



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**PROBLEMATIKA TEPLOTNÍ KOMPENZACE
LINEÁRNÍHO ENKODÉRU OBRÁBĚCÍHO CENTRA**

THERMAL BEHAVIOR OF A LINEAR POSITION SENSOR USED IN MACHINING CENTERS

ZKRÁCENÁ VERZE PHD THESIS

AUTOR PRÁCE

Ing. Vojtěch Štěpánek

ŠKOLITEL

Prof. Dr. Ing. Jiří Marek Ph.D., DBA

OPONENTI

BRNO 2022

KLÍČOVÁ SLOVA

Geometrická přesnost, CNC obráběcí stroj, teplotní vlivy, kyber-fyzikální systém, lineární snímač polohy

KEYWORDS

Geometric accuracy, CNC machine tool, temperature effects, cyber-physical system, linear position sensor

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta strojního inženýrství

Technická 2896/2

616 69 Brno

© Vojtěch Štěpánek, 2022

ISBN 80-214-

ISSN 1213-4198

OBSAH

Úvod	6
1 <i>Současný stav poznání řešené problematiky</i>	6
1.1 Přesnost obráběcího stroje	6
1.2 Faktory ovlivňující výrobní přesnost	7
1.3 Způsoby odměřování lineární polohy CNC obráběcího stroje	7
1.4 Přístupy k softwarové kompenzaci chyb obráběcího stroje	8
1.5 Hypotézy odborných publikací z oblasti teplotního chování lineárních snímačů polohy	9
2 <i>Cíle dizertační práce</i>	11
3 <i>Systémový přístup hledání podstatných veličin v oblasti lineárních snímačů polohy</i>	11
4 <i>Hypotézy o chování lineárního snímače polohy</i>	13
5 <i>Zvolené metody zpracování</i>	13
6 <i>Návrh kompenzačního modelu</i>	17
6.1 Dekompozice příspěvků chyby polohování v ose	17
7 <i>Statistické porovnání predikovaných a měřených dat</i>	23
8 <i>Hlavní výsledky dizertační práce</i>	25
Závěr, doporučení pro praxi a možnosti dalšího rozvoje	27
Seznam použité literatury	28
Životopis	29

ÚVOD

S rostoucím tlakem na snižování podílu neshodných kusů a stálé větší nároky na tolerance při výrobě roste i tlak na zvyšování přesnosti obráběcích strojů, zejména pak té dlouhodobé, výrobní, kde se projevuje mnoho okolních vlivů od operátora, vibrací od okolních strojů, opotřebením používaných nástrojů až po změnu teploty stroje a jeho okolí v čase. Všechny faktory společně tvoří velice komplexní soustavu, kterou je možné matematicky popsat pouze za předpokladu podstatných zjednodušení. Aby celá soustava produkovala obrobky požadované geometrické specifikace, musí být podíl chyby jednotlivých entit soustavy minimalizován. Mezi tyto vlivy lze zařadit vliv přímého odměřování polohy, vliv teplotní roztažnosti konstrukce, vliv nastavení regulačních parametrů řídicího stroje či vliv montáže či obsluhy. Vyjádření velikosti tohoto podílu a závislost změny polohové odchylky na teplotě je pro další zpřesňování pracovní přesnosti klíčové. [1], [2]

1 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

1.1 Přesnost obráběcího stroje

Přesnost obráběcího je jeden ze základních parametrů, který je potenciálním zákazníkem sledován. V rámci dlouhodobého provozování obráběcího stroje lze hodnotit tři základní veličiny přesnosti. [3]

Geometrická přesnost

Geometrická přesnost stroje je jedním ze základních ukazatelů, který dokáže popsat očekávanou kvalitu výroby. Geometrická přesnost se měří v nezatíženém stavu, aby se do měření nepromítaly síly od obrábění, ale pouze vlastnosti samotného stroje. Geometrická přesnost je definována jako těsnost odchylky ustavení nástroje vůči obrobku.

Pracovní přesnost

Pracovní přesnost je parametr obráběcího stroje, který ovlivňuje, s jakou produktivitou a s jakou kvalitou a integritou povrchu může být obrobek vyroben. Zkouška pracovní přesnosti se nejčastěji provádí při přejímání stroje zákazníkem. Při této zkoušce výrobce potvrzuje, že jím dodaný stroj splňuje požadavky, které mohou být detailně specifikovány zákazníkem nebo se obecně řídí normou ČSN ISO 10791-7:2021.

Výrobní přesnost

Posledním z řetězce přesností strojů a zároveň parametr nejdůležitější je hodnocení přesnosti výrobní. Od přesnosti pracovní se liší tím, že označuje schopnost stroje

dodržet těsnost shody s požadavky na výrobu reálného kusu v dlouhodobém horizontu. Do výrobní přesnosti jsou tedy zahrnuty ještě časově proměnné vlivy, kterými jsou vlivy proměnlivosti teploty, opotřebení stroje či nástroje a změny geometrické přesnosti v čase. Do této přesnosti se samozřejmě promítá i dlouhodobá homogenita vstupních polotovarů či vliv obsluhy.

1.2 Faktory ovlivňující výrobní přesnost

Mezi základní faktory, které se podílejí na celkové výrobní přesnosti stroje lze zařadit

- Chybu geometrického provedení obráběcího stroje
- Vlivy technologie a účinky dynamických sil
- Vlivy řízení
- Vlivy teploty

Žádný stroj nepracuje v ideálních, teplotně stabilních, podmínkách se stoprocentní účinností a tento efekt se projevuje v podobě oteplení dílčích částí stroje. Mezi nejvíce exponovaná místa vzniku tzv. vnitřních tepelných zdrojů patří:

- Vřeteno
- Pohyb matice po kuličkovém šroubu
- Realizování kinematických dvojic (tření styčných ploch, pohyb valivých elementů)
- Převodové mechanismy
- Pohony pohybových os
- Motory přídavných jednotek (otáčení zásobníku nástrojů, čerpadla)
- Zahřívání řídicí jednotky
- Řezný proces
- Výskyt horkých třísek v pracovním prostoru stroje

1.3 Způsoby odměřování lineární polohy CNC obráběcího stroje

Přímé odměřování

Přímé odměřování získalo svoje označení od skutečnosti, že odměřovací jezdec je přímo spojen s pohyblivou částí, u které je vyšetřována požadovaná poloha. Přesnost tohoto měřidla přímo ovlivňuje přesnost polohování celého stroje, neboť zpětná vazba z přímého odměřování ovlivňuje polohový regulátor řízení.

Nepřímé odměřování

Princip nepřímého odměřování si lze představit na rotačním servomotoru, kde na jedné je výstupní hřídel pro přenos krouticího momentu dál do kinematické

struktury a na straně druhé konec hřídele zpravidla menšího průměru, který slouží pro osazení rotačního snímače polohy. Při takovém principu řízení stroje je těžké kompenzovat chybu polohování v závislosti na změně délky kuličkového šroubu při jeho zahřívání nebo odhalit havarijní stavy například uvolnění matice či uvolnění pružné spojky a zastavení lineárního pohybu stroje.

Absolutní odměřování

Princip absolutního odměřování má výhodu v absolutním kódování aktuální polohy měřidla. Použití absolutního odměřování je opodstatněné v aplikacích, kde není možno najíždět tzv. referenční polohu po zapnutí.

Relativní odměřování

Již z označení tohoto typu pravítek je zřejmé, že pravítka s relativním odměřováním budou poskytovat pouze informaci o relativní poloze vůči pozici, která je přijata jako referenční. Ve strojích s relativním odměřováním musí vždy po zapnutí proběhnout proces referování stroje.

1.4 Přístupy k softwarové kompenzaci chyb obráběcího stroje

Kompenzační data vycházejí vždy z jednotné podoby. Pro tříosý stroj je žádaná pozice nástroje v prostoru definována pomocí souřadnice TCP = (X, Y, Z). K této žádané pozici je za pomoci kompenzačních tabulek sestaven prostorový vektor $ERRTCP = (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$. Prostorový vektor chyby je definován jako funkce 21 chyb tříosého stroje.

Využití připravených kompenzačních tabulek v řídicím systému stroje

Sinumerik

Řídicí systém stroje má ve své NCU¹ jednotce připraven prostor, ze kterého čerpá kompenzační data. Tento prostor je vymezen CEC² tabulkami, které umožňují provádět lineární interpolační kompenzace.

Změna měřítka pohybové osy

Pokud by průběh chyby bylo možné aproximovat jednou přímkou po celé délce, směrnice této chyby bude definovat chybu měřítka osy. Tuto chybu je možné zapisovat do řídicího systému pomocí parametrů.

¹ Numerical Control Unit – jednotka plánování trajektorie CNC stroje

² Cross Error Compensation - křížová kompenzace chyb

Parametrické CAM programování

Dalším přístupem odstranění chyb obrobku je užití metody reverzního inženýrství. V autorově článku [4] je vysvětlen princip kompenzace chyby na základě dat měřených na reálném kusu. Na hotovém díle je provedena inspekce pomocí souřadnicového měřicího stroje a na základě odchylky dat jsou upraveny výchozí kóty virtuálního modelu. Již po dvou iteracích došlo ke zpřesnění vybraných rozměrů o více než 80 %.

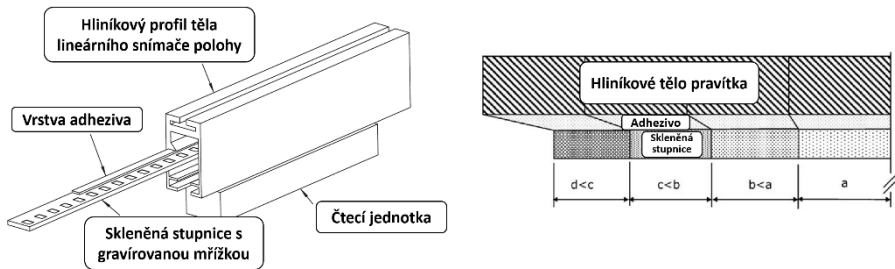
Kompenzační parametry v tabulce nástrojů

Dalším z postupů je kompenzační technika, kterou využívá pro například inspekční systém Equator™. Na základě měřených dat se specifikuje odchylka délky a poloměru nástroje, která se následně v podobě kompenzačních dat nástroje zapisuje zpět do řídicího systému CNC obráběcího stroje.

1.5 Hypotézy odborných publikací z oblastí teplotního chování lineárních snímačů polohy

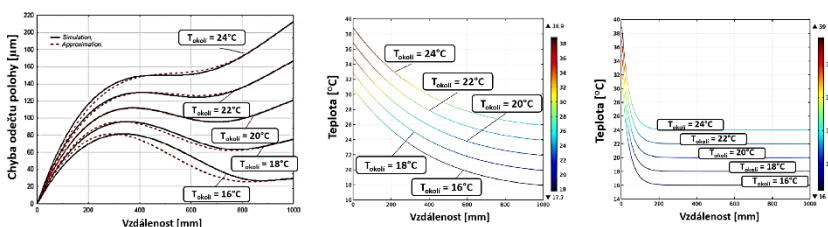
Lineární snímač polohy není složen pouze z jednoho materiálu. Dochází zde ke slučování materiálů s různou tepelnou vodivostí a tepelnou kapacitu a vytváření komplexní materiálové sestavy. Článek [5] detailně rozebírá chování lineárního snímače polohy, který je složen z hliníkového těla s předepsaným koeficientem tepelné roztažnosti $\alpha = 23 \text{ ppm.K}^{-1}$, skleněné měřicí stupnice s koeficientem teplotní roztažnosti $\alpha = 8 \text{ ppm.K}^{-1}$ a vrstvy adheziva ($\alpha = 100 \text{ ppm.K}^{-1}$) při různých teplotách měření (54,9 °C a 6,1 °C). Ohřev pravítka je prováděn rovnoměrně po celé délce lineárního snímače polohy.

Vrstva adheziva umožňuje do jisté míry nezávislé rozpínání skleněné stupnice oproti tepelnému rozpínání hliníkového těla lineárního snímače polohy. Spojení mezi stupnicí a tělem pravítka však není dostatečně flexibilní, aby se roztažnosti prvků navzájem neovlivňovaly. Pravítko je symetrické podle středu, proto v závislosti na teplotě nedochází ve středu pravítka k relativnímu pohybu těla, adheziva a stupnice. Při uvažování konstantního zahřívání po celé délce pravítka se rozdíl délky stupnice vůči tělu zvyšuje a tím se zvyšuje i pnutí v lepeném spoji. To způsobuje nelinearitu roztažnosti stupnice v závislosti na teplotě a zároveň se projevuje faktem, že stupnice aplikovaná v odměřovacím pravítku má větší koeficient teplotní roztažnosti než stupně ve volném stavu. Taktéž dochází i k nekonstantnímu průběhu koeficientu teplotní roztažnosti po délce stupnice [5] [6]



Obr. 1 Schéma vzniku pnutí na rozhraní těla a skleněné stupnice pravítka s rozdílným koeficientem tepelné roztažnosti [5]

V reálném stroji však situace s plošným zdrojem teploty, dostatečným časem pro vyrovnání teplot a izolací pravítka od zbytku konstrukce nikdy nenastane. Chování lineárního snímače polohy s jedním bodovým zdrojem tepla za konstantní teploty okolí se věnuje článek [2]. Jeden konec je zde nahříván pomocí 35° bodového zdroje tepla na jednom konci pravítka a je zkoumán projev vedení tepla tělem pravítka s přestupem tepla do okolí při různých teplotách okolních podmínek 16-24 °C pomocí MKP metody. Obecně jsou MKP metody výpočetně náročné a autoři je hodnotí jako nevhodné pro použití kompenzace v reálném čase. Nicméně získané výsledky aproximují dvourozměrnými funkcemi. Přiložené grafy potvrzují vliv teploty okolí na průběh chyby pravítka, průběh teploty těla pravítka a průběh teploty stupnice. Příliš neprojevuje vliv radiace stejně tak jako přestup tepla skrze adhezivo. Přestože je viditelná změna teploty hliníkového těla téměř po celé délce, stupnice je teplotně ovlivněna přibližně na první pětinu délky pravítka. V grafu průběhu odchylek lze vidět inflexní bod ve středu pravítka.



Obr. 2 Průběh teploty a drift polohy po délce lineárního snímače polohy [2]

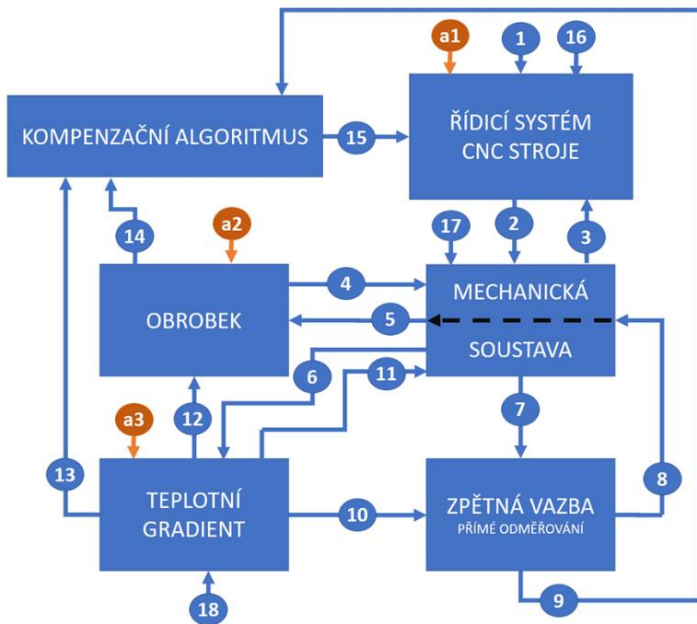
2 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Motivací pro zpracování autorovy dizertační práce je vytvoření dosud nepoužívaného algoritmu, který bude schopen dlouhodobě zlepšit výrobní přesnost CNC stroje, a který bude respektovat teplotní chování lineárního odměřování polohy. V dnešní době existují pokročilé, převážně optické, metody měření určené pro kompenzace geometrických chyb obráběcího stroje. Je však nutno podotknout, že výstupem z těchto měření bývají statická kompenzační data. Pokud se stroj nachází v podmínkách s proměnlivým teplotním gradientem nebo konstrukční zpracování stroje obsahuje nežádoucí tepelný zdroj, dochází k teplotní deformaci v čase a tím k výraznému zhoršení geometrické přesnosti. Pro sestavení funkčního algoritmu lze jmenovat dílčí cíle.

- Rešerše v oblasti teplotního chování lineárních snímačů polohy a sestavení dílčích hypotéz.
- Zpracování metodiky eliminace teplotních gradientů působící na CNC obráběcí stroje, která bude vycházet ze systémového přístupu. Dále pak zpracování metodiky lokalizace zdrojů teplotní chyby a její kompenzace.
- Definovat sadu experimentů pro vytvoření matematického modelu kompenzace teplotní chyby.
- Vytvoření hybridního kompenzačního modelu pro eliminaci chyby najetí do polohy v reálném čase.
- Vytipování umístění teplotních senzorů na konstrukci stroje pro predikci vývoje chyby, odhad podílu chyby v závislosti na počtu teplotních senzorů.

3 SYSTÉMOVÝ PŘÍSTUP HLEDÁNÍ PODSTATNÝCH VELIČIN V OBLASTI LINEÁRNÍCH SNÍMAČŮ POLOHY

Systémový rozbor umožňuje efektivně popsat jakoukoliv technickou soustavu nebo systém, kterým CNC stroj bezesporu je. Umožňuje správně definovat problém a tím umožnit jeho úspěšné řešení. Tato práce se zabývá vlivem teplotního gradientu na výrobní přesnost stroje v dlouhodobém horizontu. Proto je kompletní mechatronický model CNC stroje omezen pouze na oblast podstatných veličin v souvislosti se správností geometrické specifikace obrobku v čase a teplotě. Všechny podstatné veličiny a jejich vzájemné působení je shrnuto na Obr. 3 dále.



Obr. 3 Systémový rozbor pro zjištění vlivů působících na výrobní přesnost CNC obráběcího stroje

Detailně jsou jednotlivé vazby systémového rozboru uvedeny v plném textu dizertační práce. Za velmi významné vazby systémového rozboru, které dokazují přímý vliv mezi lineárním snímačem polohy a přesností polohového stroje jsou autorem považovány:

V2 – Vazba V2 v sobě ukrývá vliv řídicího systému na mechanickou soustavu stroje. Tato vazba je v reálném stroji reprezentována ovládacími servopohony, které provádí víceosou interpolaci na základě požadavků řídicího systému.

V5 – Vazba V5 patří k nejdůležitějším vazbám celého řetězce, neboť je v ní ukryt vliv ustavení nástroje vůči obrobku a tím i zásadní vliv na výrobní přesnost obrobku.

V8 – zpětná vazba z lineárního snímače polohy je v reálném čase přenášena do polohové vazby řízení. Smyčka polohového regulátoru může být zpracovávána centrálně v řídicím systému nebo je zpracovávána lokálně v driveru příslušného

pohonu. V každém případě vazba V8 přímo ovlivňuje přes řízení mechanickou soustavu a tím i vazbu V5.

V6 a V18 – vznik teplotního gradientu vlivem pasivních účinků ve stroji a vlivem působení okolí

V10 a V11 – vliv teplotního gradientu na mechanickou soustavu a snímač přímého odměřování lineární polohy.

4 HYPOTÉZY O CHOVÁNÍ LINEÁRNÍHO SNÍMAČE POLOHY

Na základě teoretické rešerše z oblasti konstrukce lineárních snímačů polohy, předchozímu akademickému výzkumu a systémovému rozboru dané problematiky lze bodově shrnout následující poznatky:

- Při velkých gradientech teploty může dojít ke změně koeficientu tepelné roztažnosti stupnice lineárního snímače polohy vlivem vnitřního prnutí v adhezivu mezi tělem a stupnicí snímače. Obecně lze říci, že roztažnost měřící stupnice nemá lineární chování (koeficient teplotní roztažnosti není se změnou teploty a změnou polohy od osy symetrie konstantní).
- Přesnost lineárního snímače polohy ovlivňuje jeho výroba a montáž do stroje.
- Lineární snímač polohy je ovlivňován teplotou okolí, teplotou základu, na kterém je umístěn, a teplotou vzduchu, který ve snímačích vytváří přetlak.
- Konstrukční uspořádání prvků lineárního snímače polohy a použité materiály pro výrobu ovlivňují průběh teplotního gradientu po jeho délce.
- Chování lineárního snímače polohy by mělo být symetrické podle konstrukčního středu.

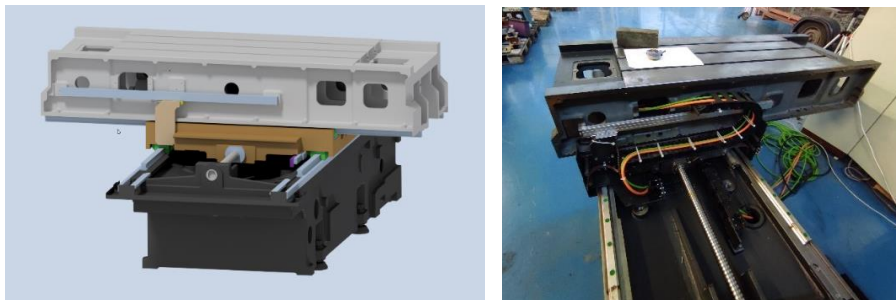
Do šíření tepla lineárním snímačem polohy se nejvíce projevuje vedení tepla a proudění, radiace do okolí nemá významný vliv. Radiaci je nutno uvažovat pouze v případě, že by byl ve stroji přítomen silný infračervený zdroj tepla.

5 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

Měření křížového stolu

Pro provedení experimentu byl zvolen křížový stůl z CNC obráběcího stroje s řídicím systémem FANUC vybaveným lineárním snímačem polohy se skleně-

nou absolutní stupnicí mřížky. Křížový stůl byl zvolen z toho důvodu, že měření a následná kompenzace stroje se provádí na HW, který je implementován i v produkčních strojích a lze tedy navržený kompenzační přístup do výrobních strojů aplikovat.



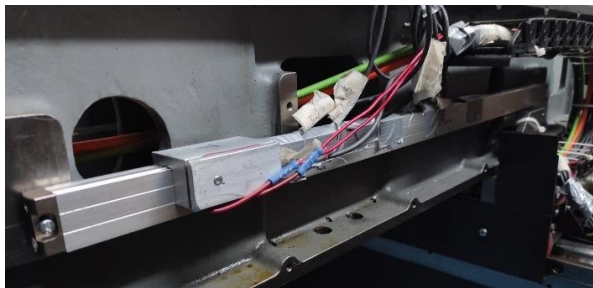
Obr. 4 Virtuální model s reálným křížovým stolem osazeným absolutním lineárním snímačem polohy LC 495F v ose X

Vyhodnocení přesnosti polohování stroje v ose a určení nejistoty měření za daných klimatických podmínek okolí stroje

Před zahájením sběru dat pro vytváření kompenzačního algoritmu bylo nutné provést měření původního stavu křížového stolu a zejména změnu okolních podmínek, které ovlivňují geometrickou stabilitu konstrukce. Tím dochází k mírnému natáčení optik interferometru vůči sobě a zkreslení měřených hodnot. Měření bylo provedeno standardně dle navrženého postupu softwaru CARTO za použití laserového interferometru s označením XL-80. Výsledkem tohoto měření byl zejména rozptyl hodnot bez jakékoliv změny teploty vyšetřovaného lineárního snímače, které dále figurují v hodnocení úspěšnosti predikce jako nejistota měření vlivem okolního prostředí.

Měření průběhu chyby polohování v závislosti na teplotě snímače polohy

Pro získání žádaného datového souboru pro vytvoření kompenzačního algoritmu byla naplánována čtveřice testů s definovaným rozmístěním ohřívacího segmentu. V prvním případě byl segment umístěn přesně na konstrukční střed pravítka, neboť se zde dle předchozí rešerše nachází s největší pravděpodobností bod symetrie (konstrukční i tepelné). Jako další body byly zvoleny symetrické ohřevy ± 100 mm okolo středu pravítka. Čtvrtý test, vyobrazen na Obr. 5, je poté s ohřevem v krajní poloze zastavení ($X=22$ mm).



Obr. 5 Detail umístění ohřivacího segmentu v případě testu s ohřevem

Popis principu záznamu dat

Pro záznam dat z měření laser interferometrem bylo využito softwaru CARTO, který je nativně kompatibilní s laserovým interferometrem XL-80 a zároveň umožňuje základní vyhodnocení naměřených dat, případně výpočet dat kompenzačních. Jelikož bylo do měřicího systému implementováno řízení teploty Beckhoff, byl řídicí software rozšířen o další snímače teploty a tyto údaje jsou periodicky každých 20 sekund ukládány do lokální databáze. Naměřená data jsou dodatečně párována na základě časové značky. Po dokončení měření jsou k dispozici následující údaje:

- až 7 údajů o teplotě těla lineárního snímače (pozice zastavení 22, 72, 122, 172, 222, 322, 422 mm)
- měřená teplota okolí (hardware Beckhoff i měřicí jednotka laseru)
- teplota ohřivacího segmentu
- průběh odchylek polohy v dílčích bodech zastavení křížového stolu

Během fáze pořízení dat byly deaktivovány všechny softwarové kompenzace řídicího systému, aby nezkreslovaly měřená data.

Verifikace měřených dat nezávislým dotykovým měřidlem

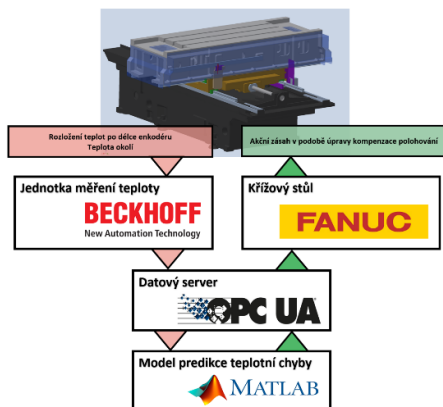
V návaznosti na teoretické předpoklady chování lineárního snímače polohy bylo předpokládáno, že se bude snímač a tím i odezva polohování křížového stolu v případě středového ohřevu chovat symetricky podle geometrického a zároveň teplotního středu. Při úvodním rozboru naměřených dat bylo zjištěno, že průběh odchylky na poloze zastavení $X=322$ mm nejsou v čase konstantní. Z tohoto důvodu bylo provedeno další porovnávací měření, při kterém bylo měřeno polohování křížového stolu v bodě zastavení $X=322$ mm ještě nezávislým dotykovým měřidlem. Při verifikačním měření se prokázalo, že opravdu dochází k posouvání středového bodu zastavení v závislosti na teplotě.

Při druhém verifikačním testu prokázání pohybu středového bodu při středovém ohřevu lineárního snímače byla demontována snímací jednotka a lineární snímač byl osazen čtveřicí dotykových úchylkoměrů (2 na koncích hliníkového těla, 2 na koncích stupnice). V tomto testu byl použit konstrukčně srovnatelný snímač (hliníkové tělo s lepenou skleněnou stupnicí). I při tomto testu se potvrdilo, že dochází k posunu středu stupnice vůči středu těla snímače. Zároveň posun není lineárně závislý na teplotě ohřevu a funkce posunu středu v závislosti na teplotě není u dvou vyšetřovaných snímačů lineární polohy shodná.

Případová studie nasazení kompenzačního modelu do řídicího systému CNC obráběcího stroje

V plném textu dizertační práce je zhodnoceno několik možných přístupů pro zavádění kompenzací do řídicího systému obráběcího stroje. [9] [10] [11] Zde bude uvedena pouze topologická struktura sestavy měřeného křížového stolu. Po délce lineárního snímače jsou umístěny senzory PT1000. Údaje o teplotě z těchto senzorů jsou přenášeny do PLC BECKHOFF, které zde figuruje jako sensorický člen a zároveň pro účely testování ovládá PID regulátor ohřevu lineárního snímače polohy.

Z PLC se následně přenáší naměřené hodnoty do OPC UA serveru, který slouží jako centrální datové úložiště. Z OPC UA serveru jsou data čerpána do kompenzačního modelu v prostředí softwaru Matlab, který vrací vypočtená kompenzační data zpět na OPC UA server. Tato data jsou následně pomocí FANUC FOCAS knihovny zaváděna do řídicího systému křížového stolu FANUC. Celá struktura je schematicky zakreslena na Obr. 6 dále.



Obr. 6 Datová struktura zpětnovazební smyčky křížového stolu

6 NÁVRH KOMPENZAČNÍHO MODELU

V předchozí kapitole byla popsána fáze sběru dat o chování polohování křížového stolu v závislosti na změně teploty lineárního snímače polohy. Zároveň byly neočekávané projevy ověřeny pomocí nezávislého dotykového měřidla. Tím byla vyloučena hypotéza, že je chyba způsobena chybou měření laserovým interferometrem. V této kapitole zkráceného textu dizertační práce bude popsán chronologický postup tvorby hybridního kompenzačního algoritmu.

6.1 Dekompozice příspěvků chyby polohování v ose

Na základě pořízených dat z dlouhodobých testů teplotního chování nelze přímo určit závislosti mezi průběhem teploty po délce lineárního snímače polohy a chybou najetí do polohy. Data je nejprve nutné dekomponovat do tří vhodně zvolených skupin. Praktický rozbor a analýza dat ukázal, že lze definovat tři hlavní příspěvky celkové geometrické chyby najetí do polohy, jimiž jsou chyba mechanické stavby, teplotní deformace stupnice a posun stupnice vůči základnímu tělu jako celku.

Systematická chyba

Chyba, která byla pro účely této publikace označena za systematickou chybu lze označit taktéž jako chybu mechanické stavby. Tato chyba je přímo závislá na preciznosti výroby a montáže mechanické konstrukce, mechanického ustavení lineárního snímače polohy či úvodní nastavení parametrů řídicího systému stroje. Dnes je tato chyba standardně měřena a vyhodnocována podle normy ISO 230-2:2015 [7] a zapisována do řídicího systému stroje v podobě CEC³ kompenzačních tabulek.

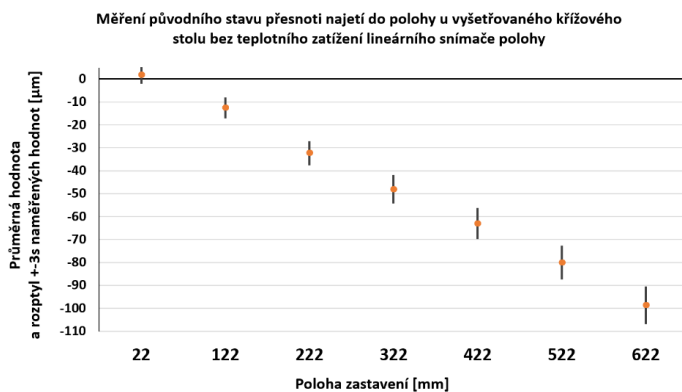
Dle teoretických předpokladů by klíčovým bodem pro popis lineárního snímače polohy měl být jeho geometrický střed, kolem kterého by měla stupnice symetricky dilatovat. Proto byla experimentálně zjištěna strojní souřadnice polohy stolu, při které je čtecí jednotka polohována přesně do konstrukčního středu těla snímače. Tomuto ustavení odpovídá strojní souřadnice $X=322$ mm. Polohy zastavení při experimentu byly zvoleny symetricky v intervalu $X \in (22 \text{ mm} : 622 \text{ mm})$ se 100 milimetrovým inkrementem polohy. Pro polohování byl využit obousměrný test, který byl naplánován v softwaru Renishaw CARTO. Při provádění úvodního testu nebyla měněna teplota lineárního snímače, takže se při tomto měření projevil pouze vliv změny okolního prostředí během dlouhodobých testů.

³ CEC – Cross Error Compensation – křížová kompenzace chyb

Tab. 1 Výsledné hodnoty testu měření okolních podmínek

INDEX CÍLE [mm]	PRŮMĚRNÁ CHYBA POLOHOVÁNÍ \bar{X}_i [μm]	SMĚRODATNÁ ODCHYLKA CHYBY POLOHOVÁNÍ [μm]	ROZPTYL HODNOT PŘI DANÉ NEJISTOTĚ	
			NEJISTOTA MĚŘENÍ +/- 2s [μm] p= 95,4 %	NEJISTOTA MĚŘENÍ +/- 3s [μm] p= 99,7 %
1 (X = 22)	0,00	1,30	-2,60 : 2,60	-3,89 : 3,89
2 (X = 122)	-14,43	1,55	-17,52 : -11,33	-19,07 : -9,78
3 (X = 222)	-34,14	1,76	-37,66 : -30,62	-39,42 : -28,86
4 (X = 322)	-49,88	2,06	-54,00 : -45,77	-56,05 : -43,71
5 (X = 422)	-64,84	2,26	-69,37 : -60,32	-71,63 : -58,06
6 (X = 522)	-81,86	2,44	-86,74 : -76,97	-89,19 : -74,52
7 (X = 622)	-100,44	2,72	-105,89 : -95,00	-108,62 : -92,27

Takto získaná data budou figurovat v návrhu kompenzačního algoritmu popsaného v další části této publikace. Vypočtená směrodatná odchylka bude figurovat při hodnocení úspěšnosti kompenzace, neboť je nutné definovat, z jaké části funguje navržený kompenzační algoritmus a z jaké části se do hodnocení výsledků projevuje nejistota vlivem prostředí. Grafické znázornění tabulkových hodnot je vyneseno na Obr. 7 níže. Je zde zřejmá chyba měřítka pohybové osy, která se projevila velkou průměrnou chybou polohování v ose ve vzdálenějších pozicích zastavení.



Obr. 7 Měření změny odchytky polohování vlivem změny okolního prostředí těžké laboratoře

Deformace stupnice vlivem změny teploty po délce pravítka

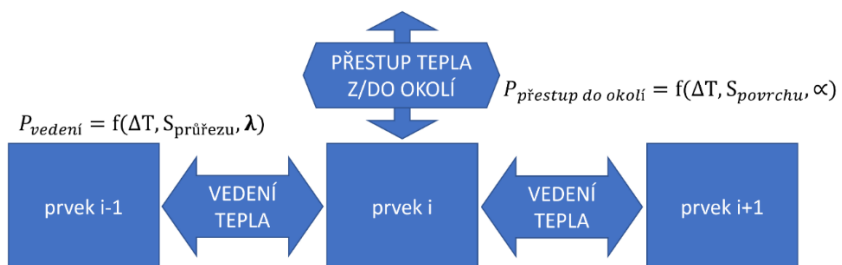
Další složkou, která má s jistotou příspěvek k vývoji chyby najetí do polohy v čase je délkové protažení stupnice v závislosti na její teplotě. Jak bylo zmíněno v teoretické části, projev této chyby je očekáván jako lineární funkce rozložení teplot po délce stupnice. [8]

$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \text{ [m]} \quad (1)$$

kde proměnná Δl [m] reprezentuje délkové protažení vlivem teplotní roztažnosti, l_0 [m] je počáteční délka vyšetřovaného segmentu, α [ppm.K⁻¹] je koeficient teplotní roztažnosti, který je závislý na materiálu použitého substrátu a nakonec proměnná ΔT [K] je rozdíl teplot mezi dvěma vyšetřovanými stavy.

Model šíření tepla po délce lineárního snímače polohy

V návaznosti na teoretické poznatky shrnuté v plném textu dizertační práce je možné vytvořit matematický model, který bude popisovat průběh teploty po délce lineárního snímače polohy. Z pohledu výkonu vedení tepla je podstatný koeficient tepelné vodivosti, průřez profilu a teplotní gradient mezi vyšetřovanými elementy. Z pohledu přenosu tepla mezi lineárním snímačem polohy a jeho okolím působením proudění je primárním faktorem rozdíl teploty snímače oproti teplotě okolí a také plocha kontaktu těchto dvou prostředí. Na základě teoretických předpokladů byl autorem sestaven jedno rozměrový iterační model pro odhad rozložení teplot po délce lineárního snímače polohy dle schématu na Obr. 8. Lineární snímač polohy je rozdělen na zvolený počet elementů. Mezi elementy a jejich okolím probíhá při výskytu gradientu teploty tok energie, popis jednotlivých částí modelu je vysvětlen v rovnicích na následující straně.



Obr. 8 Model 1D šíření tepla lineárním snímačem polohy

$$P_{vedení} = f(\Delta T, S_{průřezu}, \lambda) = k_{vedení} \cdot \Delta T_1 \quad [K/iterace] \quad (2)$$

$$P_{přestup\ do\ okolí} = f(\Delta T, S_{povrchu}, \alpha) = k_{přestup} \cdot \Delta T_2 \quad [K/iterace] \quad (3)$$

kde proměnná ΔT_1 [K] vyjadřuje rozdíl teploty mezi vzájemně sousedícími elementy. Proměnná ΔT_2 [K] figuruje jako rozdíl mezi aktuální teplotou vyšetřovaného prvku a teplotou okolí. Výsledné hodnoty $P_{vedení}$ [K/iterace] a $P_{přestup\ do\ okolí}$ [K/iterace] reprezentují teplotní rozdíl, o který se vyšetřovaný prvek v rámci jedné iterace ohřeje nebo naopak zchladne vlivem teplotních poměrů mezi prvky a jejich okolím. Iterační výpočet přes všechny elementy probíhá tak dlouho, než dojde k ustálení toku energie a vyrovnání rozložení teploty po délce měřicí stupnice.

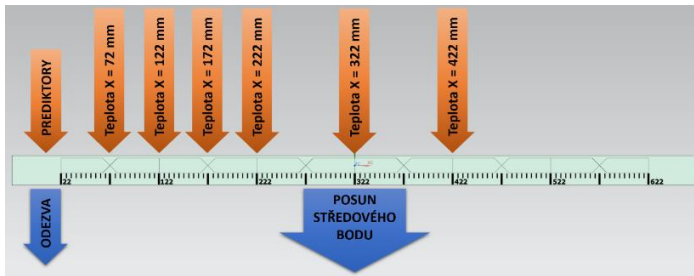
Posun stupnice jako celku

Třetím elementem, který má vliv na projev chyby lineárního snímače polohy, je posun stupnice jako celku. Tento jev byl již zmíněn v předchozí části s názvem Verifikace měřených dat nezávislým dotykovým měřidlem, kde bylo upozorněno na posun středového bodu zastavení, přestože byly splněny podmínky teplotní i mechanické symetrie. Projev tohoto podílu chyby je závislý na mechanické konstrukci snímače.

Jelikož je celá konstrukce lineárního snímače polohy tvořena jako kompozit více materiálů těla, stupnice a vrstvy adheziva, na řešení této úlohy bylo využito softwaru Matlab Regression Learner, který dokáže provádět aproximace dat i bez předchozí znalosti fyzikální podstaty problému. Do regresního modelu vždy vstupuje jeden nebo více prediktorů. Ve fázi učení do modelu dále vstupuje proměnná, jejíž odezvu bude model do budoucna predikovat. Nabízí se jako prediktory zvolit deformaci měřicí stupnice, nicméně tato hodnota ve fázi predikce není známá a může být ovlivněna chybou předchozí části prediktivního modelu.

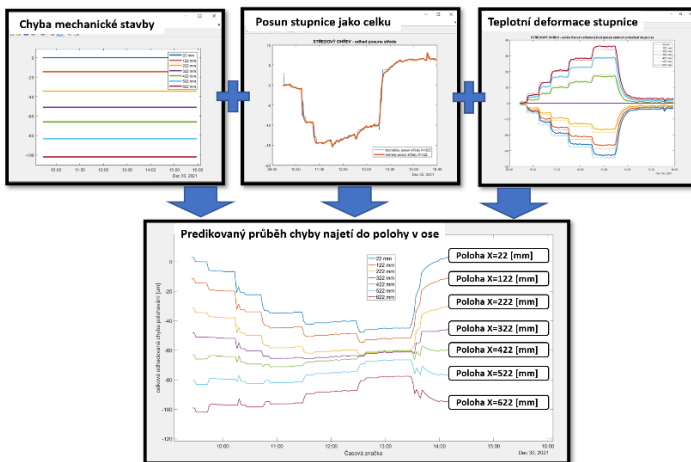
Je však nutné podotknout, že tato proměnná není při výpočtu predikce známá a vzniká jako výstup z modelu rozložení teplot po délce pravitka a z modelu odhadu protažení stupnice. Vlivem nepřesnosti výpočetního algoritmu mohou být tyto hodnoty zatíženy chybou a zkreslovat tento výpočtový model. Protože celý algoritmus predikce chyby má být koncipován jako funkce měřené teploty, i v tomto případě budou za prediktory zvoleny měřené teploty, konkrétně údaje z teploměrů na pozicích zastavení $X=72, 122, 172, 222, 322, 422$ mm (relativně vůči konstruk-

čínmu středu pravítka -250, -200, -150, -100, 0, 100 mm). Za výstupní žádanou odezvu byl zvolen relativní posun středového bodu stupnice v čase v závislosti na rozložení teplot.

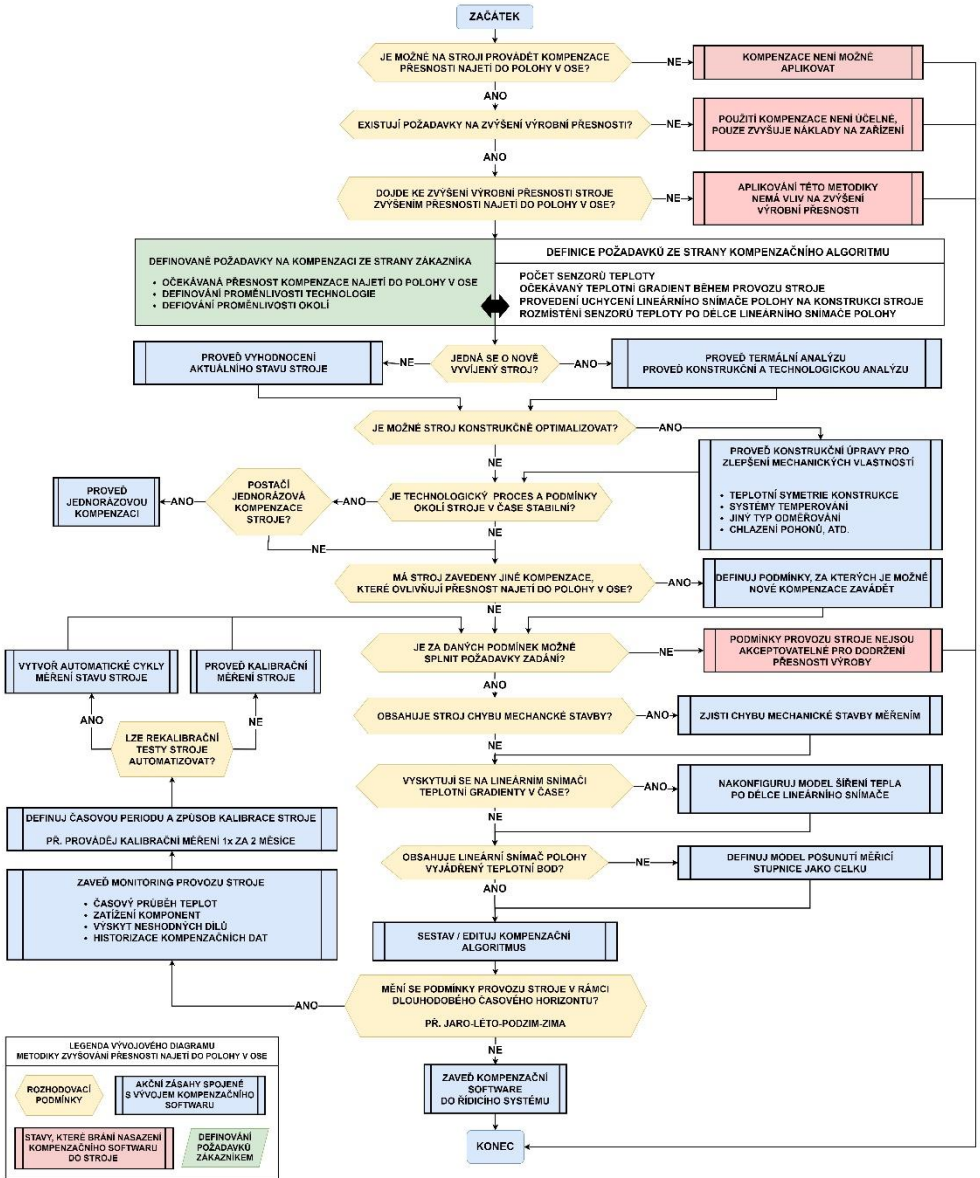


Obr. 9 Schéma prediktorů a odezvy pro odhad posunu středu stupnice

Sloučením výše uvedených přírůstků celkové chyby lze získat celkový odhad chyby najetí do polohy v ose v závislosti na rozložení teplot po délce lineárního snímače polohy. Na Obr. 10 níže je graficky znázorněná kombinace dílčích přírůstků chyby, konkrétně systematická chyba mechanické stavby, posun stupnice jako celku a průběh protažení stupnice po její délce. Dohromady celý tento kompenzační model vyjadřuje odhad kompenzačních dat v závislosti na teplotě a pozici bodu zastavení. Metodika návrhu kompenzace přesnosti najetí do polohy v ose a zhodnocení její využitelnosti v CNC obráběcích strojích je vyobrazena na vývojovém diagramu na Obr. 11 na následující straně.



Obr. 10 Sloučení dílčích přírůstků chyby



Obr. 11 Metodika nasazení kompenzačního algoritmu popsaného dizertační práci

7 STATISTICKÉ POROVNÁNÍ PREDIKOVANÝCH A MĚŘENÝCH DAT

V kapitole 5 byla popsána analýza počátečního stavu stroje, ve které byla vyjádřena průměrná chyba najetí do polohy a byla vypočtena výběrová směrodatná odchylka, která vzniká proměnlivou povahou okolního prostředí během dlouhodobých testů. Predikci chyby lze považovat za funkční, pokud se všechny měřené hodnoty budou vyskytovat v oblasti $\pm 3s$ od teoretické predikované křivky, tedy v definovaném poli nejistoty okolního prostředí. Na grafu níže je jsou oblasti $\pm 3s$ vyznačeny světlou plochou. Tenká čára zobrazuje průběh predikovaného průběhu odchylky na základě teploty a tlustá poté průběh měřené chyby. V oblastech s nízkým teplotním gradientem se křivka měření s rezervou nachází uvnitř pole nejistoty $\pm 3s$.

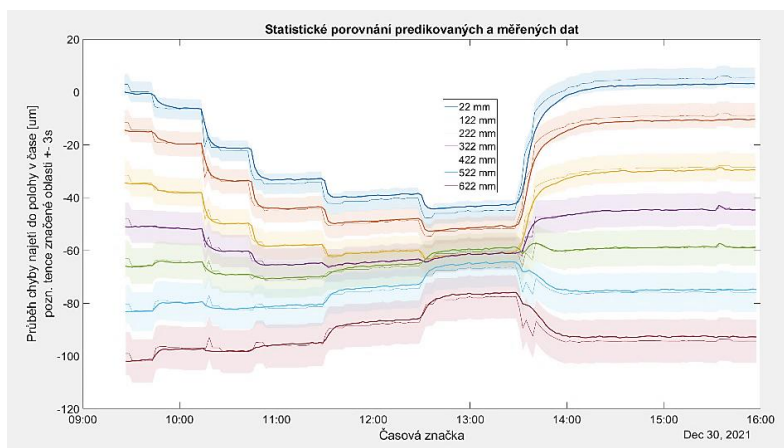
V případě hodnocení úspěšnosti celkové predikce chyby poměrem mezi největší odchylkou a největší chybou napříč všemi daty, kdy je maximální chyba predikce rovna $10,24 \mu\text{m}$ a největší chyba polohování je $102,05 \mu\text{m}$, odpovídá zlepšení chyby polohování rovnici níže.

$$\left(1 - \frac{|dErr_{\text{měřeno}} - dErr_{\text{predikováno}}|_{\text{max}}}{|dErr_{\text{měřeno}}|_{\text{max}}}\right) \cdot 100 = \quad (4)$$

$$= \left(1 - \frac{10,24}{102,05}\right) \cdot 100 = 89,97 \%$$

$dErr_{\text{měřeno}}$ [m] - odchylka měřená laserovým interferometrem XL-80

$dErr_{\text{predikováno}}$ [m] - odchylka odhadovaná výpočetním algoritmem



Obr. 12 Porovnání měřených a predikovaných dat s přihlédnutím ke směrodatné odchylce dlouhodobého měření

Téměř 90% shoda odhadu s měřenými daty platí pro oblast celého vyšetřovaného intervalu. Pokud je hodnocení omezeno pouze na oblasti s nižším teplotním gradientem (teplotně ustálené stavy), sníží se maximální chyba mezi odhadovanou a měřenou hodnotou na 2,5 μm a míra shody mezi predikcí a měřením vzroste téměř na 97 %. Vysoká míra shody je z části způsobena velikostí chyby najetí do polohy v ose ve výchozím stavu křížového stolu, která ve vzdálené úvrati ($X=622\text{ mm}$) téměř jedné desetinně milimetru.

Méně přesných výsledků je docíleno v oblasti přechodové, kde se teplotní gradient blíží až ke 3 $^{\circ}\text{C}$ za minutu, a dochází zde k výraznému odchýlení hodnot, které se v maximu přes celý interval pohybuje kolem hodnoty 10 μm a není vhodné stroj při takto vysokých gradientech teploty používat pro přesné dokončování. Z pohledu provozu stroje by měl být na tyto jevy operátor upozorněn a vyzván k vyčkání na ustálení teplot. Přestože se tato publikace věnuje pouze přesnosti najetí do polohy v ose v závislosti na teplotě lineárního snímače polohy, teplotní gradient ovlivňuje u tříosého stroje i další dvě desítky geometrických chyb, které se podílejí na výsledné přesnosti a integritě povrchu výsledného obrobku.

8 HLAVNÍ VÝSLEDKY DIZERTAČNÍ PRÁCE

Akademický přínos

Dizertační práce je pro teoretickou oblast přínosná v několika směrech. Prvním je vytvoření kompenzačního algoritmu, který je založen na fyzikální podstatě problému teplotního chování lineárního snímače. Jelikož respektuje základní fyzikální zákony, je s velkou pravděpodobností přenositelný i na další snímače podobného konstrukčního uspořádání. Práce shrnuje řadu dílčích příspěvků k celkové teplotní chybě lineárního snímače polohy, které mohou být do budoucna detailně zkoumány v prostředí stabilních laboratorních podmínek a omezit tedy vliv okolního prostředí na měření a jeho výsledky.

Přínos pro ústav Výrobních strojů, systémů a robotiky autor sledává zejména v kolektivně nabytých zkušenostech z oblasti řídicích systémů CNC strojů, jejich možnosti připojení do vyšších systémů plánování výroby, systému pokročilých metod Edge Computingu, virtuálního zprovoznění a přes další prvky Industry 4.0 až k plnohodnotnému digitálnímu dvojčeti. Provedený výzkum z oblasti teplotního chování lineárních snímačů polohy přispívá k dlouhodobému internímu výzkumu ÚVSSR zaměřeného na zvyšování geometrické a zejména výrobní přesnosti strojů s využitím prvků automatické zpětnovazební kompenzace a lze na její výsledky navazovat v rámci dalších výzkumných projektů. Výsledky této dizertační práce je možno aplikovat do inovace předmětů garantovaných ústavem výrobních strojů, systémů a robotiky. Mezi potenciální cílové předměty lze specifikovat:

- GAR - Elektrické prvky automatického řízení výrobních systémů
- GRV - Návrh a projektování řídicích systémů
- GTS - Testování obráběcích strojů

Přínos pro praxi

Dizertační práce je pro praxi přínosná zejména pro svoji povahu aplikačního výzkumu. Akademická sféra je v mnoha ohledech odtržena do průmyslové praxe a četné konzultace se zástupci firem ukazují, že ne všechny jimi navržené postupy jsou do reálných aplikací implementovatelné. Hranice zde tvoří zejména limitace výpočetního výkonu používaného průmyslového hardwaru a omezení z hlediska bezpečnosti či spolehlivosti stroje provozovaného u zákazníka. Obecně platí, že čím složitější je soustava vytvořených teplotních kompenzací, tím klesá její dlouhodobá spolehlivost. Neméně tak tvoří bariéru obrovská setrvačnost průmyslového světa, kde se inovace stávajících funkčních a spolehlivých řešení provádí s velkou opatrností. Z výše zmíněných důvodů považuje autor práce část případových studií za opodstatněnou součást práce, která usnadní přenesení komplexní řešení problematiky teplotních kompenzací lineárního snímače polohy do vytvoření spolehlivých kompenzačních aplikací na stroji, jelikož se zde

vyskytují nejrůznější postupy, softwarové aplikace, technická řešení a klíčová slova, která mohou vést k integraci kompenzačních algoritmů a zvýšení výrobní přesnosti stroje v kratším časovém horizontu.

Podporou pro nasazení kompenzací lineárního snímače polohy do obráběcího stroje je metodika návrhu na Obr. 11, která je výrobcům strojů oporou jak ve fázi rozhodování, zda kompenzace do stroje zařadit, tak i při vytváření celého kompenzačního algoritmu. Z metodiky návrhu také vychází fakt, že pokud se stroj nachází v dlouhodobě proměnném prostředí (jaro-léto-podzim-zima), není možné nasadit plnohodnotné kompenzace okamžitě, ale musí proběhnout ještě dodatečná fáze učení, která umožní adaptaci i na dlouhodobé změny konkrétního okolního prostředí stroje.

Vytvořené publikace a funkční vzorky

V rámci studia byly dílčí výsledky z oblasti automatické zpětnovazební smyčky pro zvýšení dlouhodobé výrobní přesnosti CNC obráběcích strojů vytvořeny níže uvedené publikace, které jsou obě zařazeny do citační databáze SCOPUS. Zároveň se autor aktivně podílel na konstrukci výtčtu funkčních vzorků, které zapadají do dlouhodobého interního výzkumu na Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky.

Článek na konferenci ISPR 2021

ŠTĚPÁNEK, V.; BRAŽINA, J.; HOLUB, M.; VETIŠKA, J.; KOVÁŘ, J.; KROUPA, J.; JELÍNEK, A. Implementation of Industry 4.0 Elements in Industrial Metrology – Case Study. In *Digitizing Production Systems. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 1. Springer, Cham, 2021. p. 296-308. ISBN: 978-3-030-90421-0. ISSN: 2195-4356.

Článek z pracovní stáže na TU Wien 2020 - ŠTĚPÁNEK, V.; BODUR, O.; WALCHER, E.; DURAKBASA, N.

Precision in additive manufacturing, optimization and evaluation of the accuracy of 3D printer base on GPS system. In *Proceedings of the 31st International DAAAM Virtual Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation"*. 2020. p. 963-972. ISBN: 978-3-902734-29-7.

Kapitola na téma lineárních snímačů polohy v připravované knize prof. Marka - Konstrukce OS V.

Jednouúčelová měřicí stanice – funkční vzorek

ŠTĚPÁNEK, V.; BRAŽINA, J.; HOLUB, M.; VETIŠKA, J.; JANKOVÝCH, R.; MAREK, T.; TŮMA, J.: JMS 320; Jednouúčelová měřicí stanice. C1/118.

Lineární osa s teplotním managementem – funkční vzorek

ŠTĚPÁNEK, V.; HOLUB, M.; VETIŠKA, J.; BRADÁČ, F.; MAREK, J.: Linosa 1220; Lineární osa s teplotním managementem. C1/118.

Robotická obráběcí buňka – funkční vzorek

BRAŽINA, J.; ŠTĚPÁNEK, V.; VETIŠKA, J.; HOLUB, M.: Robotická obráběcí buňka. C1/118.

Buňka UVSSR CELL – dlouhodobý projekt

VETIŠKA, J.; HOLUB, M.; BRADÁČ, F.; BLECHA, P.; BLECHA, R.; KOLÍBAL, Z.; KOVÁŘ, J.; ANDRŠ, O.; KROUPA, J.; ŠTĚPÁNEK, V.; BRAŽINA, J.; TŮMA, J.; TŮMA, Z.; HUZLÍK, R.; ZUTH, D.; MARADA, T.; KNOFLÍČEK, R.; MAREK, T.; MAREK, J.; JANKOVÝCH, R.: UVSSR CELL; UVSSR CELL. FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ Technická 2896/2 616 69 Brno laboratoře C1/118.

ZÁVĚR, DOPORUČENÍ PRO PRAXI A MOŽNOSTI DALŠÍHO ROZVOJE

Dizertační práce je věnována jednomu z témat rozsáhlé oblasti řešení teplotního chování CNC obráběcího stroje. Existují přístupy měření a kompenzace CNC strojů, ve kterých je stroj osazen stovkami senzorů a metody strojního učení hledají jejich vzájemné závislosti. Nevýhodou tohoto přístupu je jisté množství vstupních a výstupních parametrů, které mezi sebou zcela jistě korelují a interagují a je velice složité rozdělit výsledek měřené chyby mezi chybu stroje, chybu měření, zaokrouhlovací chyby modelu a jiné. Zároveň do celého kompenzačního řetězce vstupují velice náhodné proměnné, jako je teplota, tlak či vlhkost vzduchu okolí, včetně meteorologických předpovědí, které nelze jednoznačně predikovat, a přesto mají na výsledky kompenzačního algoritmu velký vliv.

V autorem řešené dizertační práci je vybrán pouze jeden komponent celého kinematického řetězce, a sice lineární snímač polohy. Pro tento element je pomocí teplotních zatěžovacích cyklů vytvořen model, který popisuje průběh rozložení teplot po tělese lineárního snímače polohy, odhaduje protažení včetně nelineárního chování adhezivního spojení mezi základem a odměřovací stupnicí. Jak definuje provedený systémový rozbor, výzkum teplotního chování je pouze jedna z entit celého řetězce zpětnovazební smyčky. Proto je v rámci dizertační práce provedena ještě případová studie, která navrhuje harwarové a zejména softwarové uspořádání celé struktury, aby byl algoritmus implementovatelný do nově vznikajících strojů, ale zároveň i do strojů starších, které podporují určitá komunikační rozhraní a dají se tedy opčně zpřesňovat bez nároků na jejich kompletní rekonstrukci nebo výměnu za stroj nový. Dizertační práce popisuje komplexní mechatronickou strukturu CNC obráběcího stroje se zaměřením na přímé závislosti mezi teplotou, lineárním snímačem polohy a řídicím systémem obráběcího stroje.

Při hodnocení úspěšnosti predikce protažení stupnice oproti hodnotám měřeným bylo dosaženo vysoké přesnosti odhadu chyby téměř 93 %. Pokud je kompenzační algoritmus hodnocen komplexně přes celý interval testování, projeví se zde příspěvek chyby odhadu posunutí stupnice jako celku lineárního snímače polohy a shoda mezi prediktivním modelem s reálně měřenými daty klesne těsně pod 90 %. Z pohledu geometrické specifikace obrobku mají vyšší vypovídající hodnotu konkrétní délkové údaje. V případě hodnocení délkového protažení stupnice v závislosti na rozložení teploty je maximální chyba predikce 2,62 μm při maximální deformaci vzniklé vlivem teploty 36,2 μm . V případě hodnocení celkového průběhu chyby je maximální chyba odhadu 10,24 μm oproti původním 102,05 μm .

Za přínos dizertační práce považuje autor potenciál jejího dalšího rozšíření o detailní výzkum projevů dílčích přírůstků chyby. Již ve fázi dokončení dizertační práce je vypsáno téma pro další závěrečnou práci, která bude věnována vytvoření aplikace na zavádění kompenzačních dat pro vybraný řídicí systém obráběcího stroje. Součástí této práce je samozřejmě i vytipování vhodného hardwaru a implementace kompenzačního algoritmu tak, aby nedocházelo k přetěžování výpočetního výkonu CNC stroje. Zároveň je připravena další závěrečná práce na výzkum chování adhezivní vrstvy, jejíž model byl v této publikaci popsán pomocí Matlab Regression Learneru. I zde musí existovat fyzikální podstata chování kompozitu tělo<->adhezivum<->stupnice. Čím více bude problematika explicitně popsána, tím přenositelnější model mezi stroji bude a zkrátí se čas potřebný pro jeho nasazení v konkrétní průmyslové aplikaci.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM publishing, 2014. MM speciál. ISBN ISBN978-80-260-6780-1.
- [2] GURAUSKIS, Donatas, Arturas KILIKEVIČIUS, Sergejus BORODINAS a Albinas KASPARAITIS. Analysis of geometric and thermal errors of linear encoder for real-time compensation. *Sensors and Actuators A: Physical* [online]. 2019, 296, 145-154 [cit. 2021-01-05]. ISSN 09244247. Dostupné z: doi:10.1016/j.sna.2019.06.055
- [3] MAREK, Tomáš. Predikování vybraných vlastností rotačních kinematických dvojic obráběcích strojů. Brno, 2019. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Vedoucí práce doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
- [4] BODUR, Osman, Vojtěch ŠTĚPÁNEK, Eva WALCHER a Numan DURAKBASA. Precision in Additive Manufacturing, Optimization and Evaluation of the Accuracy of 3D Printer based on GPS System. *Proceedings of the 31st DAAAM International Symposium* [online]. Víenna, 2020, 31, 963-972 [cit. 2021-01-08]. ISSN ISSN 1726-9679. Dostupné z: https://www.daaam.info/Downloads/Pdfs/proceedings/proceedings_2020/134.pdf
- [5] ALEJANDRE, I. a M. ARTES. Thermal non-linear behaviour in optical linear encoders. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2006, 46(12-13), 1319-1325 [cit. 2021-01-05]. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2005.10.010
- [6] LEE, T., H. GIM, S. OH, T. GOTTHARDT, F. TZANETOS, A. SCHMETZ, D. ZONTAR a C. BRECHER. A NOVEL DESIGN CONCEPT FOR A THERMALLY STABLE LINEAR SCALE USING TWO DIFFERENT MATERIALS. *MM Science Journal* [online]. 2021, 2021(3), 4721-4725 [cit. 2022-03-29]. ISSN 18031269. Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2021_7_2021081
- [7] ČSN ISO 230-2 - Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 2: Určení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslíkové řízených osách. 2015.
- [8] Tepelná roztažnost a měrná tepelná kapacita. In: *Fyzikální kabinet FyzKAB* [online]. [cit. 2022-03-24]. Dostupné z: <http://kabinet.fyzika.net/studium/tabulky/tepelna-kapacita-roztaznost.php>
- [9] Sinumerik One dává nápadům život. In: *Hospodářské noviny* [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://archiv.hn.cz/c1-66997830-sinumerik-one-dava-napadum-zivot>
- [10] HEIDENHAIN - RemoTools SDK virtualTNC [online]. In: . 2019, s. 4 [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: https://www.heidenhain.cz/fileadmin/pdb/media/img/628968-24_RemoTools_SDK_en.pdf
- [11] *Knihovna FOCAS*. In: *FANUC* [online]. [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/cnc/development-software/focas-development-libraries>

ŽIVOTOPIS

Jméno a příjmení: Ing. Vojtěch Štěpánek
Tel.: +420 721 641 910
E-mail: Vojtech.Stepanek@vut.cz



Vzdělání

2018 – současnost

VUT v Brně, fakulta strojního inženýrství, ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Obor: Konstrukční a procesní inženýrství

2016 - 2018

VUT v Brně, fakulta strojního inženýrství, ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Obor: Výrobní stroje, systémy a roboty

Diplomová práce na téma: Vývoj a návrh nízkonákladového manipulátoru pro interakci s okolím

2013 - 2016

VUT v Brně, fakulta strojního inženýrství

Obor/specializace: Základy strojního inženýrství

Bakalářská práce na téma: Návrh a konstrukce hobby frézky

2009 - 2013

SPŠ Jihlava

Obor/specializace: Technické lyceum

Kurzy a školení

2019 - Školení obsluhy CNC stroje DMU 75 monoBLOCK, řídicí SW Heidenhain TNC640, DMG MORI Czech

2018-2022 – Semináře TIA na dosah

Pedagogická činnost

6EE Elektrotechnika a elektronika
GRV Návrh a projektování řídicích systémů
RPA Programovatelné automaty
GPZ Průmyslové roboty a manipulátory I
GVR Virtuální a rozšířená realita

Účast na projektech:

2020 - současnost	FSI-S-20-6335 Technologie pro digitální dvojče výrobních systémů
2020	FV 20-29 Návrh automatické měřicí stanice pro vyhodnocování geometrických chyb obrobku. Fond vědy FSI 2020
2018 - 2019	výroba čtyřosého frézovacího centra se třemi vřeteny. Řízení Mach3/TECO PLC
2018	konstrukce RR manipulátoru určeného pro sestavování digitálních hodin z kulových segment. Řízení mikrokontroler Arduino
2016 - 2017	stavba řezacího laseru s technologií CO2, výkon stroje 100W, Řízení AWC708C
2015 - 2016	výroba tříosé CNC frézky s dotykovým řídicím panelem. Řízení Mach3

**Průběh zaměstnání
VUT v Brně**

2018 – současnost -	student doktorského studia částeční úvazek na pozici asistent na ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky účast na projektech týkajících se kompenzací obráběcích strojů
---------------------	--

MillVOY.cz	2017 - současnost
S.J.S Invest s.r.o.	2008 - 2019

Znalosti**Jazykové znalosti:**

Čeština - mateřský jazyk, Angličtina – B1, Němčina - A1

Ostatní znalosti:

Autodesk Inventor, EdgeCAM, SurfCAM, PowerMill, ArtCAM, InventorCAM - pokročilý
Microsoft Office
Matlab, Simulink,
Virtuální zprovoznění - NX Mechatronics Concept Designer
Programování CNC strojů (Sinumerik, Fanuc FOCAS, Heidenhain)
Programování PLC a mikrokontrolerů Arduino
Programovací prostředí pro PLC - Siemens TIA Portál, TwinCAT
Elektrotechnická kvalifikace dle §7 (vyhl.50/1978 Sb.)

Řidičský průkaz:

sk. B; aktivní řidič