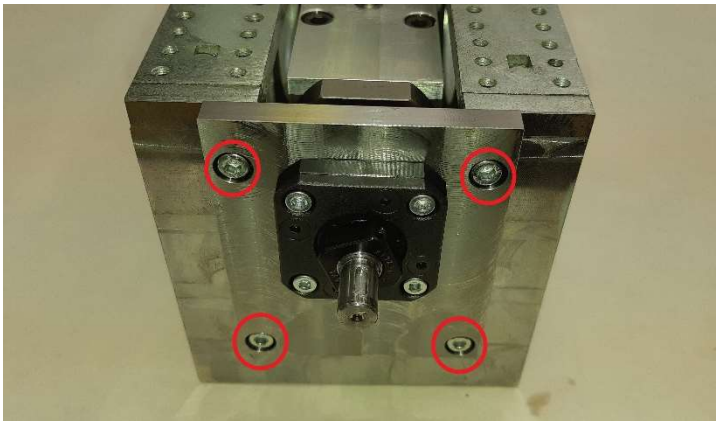
Přišroubování předního ložiskového domku 4 šrouby M4x12.

Obr. 60 Krok montáže 15



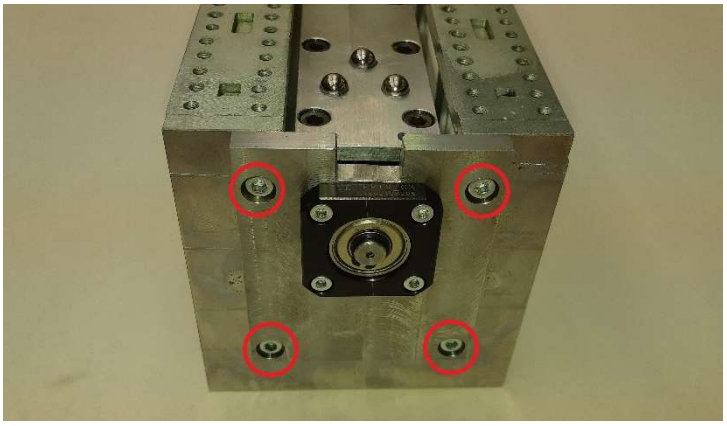
Přejezd na začátek rozsahu lineárního vedení a dotažení 4 šroubů M6x35 stolku

Obr. 61 Krok montáže 16



Dotažení 4 šroubů M5x10 přední krytky

Obr. 62 Krok montáže 17



Přejezd na konec rozsahu lineárního vedení a dotažení 4 šroubů M5x10 zadní krytky

Obr. 63 Krok montáže 18

Nasazený ruční kličky na konec kuličkového šroubu a jeho zajištění pomocí stavěcího šroubu M4x5

Obr. 64 Krok montáže 19

9 Experiment

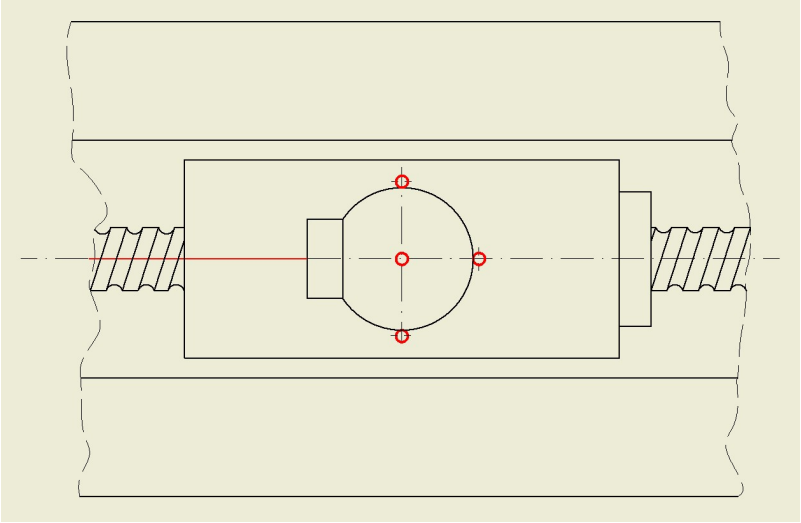
Experiment se skládá ze dvou hlavních částí. První částí je samotná metoda zkoušky SMS (6.1), druhou částí je verifikace této metody. Verifikace metody měla za úkol potvrzení rozpočtu nejistoty měření navrženého zařízení. Předmětem zkoušky bude SMS Zeiss XENOS (Obr. 65). Jde o vysoce přesný souřadnicový měřicí stroj mostové konstrukce, kterým je vybavena laboratoř ČMI.

Obr. 65 SMS Zeiss XENOS

9.1 Metoda měření SMS

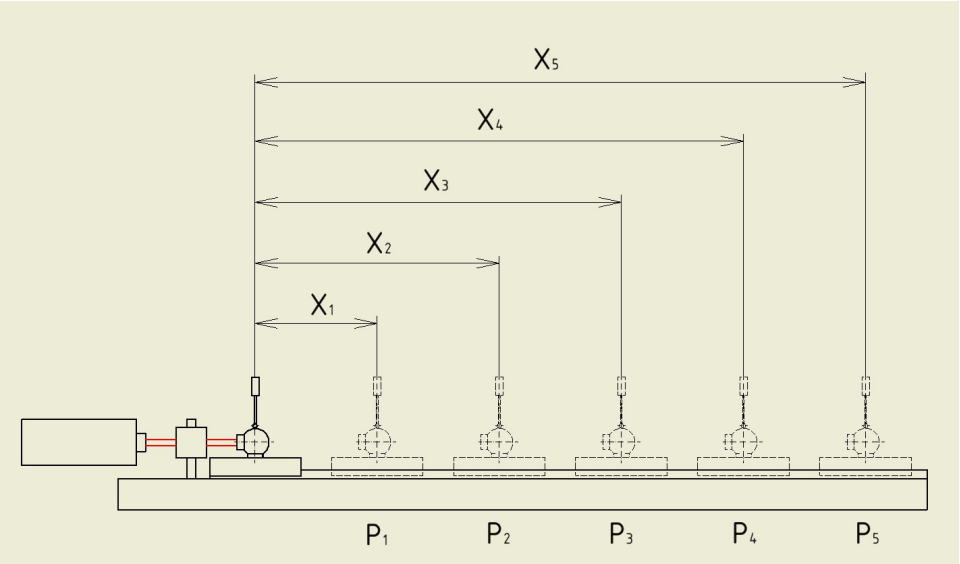
Metoda měření je odvozena od doporučení normy ISO 10360.2 [2]. Norma popisuje zmapování chyb měření v pracovním prostoru stroje nasnímáním pěti měřených délek v sedmi polohách. Konkrétně v osách *X, Y* a *Z* a čtyřech prostorových diagonálách. Měření v každé poloze musí být třikrát opakováno. V případě tohoto experimentu měření proběhlo v sedmi polohách, avšak měření v ose Z, z důvodu obtížného ustavení navrženého zařízení, bylo nahrazeno úhlopříčkou v rovině YZ. Neznamená to, že vliv nepřesnosti osy Z nebyl v měření zohledněn. Tento vliv se totiž projevuje i během měření v této poloze a také během měření ve směru diagonál pracovního prostoru.

Měření v jedné poloze (např. Osa *X*) spočívá v zaznamenání alespoň pěti zkušebních délek pomocí zkoušeného SMS [2]. Délky jsou dány roztečí středů koulí koutového odražeče v jeho jednotlivých polohách. Souřadnice středů koulí jsou vypočítány ze sejmutých bodů na povrchu koule pomocí software zkoušeného SMS. Koule je vždy v každé poloze určena čtyřmi body, z čehož jsou tři body umístěny na rovníku a zbylý na pólu koule. Schéma distribuce bodů po povrchu koule je znázorněno na Obr. 66.



Obr. 66 Distribuce snímacích bodů (pohled na koutový odražeč shora)

Referenční hodnoty (Obr. 67) pro porovnání naměřených dat jsou reprezentovány délkami změřenými pomocí laserového interferometru, který je součástí navrhovaného zařízení. Jde o rozteče středů (X_1 až X_5) koutového odražeče v jednotlivých polohách (p_1 až p_5).



Obr. 67 Schéma snímání poloh koutového odražeče

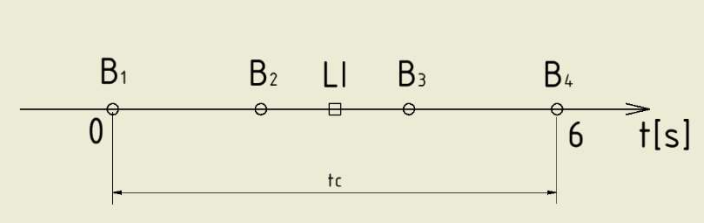
9.1.1 Vliv driftu

Driftem se rozumí změna délky za určitý čas, která vznikla vlivem teplotní dilatace materiálu. V průběhu prováděných zkušebních měření byl zjištěn délkový drift v řádu stovek nm/min. Vliv tohoto driftu lze dělit do dvou skupin podle času, během kterého drift působí:

- **Krátkodobý**
- **Dlouhodobý**

Krátkodobý drift působí pouze během snímání polohy koule koutového odražeče. Díky analýze driftu a zvolení vhodné časové strategie snímání lze vliv tohoto driftu minimalizovat. Tato strategie spočívá ve vhodné časové synchronizaci sejmutí bodů na povrchu koule a sejmutí hodnoty měřené laserovým interferometrem. Pro získání nulového krátkodobého driftu by v ideálním případě bylo potřeba sejmout souřadnice středu pomocí laserového interferometru i zkoušeného stroje v naprosto stejném čase. Vzhledem k faktu, že k určení souřadnic středu koule je třeba sejmutí čtyř bodů, to není možné. Doba snímání těchto bodů na povrchu koule je 6 s. Sejmutí hodnoty pomocí laserového interferometru trvá přibližně 0,5 s. Nejvhodnějším způsobem časové synchronizace je tedy sejmutí prvních dvou bodů,

následné sejmutí hodnoty laserového interferometru a nakonec sejmutí zbylých dvou bodů koule, jak je znázorněno na časové ose (Obr. 68).



t_c – celkový čas snímání

• - snímání bodů na kouli (B_1, B_2, B_3, B_4)

□ – sejmutí hodnoty LI

Obr. 68 Časová synchronizace snímání

Dlouhodobý drift je uvažován jako změna vzdálenosti, která probíhá v čase mimo snímání. Například může jít o čas přejezdu koutového odražeče na další kalibrovanou délku nebo jinou časovou prodlevu. Vzhledem k tomu, že tato změna je neustále zaznamenávána pomocí laserového interferometru nemá tento drift žádný vliv na přesnost měření.

9.2 Verifikace metody

Pro verifikaci metody byl zvolen postup pro mezilaboratorní porovnávací zkoušku (MPZ). Jde o postup, kde je porovnáváno měření prověřované laboratoře s měřením referenční, tzv. pilotní laboratoře. Pilotní laboratoř tak poskytuje referenční data, se kterými jsou porovnávána data prověřované laboratoře. Referenční data byla v tomto případě získána z kalibrace souřadnicového měřicího stroje Zeiss Xenos, provedené v květnu 2019 v rámci pravidelné údržby a seřízení stroje. Tato kalibrace byla provedena pomocí *1D* kalibračního artefaktu a to stupňové měrky ze Zeroduru. Tento materiál se vyznačuje nulovým koeficientem teplotní roztažnost, čímž je eliminován vliv variace teploty, který je hlavním vstupem do nejistoty kalibrace referenční laboratoře. Referenční laboratoř má mít v MPZ nižší hodnotu nejistoty měření, což bylo díky tomuto faktu umožněno. MPZ je založeno na vyhodnocení tzv. normalizované chyby E_N (E_N - kritérium hodnocení), která je dána vztahem:

$$E_N = \frac{|X_{lab} - X_{ref}|}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}} \leq 1 \qquad (2)$$

kde:

E_N……..normalizovaná chyba

X_{lab}……naměřená hodnota chyby prověřované laboratoře

X_{ref}.....referenční hodnota chyby

U_{lab}……rozšířená nejistota měření prověřované laboratoře

U_{ref}…… rozšířená nejistota měření referenční laboratoře

Jako výsledek porovnání slouží k posouzení hodnota normalizované chyby E_N.

$E_N < 1$ …… laboratoř v MPZ uspěla

$E_N > 1$ ……laboratoř v MPZ neuspěla

Na základě výsledku kritéria hodnocení E_N může prověřovaná laboratoř upravovat svoji nejistotu měření. Pokud je $E_N < 0,5$, pak je zřejmé, že laboratoř při výpočtu nebo kvalifikovaném odhadu nejistoty podcenila svoji měřicí schopnost a může nejistotu svého měření snížit. Toto snížení je však podmíněno provedením nového MPZ, kde pilotní laboratoř bude mít nižší nejistotu, než je nová nejistota prověřované laboratoře.

9.2.1 Rozpočet nejistoty

Kapitola rozpočtu nejistoty byla převzata a upravena z uvedené literatury [15] a [16]. Nejistota měření se skládá z tzv. absolutní nejistoty U_{abs} (Tab. 5 a rovnice (4)) a nejistoty relativní U_{rel} (Tab. 6 a rovnice (5)). **Absolutní složka** nejistoty obsahuje všechny známé vlivy nejistoty, které nejsou závislé na měřené délce. V případě měření na navrženém zařízení jde o:

- absolutní chybu laserového interferometru, která je známa z jeho kalibračního listu (KL),
- vliv snímací síly,
- vliv chyby přímosti lineárního vedení.

Relativní složka pak slučuje všechny vlivy, které jsou funkcí měřené délky. Jsou jimi:

- relativní složky laserového interferometru z kalibračního listu,
- vlivy nehomogenity prostředí,
- vliv teplotní roztažnosti,
- chyba seřízení laserového interferometru.

Koeficient citlivosti popisuje míru vlivu vstupní veličiny na nejistotu konkrétních složek. **Výsledná standardní nejistota** je pak odmocninou součtu kvadrátů jednotlivých složek. Uvedená rozšířená nejistota měření $U_{celková}$ (viz rovnice (6)) je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu *k*, který odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 %, což pro normální rozdělení odpovídá koeficientu rozšíření *k* = 2.

Nejistota LI z kalibračního listu je dána následující rovnicí.

$$\boldsymbol{U_{LI} = (0,01 + 0,12 \cdot L + 0,05 \cdot \alpha \cdot L)} \qquad (3)$$

kde U_{LI} je nejistota LI z kalibračního listu, *L* je měřená délka dosazovaná do rovnice (3) v metrech a α je součinitel teplotní roztažnosti.

Tab. 5 Absolutní část nejistoty měření

	Vliv na nejistotu měření	standardní nejistota		rozdělení	koeficient citlivosti		příspěvek k nejistotě [µm]
absolutní část	**Interferometer-dle KL**						
	vlnová délka	0,005	mm	Gaussovo	1,0		0,005
	Navržené zařízení						
	snímací síla	0,040	mm	Gaussovo	1,0		0,040
	součet pro k=1						0,045
	celková nejistota U_{abs} pro k=2						**0,090**

Celková absolutní složka nejistoty pro *k = 1* je dána sumarizací příspěvků k nejistotě z Tab. 5 (poslední sloupec) viz následující rovnice.

$$u_{abs} = \sqrt{0{,}005^2 + 0{,}045^2} = 0{,}045\mu m \qquad (4)$$

Tab. 6 Relativní část nejistoty měření

	Vliv na nejistotu měření	standardní nejistota		rozdělení	koeficient citlivosti		příspěvek k nejistotě [µm/m]
relativní část	**Interferometer-dle KL**						
	vlnová délka	0,100	mm	Gaussovo	1,000		0,100
	roztažnost Laser Int.	0,000	mm	Gaussovo	1,000		0,000
	Nehomogenita prostředí						
	Interferometr						
	tlak	0,100	kPa	Gaussovo	0,100	µm/kPa	0,010
	vlhkost	1,000	%RH	Gaussovo	0,002	µm/%	0,002
	teplota	0,050	°C	Gaussovo	0,333	µm/°C	0,017
	Navržené zařízení						
	krátkodobý drift	0,020	mm	Gaussovo	1,000		0,020
	vyrovnání interferometru	0,200	mm		0,000	µm	0,020
	CMM						
	roztažnost měřítek stroje α	0,000	°C	Gaussovo	0,000	µm/°C	0,000
	součet pro k=1						0,169
	celková nejistota U_{rel} pro k=2						**0,338**

Celková relativní složka nejistoty pro *k=1* je dána sumarizací příspěvků k nejistotě z Tab. 6 (poslední sloupec) viz následující rovnice.

$$u_{rel} = \sqrt{0{,}100^2 + 0{,}010^2 + 0{,}002^2 + 0{,}017^2 + 0{,}0020^2 + 0{,}0020^2} = 0{,}169\mu m \qquad (5)$$

Výsledná nejistota kalibrace je dána vztahem:

$$U_{celková} = \ k \cdot (u_{abs} + u_{rel} \cdot L) \qquad (6)$$

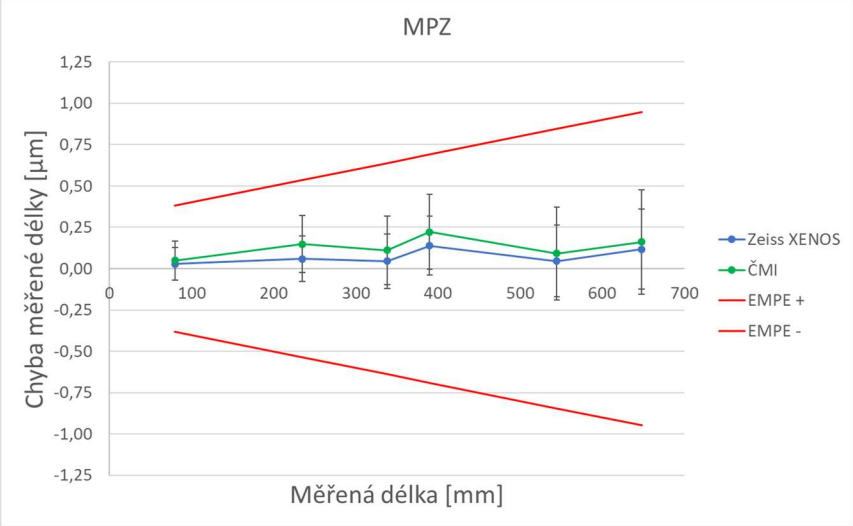
kde *L* je měřená délka uvedená v metrech. Po dosazení z rovnic (4) a (5) do rovnice (6) výsledná standardní nejistota vychází:

$$U_{celková} = 2 \cdot (0{,}045 + 0{,}169 \cdot L) \quad (7)$$

$$\boldsymbol{U_{celková} = (0{,}09 + 0{,}34 \cdot L)\ [\mu m]} \quad (8)$$

9.2.2 Vyhodnocení verifikace

Data referenční laboratoře byla získána z kalibrace souřadnicového měřicího stroje Zeiss Xenos. Tato kalibrace byla provedena ve 14 polohách pracovního prostoru stroje. Z těchto měření bylo jako referenční vybráno měření v ose Y. V kalibračním listě firmy Zeiss byla kromě hodnot chyb s nejistotami měření uvedena i přesná poloha Zerodurové stupňové měrky při kalibraci. Následně byla v tom samém místě provedena čtyři měření stejných vzdáleností pomocí navrženého zařízení a byly vypočítány průměrné hodnoty. Výsledkem tohoto měření bylo získání naměřených chyb stroje s přiřazenými nejistotami posuzované laboratoře. Tímto postupem byla získána všechna potřebná data pro uskutečnění vyhodnocení verifikace metodou MPZ. Naměřená data s přiřazenými nejistotami jsou graficky znázorněna na Obr. 69. V Tab. 7 jsou naměřená data doplněna o výsledek porovnávací zkoušky vyjádřený pomocí E_N kritéria.



Obr. 69 Graf MPZ

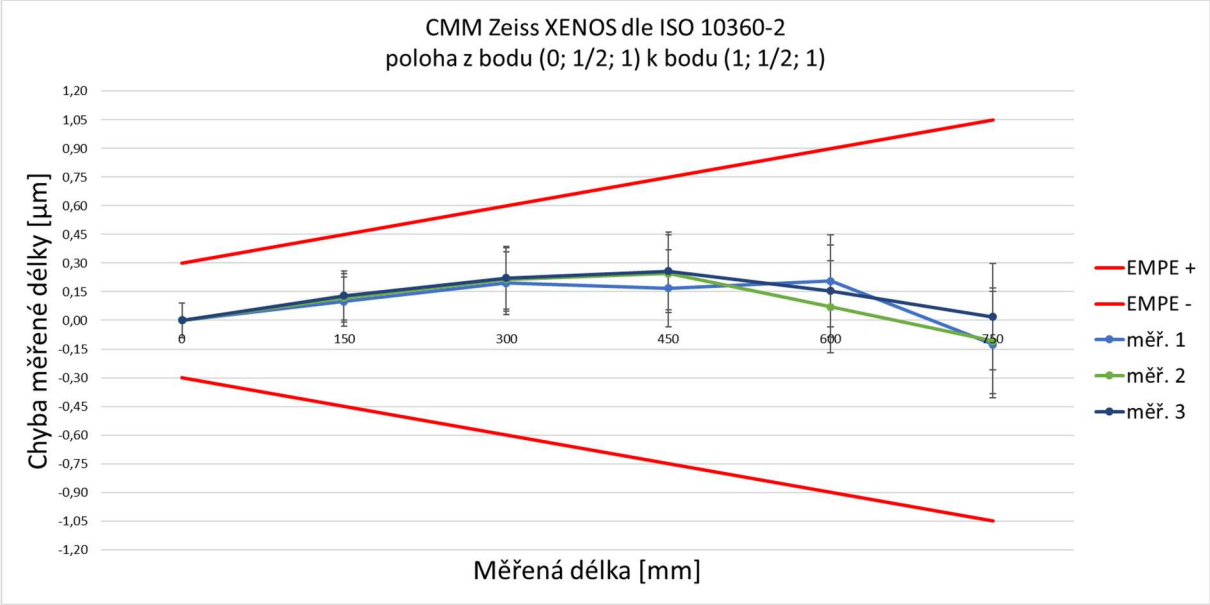
Tab. 7 Vyhodnocení MPZ

X_{lab} [µm]	u_{lab} [µm]	X_{ref} [µm]	u_{ref} [µm]	E_N [-]
0,05	0,11	0,03	0,10	0,14
0,15	0,15	0,06	0,14	0,44
0,11	0,17	0,05	0,16	0,27
0,22	0,19	0,14	0,18	0,32
0,09	0,23	0,05	0,22	0,15
0,16	0,25	0,12	0,24	0,12
0,05	0,11	0,03	0,10	0,14

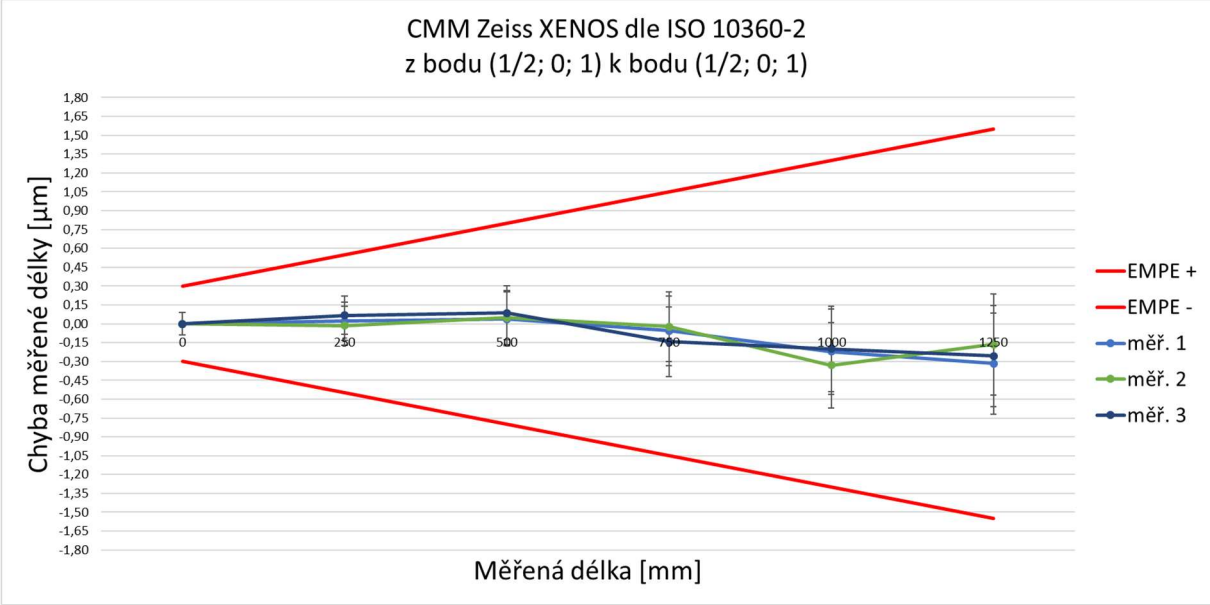
Z Tab. 7 je patrné, že kritérium hodnocení E_N je ve všech měřených bodech vyhovující ($E_N < 1$). Vzhledem k faktu, že velikost nepřesahuje hodnotu 0,5 lze konstatovat, že výpočet nejistoty lze přepracovat na nižší hodnoty. To je však, jak již bylo uvedeno v kapitole 9.2, podmíněno provedením nové MPZ. Aby platilo, že $0,5 < E_N < 1$, musela by nejistota prověřované laboratoře mít hodnotu $U = (0,04+0,30*L)$, kde L je v metrech. Žádná z dostupných laboratoří však není schopna nabídnout porovnatelnou metodu s nižší nejistotou, a tak možnost snížení nejistoty prověřované laboratoře nebude využita. To znamená, že nejistota měření pomocí navrženého zařízení bude ponechána na hodnotě $U = (0,09+0,34*L)$, kde L je v metrech.

9.3 Vyhodnocení experimentu

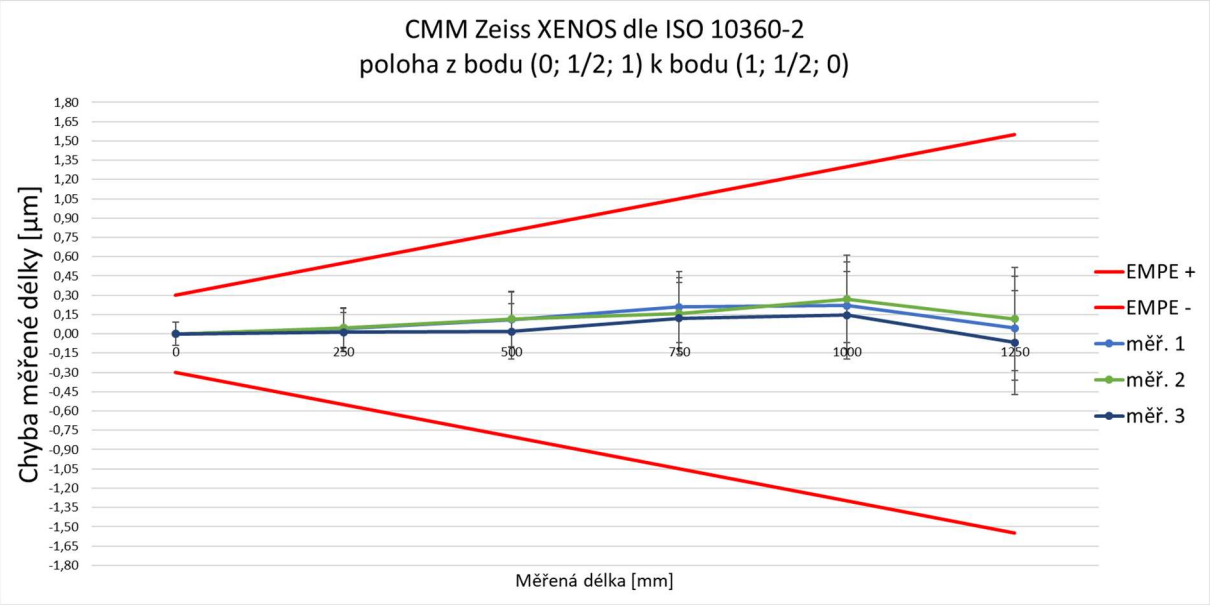
Metodou podrobně popsanou v kapitole 9.1 byla získána data pro vyhodnocení zkoušky souřadnicového měřicího stroje Zeiss Xenos. Data byla následně zpracována v SW a vynesena do grafů (Obr. 70 až Obr. 76). Tyto grafy znázorňují velikosti chyb v třikrát měřených délkách stroje, specifikaci MPE udanou výrobcem stroje a velikost nejistoty měření vykreslenou pomocí chybových úseček. Nakonec byl vypočten aritmetický průměr ze tří opakování v každé poloze a pro názornost vynesen do souhrnného grafu (Obr. 77), který ukazuje, že SMS Zeiss XENOS splňuje specifikaci výrobce $E_{MPE} = (0,3+1L)\ \mu m$, kde L je v metrech. Polohy v rámci pracovního prostoru, do kterých bylo zařízení během zkoušky nastavováno jsou značeny dle konvence popsané v kapitole 4.1.1 (Tab. 1).



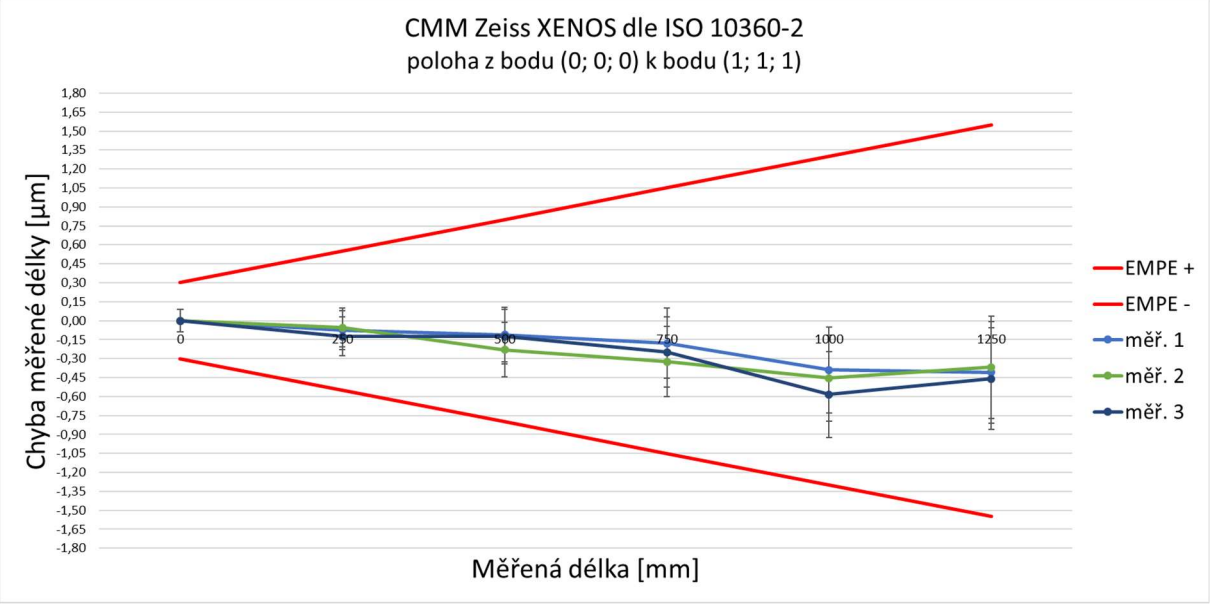
Obr. 70 Naměřená data - poloha z bodu (0; 1/2; 1) do bodu (1; 1/2; 1)



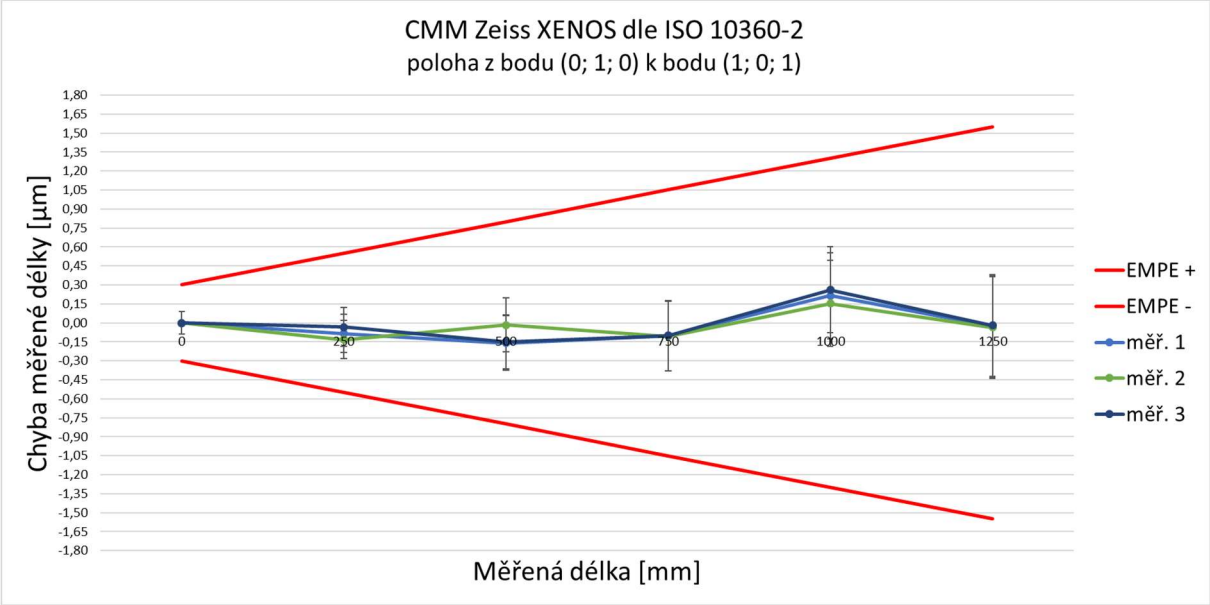
Obr. 71 Naměřená data - poloha z bodu (1/2; 0; 1) do bodu (1/2; 0; 1)



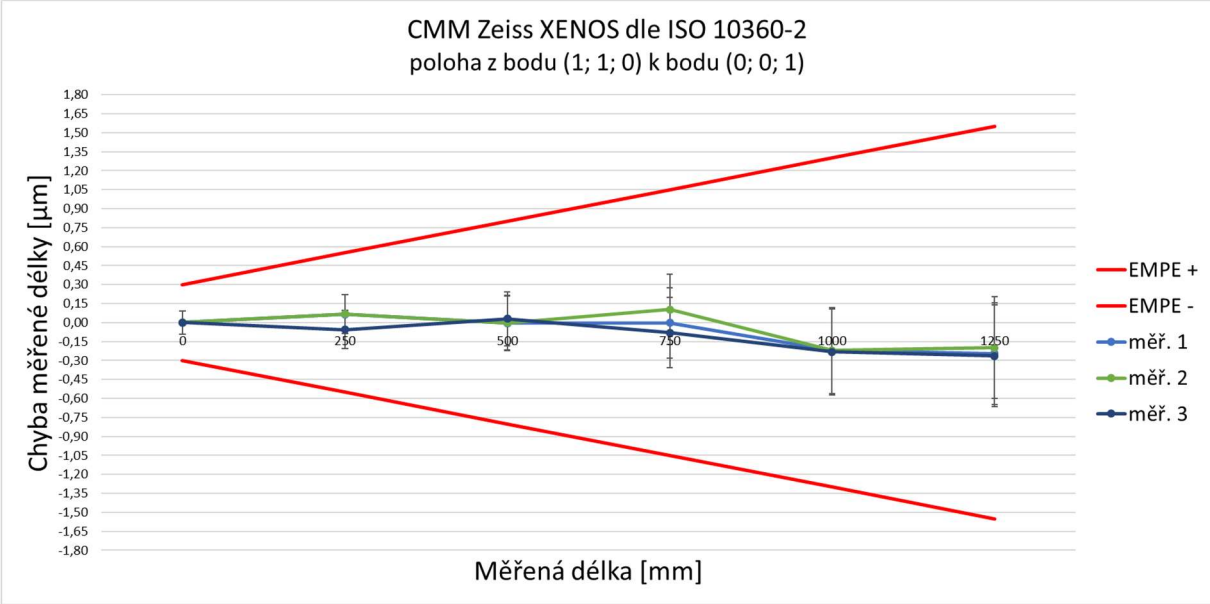
Obr. 72 Naměřená data - poloha z bodu (0; 1/2; 1) do bodu (1; 1/2; 0)



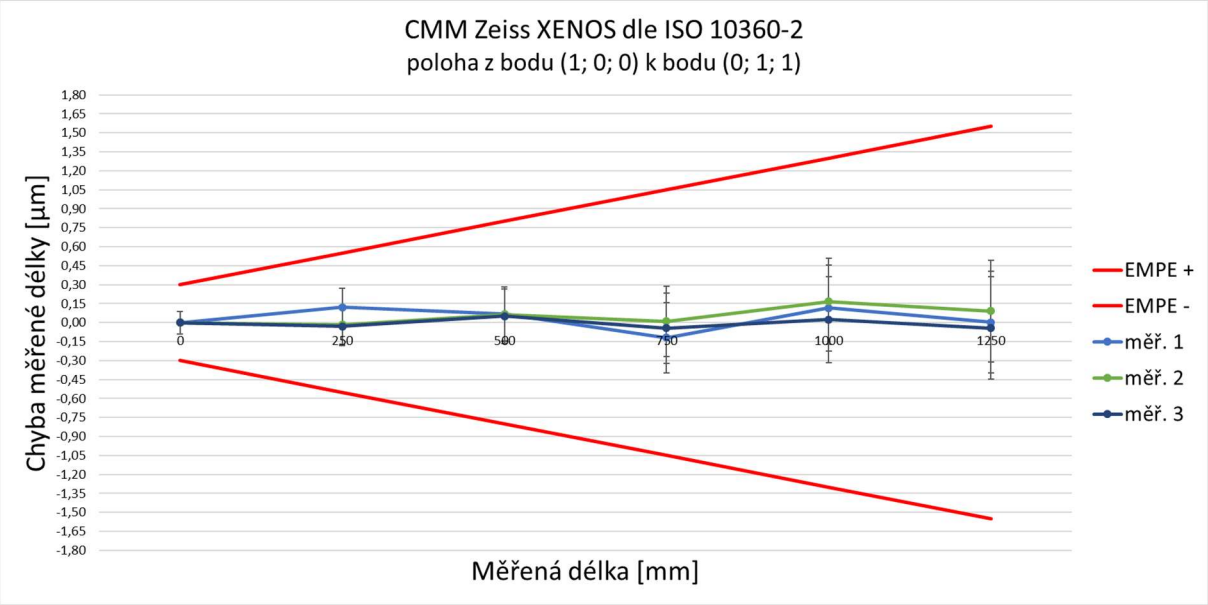
Obr. 73 Naměřená data - poloha z bodu (0; 0; 0) do bodu (1; 1; 1)



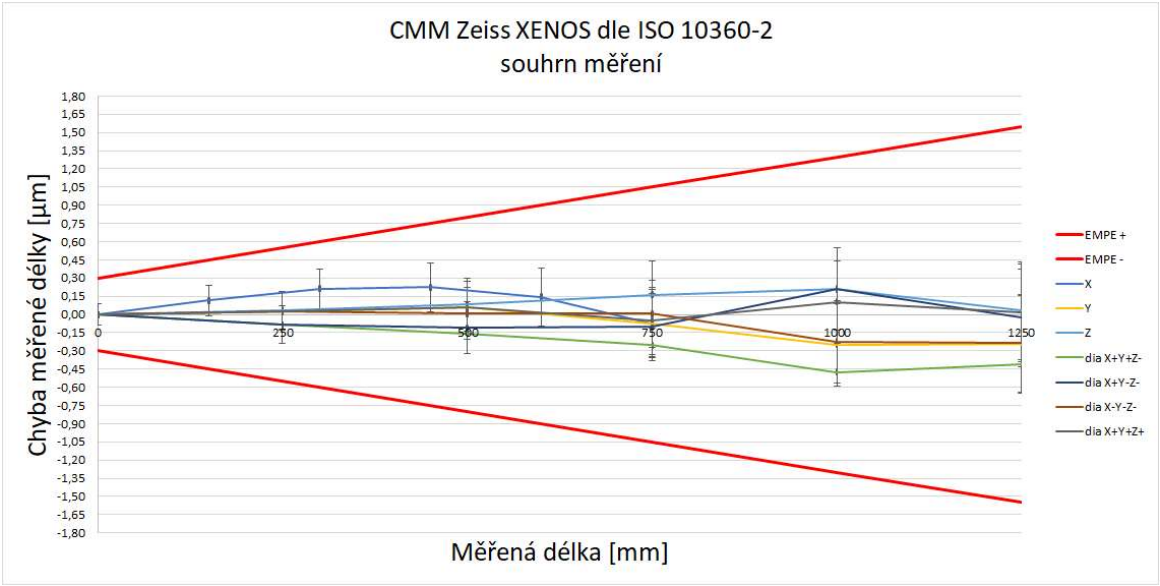
Obr. 74 Naměřená data - poloha z bodu (0; 1; 0) do bodu (1; 0; 1)



Obr. 75 Naměřená data - poloha z bodu (1; 1; 0) do bodu (0; 0; 1)



Obr. 76 Naměřená data - poloha z bodu (1; 0; 0) do bodu (0; 1; 1)



Obr. 77 Naměřená data - souhrn

10 Závěr

Diplomová práce začíná úvodem, kde je definována motivace vzniku požadavku Českého metrologického institutu na vytvoření zařízení pro zkoušky souřadnicových měřicích strojů nebo frézovacího stroje v konfiguraci s dotykovou obrobkovou sondou.

Dále navazuje vytyčení cílů práce. Těmi jsou vypracování rešerše současného stavu řešené problematiky, návrh konstrukce nového zařízení a zpracování výrobní dokumentace. Dalšími stanovenými cíli nad rámec zadání je výroba tohoto zařízení, provedení a vyhodnocení experimentů. Experimenty se zabývají verifikací měřicí metody a zkoušky SMS Zeiss XENOS.

Kapitola 3 je věnována zmapování současného stavu problematiky souřadnicového měření. Popisuje význam, princip a nejčastěji využívané konstrukce SMS

Kapitola 4 shrnuje nejdůležitější aspekty provádění zkoušek SMS.

Kapitola 5 uvádí přehled v dnešní době nejčastěji využívaných artefaktů pro zkoušky dotykových SMS. Na konci kapitoly je provedeno shrnutí nejistot zkoušek v závislosti na použitých zkušebních artefaktech.

V kapitole 6 jsou stanoveny a popsány požadavky na konstrukci zařízení a předložen předběžný návrh dvou variant zařízení. V závěru kapitoly je provedeno srovnání vlastností obou variant, na jehož základě je proveden výběr finální varianty řešení.

Náplní kapitoly 7 je návrh zařízení. Úvod kapitoly je věnován předběžnému návrhu tří variant průřezů nosného lože. K výběru vhodného průřezu nosného profilu lože bylo použito metody konečných prvků. Závěr kapitoly popisuje jednotlivé navržené části a uzly konstrukce. Pro navržené zařízení byl vytvořen CAD model.

Kapitola 8 popisuje výrobu součástí nového zařízení. V závěru kapitoly je uveden podrobný obrazový postup montáže.

Úvod kapitoly 9 se zabývá stanovením metody zkoušky SMS Zeiss XENOS pomocí vyrobeného zařízení a rozborem driftu. Dále se v kapitole řeší rozpočet nejistoty měření a verifikace měřicí metody za použití postupu pro MPZ. V závěru kapitoly je popsáno provedení zkoušky SMS Zeiss XENOS a dále jsou vyhodnocena naměřená data.

Závěrem je možné konstatovat, že všechny cíle diplomové práce byly splněny. Nad rámec zadání práce bylo zařízení i vyrobeno a následně provedená verifikace metody ukázala, že nejistota měření nového zařízení splňuje se značnou rezervou požadavky na zkoušky vysoce přesných SMS.

Seznamy

Použitá literatura

[1] „Souřadnicové měřicí stroje - skripta," [Online]. Available: http://www.ksa.tul.cz/getFile/id:2522. [Přístup získán 3 3 2019].

[2] *ISO 10360-2. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) - Část 2: Souřadnicové měřicí stroje používané pro měření lineárních rozměrů.,* Praha: ÚNMZ, 2010.

[3] *ČSN ISO 230-2 Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 2: Určení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách,* Praha: UNMZ, 2015.

[4] „Koncové měrky," [Online]. Available: http://www.unimetra.cz/soubory_materialy/84_1.pdf. [Přístup získán 10 7 2019].

[5] „Eumetron Calibration services," Eumetron GmbH, [Online]. Available: https://cdn.website-editor.net/bd6fcdc3d13846dfa233e2bd57c68f74/files/uploaded/eumetron_DAkkS-Calibration_Services_8.1E.pdf. [Přístup získán 10 7 2019].

[6] „RENISHAW," [Online]. Available: https://www.renishaw.cz/cs/jak-funguje-interferometricky-system--38612. [Přístup získán 1 7 2019].

[7] V. Zelený, I. Lineová, J. Sýkora, P. Sklaník a J. Hynek, *Závěrečná ZPRÁVA Č. 8015-TR-Z0001-14 k úkolu TR č. 1480151,* Praha: Český metrologický institut, 2014.

[8] V. P. Esala, P. Salminen, B. Hemming a A. Rant, *D 2.4.5 Novel portable measurement standard,* Espoo: VTT MIKES, 2016.

[9] D. Flack, *CMM Measurement Strategies,* Teddington, United Kingdom: National Physical Laboratory, 2001.

[10] J. Tesař, „Zavádění procesního přístupu a dalších nových požadavků ČSN EN ISO/IEC 17025:2019," *Metrologie,* sv. 2, p. 3, 2019.

[11] „Thorlabs," Thorlabs Optical Posts, [Online]. Available: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1266. [Přístup získán 15 5 2019].

[12] „HIWIN Okružované šrouby," HIWIN Motion & Control Systems, [Online]. Available: https://www.hiwin.cz/cz/produkty/kulickove-srouby/okruzovane-srouby/58_matice-dvojita-prirubova-ddb. [Přístup získán 3 3 2019].

[13] „HIWIN Přírubové ložiskové domečky," HIWIN Motion & Control Systems, [Online]. Available: https://www.hiwin.cz/cz/produkty/kulickove-srouby/loziskove-domecky/176_prirubove-loziskove-domecky-fk. [Přístup získán 3 3 2019].

[14] „HIWIN Lineární vedení," HIWIN Motion & Control Systems, [Online]. Available: https://www.hiwin.cz/cz/produkty/linearni-vedeni/kulickove-vedeni/rada-hg-qh/17_vozik-hgh. [Přístup získán 3 3 2019].

[15] J. Hynek, „Návrh zařízení na výrobu akalibraci fotogrammetrických tyčí, bakalářská práce (Bc.)," ČVUT Fakulta strojní, Praha, 2017.

Seznam obrázků

Obr. 1 Kinematické schéma výložníkového SMS 14
Obr. 2 Kinematické schéma portálového SMS 15
Obr. 3 Kinematické schéma mostového SMS 15
Obr. 4 Kinematické schéma stojanového SMS 16
Obr. 5 Pokrytí pracovního prostoru SMS [2] 18
Obr. 6 Odsazením hrotu snímacího doteku 19
Obr. 7 Sada koncových měrek Mitutoyo 21
Obr. 8 Způsob měření koncových měrek [2] 21
Obr. 9 Stupňová měrka 21
Obr. 10 Jednostranné měření [2] 22
Obr. 11 Měření z vnějších stran [2] 22
Obr. 12 Ball bar 22
Obr. 13 Způsob měření tělesa ball bar [2] 22
Obr. 14 Ball plate 23
Obr. 15 Způsob měření tělesa ball plate [2] 23
Obr. 16 Ball cube 24
Obr. 17 Jednostranné měření pomocí LI [2] 24
Obr. 18 Měření z vnějších stran pomocí LI [2] 24
Obr. 19 Princip laserového interferometru [6] 25
Obr. 20 Laserový interferometr Renishaw 26
Obr. 21 Virtuální ball bar ČMI 27
Obr. 22 Interferometrická stupňová měrka MIKES [8] 28
Obr. 23 Rozhodovací pravidlo shody/neshody 31
Obr. 24 Schéma varianty 1 33
Obr. 25 Schéma varianty 2 34

Obr. 26 Popis konstrukce 36
Obr. 27 Podepření v Besselových bodech [12] 37
Obr. 28 Nosný profil O-O 38
Obr. 29 MKP analýza nosného profilu O-O 38
Obr. 30 Nosný profil OTO 38
Obr. 31 MKP analýza nosného profilu OTO 38
Obr. 32 Nosný profil W 39
Obr. 33 MKP analýza nosného profilu W 39
Obr. 34 MKP analýza finální verze nosného profilu W 40
Obr. 35 Způsob sesazení nosného profilu před svařováním 41
Obr. 36 Detail svaru 41
Obr. 37 Kuličkový šroub [12] 42
Obr. 38 Uložení začátku kuličkového šroubu [13] 42
Obr. 39 Uložení konce kuličkového šroubu [13] 43
Obr. 40 Lineární kuličkové vedení [14] 43
Obr. 41 Magnet s otvorem uprostřed 44
Obr. 42 Vybraná varianta - trojice magnetických kuliček 44
Obr. 43 Upnutí optických prvků 45
Obr. 44 Ruční klička s možností připojení pohonu 46
Obr. 45 Součásti zařízení 47
Obr. 46 Krok montáže 1 49
Obr. 47 Krok montáže 2 49
Obr. 48 Krok montáže 3 49
Obr. 49 Krok montáže 4 50
Obr. 50 Krok montáže 5 50
Obr. 51 Krok montáže 6 50
Obr. 52 Krok montáže 7 51
Obr. 53 Krok montáže 8 51

Obr. 54 Krok montáže 9 51

Obr. 55 Krok montáže 10 52

Obr. 56 Krok montáže 11 52

Obr. 57 krok montáže 12..... 52

Obr. 58 Krok montáže 13 53

Obr. 59 Krok montáže 14 53

Obr. 60 Krok montáže 15 53

Obr. 61 Krok montáže 16 54

Obr. 62 Krok montáže 17 54

Obr. 63 Krok montáže 18 54

Obr. 64 Krok montáže 19 55

Obr. 65 SMS Zeiss XENOS..... 55

Obr. 66 Distribuce snímacích bodů (pohled na koutový odražeč shora) 56

Obr. 67 Schéma snímání poloh koutového odražeče 57

Obr. 68 Časová synchronizace snímání 58

Obr. 69 Graf MPZ 62

Obr. 70 Naměřená data - poloha z bodu (0; 1/2; 1) do bodu (1; 1/2; 1) 64

Obr. 71 Naměřená data - poloha z bodu (1/2; 0; 1) do bodu (1/2; 0; 1) 64

Obr. 72 Naměřená data - poloha z bodu (0; 1/2; 1) do bodu (1; 1/2; 0) 65

Obr. 73 Naměřená data - poloha z bodu (0; 0; 0) do bodu (1; 1; 1)..... 65

Obr. 74 Naměřená data - poloha z bodu (0; 1; 0) do bodu (1; 0; 1)..... 66

Obr. 75 Naměřená data - poloha z bodu (1; 1; 0) do bodu (0; 0; 1)..... 66

Obr. 76 Naměřená data - poloha z bodu (1; 0; 0) do bodu (0; 1; 1)..... 67

Obr. 77 Naměřená data - souhrn 67

Seznam tabulek

Tab. 1 Orientace kalibrovaného tělesa v měřicím prostoru SMS [2] 18

Tab. 2 Shrnutí dosažitelných nejistot 28

Tab. 3 Srovnání variant návrhů 34

Tab. 4 Srovnání variant nosného profilu 40

Tab. 5 Absolutní část nejistoty měření 60

Tab. 6 Relativní část nejistoty měření 61

Tab. 7 Vyhodnocení MPZ 63

Seznam použitého software

Autodesk Inventor Professional 2018……36

Abaqus/CEA 6.14……36

Seznam příloh

Příloha A - Výrobní dokumentace

Druh:	***Název:***	***Číslo***
Výkres sestavení	*Měřicí zařízení*	*DP-2019-00-00*
Kusovník	*Kusovník*	*DP-2019-00-00-K*
Výrobní výkres	*Lože*	*DP-2019-01-00 (2 listy)*
Výrobní výkres	*Pojezdový stolek*	*DP-2019-01-01*
Výrobní výkres	*Krytka*	*DP-2019-01-02*
Výrobní výkres	*Krytka zadní*	*DP-2019-01-03*
Výrobní výkres	*Destička zrcadla*	*DP-2019-01-04*
Výrobní výkres	*Držák optiky*	*DP-2019-01-05*
Výrobní výkres	*Disk kličky*	*DP-2019-01-06*
Výrobní výkres	*Klička*	*DP-2019-01-07*