

Implementace SW nástroje pro zvyšování přesnosti obráběcích strojů

Bc. Pavel Kadlečík

Diplomová práce
2019



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel Kadlečík**
Osobní číslo: **A17248**
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Automatické řízení a informatika**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Implementace SW nástroje pro zvyšování přesnosti obráběcích strojů**

Téma anglicky: **The Implementation of a SW Utility for Improving the Accuracy of Machine Tools**

Zásady pro vypracování:

1. Prostudujte dostupné metody měření přesností lineárních posuvů CNC obráběcích strojů.
2. Popište princip kalibrace lineárních posuvů CNC obráběcích strojů pomocí laserového interferometru.
3. Provedte několik měření lineárních posuvů obráběcího CNC stroje pomocí laserového interferometru.
4. Navrhněte a implementujte softwarový nástroj pro konverzi naměřených dat k vytvoření korekčních souborů ve formátech podporovaných jednotlivými CNC řídicími systémy HEIDENHAIN nebo SIEMENS.
5. Vámi vytvořený nástroj otestujte v reálných podmínkách a výsledky vyhodnoťte.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **SCHMID, Dietmar. Řízení a regulace pro strojírenství a mechatroniku. Přeložil Jiří HANDLÍŘ. Praha: Europa - Sobotáles, 2005. ISBN 80-86706-10-9**
2. **Machine calibration and optimisation: Machine performance measurement and diagnosis is essential to establish a known and repeatable level of process capability. [online]. RENISHAW, 1128 [cit. 2018-11-28]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/en/machine-calibration-and-optimisation--6330>**
3. **HEIDEINHAIN Technical Manual TNC640 [online]. Ver06. 2017 [cit. 2018-11-27]. 892899-26 SW08. Dostupné z: <https://portal.heidenhain.de/>**
4. **SIEMENS: Industry Online Support [online]. 2018 [cit. 2018-11-27]. Dostupné z: <https://support.industry.siemens.com>**
5. **KISHORI, Sharan. Learn JavaFX 8: Building User Experience and Interfaces with Java 8 [online]. 1. Apress, 2015 [cit. 2018-11-27]. ISBN 978-1-4842-1142-7. Dostupné z: <http://www.apress.com/gp/book/9781484211434>**

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Tomáš Dulík, Ph.D.

Ústav informatiky a umělé inteligence

Datum zadání diplomové práce:

21. prosince 2018

Termín odevzdání diplomové práce:

15. května 2019

Ve Zlíně dne 21. prosince 2018

doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
ředitel ústavu

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne 13. 5. 2019

Pavel Kadlecík, v. r.
.....
podpis diplomanta

ABSTRAKT

Cílem práce je prostudovat a popsat princip dostupných metod pro měření lineárních posuvů CNC obráběcích strojů. Dále navrhnout a implementovat softwarový nástroj pro konverzi naměřených dat (polohových úchylek) lineárních posuvů obráběcích strojů k vytvoření korekčních dat (souborů) pro zavedení elektronických kompenzací délky u moderních CNC systémů.

Klíčová slova: přesnost polohování, obráběcí stroj, CNC - Computer Numerical Control, laserový interferometr, lineární snímač

ABSTRACT

The aim of the thesis is to describe principle of available measurement methods for linear positioning of CNC machine tools. Then to develop and implement software utility for conversion of measured data (positional deviations) of machine tool linear positioning for creating correctional data (files) to apply electronical compensations of length for modern CNC systems.

Keywords: accuracy of positioning, machine tool, CNC - Computer Numerical Control, laser interferometer, linear encoder

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Tomáši Dulíkovi, PhD. za odborné vedení, podnětné rady, poskytnuté materiály a veškerou spolupráci při tvorbě této diplomové práce

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 ZKOUŠKY OBRÁBĚCÍCH STROJŮ	11
1.1 NORMY SOUVISEJÍCÍ S PŘESNOSTÍ POLOHOVÁNÍ ČÍSLICOVĚ ŘÍZENÝCH OS	13
1.2 DEFINICE A ZNAČENÍ DLE ISO 230-2.....	14
2 SNÍMÁNÍ POLOHY ČÍSLICOVĚ ŘÍZENÝCH OS CNC STROJŮ	19
2.1 OBECNÉ BLOKOVÉ SCHÉMA SERVOMECHANISMU CNC STROJŮ	19
2.2 NEPŘÍMÉ MĚŘENÍ POLOHY	19
2.3 PŘÍMÉ MĚŘENÍ POLOHY	20
2.4 ZÁKLADNÍ KLASIFIKACE ODMĚŘOVACÍCH SYSTÉMU POUŽÍVANÝCH V CNC TECHNOLOGIÍCH	22
2.5 INKREMENTÁLNÍ SNÍMAČE POLOHY	22
2.6 ABSOLUTNÍ SNÍMAČE POLOHY	24
2.7 SNÍMAČE PRO PŘÍMÉ MĚŘENÍ LINEÁRNÍCH POSUVŮ	25
3 DOSTUPNÉ METODY MĚŘENÍ DÉLEK LINEÁRNÍCH POSUVŮ	27
3.1 MICHELSONŮV INTERFEROMETR	27
3.2 LASEROVÝ INTERFEROMETR	30
II PRAKTICKÁ ČÁST	34
4 POPIS APLIKACE AXIS CORRECTION	35
4.1 POŽADAVKY KLADENÉ NA APLIKACI.....	35
4.2 VOLBA PLATFORMY	35
4.3 ARCHITEKTURA APLIKACE	36
4.4 POPIS GUI APLIKACE	39
4.4.1 Hlavní okno aplikace.....	39
4.4.2 Nastavení výstupního souboru	43
4.5 ELEKTRONICKÉ KOMPENZACE CNC ŘÍDICÍCH SYSTÉMŮ	45
4.5.1 Heidenhain iTNC530	45
4.5.2 Heidenhain TNC640	46
4.5.3 Simemens SINUMERIK 840D	47
5 MĚŘENÍ PŘESNOSTI A OPAKOVATELNOSTI LINEÁRNÍCH POSUVŮ OBRÁBĚCÍCH STROJŮ	49
5.1 MĚŘENÍ PŘESNOSTI A OPAKOVATELNOSTI LINEÁRNÍCH POSUVŮ REÁLNÉHO STROJE.....	49
5.2 PODMÍNKY A POSTUP MĚŘENÍ.....	50
5.2.1 Podmínky měření	50
5.2.2 Postup měření.....	52
5.2.3 Seřízení měřicí optiky, schéma měření	52
5.2.4 Nastavení PC softwaru Renishaw LaserXL Capture	54
5.2.5 Naměřená data pro tvorbu kompenzačních dat	57
5.2.6 Vytvoření kompenzačních dat.....	59
5.2.7 Kontrolní měření po nahrání kompenzačních dat do stroje	60

5.3	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ DLE ISO 230-2.....	63
ZÁVĚR	.....	64
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	.....	65
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	.....	68
SEZNAM OBRÁZKŮ	.....	70
SEZNAM TABULEK	.....	72
SEZNAM PŘÍLOH	.....	73

ÚVOD

Diplomová práce se zabývá návrhem a implementací softwarového nástroje pro konverzi naměřených dat polohových úchylek lineárních posuvů obráběcích strojů, na jejichž základě jsou vytvořena kompenzační data, která jsou určena k zavedení elektronických kompenzací u moderních CNC řídicích systémů Siemens a Heidenhain. Důvodem tvorby tohoto softwarového nástroje je snížení chybovosti při „ruční“ manipulaci s kompenzačními daty a usnadnění práce technickým pracovníkům, kteří provádějí tento druh metrologického měření pomocí laserového měřicího systému Renishaw, na jejichž podnět byl softwarový nástroj implementován.

V teoretické části této práce je popsán princip měření délky lineárních posuvů obráběcích strojů pomocí interferenčních komparátorů a také moderní laserové měřicí systémy, pracující na stejném principu.

V úvodu teoretické části je pojednáno o zkouškách prováděných na obráběcích strojích, z nichž právě měření přesnosti a opakovatelnosti číslicově řízených os je jedna ze součástí předávacích zkoušek obráběcích strojů. Jsou zde také zmíněny některé normy související s přesností polohování číslicově řízených os.

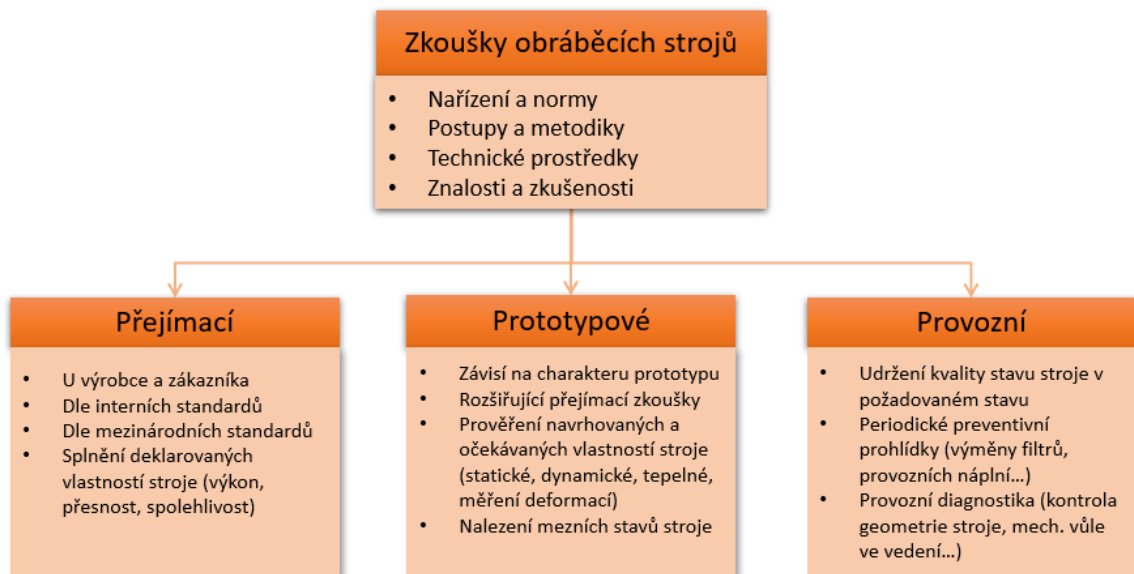
Dále jsou v teoretické části popsány základní principy snímání polohy posuvných částí obráběcích strojů včetně vybraných technických prostředků odměřovacích systémů používaných v CNC technologiích.

Praktická část obsahuje dvě kapitoly. První je zaměřena na návrh, implementaci a provedené řešení výše zmíněného softwarového nástroje. V druhé kapitole je popsána metodika, obecný postup a podmínky měření lineárních posuvů obráběcích strojů pomocí laserového interferometru, které bylo provedeno na reálném stroji za účelem získání naměřených vstupních dat k ověření funkčnosti softwarového nástroje. Závěrem praktické části jsou zhodnoceny naměřené výsledky před a po zavedení elektronických kompenzací do řídicího systému.

I. TEORETICKÁ ČÁST

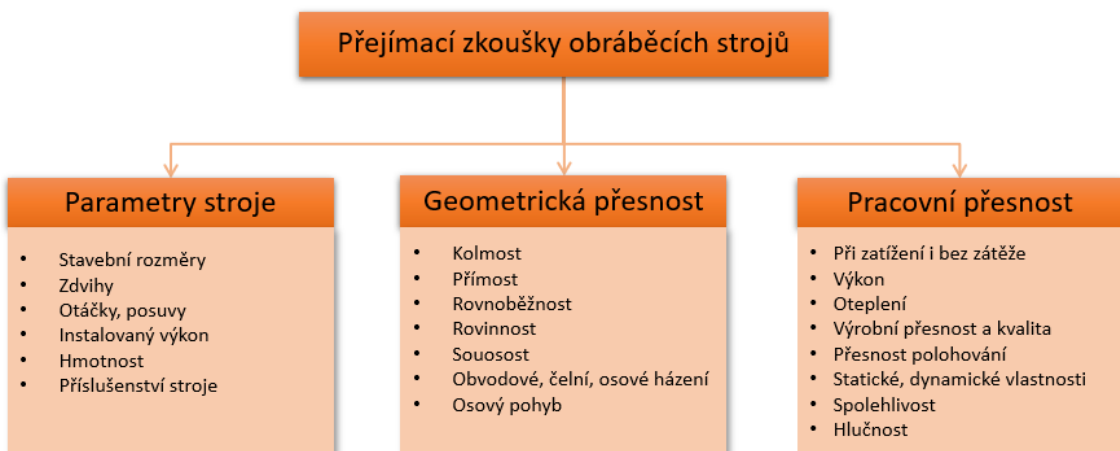
1 ZKOUŠKY OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

V souvislosti s celosvětovou modernizací technologií jsou kladeny stále větší požadavky na přesnost obráběcích strojů. Výrobci obráběcích strojů si vytvořili interní směrnice ve snaze dodržet vysoké úrovně přesnosti. Zkoušky obráběcích strojů lze rozdělit do tří základních skupin.



Obrázek 1 Zkoušky obráběcích strojů [1]

Přesnost obráběcích strojů je nutné ověřovat jak u nově vyrobených strojů, tak i v pravidelných intervalech u výrobních strojů v provozu, případně po jejich opravě. Účelem je dodržení požadované kvality výroby.



Obrázek 2 Přejímací zkoušky obráběcích strojů [1]

Kvalita obráběcího stroje je tvořena několika parametry, přičemž o jejich důležitosti rozhodují požadavky výrobce stroje a zejména koncového zákazníka, jemuž se snaží výrobce strojů ve všech směrech vyhovět. Je však nutné respektovat technické možnosti strojního zařízení.

Jedním ze základních aspektů kvality a úspěšného nasazení obráběcího stroje ve výrobě je jeho přesnost. Přesnost obráběcího stroje vychází z požadavků, které jsou kladeny na stroj, tedy požadavků na geometrickou přesnost součástí, které na stroji budou vyráběny.

S geometrickou přesností obrobeků je však úzce spjata geometrická přesnost obráběcího stroje. Z tohoto důvodu je ověření geometrické přesnosti stroje jednou ze součástí přijímacích zkoušek. Existují však i směrnice pro kontrolu přesností obráběcích strojů, kde je stroj posuzován dle geometrických přesností obrobku. To je však z hlediska hospodárnosti neekonomické, i když by se samozřejmě mohlo zdát, že pro kupujícího je směrodatná geometrická přesnost a kvalita povrchu obrobku, nikoliv geometrická přesnost obráběcího stroje. [2]

Obecně platí, čím pečlivěji a kvalitněji jsou provedeny kroky při výrobě a montáži obráběcího stroje, tím je dosaženo snáze požadované geometrické přesnosti, která se podílí na celkové přesnosti stroje. Geometrická přesnost stroje je tedy podmínkou nutnou, nikoliv postačující.

Výrobci strojů věnují náležitou pozornost seřízení a přesnosti strojů. Při snaze o další zvýšení přesnosti stroje přichází na řadu zavedení elektronických kompenzací, kterými jsou moderní řídicí CNC systémy vybaveny. Tyto elektronické kompenzace jsou vhodné až pro finální seřízení stroje a měly by být u nových strojů aplikovány až po jejich precizním mechanickém seřízení. U strojů v provozu je dále žádoucí tyto kompenzace aktualizovat v pravidelných intervalech nebo po opravách s ohledem na mechanické opotřebení součástí strojů.

1.1 Normy související s přesností polohování číslicově řízených os

Zkoušky obráběcích strojů jsou specifickou oblastí metrologického měření. Prioritní úlohou obráběcích strojů je řízení polohy. Přesnost a opakovatelnost nastavení polohy u číslicově řízených os specifikuje několik norem definující předepsané postupy, které jsou od sebe odlišné a je důležité stanovit, které z těchto norem budou sloužit pro posouzení vlastností obráběcího stroje. [1]

Tabulka 1 Normy zabývající se nastavením polohy číslicově řízených os [3]

Norma	Oblast působnosti	Stručný popis normy
ISO 230-2	Mezinárodní	Specifikuje metody zkoušení a hodnocení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy číslicově řízených lineárních a rotačních posuvů přímou metodou bez zatížení.
VDI/DGQ 3441	Německo	Norma definuje metody statistického testování přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy obráběcích strojů
ASME B5.54	USA	Ekvivalent normy ISO 230-2. Mimo část věnující se přesnosti polohování obsahuje komplexní informace pro celkovou klasifikaci parametrů obráběcího stroje
GB/T 1721.2	Čína	Ekvivalent normy ISO 230-2
JIS B 6190-2	Japonsko	Ekvivalent normy ISO 230-2

Vzhledem k tomu, že v České republice je nejvíce používáno standardů ISO 230-2, budou zde uvedeny klíčové parametry pro vyhodnocování přesnosti a opakovatelnosti polohování číslicově řízených os dle normy ISO 230-2.

1.2 Definice a značení dle ISO 230-2

Žádaná poloha

$$P_i = [P_1, P_2, P_3 \dots P_m], \quad \text{kde } i = 1 \dots m$$

Poloha, do které je programován pohyb translační či rotační osy. Index i udává jednu konkrétní žádanou polohu v dané ose.

Skutečná poloha

Naměřená hodnota aktuální polohy translační či rotační části stroje dosažená polohováním do i -té hodnoty žádané polohy při j -té sérii nastavení polohy.

$$P_{ij} \text{ (kde } i = 1 \dots m, j = 1 \dots n \text{)}$$

Polohová úchylka

$$x_{ij} = P_{ij} - P_i \quad (1)$$

Rozdíl mezi skutečnou a žádanou hodnotou polohy nastavované rotační či translační části stroje. Jedná se o relativní pohyb mezi rámem stroje a pohybující se nastavovanou částí (viz graf 1 žlutá, šedá, červená, oranžová série).

Typ chodu (běhu) nastavované části:

- **Jednostranný** – vztahuje se k j -té sérii měření probíhající pouze jedním směrem. Směr pohybu je označen symbolem šipky:
 - značení \uparrow - série měření probíhající v kladném směru pohybu
 - značení \downarrow - série měření probíhající v záporném směru pohybu
- **Dvoustranný** – vztahuje se k j -té sérii měření probíhající oběma směry pohybu

Průměrná jednosměrná polohová úchylka v poloze

Aritmetický průměr polohových úchylek x_{ij} pro n sérii v jednom směru (viz graf 1 modrá a zelená série).

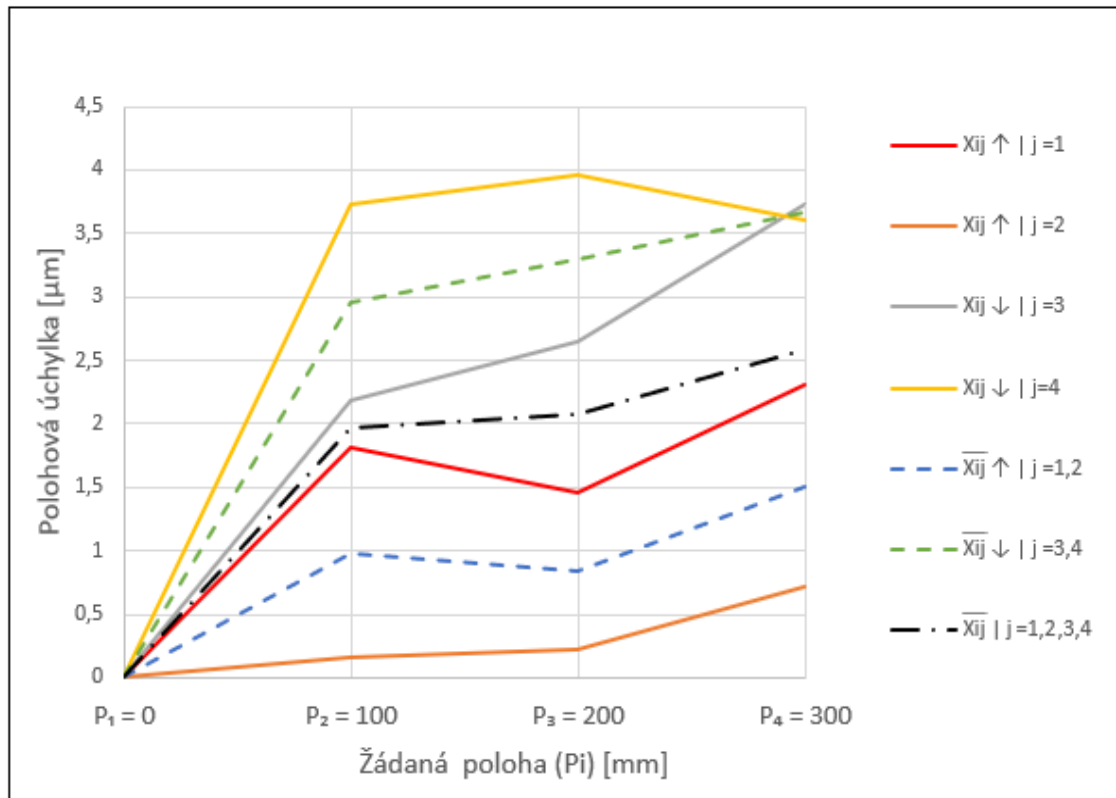
$$\bar{x}_i \uparrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \uparrow - \text{obr. 3 modrá série} \quad (2)$$

$$\bar{x}_i \downarrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \downarrow - \text{obr. 3 zelená série} \quad (3)$$

Průměrná dvoustranná polohová úchylka v poloze

Aritmetický průměr \bar{x}_i polohových úchylek x_{ij} pro n sérii při najíždění do polohy P_i v obou směrech (viz obrázek 3 – černá série)

$$\bar{x}_i = \frac{\bar{x}_i \uparrow + \bar{x}_i \downarrow}{2} \quad (4)$$



Obrázek 3 – Graf polohových úchylek (jednostranné, dvoustranné, průměr)

Rozsah dráhy v ose

Maximální možný dosažitelný pracovní rozsah pojezdu osy. Rozsah dráhy v ose je především konstrukčním uspořádáním stroje.

Měřený rozsah dráhy

Měřená část rozsahu dráhy translační, případně rotační osy. Dráha je volena tak, aby do první a poslední žádané polohy bylo možné polohovat oběma směry.

Necitlivost

- **v poloze** – rozdíl průměrných jednostranných aritmetických polohových odchylek naměřených při najíždění do žádané polohy P_i

$$B_i = \bar{x}_i \uparrow - \bar{x}_i \downarrow \quad (5)$$

- **v ose** – maximální hodnota z absolutních hodnot všech necitlivostí v poloze B_i

$$B = \max[|B_i|] \quad (6)$$

- **průměrná necitlivost v ose** – aritmetický průměr jednotlivých necitlivostí B_i ze všech žádaných poloh v ose

$$\bar{B} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m B_i \quad (7)$$

Odhad jednostranné standardní nejistoty nastavení polohy v dané poloze

Odhad standardní nejistoty polohových úchylek získaný ze série n opakovaných měření při najetí posuvnou částí stroje do žádané polohy P_i v jednom směru.

$$s_i \uparrow = \sum_{j=1}^n \sqrt{\frac{(x_{ij} \uparrow - \bar{x}_i \uparrow)^2}{n-1}} \quad (8)$$

$$s_i \downarrow = \sum_{j=1}^n \sqrt{\frac{(x_{ij} \downarrow - \bar{x}_i \downarrow)^2}{n-1}} \quad (9)$$

Průměrná dvoustranná polohová úchylka v ose

$$M = \max[\bar{x}_i] - \min[\bar{x}_i] \quad (10)$$

Opakovatelnost nastavení polohy v dané poloze

- **Jednostranná** – nejistota jednostranných polohových úchylek při použití koeficientu rozšíření $k=2$

$$R_i \uparrow = 4s_i \uparrow \quad (11)$$

$$R_i \downarrow = 4s_i \downarrow \quad (12)$$

- **Dvoustranná**

$$R_i = \max[2s_i \uparrow + 2s_i \downarrow + |B_i|; R_i \uparrow; R_i \downarrow] \quad (13)$$

Opakovatelnost nastavení polohy v ose

- **Jednostranná** – maximální hodnota z opakovatelnosti nastavení polohy ze všech žádaných poloh v dané ose

$$R \uparrow = \max[R_i \uparrow] \quad (14)$$

$$R \downarrow = \max[R_i \downarrow] \quad (15)$$

- **Dvoustranná**

$$R = \max[R_i] \quad (16)$$

Systematická polohová úchylka v ose

- **Jednostranná** – jedná se o rozdíl mezi maximální a minimální aritmetickou hodnotou průměrných jednostranných úchylek polohy při nastavování polohy v jednom nebo druhém směru

$$E \uparrow = \max[\bar{x}_i \uparrow] - \min[\bar{x}_i \uparrow] \quad (17)$$

$$E \downarrow = \max[\bar{x}_i \downarrow] - \min[\bar{x}_i \downarrow] \quad (18)$$

- **Dvoustranná** – udává rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou průměrných jednostranných polohových úchylek při nastavování polohy v obou směrech

$$E = \max[\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow] - \min[\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow] \quad (19)$$

Přesnost nastavení polohy v ose

- **Jednostranná** – rozsah odvozený z jednostranných systematických úchylek a odhadu standardní nejistoty pro koeficient rozšíření $k=2$

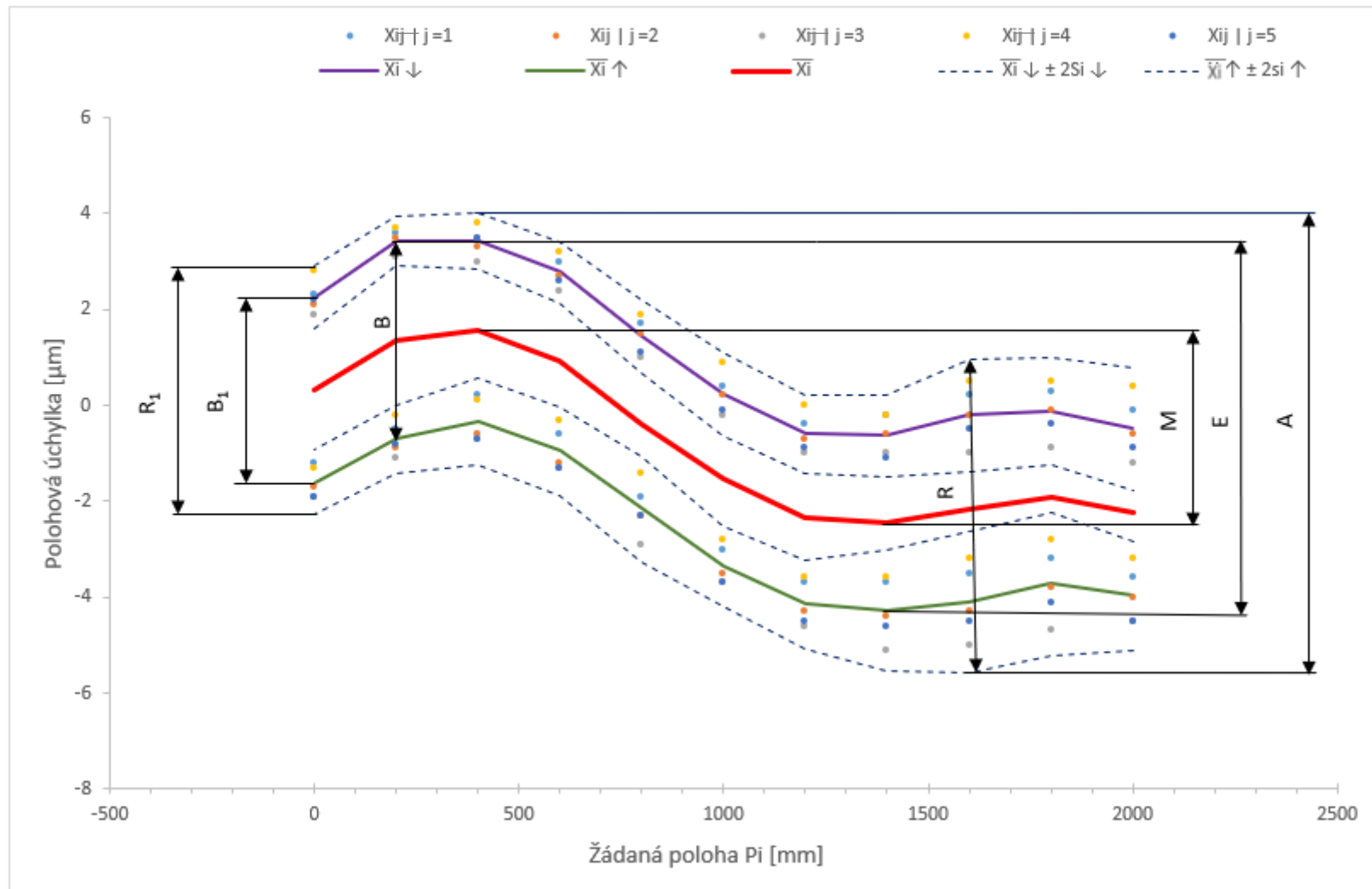
$$A \uparrow = \max[\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow] - \min[\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow] \quad (20)$$

$$A \downarrow = \max[\bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow] - \min[\bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow] \quad (21)$$

- **Dvoustranná** – rozsah odvozený ze dvoustranných systematických úchylek a odhadu standardní nejistoty pro koeficient rozšíření $k=2$

$$A = \max[\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow] - \min[\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow] \quad (22)$$

[4]



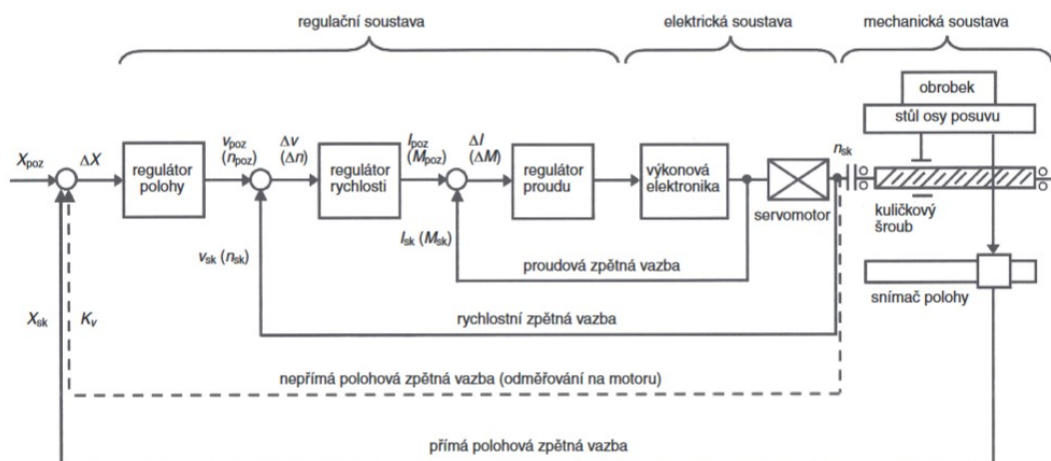
Obrázek 4 – Grafická interpretace klíčových parametrů ISO-230-2 [4]

2 SNÍMÁNÍ POLOHY ČÍSLICOVĚ ŘÍZENÝCH OS CNC STROJŮ

2.1 Obecné blokové schéma servomechanismu CNC strojů

Pro řízení pohybu posuvných částí obráběcích strojů je nejčastěji používáno elektrických servopohonů, tedy pohonů s uzavřenou regulační smyčkou, jejichž prioritní úlohou je řízení polohy (úhlu natočení). Jedná se o polohový servomechanismus umožňující čtyřkvadrantový provoz (oba směry pohybu i momentu) tvořený: [5]

- elektrickým pohonem
- snímačem otáček, polohy
- regulátor proudů, rychlosti a polohy
- elektronický výkonový měnič zajišťující řízení elektrické energie do soustavy



Obrázek 5 Obecné blokové schéma rychlostně polohového servomechanismu [6]

2.2 Nepřímé měření polohy

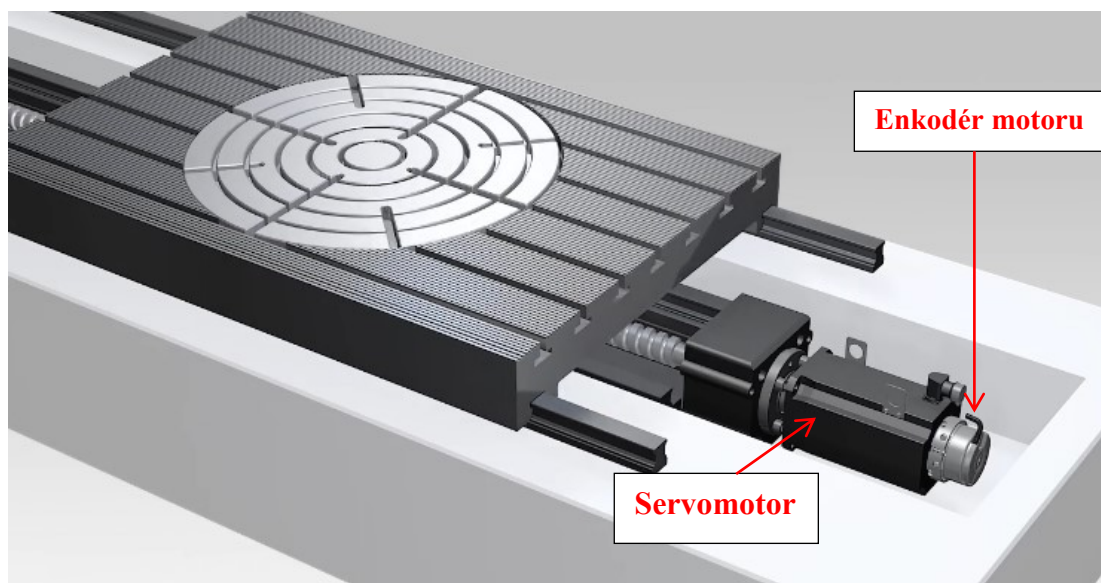
Poloha suportu obráběcího stroje je měřena nepřímo (převod úhlu na polohu) pomocí rotačního odměřovacího systému umístěného na servopohonu (enkodér motoru). Snímač lze také instalovat např. na hřídel kuličkového šroubu. Jedná se o levnou a méně přesnou variantu snímání polohy, jelikož do regulační smyčky nejsou zahrnuty pružné vazby a nelinearity mechaniky. U servomotorů používaných pro lineární posuvy obráběcích strojů se používají nejčastěji motorové snímače s počtem 2048 rysek v intervalu jedné otáčky.

Pro přehled jsou níže uvedeny přesnosti absolutních rotačních snímačů v závislosti na počtu rysek, udávané v katalogu firmy HEIDENHAIN při 20 °C. [5]

Tabulka 2 Přesnosti absolutních rotačních snímačů polohy [7]

Počet rysek rotačního snímače	Přesnost
16	±480 úhlových vteřin
512	±60 úhlových vteřin
2048	±20 úhlových vteřin

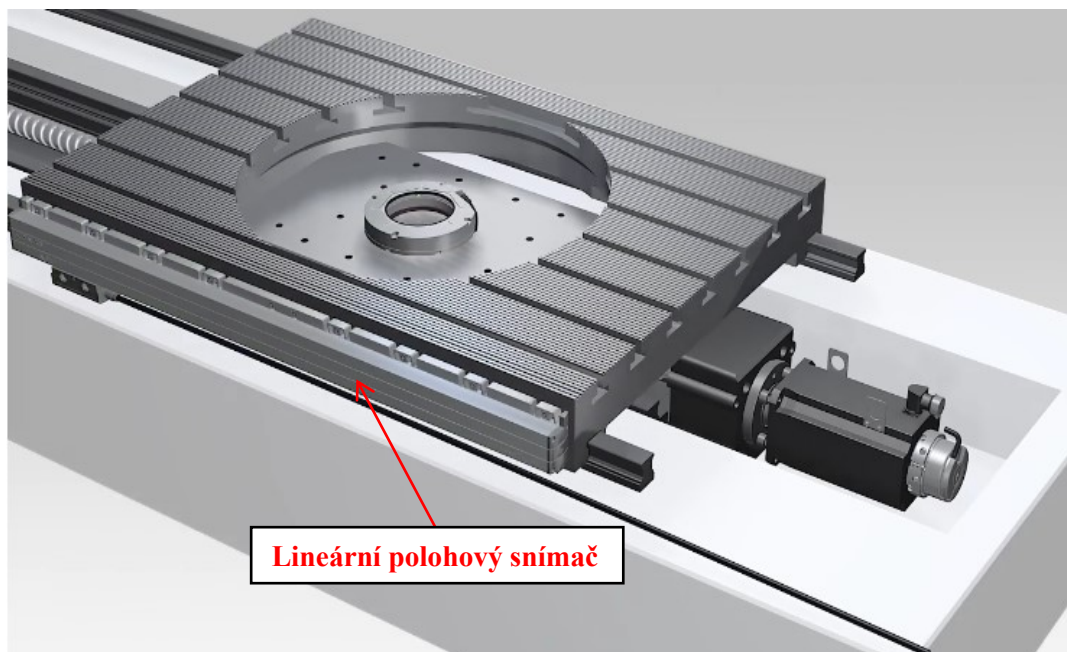
U inkrementálních rotačních snímačů firmy Heidenhain je jejich přesnost uváděna jako 1/20 vzdálenosti mezi odměřovacími ryskami. [7].



Obrázek 6 Nepřímé měření polohy [8]

2.3 Přímé měření polohy

Poloha suportu (nebo stolu) obráběcího stroje je měřena pomocí odměřovacího systému umístěného na pohybující se části stroje, případně v blízkosti pohybující se části stroje, kde je snímač mechanickou vazbou spojen s pohybující se částí stoly. Následující obrázek ukazuje jednu z možných variant snímání polohy posuvného stolu pomocí lineárního snímače.

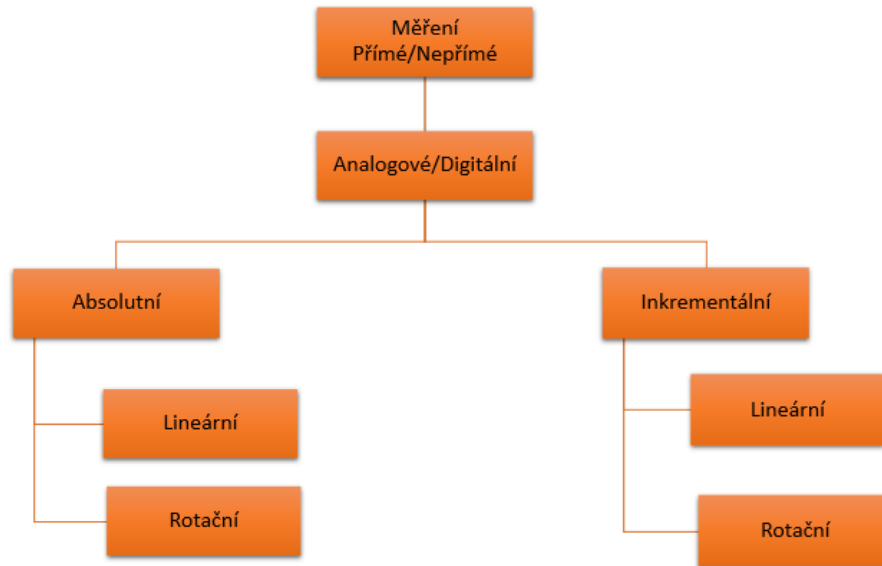


Obrázek 7 Přímé měření polohy [8]

Výhodou přímého měření polohy je, že dokážeme změřit polohu pohybujících se částí stroje a zahrnout tak všechny vlastnosti mechanických vazeb do uzavřené polohové smyčky. Přesnost řízení může být pak podstatně vyšší. Nevýhodou je samozřejmě vyšší pořizovací cena.

K rozhodování při volbě mezi přímým a nepřímým odměřováním je třeba poznamenat, že je zcela mylná představa, že velké vůle v převodech mezi motorem a koncovým členem mechanismu lze vykompenzovat přímým odměřováním. Takový servopohon by byl s největší pravděpodobností zcela nepoužitelný, protože při běžné velikosti polohového zesílení ($K_v = 15$ až 30 1/s) bude pomalu kmitat s rozkmitem zhruba stejným, jako je vůle v převodech. Tyto tzv. pomalé kmity lze sice potlačit snížením polohového zesílení, ale následkem toho se sníží přesnost pohonu a jeho hysterese bude opět zhruba odpovídat vůli v převodech. Pokud ze závažných důvodů není možné vůli v převodech zmenšit, je lepší použít nepřímé odměřování od prvku, který není zatížený nadměrnou vůlí (např. motor) a chyby v poloze vznikající při najíždění na souřadnici zleva a zprava kompenzovat programem řídicího systému. Moderní systémy kompenzují tyto chyby automaticky na základě vložení velikosti vůle do strojních konstant.

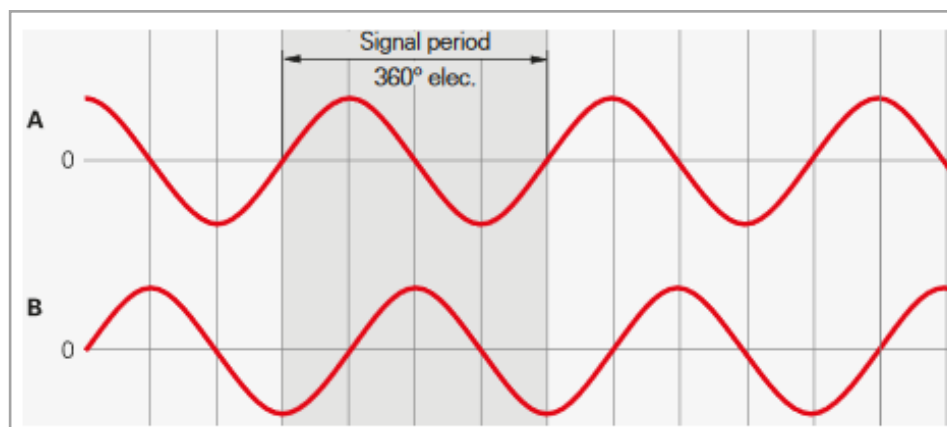
2.4 Základní klasifikace odměřovacích systému používaných v CNC technologiích



Obrázek 8 –Klasifikace odměřovacích systému

2.5 Inkrementální snímače polohy

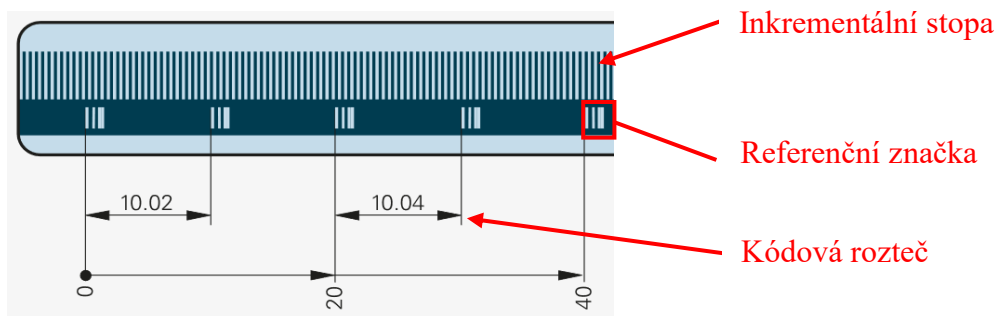
Signály z inkrementálního odměřování mají impulsní charakter, jedná se o dvojici fázově posunutých signálů o 90° , které mohou být obdélníkového tvaru, nebo také signály sinus a cosinus (viz obrázek 9), záleží na typu odměřovacího systému. Údaj o poloze je určen počáteční (referenční) hodnotou, ke které jsou přičítány nebo odčítány dráhové přírůstky.



Obrázek 9 – Výstupní signál 1Vpp z enkodéru [9]

U motorových snímačů s inkrementální stopou je ve více případech používáno signálu s rozkmitem 1Vpp. Ve skutečnosti se jedná o 2 páry vodičů (A+, A-) a (B+, B-) mezi nimiž je vyhodnocována napěťová diference. [9]. Jedna perioda signálu (obrázek 9) odpovídá vzdálenosti mezi jednotlivými ryskami snímače. Signál je však možno dále zpracovat, z každé signálové periody může být získáno např. 1024 hodnot (interpolace 1:1024) a tím dosáhnou větší rozlišovací schopnosti snímače a kvality řízení. Například při počtu 3600 rysek lze interpolací 1:1024 dosáhnout přibližně rozlišení 0.00001° úhlového kroku. Zpracováním signálů pomocí interpolace lze však zvýšit rozlišovací schopnost snímače, nikoliv jeho přesnost. [10].

Nevýhodou tohoto typu odměřování je, že po výpadku napájení snímače není uchována informace o aktuální poloze snímaného subjektu, proto jsou inkrementální snímače vybaveny minimálně jednou referenční značkou, přes kterou musí při zapnutí stroje přejet snímací hlava pro nastavení počáteční (referenční) hodnoty polohy. [6] Aby bylo vždy zajištěno určení stejné referenční polohy, bývá využíváno tzv. externích referenčních spínačů, na které je nutné v režimu nájezdu do reference polohovat. Ty jsou však umístěny na různých pozicích pracovního pojezdu suportu a dle rozsahu dráhy v ose se doba procesu nájezdu referencí může zvyšovat. Tento proces lze však urychlit užitím tzv. kódovaných referenčních značek.

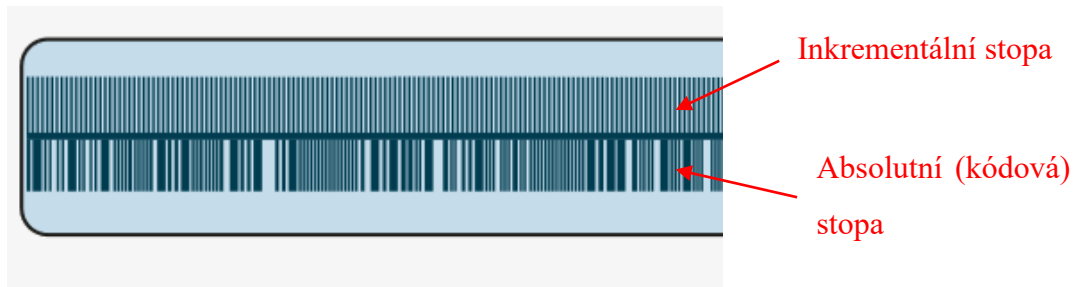


Obrázek 10 Zjednodušená interpretace inkrementální stopy lineárního snímače s kódovanými referenčními ryskami [9]

Při výpadku napájení ze snímače polohy musí snímací hlava přejet dvě sousední referenční značky. Informace o poloze je získána z rozdílných kódových roztečí. [6]

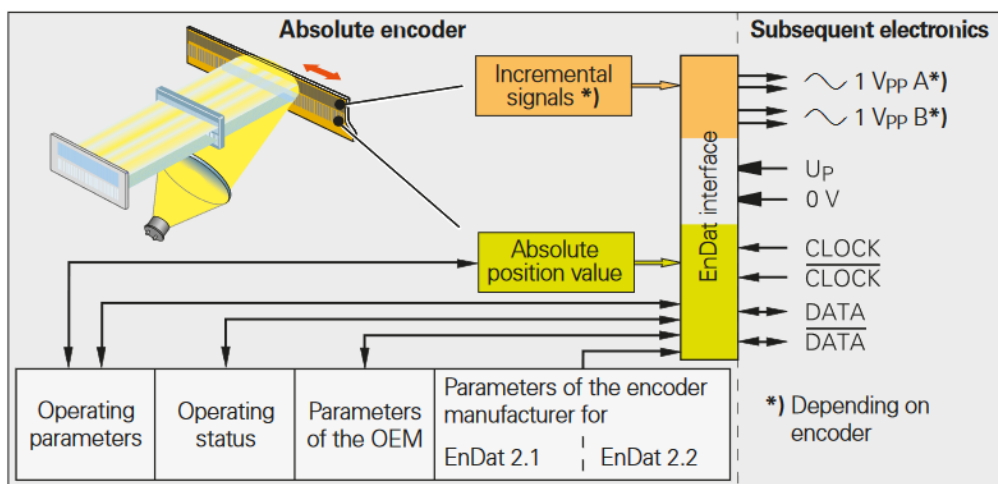
2.6 Absolutní snímače polohy

Absolutní snímače se v současné době se stávají standardem v oblasti aplikace u obráběcích strojů. Hlavní předností tohoto typu odměřování je, že odpadá nutnost najíždění referencí (počátečního bodu) jako u inkrementálních snímačů.



Obrázek 11 Zjednodušená interpretace absolutního odměřování s inkrementální stopou [9]

Informace o absolutní poloze po zapnutí napájení je do řídicího systému stroje předávána formou datového propojení. Současně se využívá inkrementální stopy, jelikož není možné z kódového měřítka odečíst přesně dráhu nebo úhel. [10]



Obrázek 12 Absolutní snímač s inkrementální stopou s rozhraním EnDat [9]

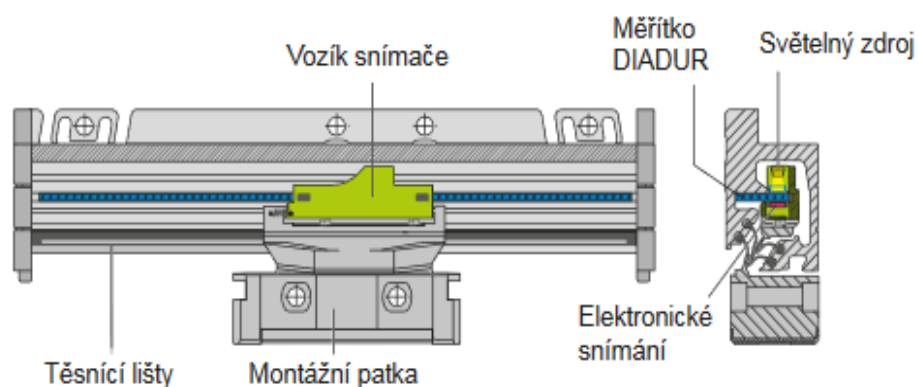
Výše je uvedeno blokové schéma absolutního snímače s inkrementální stopou a rozhraním EnDat, což je digitální obousměrné rozhraní firmy HEIDENHAIN pro snímače polohy založené na synchronním sériovém přenosu. [9]

2.7 Snímače pro přímé měření lineárních posuvů

Snímače polohy pracují velmi často na principu snímání mřížky s jemným rastrem rysek. Jedním z předních výrobců kvalitních lineárních snímačů polohy je firma Heideinhain, která disponuje škálou různých druhů odměřovacích systémů.

Měřítka s jemným rastrem a s vysokou přesností dělení rysek a mezer definovaného intervalu je realizováno pomocí fotolitografických procesů vyvinutých společností Heideinhain. Níže jsou uvedeny některé z používaných technologií: [9]

- AURODUR: Stupnice je realizována pozlacenými ryskami a matně leptanými mezerami většinou na ocelovém pásku s typickým odstupňováním rysek 40 μm . [9]
- DIADUR: Stupnice s ryskami je realizována pomocí tenké vrstvy chromu na nosném podkladu (sklo nebo sklokeramika) stupnice 4 – 8 μm . [9]
- METALLUR: Speciální reflektivní vrstva zlata na skleněném nebo ocelovém podkladu s typickým odstupňováním 20 μm a vysokou odolností vůči znečištění. [9]



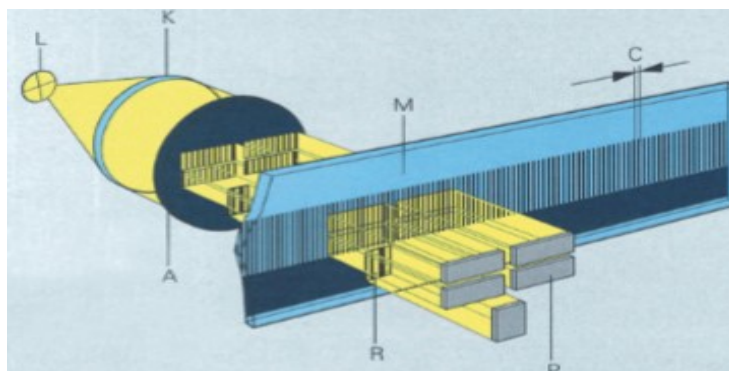
Obrázek 13 Zapouzdřený lineární polohový snímač firmy Heideinhain [9]

Jelikož jsou snímače vyrobeny z různých druhů materiálů, mají definované chování při změnách teploty. V průmyslovém prostředí, kde jsou nasazovány obráběcí stroje, mají využití hlavně zapouzdřené lineární snímače polohy, které jsou chráněny před prachem, třískami a stříkající vodou. Disponují hliníkovým pouzdrům a systémem těsnění. [9] Klíčovým parametrem snímače polohy je tedy jeho přesnost, které se u výše zmíněných lineárních snímačů pohybují od $\pm 2 \mu\text{m}$ do $\pm 5 \mu\text{m}$. [9]

Pro umístění polohových snímačů vůči posuvným částem platí následující pravidla: [6]

- Vzdálenost mezi posuvnou částí stroje a snímačem polohy by měla být co nejmenší, aby byl měřicí systém odolný vůči kmitavým vlivům.
- Snímač polohy by měl být umístěn co nejbližší k nástroji.
- Měl by být dodržen základní princip délkových měřících přístrojů, tzv. Abbeho princip, který říká, že měřítko přístroje by mělo ležet na jedné přímce s měřeným rozměrem.
- Dodržení montážních postupů deklarovaných výrobcem polohových snímačů.

Často používaný princip měření u lineárních snímačů je fotoelektrické snímání jemných rastrů s typickou periodou dělení mřížky 10–20 μm . Mřížka se skládá z rysek nepropouštějících světlo a mezer světlo propouštějících. To může být realizováno například neprůhledným potiskem na průhledném skleněném materiálu. Snímací hlava je tvořena zdrojem světla a optickou soustavou. Světlo procházející snímací maskou, rovněž vybavenou rastrem dopadá na fotosenzory – např. fotodiody, fototranzistor. Při pohybu snímací hlavy vzhledem k měřítku dochází k cyklickému překrývání mezer a rysek mřížky měřítka. Procházející světelný tok dopadající na fotosenzory se střídavě mění. Periodické změny osvětlení jsou registrovány fotosenzory a převáděny na odpovídající průběh elektrických signálů. Popsaný princip snímání se nazývá transparentní. Nosičem mřížky může být také ocelový pásek. Mřížka se skládá z rysek, které světelné záření odrážejí, a z mezer, které pohlcují světlo. Princip funkce je však stejný a označován jako reflexní. [6]



Obrázek 14 Fotoelektrický princip snímání [6]

L – Polovodičový zdroj, K – Kondenzor (optická soustava čoček), A – deska snímací hlavy
M – měřítko s rastrem, R – Referenční značka, C – perioda rastru, P – Fotodiody

3 DOSTUPNÉ METODY MĚŘENÍ DÉLEK LINEÁRNÍCH POSUVŮ

Pro měření délek se užívají tzv. interferenční komparátory (využívá ke své funkci interferenci dvojice paprsků) založeny na principu, který navrhl v roce 1881 americký fyzik Albert Abraham Michelson (1852-1931). [11]

3.1 Michelsonův interferometr

Měření je založen na interferenci světelných vln. Předpokládejme tedy dvě postupující vlny se stejnou rychlostí a směrem, lišící se pouze fázovým posunutím o úhel φ

První postupující vlna je dána vztahem:

$$y_1(x, t) = y_m \cdot \sin(kx - \omega t), \quad (23)$$

Kde k je úhlový vlnčet:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (24)$$

Zatímco druhá vlna je posunuta vzhledem k první:

$$y_2(x, t) = y_m \cdot \sin(kx - \omega t + \varphi) \quad (25)$$

Z principu superpozice pro výslednou vlnu vyplývá:

$$\begin{aligned} y'_m(x, t) &= y_1(x, t) + y_2(x, t) \\ &= y_m \sin(kx - \omega t) + y_m \sin(kx - \omega t + \varphi) \end{aligned} \quad (26)$$

S využitím goniometrického vzorce:

$$\sin(\alpha + \beta) = 2 \sin\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right) \cos\left(\frac{\alpha - \beta}{2}\right) \quad (27)$$

Pro vztah (25) platí:

$$y'(x, t) = \left(2y_m \cos\frac{1}{2}\varphi\right) \sin\left(kx - \omega t + \frac{1}{2}\varphi\right) \quad (28)$$

Interferencí dvou sinusových vln postupujících stejným směrem o stejné délce, amplitudě vznikne opět vlna sinusová, která se liší ve dvou případech. Fáze nově vzniklé vlny obsahuje konstantu $\frac{1}{2}\varphi$ a její velikost amplitudy je dána:

$$y'_m(x, t) = 2y_m \cos\frac{1}{2}\varphi \quad (29)$$

Je-li fázový posun $\varphi = 0$ (vlny jsou ve fázi), pro vztah (25) platí:

$$y'(x, t) = 2y_m \sin(kx - \omega t) \quad (30)$$

Vznikne vlna s maximální možnou amplitudou (dvojnásobek původní amplitudy). Jedná se o **úplnou konstruktivní interferenci**.

Je-li fázový posun $\varphi = 180^\circ$ (vlny jsou v protifázi), potom dostáváme ze vztahu (25):

$$y'(x, t) = \left(2y_m \overbrace{\cos \frac{1}{2}\varphi}^{=0} \right) \sin(kx - \omega t + \frac{1}{2}\varphi) = 0 \quad (31)$$

Tento typ se nazývá **úplná destruktivní interference**. Pokud interference není úplná destruktivní ani konstruktivní (amplituda výsledné vlny je $0 < y'(x, t) < 2y_m$), jedná se o interferenci **částečnou**.

Fázový rozdíl můžeme vyjádřit i jako dráhový. Fázový rozdíl 2π odpovídá dráhovému rozdílu d . Pro fázový rozdíl mezi dvěma vlnami platí:

$$\frac{\varphi}{2\pi} = \frac{d}{\lambda} \rightarrow \varphi = \frac{d}{\lambda} 2\pi \quad (32)$$

Vidíme, že fázový rozdíl je přímo úměrný dráhovému rozdílu a pro mezní stavy interference (konstruktivní a destruktivní) můžeme psát:

$$d = 2m \frac{\lambda}{2} = m\lambda, \quad m = \pm 0, 1, 2, 3 \dots \quad (33)$$

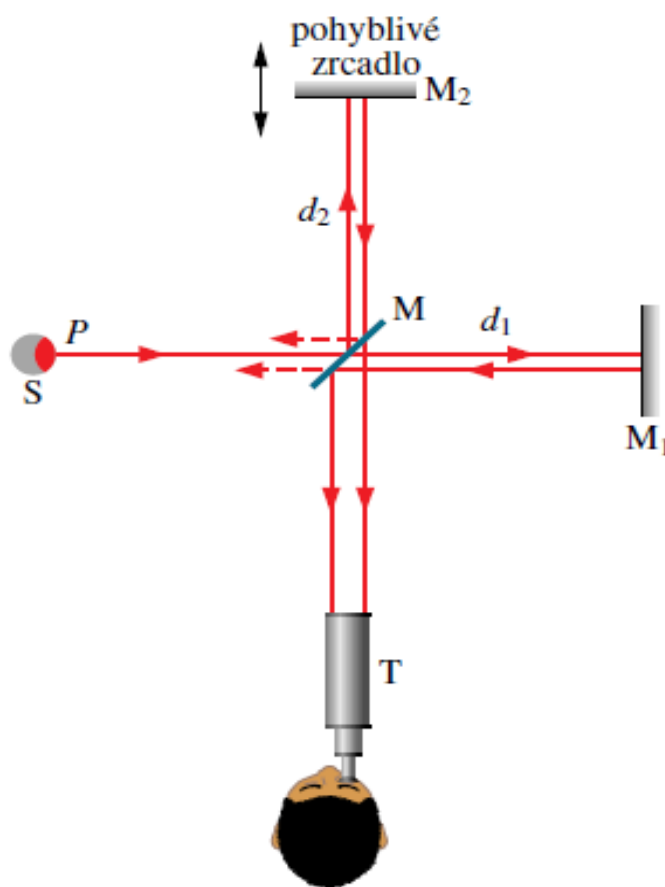
(konstruktivní interference)

$$d = (2m + 1) \frac{\lambda}{2} = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda, \quad m = \pm 0, 1, 2, 3 \dots \quad (34)$$

(destruktivní interference)

Z rovnice (33) vyplývá, že pokud je dráhový rozdíl roven celému násobku vlnové délky, respektive sudému násobku půlvln, vzniká konstruktivní interference.

Z rovnice (34) vyplývá, že pokud je dráhový rozdíl roven lichému násobku půlvln, vzniká destruktivní interference.



Obrázek 15 Michelsonův interferometr [11]

Interferometr se skládá ze zdroje S , polopropustného zrcadla M , pevného zrcadla M_1 a pohyblivého zrcadla M_2 . Svazek monochromatického světla vycházející ze zdroje S dopadá na polopropustné zrcadlo M_1 , kde je rozdělena na dva svazky, které se odráží od zrcadel M_1, M_2 . Svazky se vracejí podél směru dopadu do dalekohledu pozorovatele, který může vidět strukturu zakřivených či přímých interferenčních proužků.

Pokud se pohyblivé zrcadlo M_2 posune o $\lambda/4$, bude dráhový rozdíl je roven $d=\lambda/2$ (paprsek projde dráhu $2d_2$ tam i zpět). Dráhový rozdíl způsobí změnu fáze (viz rovnice 32) $\varphi=\pi$. Tím se tmavý proužek posune do místa světlého, ale situace může být i opačná (světlý proužek se posune do místa tmavého). Pokud posuneme zrcadlo M_2 znovu od $\lambda/4$, proužky se dostanou do své původní polohy. Tento destruktivní a konstruktivní cyklus způsobuje, že intenzita rekombinovaného světla podléhá cyklickým změnám. Jeden cyklus změny intenzity ze světla do tmy a opět ke světlu nastane vždy, když se měřící pohyblivé zrcadlo posune o polovinu vlnové délky paprsku. [11]

Tímto postupem můžeme měřenou délku vyjádřit pomocí násobku vlnové délky. [11]

$$d = N \frac{\lambda}{2} \quad (35)$$

Kde d je relativní posun, λ je vlnová délka laserového paprsku. N reprezentuje cyklus změny intenzity paprsku světlá – tmavá – světlá nebo opačně. To odpovídá i posunu odražeče o polovinu vlnové délky. [11]

3.2 Laserový interferometr

Laserový interferometr pracuje na stejném principu jako Michelsonův interferometr. Využívá jako zdroj mimořádně stabilního laserového záření s vlnovou délkou odpovídající mezinárodním normám. Využívá také speciální měřicí optiky umožňující provádět nejen lineární měření, ale například měření přímosti, kolmosti, rovinnosti atd. [12]



Jedním ze světově uznávaným laserovým kalibračním systémem se stal měřicí systém Renishaw ML10, který v současné době nahrazuje laserový systém XL-80.



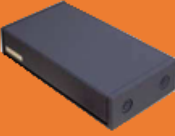

Obrázek 16 Měřicí systém Renishaw ML10 (vlevo) a XL-80 (vpravo) [13; 12]

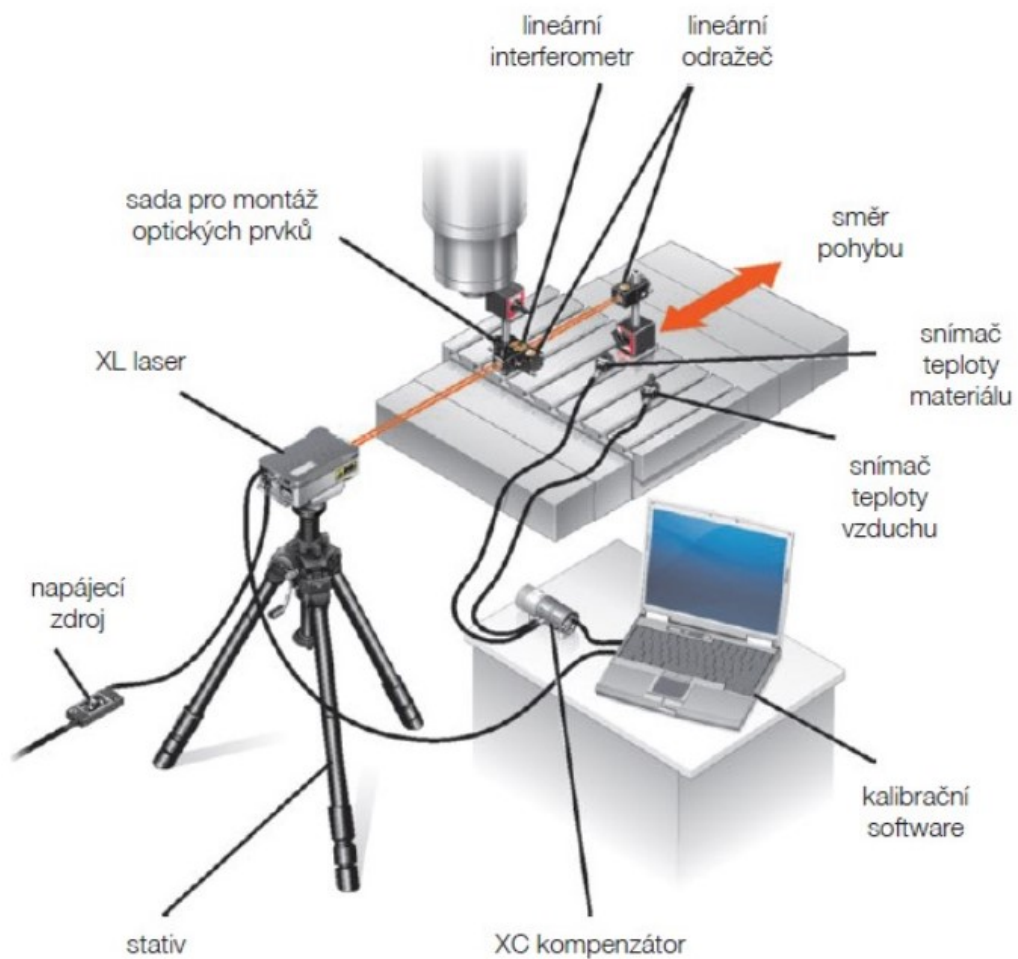
Jedná se o vylepšení přinášející vyšší přesnost, mobilitu, zachovává si však výhody čistě interferometrického systému viz tabulka 3, 4 uvedena níže. [12]

Tabulka 3 Srovnání technických parametrů ML10 a XL-80 [13; 12]

Technické parametry laserového systému	 ML10	 XL-80
Hmotnost	4.5 kg	1.85 kg
Rozměry	335x176x75 mm	241x120x70 mm
Rozsah lineárního měření	40 m standard (max. 80 m)	80 m
Přesnost lineárního měření	$\pm 0.7 \mu\text{m/m}$	$\pm 0.5 \mu\text{m/m}$
Přesnost frekvence laseru	$\pm 0.05 \mu\text{m/m}$	$\pm 0.05 \mu\text{m/m}$
Rozlišení	1 nm	1 nm
Pracovní teplota	0° - 40 °C	0° - 40 °C
Max. rychlost sním. pohybu	1 m/s	4 m/s
Laserový zdroj	HeNe Laser	HeNe Laser
Vlnová délka	$\approx 633 \text{ nm}$	$\approx 633 \text{ nm}$

Tabulka 4 Srovnání parametrů kompenzátoru EC10 a XC-80 [13; 12]

Technické parametry kompenzátoru vlivu prostředí	 EC10		 XC-80	
Hmotnost	4 kg		490 g	
Rozměry	335x176x75 mm		135x58xx52 mm	
	Rozsah	Přesnost	Rozsah	Přesnost
Teplota materiálu	0 °C–40 °C	$\pm 0,1 \text{ °C}$	0 °C–55 °C	$\pm 0,1 \text{ °C}$
Teplota vzduchu	0 °C–40 °C	$\pm 0,2 \text{ °C}$	0 °C–40 °C	$\pm 0,2 \text{ °C}$
Tlak vzduchu	750-1150 mbar	$\pm 1 \text{ mbar}$	650–1150 mbar	$\pm 1 \text{ mbar}$
Relativní vlhkost	0 % až 95 %	$\pm 15 \text{ %}$	0 % až 95 %	$\pm 6 \text{ %}$



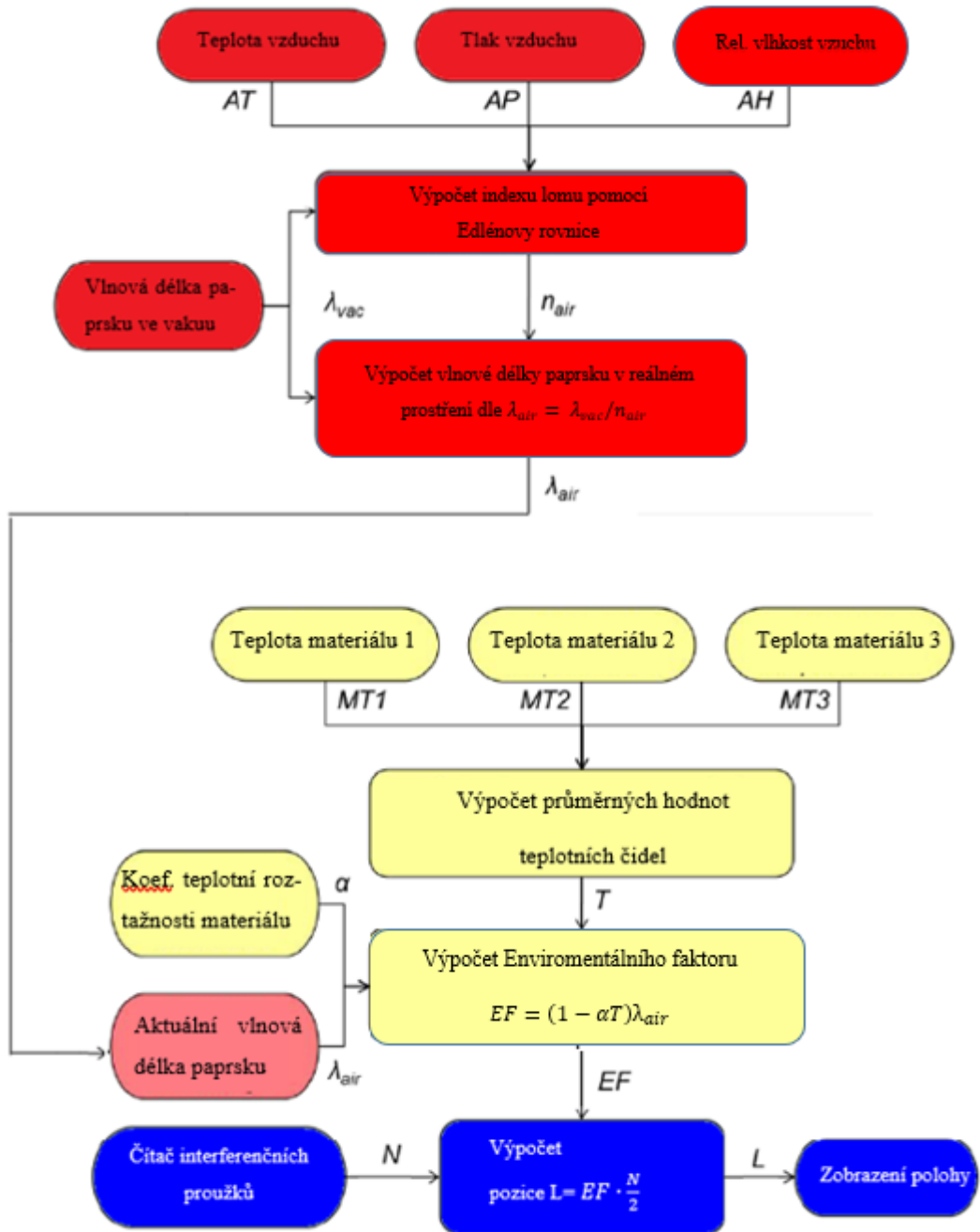
Obrázek 17 Kompletní sestava laserového interferometru Renishaw XL-80 s kompenzátořem XC-80 [14]

Kalibrační software Renishaw XL-80 s aktivní kompenzační jednotkou XC-80 využívá při měření zjednodušené empirické Edlénovy rovnice, pro výpočet indexu lomu vzduchu.

$$n_{air} = 1 + \left(\frac{7.86 \cdot 10^{-5} \cdot P}{273 + T} \right) - 1.5 \cdot 10^{-11} \cdot H \cdot (T^2 + 160) \quad (36)$$

Výše uvedený vztah tedy zohledňuje při výpočtu indexu lomu teplotu prostředí T , atmosférický tlak P a relativní vlhkost H . Na základě těchto hodnot upravuje měřicí systém hodnotu vlnové délky laserového paprsku, známé ve vakuu. Jelikož laserový paprsek prochází reálným prostředím, proto je ovlivněna i vlnová délka paprsku. Na vlnovou délku paprsku má největší vliv právě teplota (T je ve vztahu v druhé mocnině). Níže je uvedeno

blokové schéma ilustrující princip výpočtu polohy pomocí laserového měřicího systému Renishaw s aktivní elektronickou kompenzací zohledňující parametry prostředí. [15]



Obrázek 18 Výpočet měřené polohy s aktivní kompenzací [15]

Z výše uvedeného obrázku vyplývá, že při výpočtu lineární polohy měřicí systém Renishaw využívá pro výpočet namísto vlnové délky paprsku tzv. enviromentální faktor. [15]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 POPIS APLIKACE AXIS CORRECTION

Praktickým výstupem této diplomové práce je aplikace – softwarový nástroj pro konverzi naměřených dat polohových úchylek pomocí laserového měřicího systému firmy Renishaw XL-80. Aplikace poskytuje možnost vytvářet z naměřených dat kompenzační (korekční) data a jejich následnou konverzi pro CNC řídicí systémy Heideinhain iTNC530, TNC640 a Siemens SINUMERIK 840D. Obsahuje grafické uživatelské rozhraní s možností textové a grafické interpretace naměřených a kompenzačních dat. Naměřená data jsou zpracována jako datový soubor ve formátu .rtl, což je standardní datový formát poskytovaný kalibračním softwarem LaserXL™ firmy Renishaw a jeho softwarového modulu pro lineární měření Renishaw LaserXL Capture. Aplikace dále poskytuje možnost z naměřených hodnot vytvářet kompenzační data ve formátech přizpůsobených pro řídicí CNC systémy Heideinhain iTNC530, TNC640 a Siemens SINUMERIK 840D. Na základě uživatelského nastavení lze vytvářet výstupní data (kompenzační soubory), které je možno přímo aplikovat ve výše uvedených systémech pro zavedení délkových elektronických kompenzací, jimiž jsou tyto moderní CNC systémy vybaveny.

4.1 Požadavky kladené na aplikaci

Aplikace musí z naměřených dat polohových odchylek lineárních posuvů obráběcího stroje vytvořit korekční data a umožnit jejich konverzi do souborů podporovaných řídicími systémy Heideinhain iTNC530, TNC640 a Siemens SINUMERIK 840D.

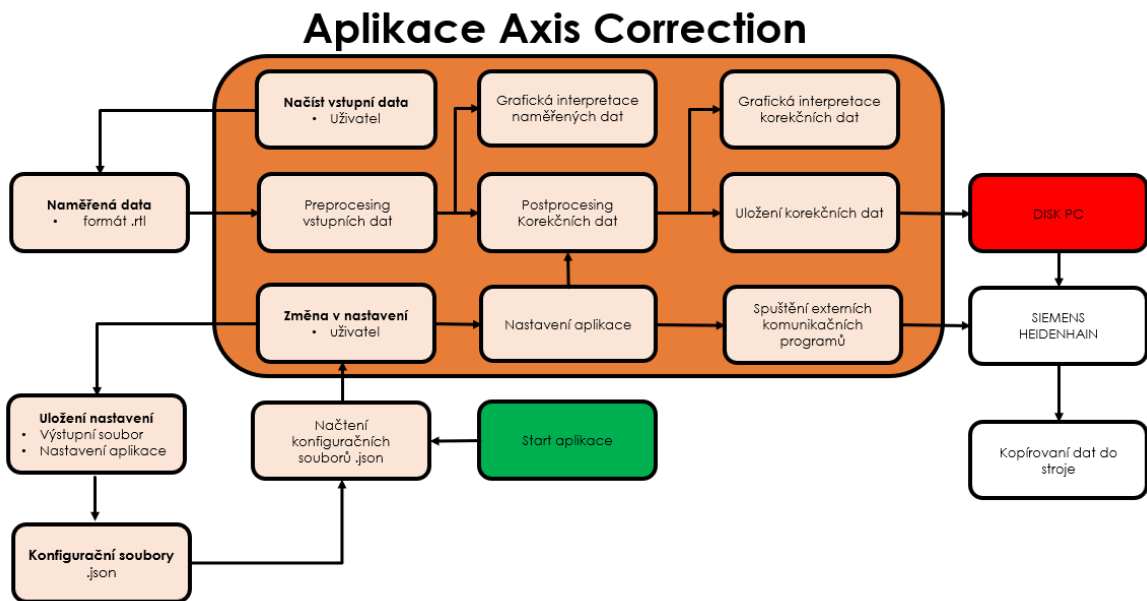
Implementaci bylo možno realizovat v libovolném programovacím jazyce. Aplikace byla nakonec implementována v jazyce Java, jako Java FX FXML Application. Kompletní zdrojový kód se nachází v příloze této práce.

4.2 Volba platformy

K tvorbě aplikace byla zvolena platforma Java ve verzi Java SE 1.8. JDK 8 zahrnuje technologii JavaFX. JavaFX obsahuje knihovny, které usnadňují tvorbu GUI aplikací. Například vazby mezi jednotlivými vlastnostmi komponent GUI z důvodů pozorovatelných vlastností komponent. JavaFX dále obsahuje pozorovatelné kolekce, což umožňuje sledovat změny obsahu těchto kolekcí. Při tvorbě aplikace je přínosem použití

knihoven pro práci s grafy, která ulehčuje jejich tvorbu. Technologie JavaFX obsahuje vše potřebné k tvorbě aplikace a není tedy nutné používat knihoven třetích stran. [16]

4.3 Architektura aplikace



Obrázek 19 Blokové schéma architektury aplikace

Načítání dat do aplikace

Načtení souboru je provedeno pomocí souborového prohlížeče. Načtená cesta k souboru je předána třídě RtlParser. Ta má za úkol v aplikaci zpracovat načtený soubor .rlt do 6 sekcí dle jejich významu. Význam sekcí je následující:

- RtlHeader – hlavička souboru obsahuje informace o typu souboru, druhu měření a verzi softwaru Renishaw LaserXL.
- RtlTargetData – typ použitého standardu měření, počet měřících bodů a jejich hodnoty.
- RtlUserText – uvádí informace o měřeném stroji, jeho sériovém čísle, datumu měření, kdo měření provedl, měřená osa, místo měření, a popis.
- RtlRun – definuje počet měřících cyklů.
- RtlDeviation – naměřené polohové úchytky.
- RtlEnvironment – informace o podmínkách měření (teplota, tlak, vlhkost...)

Zpracování naměřených dat

Parsovaná data jsou uložena ve vlastnostech třídy RtlFileWrap. Data jsou dále zpracována pro potřeby vytváření korekčních souborů. Vytváření korekčních dat zajišťuje třída MeanMeasurementValue.

Interpretace dat.

- Graf – vstupní a výstupní (korekční) data jsou vykreslována pomocí tříd LineChart.
- Text – vstupní a výstupní data jsou zobrazována pomocí komponent TextArea v hlavním okně aplikace.
- Výstupní soubor – lze uložit jako soubor ve formátech .txt, .MFP a .COM.

Vytváření korekčních dat

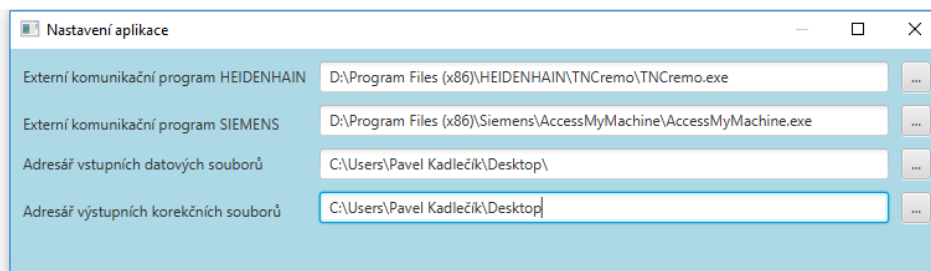
Konverze naměřených dat včetně výstupního formátování dle uživatelského nastavení je realizováno pomocí metody createOutputFile() nacházející se v FXMLAxisCorrectionController. Na konci této metody jsou výstupní data předána pomocí metody setOutContent() obsažené v FXMLMainScreenController jako String a následně zobrazena v komponentně TextArea v hlavním okně aplikace.

Ukládání uživatelských nastavení

Uživatelská nastavení jsou načítána při spuštění aplikace ze souborů .json a udržována v třídách UserSettings a OutputFileSettings. V třídách je implementováno i ukládání změn v nastavení provedené uživatelem.

Nastavení aplikace

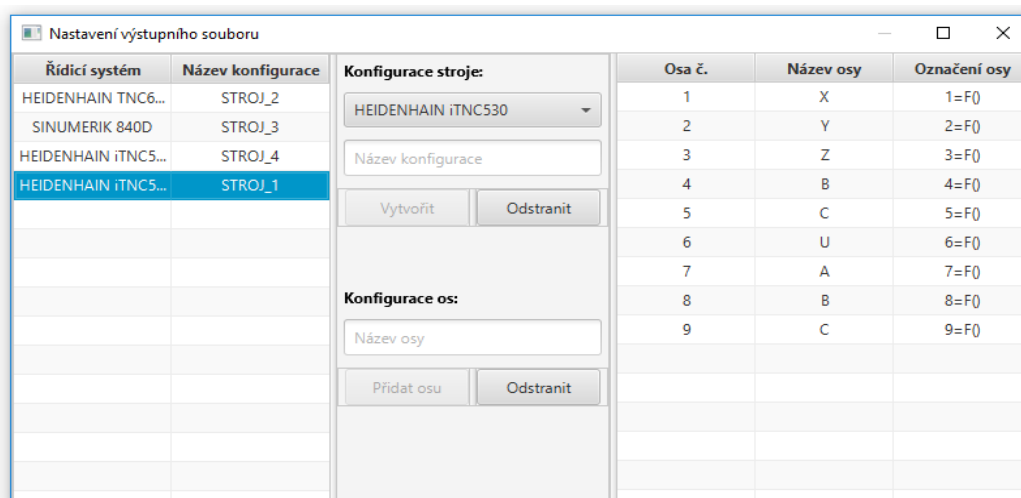
Poskytuje uživateli nastavení adresáře vstupních a výstupních datových souborů. Pokud není nastavení uživatelem definováno, jsou vstupní a výstupní adresáře směřovány na domovskou složku aktuálně přihlášeného uživatele. Uživatel má dále možnost zadat cestu k externím komunikačním programům, které slouží pro přenos souborů mezi PC a CNC řídicím systémem. Externí programy lze poté spouštět z prostředí této aplikace. Uživatelské nastavení aplikace je ukládáno do formátu .json.



Obrázek 20 Uživatelské nastavení aplikace

Nastavení výstupního souboru

Jednotlivé řídicí systémy mají specifický formát výstupního souboru (viz kapitola 4.5). Uživateli je umožněno definovat nastavení struktury výstupního souboru pro jednotlivé systémy. Uložená nastavení si poté může uživatel zvolit pro generování výstupního souboru. Struktura formátu výstupního souboru se může lišit i v rámci jednoho konkrétně zvoleného řídicího systému. Je to dáno především variabilitou nastavení parametrů stroje. Ukládání nastavení výstupního souboru je řešeno pomocí souboru .json, který tak umožňuje distribuci konfiguračních souborů pro opakované použití.



Obrázek 21 Nastavení formátu výstupního souboru

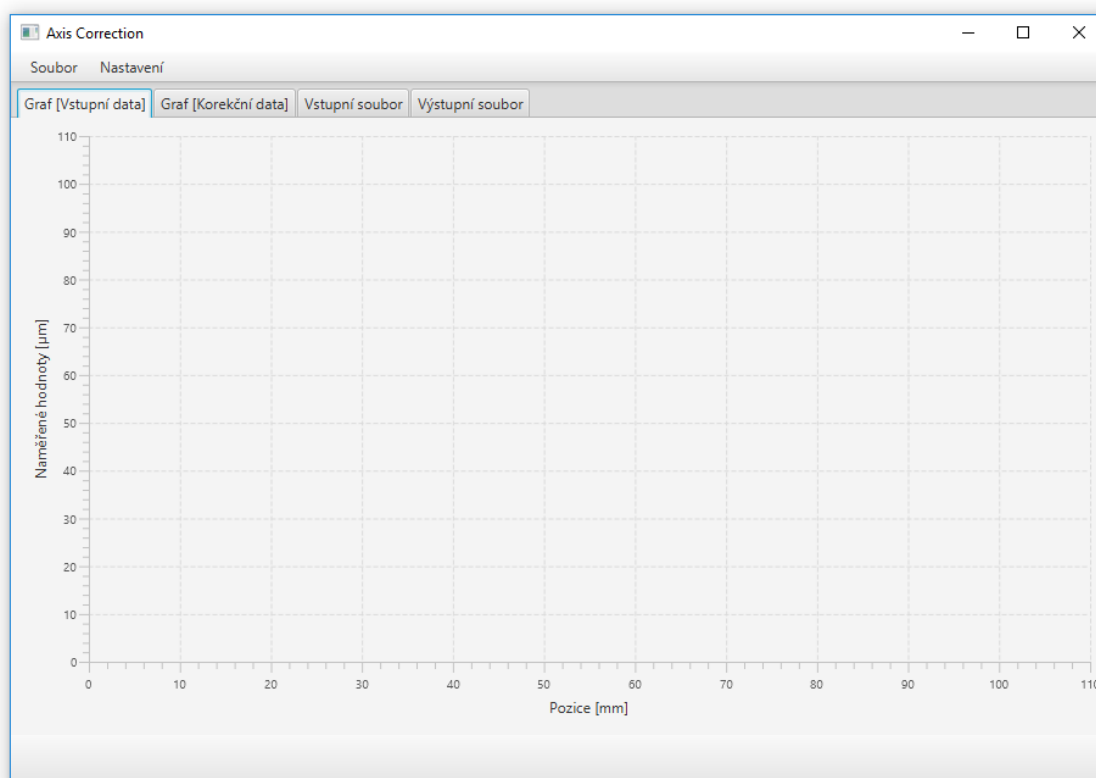
Export výstupního souboru

Výstupní data je možné uložit na disk PC, ve kterém je aplikace spuštěna a následně je nahrát do řídicího systému pomocí externího komunikačního programu. V tomto případě se jedná o programy TNCremo pro řídicí systémy Heideinhain a AccessMyMachine, případně RCS Commander pro řídicí systémy Siemens. Jedná se o programy dodávané výrobcí řídicích systémů.

4.4 Popis GUI aplikace

4.4.1 Hlavní okno aplikace

Hlavní okno se zobrazí po spuštění aplikace. Z jeho menu lze získat přístup k ostatním volbám. Jednotlivé volby jsou popsány v následujících tabulkách.



Obrázek 22 GUI – Hlavní okno aplikace

Tabulka 5 Popis komponent v menu Soubor

Menu: Soubor	Zkratka	Popis
Otevřít	CTRL+O	Načtení naměřených dat ze souboru. rtl
Vytvořit	CTRL+N	Vytvoření korekčních dat z naměřených hodnot
Uložit	CTRL+S	Uložení korekčních dat pro jednotlivé ŘS
Zavřít	CTRL+Q	Ukončení aplikace

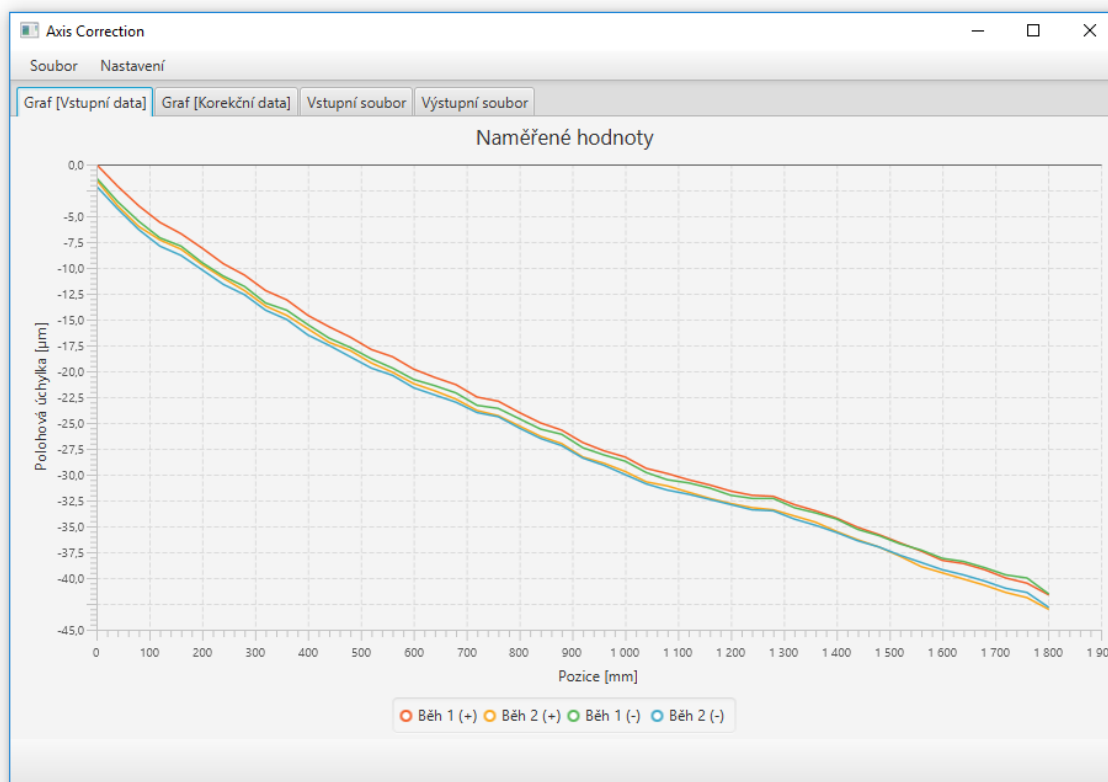
Tabulka 6 Popis komponent v menu Nastavení

Menu: Nastavení	Zkratka	Popis
Aplikace	CTRL+X	Uživatelské nastavení aplikace
Výstupní soubor	CTRL+Y	Nastavení formátu výstupního souboru

Ve formuláři hlavního okna aplikace je umístěn kontejner TabPane obsahující celkem čtyři záložky:

Graf [Vstupní data]

Tato záložka obsahuje komponentu LineChart sloužící pro zobrazování naměřených dat souborů .rtl. Po načtení vstupního souboru .rtl jsou data automaticky zobrazena v grafu. Graf zobrazuje hodnoty jednotlivě měřených sérií jednostranných úchylek polohy v kladném směru pohybu a záporném směru pohybu.



Obrázek 23 GUI – Graf vstupních dat

Graf [Korekční data]

Obdobně jako záložka Graf [Vstupní data] obsahuje stejnou komponentu LineChart sloužící pro zobrazování korekčních dat, které jsou vypočítány na základě naměřených hodnot polohových úchylek. Po načtení vstupního souboru .rtl jsou naměřená data v aplikaci automaticky zpracována a jejich průběh následně vykreslen do grafu.

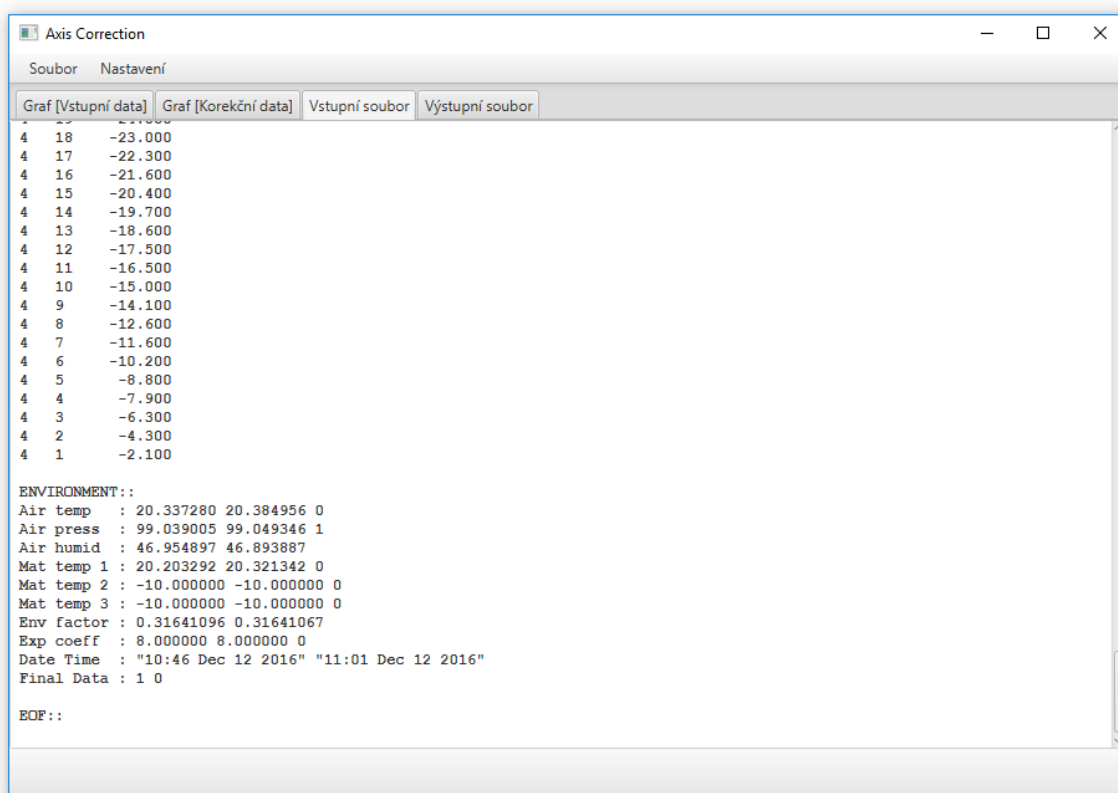


Obrázek 24 GUI – Graf korekčních dat

Graf korekčních dat obsahuje celkem tři série běhů, z nichž oranžová série označená Korekce (viz obrázek 24) odpovídá korekčním hodnotám určených dle vztahu (4) uvedeného v kapitole 1.2. Jedná se o aritmetický průměr polohových úchylek, při najíždění do polohy v obou směrech. Tato série dat slouží pro elektronické kompenzace lineárních posuvů příslušné osy. Série označené jako Běh (+) a Běh (-) odpovídají hodnotám jednosměrných polohových úchylek, při polohování jedním i druhým směrem, vypočítané na základě vztahů (2), (3) uvedených v kapitole 1.2

Vstupní soubor

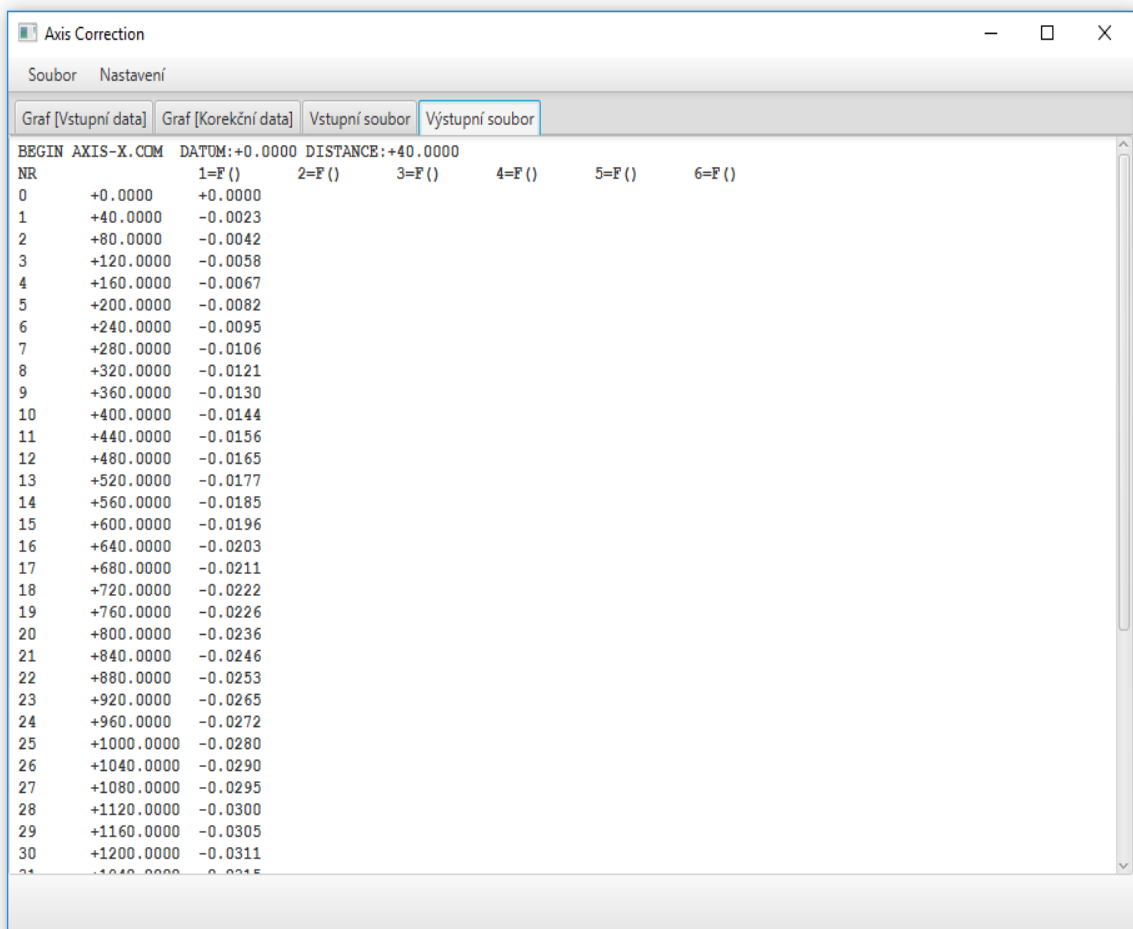
Záložka vstupní soubor poskytuje uživateli textovou interpretaci vstupního souboru (dat) formátu. rtl. Uživatel má však přístup mimo jiné také k dalším údajům jako je datum, čas, teplota, tlak, vlhkost na začátku a na konci měření. Tento přístup je umožněn pouze pro čtení.



Obrázek 25 GUI – Vstupní soubor

Výstupní soubor

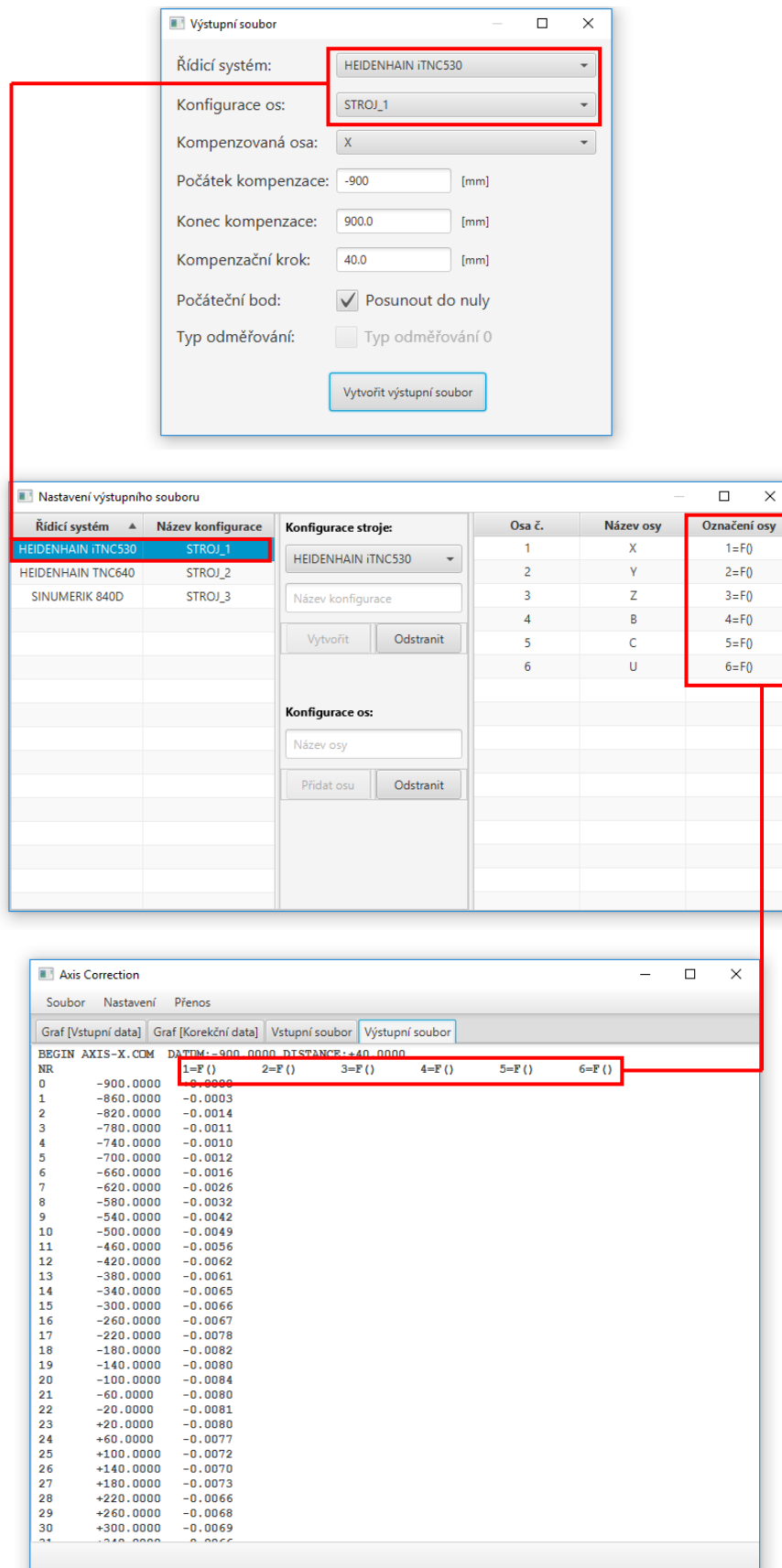
Záložka výstupní soubor umožňuje uživateli náhled na výslednou strukturu výstupního souboru, který obsahuje korekční data před uložením na disk PC. Uživatel má možnost provést kontrolu výstupního souboru a případně korekční data znovu vygenerovat. Struktura výstupního souboru závisí na volbě typu řídicího systému a volbě kompenzované osy, kterou uživatel zvolí.



Obrázek 26 – GUI Výstupní soubor ve formátu pro Heideinhain iTNC530

4.4.2 Nastavení výstupního souboru

Každý CNC řídicí systém má specifický formát a způsob zadávání korekčních dat (viz kapitola 4.5). U řídicích systémů Heideinhain je závislost výstupního souboru dána především počtem strojních os. Aby byla zachována struktura korekčních dat (tabulek) na stroji, tak lze v menu nastavení výstupního souboru definovat konfiguraci pro každý typ stroje samostatně, a k ní patřičný počet strojních os. Pokud uživatel při vytváření výstupního souboru zvolí příslušnou konfiguraci, výstupní soubor bude pro řídicí systémy Heideinhain vygenerován v závislosti na zvolené konfiguraci. Následující obrázek ilustruje výše uvedenou závislost. Tato závislost není platná u výstupních souborů pro řídicí systémy Siemens.



Obrázek 27 Vztah mezi konfigurací výstupního souboru a korekčními daty

4.5 Elektronické kompenzace CNC řídicích systémů

Elektronické kompenzace jsou nedílnou součástí moderních řídicích systémů. Způsoby řešení a aktivace elektronických kompenzací jsou však specifické pro daný řídicí systém. Níže budou popsány způsoby řešení elektronických kompenzací pro řídicí systémy Heideinhain iTNC530, TNC640 a Siemens SINUMERIK 840D se zaměřením na nelineární délkové korekce.

4.5.1 Heideinhain iTNC530

U řídicích systémů Heideinhain iTNC530 se jedná o soubory s příponou .COM, které jsou na systému reprezentovány formou tabulky určité struktury. U souborů .COM se na jednotlivé osy odkazuje číselným indexem.

Referenční souřadnice polohy osy X

Soubor: X.COM		DATUM: +0		DISTANCE: 100		>>	
NR	1=F()	2=F()	3=F()	C1	C2		
0	+0	+0.0000					
1	+100	-0.0023					
2	+200	-0.0042					
3	+300	-0.0057					
4	+400	-0.0057					
5	+500	-0.0032					
6	+600	-0.0095					
7	+700	-0.0106					
8	+800	-0.0121					
9	+900	-0.0130					
10	+1000	-0.0144					
[END]							

Kompenzační data definovaná pro jednotlivé referenční souřadnice polohy osy č.1

Obrázek 28 – Korekční tabulka (soubor) pro osu X na iTNC530

V systému pak existuje několik souborů s příponou .COM, do který lze vkládat přímo korekční data. Popis struktury souboru .COM je uveden níže, pozn. všechny číselné hodnoty uváděné v souboru jsou v jednotkách mm, v případně rotačních os se hodnoty uvádí v jednotkách °.

- **NR** – udává číslo řádku
- **Hlavička souboru** – .COM obsahuje parametry DATUM a DISTANCE. Parametr DATUM definuje počátek kompenzované dráhy v dané ose. Parametr DISTANCE definuje hodnotu kompenzačního kroku, zde je uvedena hodnota 100 mm.
- **Sloupce *=F()** – slouží pro vkládání kompenzačních dat. Hodnoty zapsané ve sloupci 1=F()) odpovídají kompenzačním datům definovaných pro osu č.1. Číselný index může odpovídat např. ose X, záleží na konfiguraci v řídicím systému. [17]

4.5.2 Heidenhain TNC640

Řídicí systém TNC640 má korekční soubory řešené také tabulkovou formou se stejnou příponou .COM jako iTNC530. Pro označení příslušné osy je již používán přímo její název, nikoli číselné označení. Mezi názvy sloupců pro popis jednotlivých os však existuje závislost, která je záležitostí strojních parametrů. Počet sloupců, respektive os, se musí také shodovat s definicí ve strojních parametrech. [18]

NR	AXISPOS	BACKLASH	X	Y	Z
0	+0		+0.0000		
1	+100		-0.0023		
2	+200		-0.0042		
3	+300		-0.0057		
4	+400		-0.0067		
5	+500		-0.0082		
6	+600		-0.0095		
7	+700		-0.0106		
8	+800		-0.0121		
9	+900		-0.0130		
10	+1000		-0.0144		

Referenční souřadnice polohy osy X

Kompenzační data definovaná pro jednotlivé referenční souřadnice polohy

Obrázek 29 Korekční tabulka (soubor) pro osu X na TNC640

Níže jsou uvedeny jednotlivé definice sloupců. Všechny číselné údaje mohou být zadávány v jednotkách mm nebo úhlových jednotkách ° dle typu strojní osy (rotační, translační):

- NR – udává číslo řádku
- AXISPOS – udává referenční souřadnici polohy v tomto případě souřadnici osy X. Kompenzační krok je zde roven 100 mm (lze volit libovolně). Počátek a konec kompenzované dráhy je dán první a poslední hodnotou ve sloupci AXISPOS.
- BACKLASH – definuje kompenzační hodnoty pro mrtvý chod osy. Ty mohou být získány měřením pomocí laserového interferometru a určeny na základě vztahu (6) definovaného v kapitole 1.2.1.
- Sloupce X, Y, Z – slouží k zadávání korekčních hodnot v jednotkách mm. Pro zadání elektronické délkové kompenzace je v tomto případě použit sloupec X. [18]

4.5.3 Simemens SINUMERIK 840D

Elektronické kompenzace na řídicím systému SINUMERIK 840D lze aktivovat dvěma způsoby:

- Vytvořením NC programu a spuštěním na řídicím systému.
- Nahráním kompenzačních tabulek z externího PC do systému.

Načtení korekčních hodnot do kompenzačních tabulek může být provedeno pouze tehdy, pokud je příslušná kompenzační funkce neaktivní pro všechny osy ve strojních parametrech.

```
MD32700 $MA_ENC_COMP_ENABLE[<axis>] == 0
```

Dále musí být ve strojních datech definován maximální počet kompenzačních bodů

```
MD38000 $MA_MM_ENC_COMP_MAX_POINTS[<e>,<AXi>]
```

Pro zavedení kompenzačních hodnot do řídicího systému lze použít .MPF soubor, což je NC program, ve kterém bylo nutné definovat tyto klíčové příkazy:

```
$AA_ENC_COMP_STEP[<e>,<AXi>] - Kompenzační krok
```

```
$AA_ENC_COMP_MIN[<e>,<AXi>] - Počátek kompenzace (referenční souřadnice)
```

```
$AA_ENC_COMP_MAX[<e>,<AXi>] - Konec kompenzace (referenční souřadnice)
```

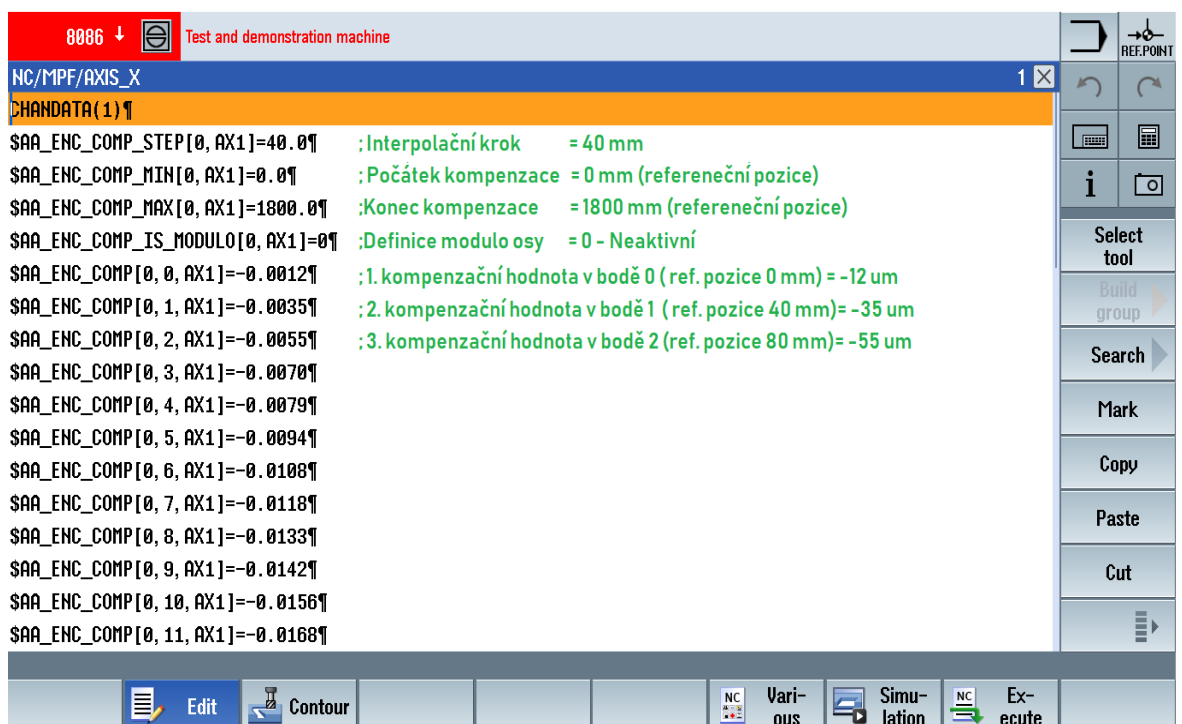
```
$AA_ENC_COMP_IS_MODULO[<e>,<AXi>] – Definice osy modulo (pro rotační osy)
```

Kompenzační hodnoty pro N měřících bodů zapisují do souboru pomocí příkazu

```
$AA_ENC_COMP[<e>,<N>,<AXi>]
```

Parametry v závorkách udávají:

- <e> - definuje číselný index odměřovacího systému. Může nabývat hodnot 0 nebo 1. Udává informaci, zda mají být aktivovány kompenzace ve vztahu k nepřímému (odměřování z motoru) či přímému odměřování. To, jestli hodnota 1 označuje přímé odměřování je záležitostí nastavení strojních parametrů řídicího systému.
- <AXi> specifikuje index osy, která má být kompenzována.
- <N> - Interpolační bod udává referenční pozici (souřadnici) osy, na které má být uplatněna kompenzační hodnota.



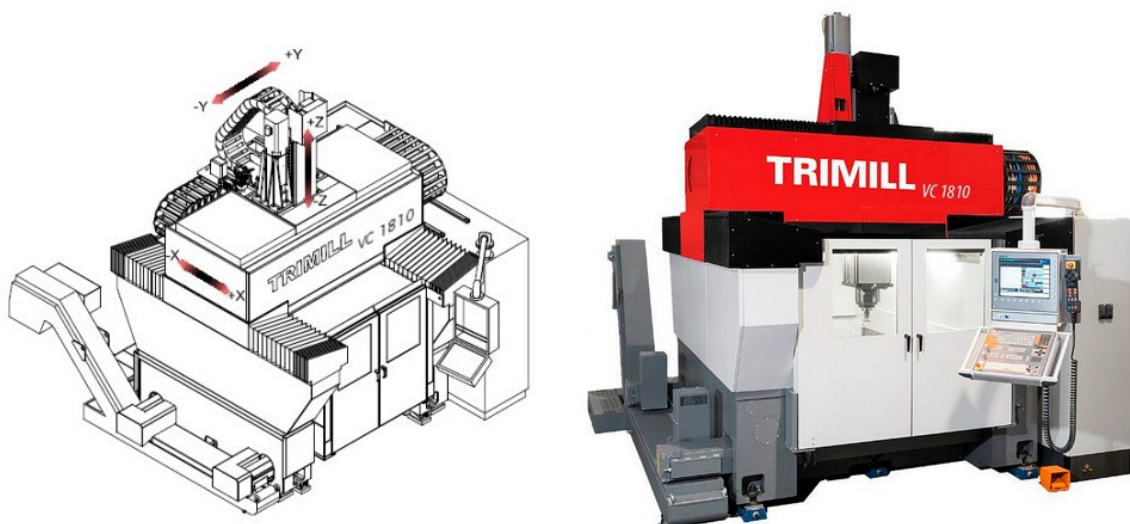
Obrázek 30 – Ukázka souboru .MFP s korekcemi pro SINUMERIK 840D

5 MĚŘENÍ PŘESNOSTI A OPAKOVATELNOSTI LINEÁRNÍCH POSUVŮ OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

Ve fázi dokončení výroby obráběcího stroje i po určité době provozu je nutné ověřovat přesnost a opakovatelnost nastavení polohy u číslicově řízených os a jejich posuvných mechanismů. U obráběcích strojů, na které jsou kladeny vysoké požadavky na přesnost v řádech tisíců milimetrů se ověřuje přesnost výhradně laserovými měřicími systémy, které dokáží měřit délku s certifikovanou přesností deseti tisíců milimetrů, tedy minimálně o jeden řád vyšší, než je pracovní přesnost samotného obráběcího stroje.

5.1 Měření přesnosti a opakovatelnosti lineárních posuvů reálného stroje

Cílem měření bylo získat polohové úchyly v osách X, Y, Z, které slouží jako vstupní data ke zpracování aplikace navržené v této práci, jejíž výstupem jsou korekční data určená k elektronické kompenzaci lineárních posuvů. Měření lineárních posuvů bylo realizováno na 3osém portálovém vertikálním obráběcím stroji v provedení horní gantry s řídicím systémem Heideinhain TNC640 ve firmě TRIMILL a.s. Tento typ stroje se uplatňuje především pro obrábění forem, nástrojů a zápusťek. Je vhodný pro hrubovací a dokončovací operace.



Obrázek 31 Vertikální obráběcí centrum VC1810 [19]

Tabulka 7 Vybraná technická data stroje VC1810 [19]

Osa	Pojezd	Převod KŠM	Typ odměřování
X – podélná	1800 mm	Stoupání 15	LC 115
Y – příčná	1000 mm	Stoupání 15	LC 115
Z – svislá	700 mm	Stoupání 15	LC 115

Převod rotačního pohybu servopohonů na lineární pohyb je na stroji realizován pomocí kuličkového šroubového mechanismu (KŠM). Přímé odměřování je realizováno pomocí lineárních zapouzdřených polohových snímačů firmy HEIDENHAIN LC 115. Jedná se o absolutní snímače s inkrementální stopou a rozhraním Endat22 (obchodní označení). Garantovaná přesnost odměřovacího systému LC 115 $\pm 3\mu\text{m}$ (do velikosti $<3040\text{ mm}$). Snímač polohy LC115 je vyroben pomocí technologie DIADUR na skleněném podkladu, má koeficient tepelné roztažnosti $\alpha_{term} \approx 8 \cdot 10^{-6}K$.

Měření bylo provedeno pomocí laserového měřicího systému XL-80. Ideální je měření provádět za stabilní teploty, jak u měřících přístrojů, tak u měřeného subjektu. Jelikož je měřicí proces zatížen poruchami, nelze vždy ideálních podmínek dosáhnout a je nutné, aby měřicí systém tyto okolnosti při měření zohlednil. K tomu slouží právě kompenzační jednotka XC-80.

5.2 Podmínky a postup měření

5.2.1 Podmínky měření

Před měřením přesnosti a opakovatelnosti lineárních posuvů os X, Y, Z pomocí laserového interferometru byly splněny tyto body:

- Zkoušený stroj byl ve vyhovujícím stavu z hlediska geometrie, plně funkční a kompletně smontován.
- Veškeré kompenzační programy byly na řídicím systému deaktivovány.
- Stroj nebyl při měření nijak zatížen.
- Před měřením byl spuštěn hodinový NC program zajišťující rovnoměrný pohyb všech měřených os, aby byla zajištěna teplotní stabilita.
- Měření probíhalo v teplotně stabilním prostředí.

- Byly vytvořeny zkušební NC programy, tak aby se nastavovaná část dané osy pohybovala do žádaných poloh a mohla být dosažena a změřena skutečná poloha. Rychlost posuvu při měření byla $F = 4000$ mm/s. Při dosažení žádané polohy zůstala nastavovaná část na pozici 5 sekund. Při finálním měření bylo do každé žádané pozice polohováno celkem 6krát. Pro získání korekčních souborů byly provedeny 2 běhy. Do každé z žádaných pozic bylo polohováno celkem 4krát.

Tabulka 8 Parametry měření

Osa	Měřená dráha	Rychlost posuvu	Měřicí krok
X – podélná	1800 mm	4000 mm/s	40 mm
Y – příčná	1000 mm	4000 mm/s	25 mm
Z – svislá	700 mm	4000 mm/s	14 mm

```

TNC: \TRIMILL\LINKOR\LINKOR_X.H
→ LINKOR_X.H
0 BEGIN PGM LINKOR_X_MM
1 M31
2 LBL 3
3 L X-900.9 R0 F4000 M91
4 CYCL DEF 9.0 CASOVA PRODLEVA
5 CYCL DEF 9.1 PRODLV2
6 L IX+0.9 R0 F4000
7 CYCL DEF 9.0 CASOVA PRODLEVA
8 CYCL DEF 9.1 PRODLV5
9 LBL 1
10 L IX+40 R0 F4000
11 CYCL DEF 9.0 CASOVA PRODLEVA
12 CYCL DEF 9.1 PRODLV2
13 CALL LBL 1 REP44
14 LBL 0
15 L IX+0.9
16 CYCL DEF 9.0 CASOVA PRODLEVA
17 CYCL DEF 9.1 PRODLV2
18 L IX-0.9
19 CYCL DEF 9.0 CASOVA PRODLEVA
20 CYCL DEF 9.1 PRODLV2
21 LBL 2
22 L IX-40 R0 F4000
23 CYCL DEF 9.0 CASOVA PRODLEVA
24 CYCL DEF 9.1 PRODLV2
25 CALL LBL 2 REP44
26 LBL 0
27 CALL LBL 3 REP5
28 LBL 0
29 M30
30 END PGM LINKOR_X_MM

```

Pohyb v kladném směru osy po 40 mm krocích v ose X



Pohyb v záporném směru po 40 mm krocích v ose X



Obrázek 32 – Ukázka NC kódu psaného v dialogu Heideinhain

- Teplotní snímač materiálu byl umístěn co nejbližší k lineárnímu snímači polohy
- Snímač tlaku, teploty a vlhkosti vzduchu byl umístěn v pracovním prostoru stroje v blízkosti laserového paprsku mimo dosah vyzařování jiných tepelných zdrojů.
- Měřicí optika byla seřizena tak, aby bylo možné měřit relativní změnu polohy mezi pohyblivou částí nesoucí nástroj a stojící částí nesoucí obrobek. V tomto případě se jednalo o pevný stůl.

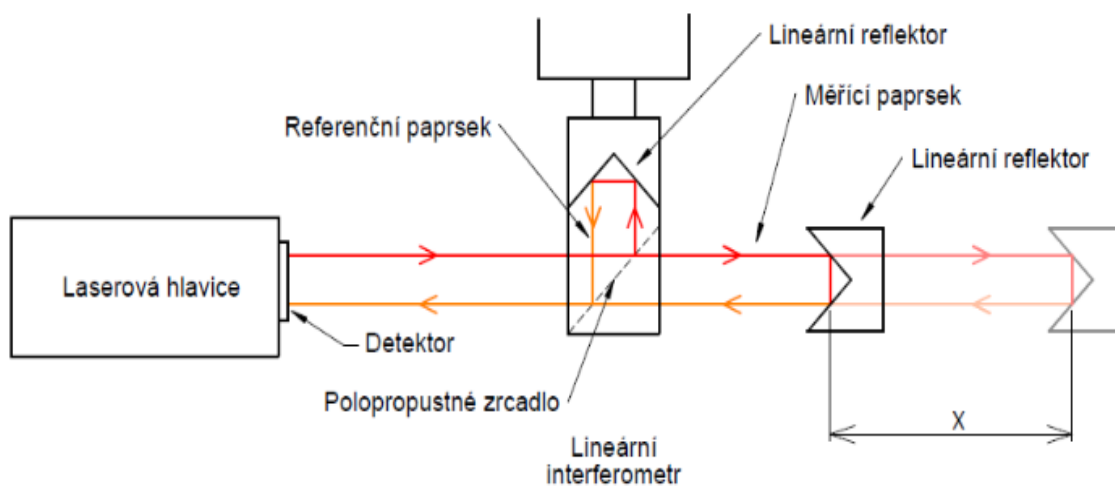
5.2.2 Postup měření

- Seřízení měřicí optiky, rozmístění teplotních snímačů dle výše uvedených podmínek.
- Vypnutí veškerých elektronických kompenzací stroje.
- Zahřátí stroje na pracovní teplotu - spuštěn hodinový NC program zajišťující rovnoměrný pohyb všech lineárních os X, Y, Z.
- Provedení měření lineárních posuvů jednotlivých os X, Y, Z pro získání vstupních dat, na základě nichž byla vytvořena korekční data.
- Vygenerování kompenzačních dat pro jednotlivé osy pomocí implementovaného programu.
- Aktivace vygenerovaných kompenzačních dat v řídicím systému.
- Provedení finálního měření všech os a vyhodnocení výsledků.

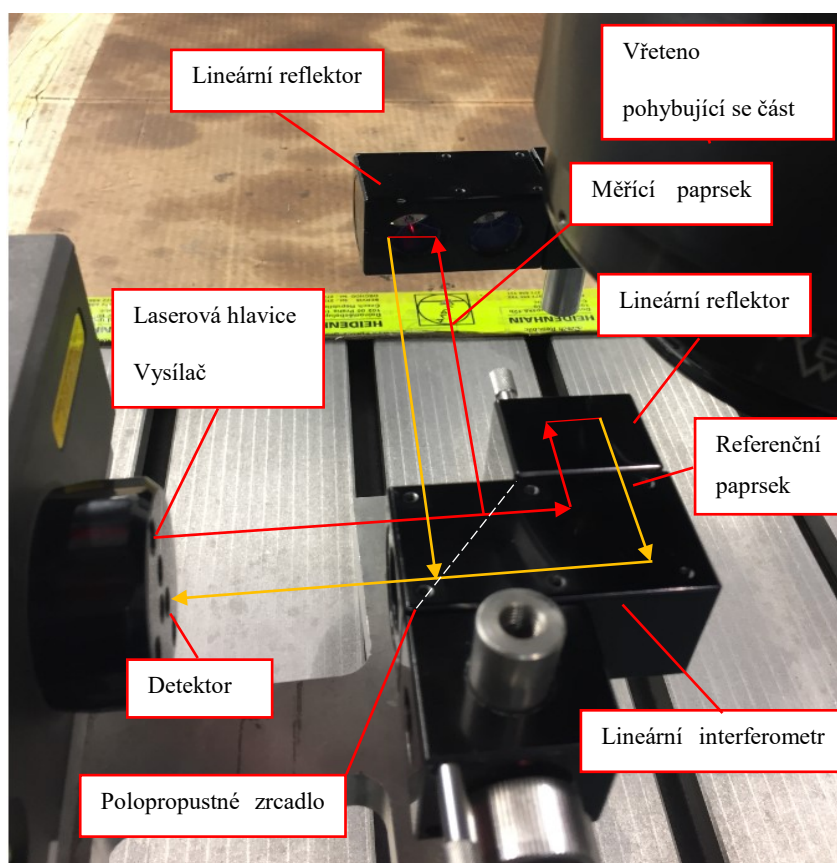
Zde je nutno uvést, že měřený stroj byl v provedení typu horní gantry. Osa X se skládala ze dvou servopohonů osy X a osy U, které jsou mezi sebou v polohové vazbě. Proto bylo do systému nutné zadat i kompenzační data pro osu U, která musí ve shodě s kompenzační daty osy X. Dále je nutno zmínit, že po měření a aplikaci délkových kompenzačních hodnot bylo nutno provést úhlové měření, které není součástí této práce.

5.2.3 Seřízení měřicí optiky, schéma měření

Seřízení měřicího systému pro lineární měření lze provést více způsoby. Jedná se o poměrně časově náročný proces (záleží na zkušenostech pracovníka a na rozsahu délky měřené osy daného stroje) vyžadující pečlivost. Následující obrázky ukazují obecné schéma měření délek pomocí laserového interferometru jedné osy a rozmístění měřicí optiky na reálném stroji.



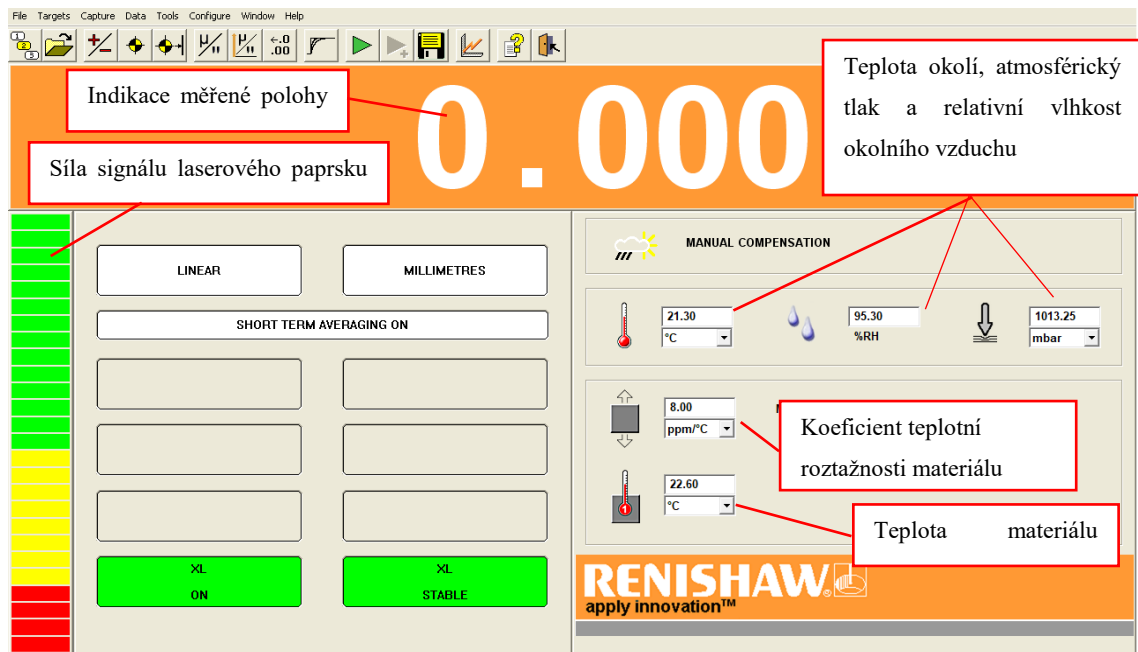
Obrázek 33 – Obecné schéma měření [20]



Obrázek 34 Rozmístění měřicí optiky na stroji

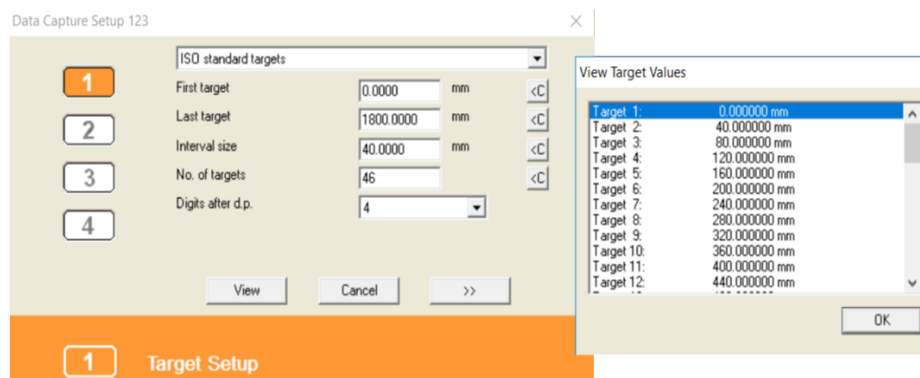
5.2.4 Nastavení PC softwaru Renishaw LaserXL Capture

Snímání měřených hodnot bylo provedeno pomocí softwaru Renishaw LaserXL Capture, instalovaném na PC. Laserový měřicí systém byl propojen s PC přes USB rozhraní.



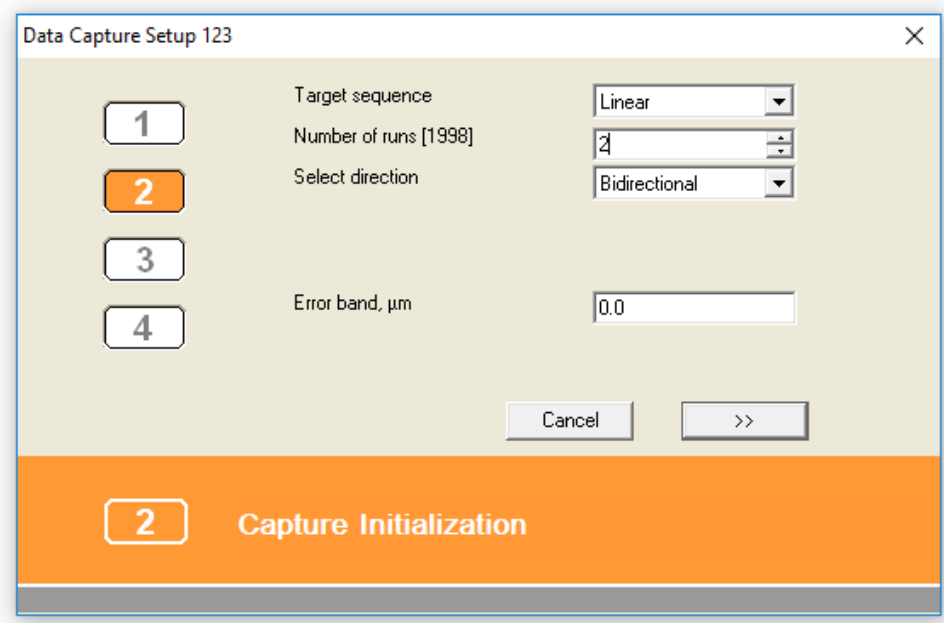
Obrázek 35 Hlavní okno aplikace Renishaw LaserXL Capture

Po správném seřízení měřicí optiky byla síla signálu v celém měřeném rozsahu dráhy maximální. Koeficient teplotní roztažnosti byl nastaven na $8 \text{ } \mu\text{m}/^\circ\text{C}$, dle koeficientu tepelné roztažnosti definovaného pro lineární snímač polohy. Přes položku v menu File -> New Automatic Setup byl spuštěn průvodce nastavení automatického snímání dat v hlavním okně aplikace. Jako první bylo nutné nastavit měřicí rozsah délky a velikost intervalu měření pro osu X.



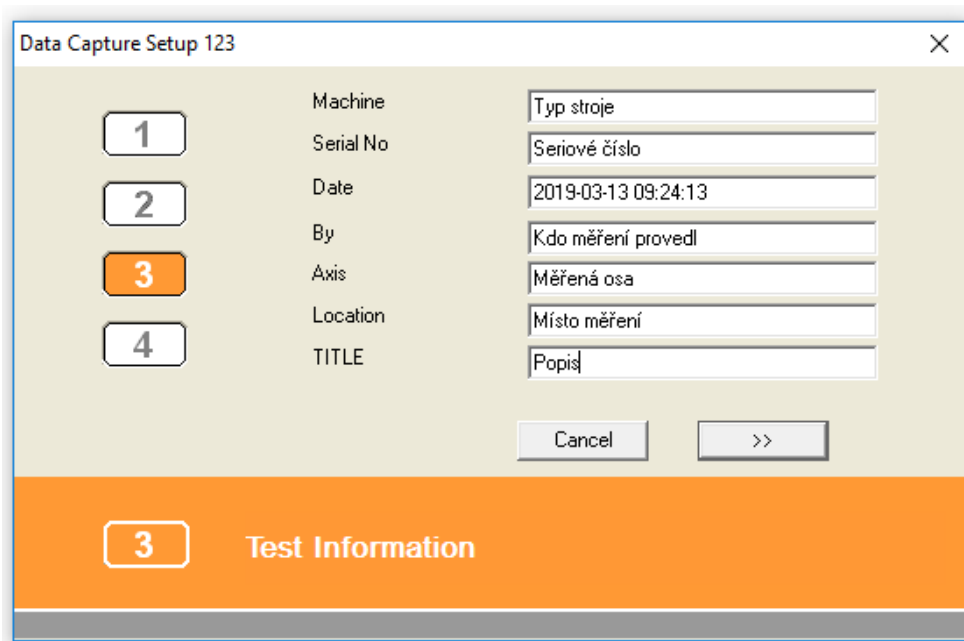
Obrázek 36 Nastavení rozsahu a intervalu měření osy X

V další části nastavení bylo nutné zvolit typ měření a počet měřících cyklů. Pro získání kompenzačních dat bylo zvoleno obousměrné měření a celkový počet cyklů 2. Do každé pozice bylo polohováno celkem čtyřikrát.



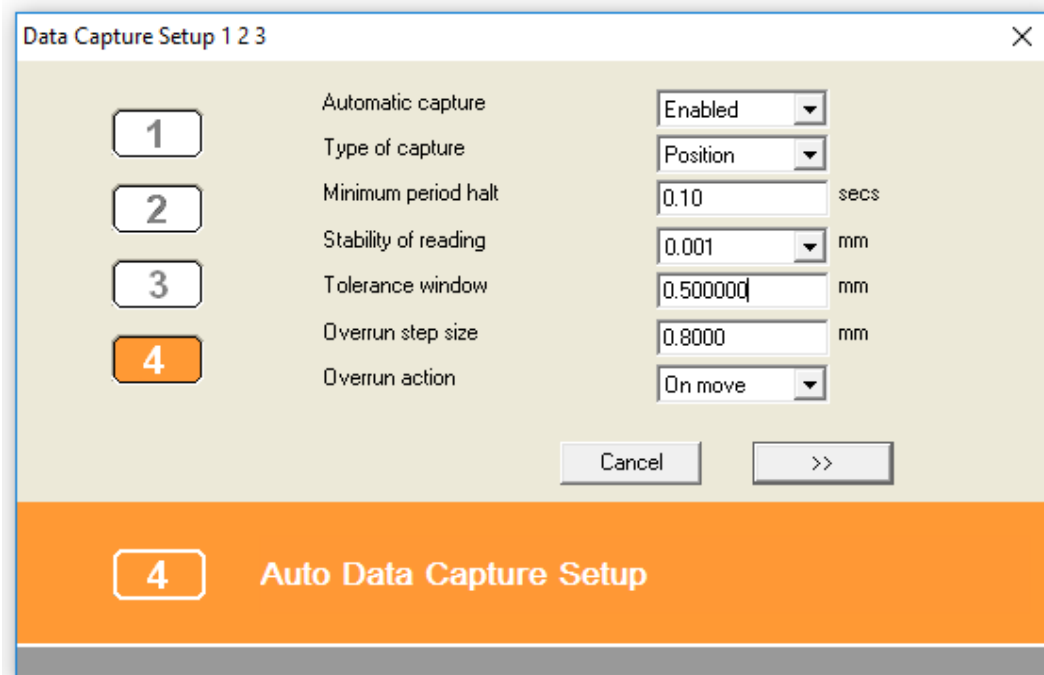
Obrázek 37 Nastavení typu a počtu měřících cyklů osy X

Ve třetí části nastavení byly definovány údaje o prováděném měření.



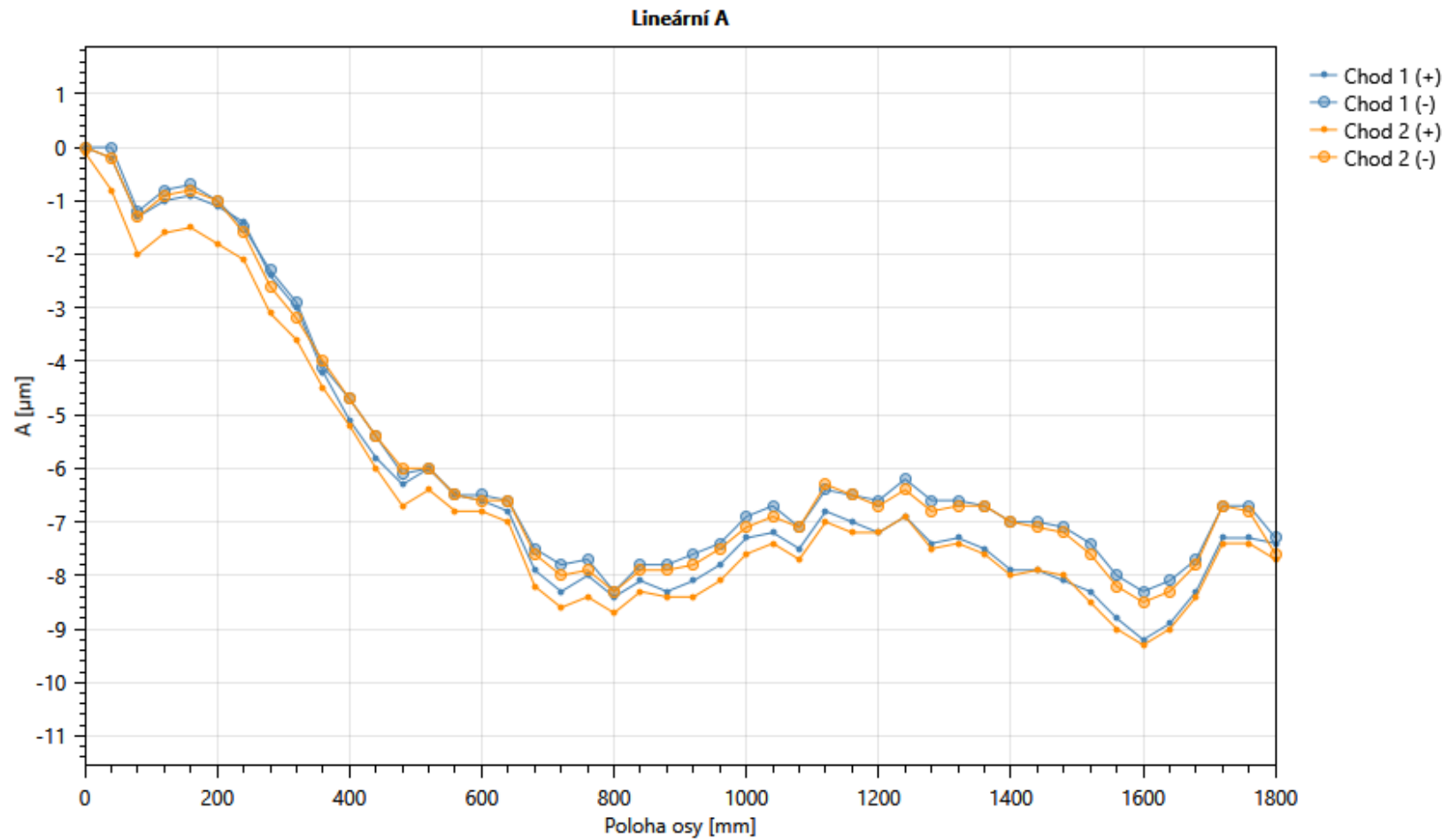
Obrázek 38 Doplnující informace k měření

Poslední část se týkala nastavení automatického snímání dat při měření délky. Níže je uvedeno konkrétní nastavení, které bylo použito při tomto měření. Nastavení musí korespondovat s NC programem. Zjednodušeně řečeno, osa se při nájězdu na požadovanou pozici musí dostat do žádané polohy v toleranci ± 0.5 mm (parametr Tolerance window), zůstat v této poloze minimálně po dobu 0.1 s (parametr Minimum period halt), a to tak, že se poloha nastavované části stroje během měření nezmění více než o ± 0.001 mm (parametr Stability of Reading). Pak bude relativní hodnota polohy snímané části stroje automaticky při měření uložena. Poslední parametr Overrun step size definuje minimální přírůstek krajních bodů měření, při kterém je měřicí systém schopen rozeznat, že došlo ke změně směru pohybu. Aby k tomu došlo, musí nastavovaná část stroje polohovat mimo rozsah měřicího intervalu v tomto případě o 0.8 mm.



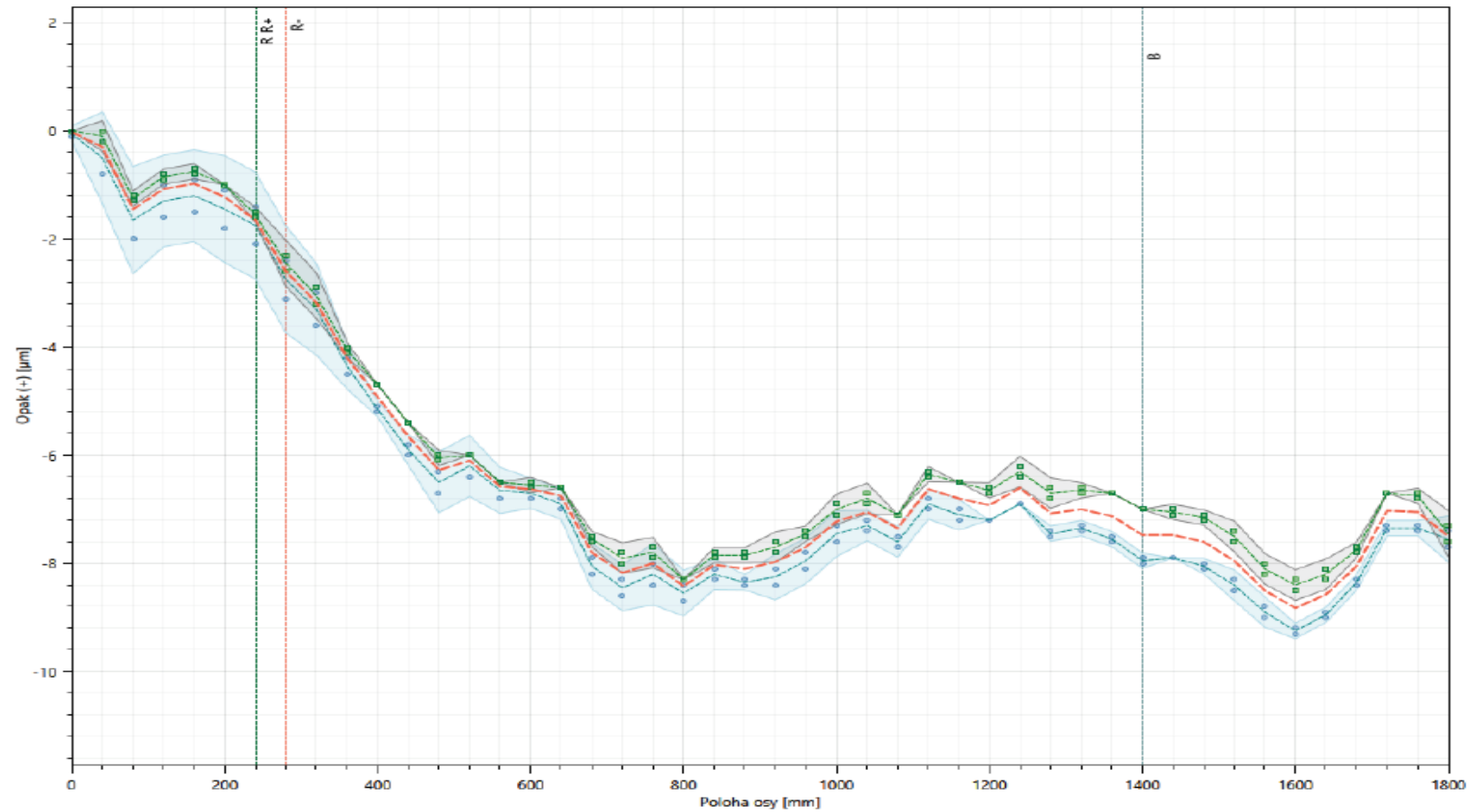
Obrázek 39 Nastavení automatického snímání dat

5.2.5 Naměřená data pro tvorbu kompenzačních dat



Obrázek 40 Naměřená data polohových úchylek podélné osy X bez elektronické kompenzace

Přesnost A Opakovatelnost



Lineární A - Vlastnosti analýzy

Název	(+) µm	(-) µm	(Bidir) µm
Přesnost (A)	9,7	8,9	9,7
Opakovatelnost (R)	2,0	0,8	2,0
Sys. odchyl (E)	9,2	8,4	9,3

Lineární A - Vlastnosti analýzy

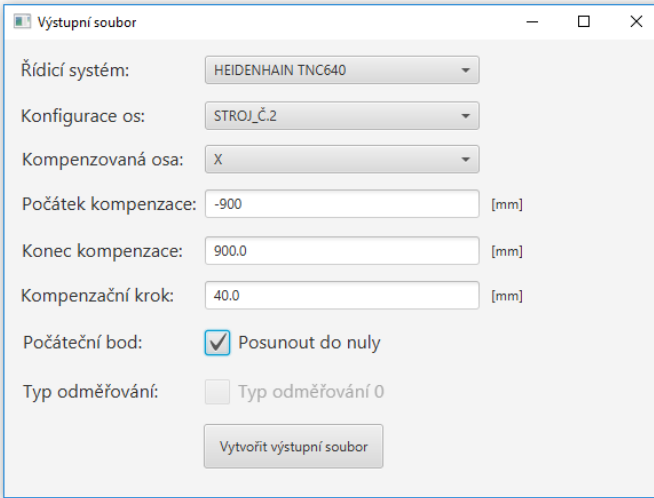
Název	Hodnota (µm)
Obrácení (B)	1,0
Střední inverze	-0,5
Střední odchylka (M)	8,8

Obrázek 41 Naměřená data podélné osy X vyhodnocená dle ISO230-2 bez elektronické kompenzace

Naměřená data podélné osy X, s a bez elektronické kompenzace byly vyhodnoceny pomocí softwaru Renishaw XCal-View. Z grafu lze vidět kumulativní nárůst polohové odchylky do hodnoty žádané polohy 800 mm. Celková přesnost vyhodnocena pomocí analýzy ISO230-2 byla $A = 9,7 \mu\text{m}$. Největší hodnota necitlivosti v ose byla $B = 1 \mu\text{m}$ na pozici 1400 mm. V pozicích 80 mm, 200 mm, 240 mm a 280 mm se nachází oblast opakovatelností $R = 2 \mu\text{m}$. Příčinu kumulativní chyby nárůstu polohové odchylky nelze přesně identifikovat z jednoho měření. Chyba mohla být způsobena např. chybným stoupáním kuličkového šroubu, které mohlo vzniknout již při jeho výrobě, nebo např. vyšší teplotou v místě polohování. Mohlo se také jednat o souhrn více kinematických chyb.

5.2.6 Vytvoření kompenzačních dat

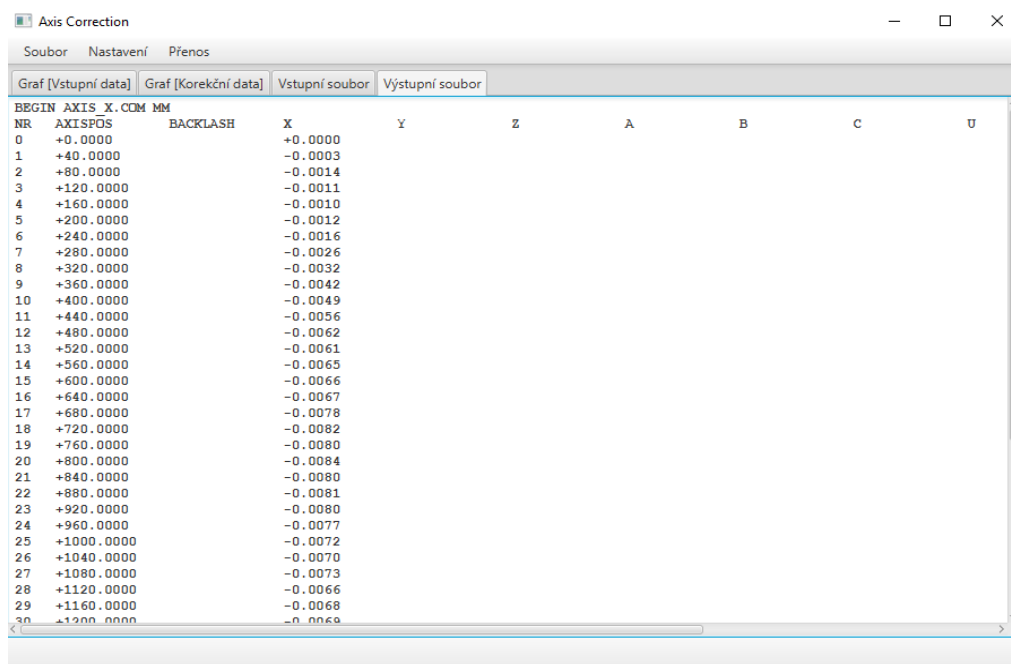
Jako první byl do aplikace Axis Correction načten .rlt soubor s naměřenými daty osy podélné os X. To bylo provedeno pomocí volby Otevřít v menu Soubor. Po načtení vstupního souboru byla data automaticky zpracována. Dále bylo nutné v menu Soubor zvolit položku Vytvořit, tím se otevřelo nové okno aplikace, kde bylo nutné zvolit typ řídicího systému, příslušnou konfiguraci os na stroji, poté vybrat kompenzovanou osu a definovat referenční počáteční pozici, od které mají být měřené kompenzační data uplatněny. Dále bylo nutné zvolit položku posunutí do nuly. Tato operace provedla lineární transformaci (posun) všech kompenzačních dat o definovanou hodnotu, tak aby počátek kompenzační hodnoty byl roven nule. Na závěr byl vytvořen výstupní soubor obsahující kompenzační data pro řídicí systém Heideinhain TNC640



Řídicí systém:	HEIDENHAIN TNC640
Konfigurace os:	STROJ_Č.2
Kompenzovaná osa:	X
Počátek kompenzace:	-900 [mm]
Konec kompenzace:	900.0 [mm]
Kompenzační krok:	40.0 [mm]
Počáteční bod:	<input checked="" type="checkbox"/> Posunout do nuly
Typ odměřování:	<input type="checkbox"/> Typ odměřování 0
Vytvořit výstupní soubor	

Obrázek 42 Tvorba korekčních dat

Po vytvoření výstupního souboru v aplikaci bylo nutné data uložit jako soubor .COM na disk PC pomocí volby Uložit v menu Soubor.



Obrázek 43 Vytvořený soubor .COM s korekcemi naměřených dat pro osu X

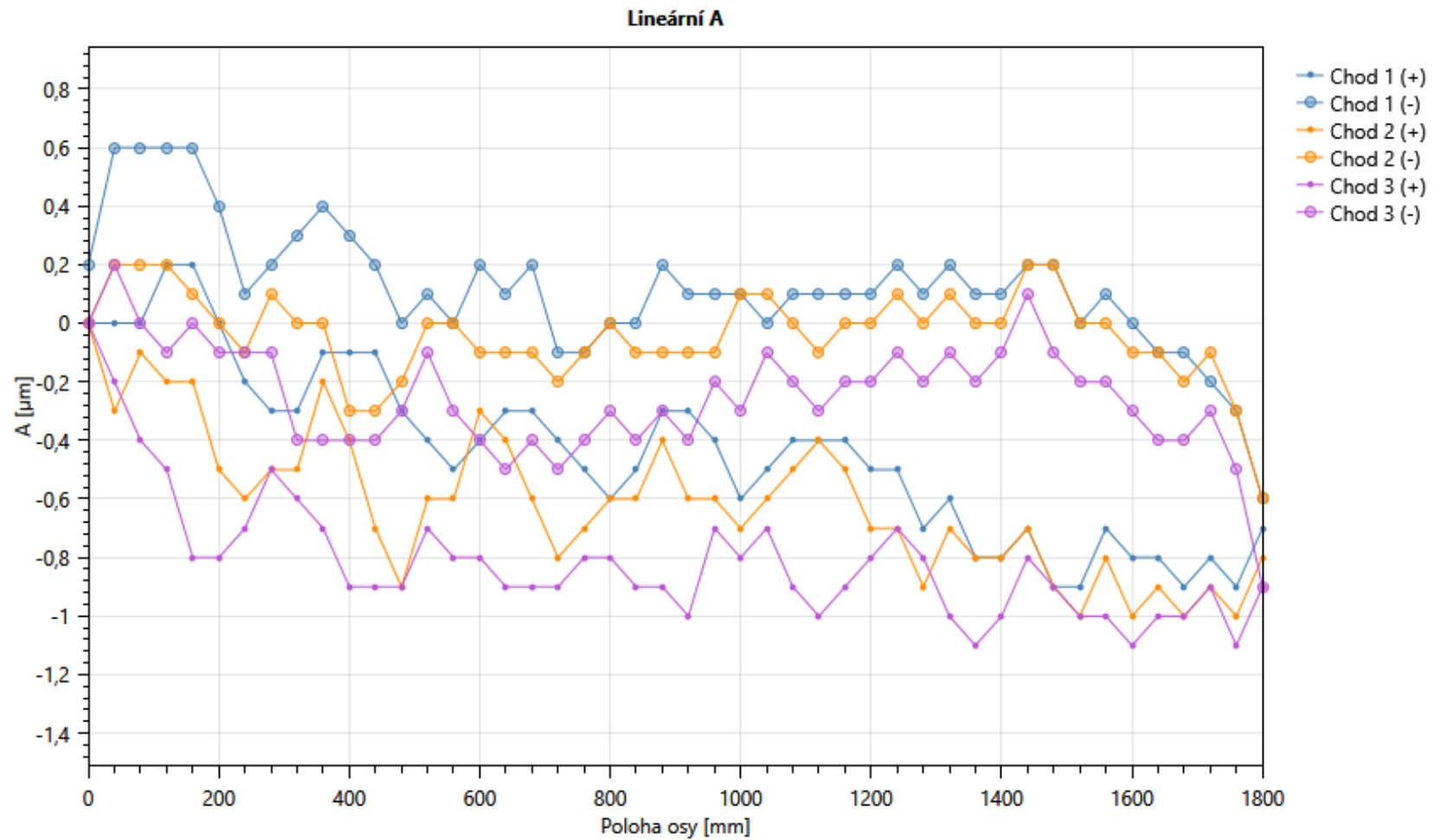
Soubor .COM uložený na disku byl nahrán do stroje pomocí externího komunikačního programu TNCremo, který je určený primárně pro přenos dat mezi PC a řídicími systémy Heideinhain.

5.2.7 Kontrolní měření po nahrání kompenzačních dat do stroje

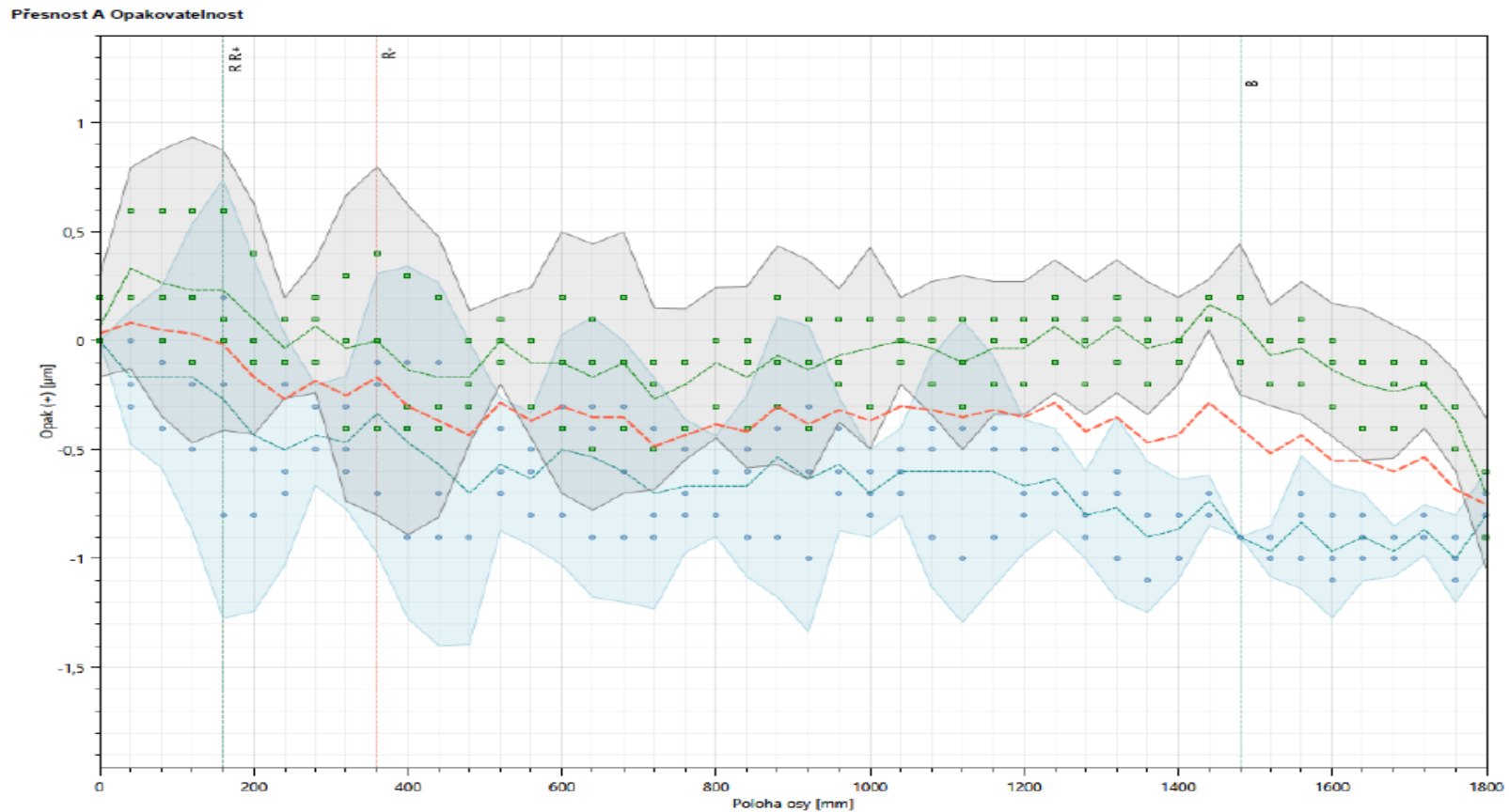
Pro ověření funkčnosti kompenzačních dat byly provedeny celkem tři obousměrné měření podélné osy X. Níže jsou uvedeny enviromentální podmínky, výsledky měření včetně vyhodnocení

Tabulka 9 Enviromentální podmínky

Snímač	Začátek měření	Konec měření
Teplota vzduchu [°C]	20.34	20.38
Tlak vzduchu [mbar]	990.39	990.49
Vlhkost vzduchu [% RH]	47	47
Teplota materiálu [°C]	20.2	20.32
Enviromentální faktor [μm]	0.31641096	0.31641067



Obrázek 44 Naměřená data polohových úchylek podélné osy X s elektronickou kompenzací délky



Lineární X - Vlastnosti analýzy			
Název	(+) µm	(-) µm	(Bidir) µm
Přesnost (A)	2,1	2,0	2,3
Opakovatelnost (R)	2,0	1,6	2,1
Sys. odchyl (E)	1,0	1,0	1,3

Lineární X - Vlastnosti analýzy	
Název	Hodnota (µm)
Obrácení (B)	1,0
Střední inverze	-0,6
Střední odchylka (M)	0,8

Obrázek 45 Naměřená data podélné osy X vyhodnocená dle ISO230-2 s elektronickou kompenzací délky

5.3 Vyhodnocení výsledků dle ISO 230-2

Tabulka 10 – Srovnání klíčových parametrů dle ISO 230-2 v jednotkách μm

Značení	Název	*Před	*Po
A	Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose	9.7	2.3
A (+)	Jednostranná přesnost nastavení polohy v ose	9.7	2.1
A (-)	Jednostranná přesnost nastavení polohy v ose	8.9	2.0
E	Dvoustranná systematická polohová úchylka v ose	9.3	1.3
E (+)	Jednostranná systematická polohová úchylka v ose	9.2	1.0
E (-)	Jednostranná systematická polohová úchylka v ose	8.4	1.0
M	Průměrná dvoustranná polohová úchylka v ose	8.8	0.8
R	Dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v ose	2.0	2.1
R (+)	Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v ose	2.0	2.0
R (-)	Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v ose	0.8	1.6
B	Necitlivost v ose	1	1

Sloupce *Před a *Po označují naměřené výsledky před a po zavedení elektronických kompenzací pro podélnou osu X. Z výše uvedených výsledků vyplývá, že zavedením elektronických kompenzací do řídicího systému byla zvýšena přesnost polohování podélné osy X, kterou definuje parametr *A* (přesnost nastavení polohy v ose). Zároveň byla snížena systematická polohová úchylka v ose, udávající rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou průměrných jednostranných úchylek polohy v obou směrech pohybu a také průměrná dvoustranná polohová úchylka v ose *M*, což je maximální diference průměrných hodnot všech měřených míst u měřené osy. Zavedení elektronické kompenzace nemělo žádný vliv na opakovatelnost nastavení polohy *R*, ani na necitlivost v ose *B*.

Z naměřených výsledků lze usoudit, že měření proběhlo korektně a bylo dosaženo dobrých výsledků (vyplývá z více provedených měření na stejném typu strojů). Zde je nutno zmínit, že ten, kdo stanovuje toleranci je především výrobce stroje. Měření příčné osy Y a svislé osy Z probíhalo stejným postupem. Výsledky z jednotlivých měření jsou součástí přílohy.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo popsat metody měření přesností lineárních posuvů CNC obráběcích strojů. Pozornost byla především věnována kalibraci lineárních posuvů pomocí laserových interferometrů, které jsou v současné době používány pro ověření přesnosti a opakovatelnosti nastavení číslicově řízených os.

V úvodu teoretické části bylo pojednáno o zkouškách prováděných na obráběcích strojích. V souvislosti s měřením lineárních posuvů, které jsou součástí zkoušek obráběcích strojů, byly zmíněny normy související s přesností polohování číslicově řízených os, především mezinárodní normy ISO-230-2 používané v naší zemi.

V další části byly popsány základní principy snímání polohy u číslicově řízených os včetně vybraných technických prostředků odměřovacích systémů. Dále byl popsán princip měření délky pomocí Michelsonova interferometru a současně dostupné laserové měřicí systémy firmy Renishaw, založené na stejném měřicím principu. Současně byl objasněn i vliv okolního prostředí na proces měření.

V praktické části této práce byl navržen a implementován softwarový nástroj pomocí platformy Java ve verzi Java SE 1.8. JDK 8 zahrnující technologie JavaFX, který lze užít ke konverzi naměřených dat polohových úchylek a k tvorbě kompenzačních dat ve formátech určených pro CNC řídicí systémy Heideinhain iTNC530, TNC640 a Siemens SINUMERIK 840D. Záměrem vytvoření této aplikace bylo usnadnění práce technickým pracovníkům provádějícím tato metrologická měření a také snížení chybovosti při přenášení korekčních dat do jednotlivých CNC řídicích systémů.

Navržený softwarový nástroj byl otestován v reálných podmínkách měřením lineárních posuvů 3osého obráběcího stroje vybaveného řídicím systémem Heideinhain TNC640. Měření bylo provedeno pomocí laserového interferometru Renishaw XL-80. Poté byly vyhodnoceny výsledky dle normy ISO230-2 před a po zavedení elektronických kompenzací, kterými byla ověřena funkčnost výše zmíněného softwarového nástroje. Pro řídicí systémy iTNC530 a SINUMERIK 840D byly testovány formáty výstupního souboru pouze formou validace, neboť korekční data jsou pro jednotlivé systémy generována stejnou výpočetní metodou.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Zkoušení CNC obráběcích strojů. *MMPrůmyslové spektrum* [online]. 2014, , 658-660 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/content/file/CNC_ukazky_Cz/9.3.pdf
- [2] KAREL, Erazim. *Karel. Kontrola přesnosti obráběcích strojů: určeno pro dílenské kontroly, přijímací orgány, opraváře obráběcích strojů a konstruktéry*. 2. přeprac. vydání. Praha: SNTL, 1961, 227 s. Řada strojír. literatury.
- [3] BRIGID, MULLANY. *Evaluation And Comparison Of The Different Standards Used To Define The Positional Accuracy And Repeatability Of Numerically Controlled Machining Center Axes* [online]. 2007, , 26 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: www.amtonline.org/article_download.cfm?article_id=63300
- [4] *Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 2: Určení přesnosti a opakovatelnosti nastavní polohy v číslicově řízených osách*. Čtvrté vydání. Praha: Český normalizační institut, 2014.
- [5] KOLÍBAL, Zdeněk. *Roboty a robotizované výrobní technologie*. První vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.
- [6] MAREK, Jiří. Odměrování lineární polohy u obráběcích strojů. *AUTOMA: časopis pro automatizační techniku* [online]. 2014, , 31 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/52629.pdf
- [7] *Rotary Encoders* [online]. Germany: DR. JOHANNES HEIDEINHAIN GmbH, 2018 [cit. 2019-05-04]. 349529-21-10. Dostupné z: https://www.heidenhain.cz/fileadmin/pdb/media/img/349529-2I_Rotary_Encoders_en_01.pdf#page=32

- [8] *Influence of position measurement on accuracy in five-axis machining* [online]. Traunreut, Germany: DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH, 2011 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: https://www.heidenhain.cz/cs_CZ/dokumentace/zaklady/machining-accuracy-of-machine-tools/accuracy-from-the-very-first-part/
- [9] *Linear Encoders: For Numerically Controlled Machine Tools* [online]. 1st. Německo: DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH, 2017 [cit. 2019-05-04]. 571470-2B-10. Dostupné z: https://www.heidenhain.cz/fileadmin/pdb/media/img/571470-2B_Linear_Encoders_For_Numerically_Controlled_Machine_Tools.pdf
- [10] SCHMID, Dietmar. *Řízení a regulace pro strojírenství a mechatroniku*. 9. Přeložil Jiří HANDLÍŘ. Praha: Europa - Sobotáles, 2005. ISBN 80-86706-10-9.
- [11] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Brno: VUTIUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1869-9.
- [12] *Přenosný laserový měřicí a kalibrační systém* [online]. Anglie: Renishaw, 2007 [cit. 2019-05-05]. L-9908-0651-02. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/laserovy-system-xl-80--8268>
- [13] *ML10 "Gold Standard" Laser Interferometer System* [online]. 2003. Renishaw, b.r. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <https://resources.renishaw.com/en/details/broschuereml10-gold-standard-laser-interferometer-system--12029>
- [14] BRABENEC, Libor. *Polohování CNC frézky dle normy ISO 230-2* [online]. Zlín, 2012 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/23058/bravenec_2012_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Baťi, Fakulta Technologická.
- [15] CHAPMAN, M.A.V. *Environmental compensation of linear laser interferometer readings* [online]. 4th. RENISHAW, b.r. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <http://www.renishaw.com/en/system-manuals--7107>

- [16] SHARAN, Kishori. *Learn JavaFX 8: building user experience and interfaces with Java 8*. New York: Apress, 2015. Expert's voice in Java. ISBN 978-1-4842-1142-7.
- [17] *Technical Manual iTNC530 HSCI* [online]. HEIDEINHAIN, 2017 [cit. 2019-05-07]. 801739-25 - Ver05. Dostupné z: <https://portal.heidenhain.de/>
- [18] *HEINDEINHAIN TNC640 Technical Manual* [online]. Ver06. HEIDENHAIN, 2017 [cit. 2018-11-27]. 892899-26 - SW08. Dostupné z: <https://portal.heidenhain.de/>
- [19] *VC 1810 - TRIMILL, a.s.: Vertikální centra, horizontální centra, 3-osé, 5-osé* [online]. TRIMIL, a.s., b.r. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <http://www.trimill.cz/produkty/vertikalni-objemove-centra/3osa/vc-1810#tab-parameters>
- [20] PLICHTA, Zbyněk. *ONLINE KOREKCE GEOMETRICKÝCH A ROZMĚROVÝCH ODCHYLEK*. BRNO, 2017. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VUT BRNO.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

P_i	Žádaná poloha
P_{ij}	Skutečná poloha
\uparrow	Typ chodu nastavované části – série měření probíhající v kladném směru pohybu
\downarrow	Typ chodu nastavované části – série měření probíhající v záporném směru pohybu
x_{ij}	Polohová úchylka
$\bar{x}_i \uparrow$	Průměrná jednosměrná polohová úchylka v poloze v kladném směru pohybu
$\bar{x}_i \downarrow$	Průměrná jednosměrná polohová úchylka v poloze v záporném směru pohybu
\bar{x}_i	Průměrná dvoustranná polohová úchylka v poloze
M	Průměrná dvoustranná polohová úchylka v ose
B_i	Necitlivost v poloze
B	Necitlivost v ose
\bar{B}	Průměrná necitlivost v ose
$s_i \uparrow$	Odhad jednostranné standardní nejistoty nastavení polohy v dané poloze pro kladný směr pohybu
$s_i \downarrow$	Odhad jednostranné standardní nejistoty nastavení polohy v dané poloze pro záporný směr pohybu
$R_i \uparrow$	Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v dané poloze v kladném směru pohybu
$R_i \downarrow$	Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v dané poloze v záporném směru pohybu
R_i	Dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v dané poloze
$R \uparrow$	Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v ose pro kladný směr pohybu
$R \downarrow$	Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v ose pro záporný směr pohybu
$E \uparrow$	Jednostranná systematická polohová úchylka v ose pro kladný směr pohybu
$E \downarrow$	Jednostranná systematická polohová úchylka v ose pro záporný směr pohybu

E	Dvoustranná systematická polohová úchylka v ose
$A \uparrow$	Jednostranná přesnost nastavení polohy v ose v kladném směru pohybu
$A \downarrow$	Jednostranná přesnost nastavení polohy v ose v záporném směru pohybu
A	Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose
k	Úhlový vlnočet
λ	Vlnová délka laserového paprsku
EF	Enviromentální faktor
n	Koeficient indexu lomu světla
T	Teplota
L	Délka měřená laserovým interferometrem
Laser	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
CNC	Computer Numeric Control – číslicové řízení počítačem
1V _{pp}	1 Volt peak/peak – napěťová úroveň 1 volt „špička/špička“
EnDat	Encoder-Data-Interface – obousměrný synchronní sériový přenos
ISO	The International Standard Organization
K _v	Zesílení regulátoru polohy

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Zkoušky obráběcích strojů [1].....	11
Obrázek 2 Přejímací zkoušky obráběcích strojů [1].....	11
Obrázek 3 – Graf polohových úchylek (jednostranné, dvoustranné, průměr).....	15
Obrázek 4 – Grafická interpretace klíčových parametrů ISO-230-2 [4]	18
Obrázek 5 Obecné blokové schéma rychlostně polohového servomechanismu [6].....	19
Obrázek 6 Nepřímé měření polohy [8]	20
Obrázek 7 Přímé měření polohy [8]	21
Obrázek 8 –Klasifikace odměřovacích systému	22
Obrázek 9 – Výstupní signál 1Vpp z enkodéru [9]	22
Obrázek 10 Zjednodušená interpretace inkrementální stopy lineárního	23
Obrázek 11 Zjednodušená interpretace absolutního odměřování.....	24
Obrázek 12 Absolutní snímač s inkrementální stopou s rozhraním EnDat [9]	24
Obrázek 13 Zapouzdřený lineární polohový snímač firmy Heideinhain [9].....	25
Obrázek 14 Fotoelektrický princip snímání [6].....	26
Obrázek 15 Michelsonův interferometr [11]	29
Obrázek 16 Měřicí systém Renishaw ML10 (vlevo) a XL-80 (vpravo) [13; 12].....	30
Obrázek 17 Kompletní sestava laserového interferometru Renishaw XL-80 s.....	32
Obrázek 18 Výpočet měřené polohy s aktivní kompenzací [15].....	33
Obrázek 19 Blokové schéma architektury aplikace.....	36
Obrázek 20 Uživatelské nastavení aplikace.....	38
Obrázek 21 Nastavení formátu výstupního souboru.....	38
Obrázek 22 GUI – Hlavní okno aplikace.....	39
Obrázek 23 GUI – Graf vstupních dat	40
Obrázek 24 GUI – Graf korekčních dat.....	41
Obrázek 25 GUI – Vstupní soubor	42
Obrázek 26 – GUI Výstupní soubor ve formátu pro Heideinhain iTNC530.....	43
Obrázek 27 Vztah mezi konfigurací výstupního souboru a korekčními daty.....	44
Obrázek 28 – Korekční tabulka (soubor) pro osu X na iTNC530	45
Obrázek 29 Korekční tabulka (soubor) pro osu X na TNC640	46
Obrázek 30 – Ukázka souboru .MFP s korekcemi pro SINUMERIK 840D.....	48
Obrázek 31 Vertikální obráběcí centrum VC1810 [19].....	49
Obrázek 32 – Ukázka NC kódu psaného v dialogu Heideinhain	51

Obrázek 33 – Obecné schéma měření [20]	53
Obrázek 34 Rozmístění měřicí optiky na stroji	53
Obrázek 35 Hlavní okno aplikace Renishaw LaserXL Capture	54
Obrázek 36 Nastavení rozsahu a intervalu měření osy X	54
Obrázek 37 Nastavení typu a počtu měřících cyklů osy X	55
Obrázek 38 Doplnující informace k měření	55
Obrázek 39 Nastavení automatického snímání dat	56
Obrázek 40 Naměřená data polohových úchylek podélné osy X bez elektronické kompenzace	57
Obrázek 41 Naměřená data podélné osy X vyhodnocená dle ISO230-2 bez elektronické kompenzace	58
Obrázek 42 Tvorba korekčních dat	59
Obrázek 43 Vytvořený soubor .COM s korekcemi naměřených dat pro osu X	60
Obrázek 44 Naměřená data polohových úchylek podélné osy X s elektronickou kompenzací délky	61
Obrázek 45 Naměřená data podélné osy X vyhodnocená dle ISO230-2 s elektronickou kompenzací délky	62

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Normy zabývající se nastavením polohy číslicově řízených os [3].....	13
Tabulka 2 Přesnosti absolutních rotačních snímačů polohy [7]	20
Tabulka 3 Srovnání technických parametrů ML10 a XL-80 [13; 12]	31
Tabulka 4 Srovnání parametrů kompenzátoru EC10 a XC-80 [13; 12]	31
Tabulka 5 Popis komponent v menu Soubor	39
Tabulka 6 Popis komponent v menu Nastavení.....	40
Tabulka 7 Vybraná technická data stroje VC1810 [19]	50
Tabulka 8 Parametry měření.....	51
Tabulka 9 Enviromentální podmínky	60
Tabulka 10 – Srovnání klíčových parametrů dle ISO 230-2 v jednotkách μm	63

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA	PI:	Přílohy	umístěné	na	disku	CD
---------	-----	---------	----------	----	-------	----

PŘÍLOHA PI: CD

Obsah přiloženého CD:

- Zdrojový kód aplikace
- Spustitelná aplikace
- Protokol měření osy X bez kompenzací
- Protokol měření osy X s kompenzacemi
- Protokol měření osy Y bez kompenzací
- Protokol měření osy Y s kompenzacemi
- Protokol měření osy Z bez kompenzací
- Protokol měření osy Z s kompenzacemi