



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

METODY KOMPENZACE TEPLOTNÍ CHYBY OBRÁBĚCÍHO STROJE

METHODS OF MACHINE TOOL THERMAL ERROR COMPENSATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Hanzal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Minář

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Jiří Hanzal
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Petr Minář
Akademický rok:	2016/17

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

Metody kompenzace teplotní chyby obráběcího stroje

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kompenzace odchylek nástroje vlivem okolního prostředí a dalších tepelných zdrojů je u výrobců obráběcích strojů a jejich uživatelů stále častěji řešeným tématem. Úkolem práce je rešerše přístupů ke kompenzaci tepelných vlivů na obráběcí stroj. Práce bude realizována ve spolupráci s výzkumným centrem Intemac Solutions, s.r.o.

Cíle bakalářské práce:

1. Změření teplotních odchylek na 3–osém frézovacím centru
2. Rešerše aplikovaných přístupů ke kompenzaci
3. Rešerše výzkumných center a výrobců obráběcích strojů, zabývajících se touto tematikou
4. Metodický návrh vlastního řešení teplotní kompenzace pro případ testovaného stroje na základě rešerší

Seznam doporučené literatury:

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM publishing, 2014, 684 s. : il. ISBN 978-80-260-6780-1.

WECK, Manfred a Christian BRECHER. Werkzeugmaschinen. Band 5, Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität. 7. neu bearb. Aufl. Berlin: Springer, 2006, xvii, 502 s. : il., čb. fot. ISBN 3-540-22505-6.

MAYR, Josef, Jerzy JEDRZEJEWSKI, Eckart UHLMANN, et al. Thermal issues in machine tools. CIRP Annals - Manufacturing Technology [online]. Elsevier Ltd, 2012, 61(2), 771-791 [cit. 2016-1-23]. DOI: 10.1016/j.cirp.2012.05.008. ISSN 0007-8506.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tepelná chyba způsobená tepelnou deformací je jedním z nejvýznamnějších faktorů ovlivňujících přesnost obráběcího stroje. Tento článek představuje přehled metod měření, regulace a kompenzace tepelné chyby. Dále se zabývá rešerší výzkumných středisek a jejich projektů. V závěru práce se zabýváme změřením teplotních odchylek na obráběcím stroji MCV 754 Quick. A pro testovaný obráběcí stroj byl sepsán metodický návrh teplotní kompenzace, který využívá model šedé neuronové sítě s konvolučním integrálem. Cílem této práce je seznámení se základním úvodem celého procesu kompenzace tepelné chyby.

ABSTRACT

Thermal error caused by the thermal deformation is one of the most significant factors influencing the accuracy of the machine tool. This paper presents an overview of the methods of measurement, regulation and compensation of thermal errors. It also deals with the research of research centers and their projects. At the end of the thesis we are dealing with measuring of temperature deviations on machine tools MCV 754 Quick. For the tested machine tool, a methodical proposal of temperature compensation was designed using the grey neural network model with convolution Integral. This paper aims to give a basic introduction of the whole process of the spindle thermal error compensation.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kompenzace tepelné chyby, tepelná chyba, neuronová síť, materiál, měření teplot a tepelných chyb, obráběcí stroj.

KEYWORDS

Thermal error compensation, thermal error, neural network, material, machine tool, Temperatures and thermal errors measurements.

BIBLIOGRAFICKÉ CITACE

HANZAL, J. *Metody kompenzace teplotní chyby u obráběcího stroje*, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2016, 69 s., Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Minář.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Petru Minářovi za jeho odbornou pomoc při vypracování této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Dipl.-Ing. Hermannu Maierovi z firmy Alzmetall, p. Otmaru Hruškovi z firmy TAJMAC-ZPS, p. Pavlu Šišákovi a p. Michalu Horáčkovi z firmy KOVOSVIT MAS, p. Pavlu Němečkovi z firmy Hermle, p. Ing. Martinu Marešovi, Ph.D. a p. Ing. Janu Hornychovi, Ph.D. za jejich konzultace.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Petra Mináře a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 26. 5. 2017

.....
Hanzal Jiří

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	ÚROVEŇ POZNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH VÝROBCŮ OS	17
3	PŘÍČINY TEPLOTNÍCH DEFORMACÍ OBRÁBĚCÍCH STROJŮ	19
3.1	Vnější zdroje tepla	19
3.2	Vnitřní zdroje tepla	19
4	PŘÍSTUPY KE KOMPENZACI TEPELNÉ CHYBY	21
4.1	Úvod do měření	21
4.2	Měření teplot.....	21
4.3	Měření odchylky v místě nástroje.....	22
4.4	Výběr míst pro měření teploty	23
5	PASIVNÍ KOMPENZACE	25
5.1	Materiály	25
5.1.1	Ocel, litina a kovové materiály	25
5.1.2	Přírodní kámen a keramika.....	26
5.1.3	Polymerbeton / minerální odlitek	26
5.1.4	Vláknové a kompozitní materiály.....	26
5.2	Konstrukce	27
5.3	Chlazení	27
6	AKTIVNÍ KOMPENZACE	29
6.1	Podstata kompenzace	29
6.2	Modelování tepelné chyby	29
6.2.1	FEM - Finite element method.....	30
6.2.2	FDM - Finite difference method.....	30
6.2.3	FDEM - Finite difference element method.....	30
6.2.4	Regresní analýza.....	31
6.2.5	Neuronová síť	33
6.2.6	Teorie šedého systému.....	36
6.2.7	SGNN - Serial grey neural network	36
6.2.8	PGNN – Parallel grey neural network.....	37
6.2.9	SVM - Support vector machines	37
6.2.10	Fuzzy logika	38
6.3	Bez-senzorové kompenzace chyby	39
6.4	Hybridní kompenzace	40
7	REŠERŠE VÝZKUMNÝCH CENTER	43
8	PRAKTICKÁ ČÁST	49
8.1	Změření teplotních odchylek na 3-osém frézovacím stroji	49
8.2	Metodický návrh vlastního řešení teplotní kompenzace.....	51
8.2.1	Tepelný model	51
8.2.2	Modelování tepelné chyby.....	52
8.2.3	Experimentální postup.....	53
9	ZÁVĚR	55
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	57
11	SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	61

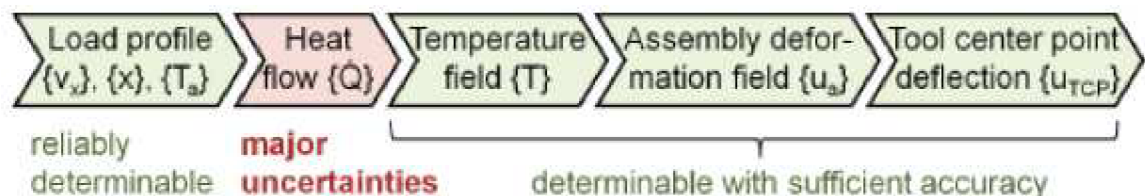
11.1 Seznam tabulek.....	61
11.2 Seznam obrázků.....	61
12 PŘÍLOHY	63

1 ÚVOD

V dnešní době jsou nezbytné v moderním průmyslu vysoce přesné obráběcí stroje. Přesnost obráběcích strojů je ovlivněna mnoha zdroji chyb, jako je například geometrická chyba, tepelná chyba, zatížení, dynamické síly, řízení pohybu či řídicí software. Podle statistik může tepelná chyba představovat přibližně 50-70% z celkového počtu chyb[1]. Jedním z hlavních faktorů ovlivňujících přesnost obráběcích strojů je tepelná chyba způsobená vnitřními a vnějšími zdroji tepla. Vnitřní zdroje tepla zahrnují všechny zdroje tepla, které jsou přímo způsobeny obráběcím strojem, jako jsou vřetenové motory, tření v ložiscích, v převodech, uložení a vedení apod. Vnější zdroje tepla jsou například topná tělesa či ventilátor topení, stěny haly, otevřené dveře, vlastní teplota dílu určeného pro obrábění, jiné stroje aj. Mezi další činitele ovlivňující tepelné deformace patří sluneční záření či tepelné záření pocházející z jiných těles. Dále to může být teplota vzduchu, chladicí kapaliny, mazacích prostředků atd.[2]

Tepelná chyba může být redukována dvěma následujícími způsoby: vyloučení chyb a kompenzací chyb. Jednou z metod používaných k vyloučení chyb je použití tepelně stabilních materiálů, jako jsou různé kompozitní materiály vyztužené vlákny, polymerbeton, hybridní materiály, apod. V konstrukci obráběcích strojů může být tepelná chyba snížena izolací zdrojů tepla či tepelně symetrickým uspořádáním stroje. Metoda kompenzace chyb způsobuje chybu v opačném směru z důvodu eliminování původní chyby. Pro tento způsob kompenzace chyb je důležitá znalost tepelného chování obráběcích strojů. Nástroje, které jsou pro tento úkol postupně používány, jsou modely, které simulují tepelné chování strojů. [1]

Příčinami tepelných chyb jsou vnitřní tepelné ztráty a změny teplot v okolí.



Obr. 1 Tepelný příčinný řetězec obráběcích strojů a nejistot modelování[3].

Na počátku obr. 1 je profil zatížení charakterizován časově proměnnými pozicemi osy x , rychlostí osy v_x a okolními teplotami T_a . Profil zatížení zahajuje proudění tepla způsobené okolními teplotami a tepelnými ztrátami. Tyto tepelné proudy mění teplotní pole strojních soustav a vedou k jejich termo-elastické deformaci. Díky kinematickým vazbám soustav dochází k posunutí mezi obrobkem a nástrojem, což vede k výrobním odchylkám. Existují dvě opatření pro snížení odchylek. Nejprve existují kompenzační opatření, jehož cílem je pozitivní ovlivnění tepelného chování. Příkladem je snížení tepelných ztrát nebo změna okolní teploty. Za druhé, existují nápravná opatření, jejichž provozní režim umožňuje tepelné procesy včetně montážní deformace. Tepelné modely se používají k reprodukci těchto procesů. Na základě vypočítaných tepelných deformací se chyba koriguje použitím posunutí na nastavené hodnoty pohybových os.[3]

Kompenzace tepelné chyby je nejvýhodnější a nejhospodárnější ze zmiňovaných způsobů. Je to proto, že není potřeba žádného drahého hardwaru, jako jsou pokročilé materiály či chlazení. Navíc tento způsob kompenzace tepelné chyby může být realizován jakékoli konstrukční fází.[4]

V této práci jsou popsány základní procesy při kompenzaci teplotní chyby. Nejprve v kapitole 2 je sepsán stručný stav poznání výrobců obráběcích strojů. V kapitole 3 jsou popsány vnitřní a vnější zdroje tepla. V kapitole 4 jsou zavedena měřicí zařízení pro měření teplot a tepelných chyb, taktéž je zde popsána optimalizace teplotně citlivých bodů. V kapitole 5 a 6 jsou studovány dvě základní kompenzace, a to pasivní a aktivní kompenzace. V Kapitole 7 jsou sepsány instituce a jejich projekty. A v praktické části jsou změřeny teplotní odchylky obráběcího stroje MCV 754 Quick a následně je navržen metodický návrh kompenzace pomocí modelu šedé neuronové sítě s konvolučním integrálem, který plně využívá podobnosti mezi modely šedých systémů a umělých neuronových sítí. Jeho nejvýznamnější výhodou je, že potřebuje malé množství dat.

Účelem této práce je seznámení s různými metodami kompenzace teplotní chyby, jež se používají v posledních letech. Dále změření teplotních odchylek na 3-osém frézovacím centru a vlastní metodický návrh teplotní kompenzace pro případ testovaného stroje.

2 ÚROVEŇ POZNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH VÝROBCŮ OS

Úroveň poznání jednotlivých výrobců obráběcích strojů je různá. Následující soupis poznání je jen stručný vhled do problematiky a rozepsán podle toho, jak jednotlivý výrobci přistupují ke kompenzaci.

- HERMLE - Pro výrobu základu stroje (rám, lože, atd.) do velikosti C 42 U je používán polymerbeton, jelikož je termostabilnější než šedá litina. Dále je nabízena možnost proplachování lože či elektronická teplotní kompenzace. Všeobecně obráběcí stroje jsou řešeny termo-symetricky za účelem zlepšení funkčnosti teplotních kompenzací.
- KOVOSVIT MAS - Teplotní kompenzace je řešena pomocí teplotních čidel na stojanu stroje a vřeteníku. Na základě změřených údajů je prováděna korekce naprogramované dráhy pomocí předem určených algoritmů.
Pro výrobu rámu stroje je používána šedá litina. Všechny pohony jsou průtokově chlazeny vodou, přičemž je nabízena možnost průtokového chlazení vřeten s vlastním chladícím agregátem. Pracovní prostor je kompletně zakrytován, aby byl zamezen přenos tepla z pracovního prostoru do rámu stroje
- FERMAT - Pro odměřování polohy je používáno optoelektrických lineárních pravítek Heidenhain. Dále ke standardní výbavě patří teplotní stabilizační systémy vřetena.
- ALZMETALL - Tepelné deformace jsou řešeny pasivní kompenzací, konkrétně termo-symetrickou konstrukcí stroje.
- OKUMA - Pro řešení této problematiky je vytvořen termo-přívětivý koncept. Ve kterém je kombinována řídicí technologie a konstrukce stroje tak, aby byla minimalizována tvorba generovaného tepla. Výhoda tohoto spojení je bezkonkurenční tvarová stálost v průběhu dlouhých souvislých chodů. Konstrukce strojů se snaží vyrovnávat okolní teplotu. Konstrukce je navržena tak, aby deformace šla předvídat a kontrolovat. Řídicí technikou je aktivní stabilizátor, který má dvě složky: TAS-S pro vřeteno a TAS-C pro konstrukci.
TAS-S získává informace o teplotě vřetena, otáčkách, změnách rychlosti a zastavení. Výsledkem je, že deformace vřetena a osy jsou přesně kontrolovány.
TAS-C je založen na teplotních charakteristikách stroje. Díky vhodně umístěným teplotním čidelům TAS-C přesně předvídá a ovládá tepelné deformace.
Zjednodušeně řečeno: Všechny teplotní deformace vyhodnocuje inteligentní řízení, které kromě sbírání informací od snímačů dokáže také předvídat teplotní zátěž od vřetene a pohonů.
- TAJMAC-ZPS - teplotní chyby jsou řešeny pasivní i aktivní kompenzací. Pro výrobu základu stroje je používána šedá litina. Konstrukce strojů jsou řešeny tepelnou symetrií.
- MIKRON - Pro výrobu loží je používána přírodní žula, pro její nízký koeficient teplotní roztažnosti
- DMG CZECH - Pro výrobu základních dílů je používán polymerbeton z důvodu integrace chlazení už při počátku výroby.

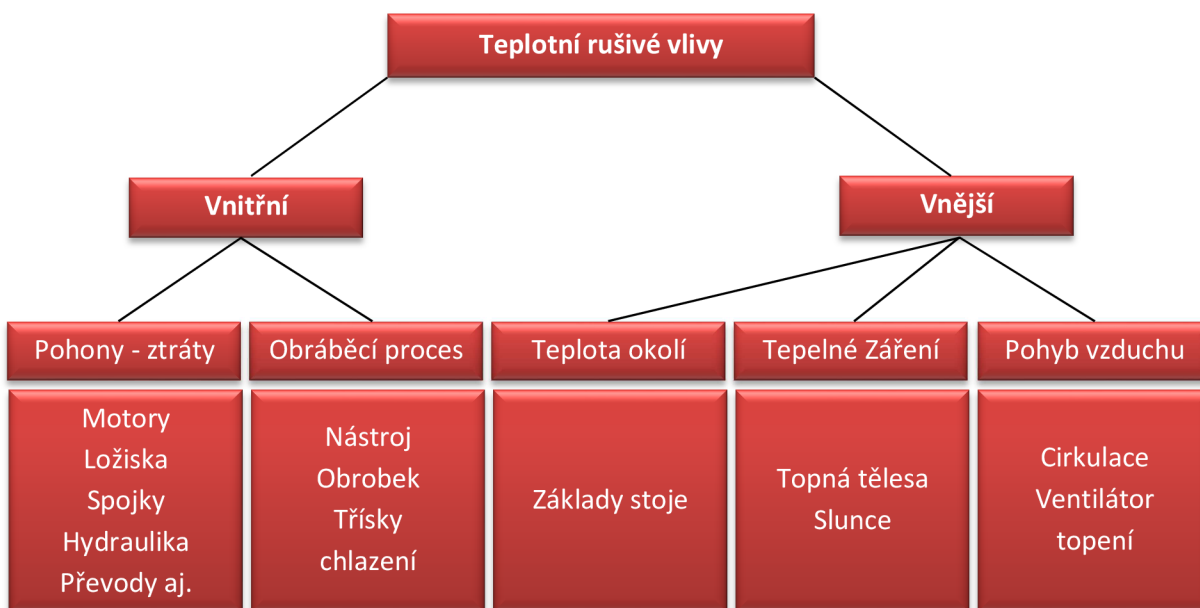
3 PŘÍČINY TEPLOTNÍCH DEFORMACÍ OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

3.1 Vnější zdroje tepla

Při obrábění působí na obráběcí stroje řada zdrojů tepla, které v závislosti na čase a zatížení ovlivňují změny teploty jednotlivých uzlů obráběcího stroje. To má za následek nežádoucí deformace, které mají nepříznivý vliv na přesnost a výrobnost obráběcích strojů. Zdroje tepla ovlivňující tepelnou stabilitu obráběcích strojů můžeme rozdělit do dvou skupin, viz Obr. 2. Vnější zdroje tepla jsou zdroje tepla z okolí jako například topná tělesa či ventilátor topení, stěny haly, otevřené dveře, které mají za následek zvýšenou cirkulaci vzduchu v hale, klimatizace, vlastní teplota dílu určeného pro obrábění, jiné stroje aj. Mezi další činitele ovlivňující tepelné deformace patří záření z jiných zdrojů tepla, ať už jde o sluneční záření či záření pocházející s jiných těles, jež jsou v hale přítomny. Dále to může být teplota okolního prostředí (kupříkladu vzduchu, chladicí kapaliny, mazací prostředky atd.) či základy obráběcího stroje, jelikož špatně izolované základy mohou vést k velkému teplotnímu gradientu v konstrukci stroje. [4, 31]

3.2 Vnitřní zdroje tepla

Vnitřními zdroji tepla rozumíme tepelné vlivy, které nastanou při provozu v zatíženém, nebo nezatíženém stavu. Vnitřní zdroje tepla jsou způsobeny ztrátami pohonových motorů všech druhů (např.: kuličkových lineárních pohonů, synchronních a momentových motorů, servomotorů, atd.), obráběcím procesem a třením v převodech, uložení a vedením. Přenos tepla se zde děje především kondukcí. Je evidentní, že nezanedbatelnou část vnitřních zdrojů tepla obráběcího stroje tvoří teplo vznikající při vlastním obráběcím procesu. Mechanická energie potřebná na odebrání třísky při procesu obrábění se převážně mění v teplo. Toto teplo je doprovázeno vysokými teplotami, které na kontaktních plochách dosahuje hodnot až 1200 °C. Tyto teploty nepříznivě ovlivňují přesnost obrábění a jakost obrobenej plochy.[4, 31]



Obr. 2 Tepelné rušivé vlivy [31]

Tabulka 1 přehled vnitřních zdrojů tepla u obráběcích strojů [31]

Zdroj tepla		Určení tepla	Vstupní data
El. Motory	Asynchronní třífázový	$Q = N \frac{1-\eta}{\eta}$ (W)	$\eta = 0,6$ N<0,2kW $\eta = 0,85 - 0,88$ N<3,5kW $\eta = 0,87 - 0,89$ N<100kW
	SS. EM regul.	N – Výkon EM η – Účinnost EM	$\eta = 0,8$ N<7,5kW – M603 $\eta = 0,84$ N<23kW – M604 A
Spojky, brzdy (lamel., el. mag.)	Teplo 1 sepnutí	$E_t = 1,395 \cdot 10^{-4} \cdot 6D^2(n_2 - n_1)^2 \cdot \frac{M_s}{M_{s \pm M_z}}$ (J)	n1,2 (min ⁻¹) – ot. spoj. hříd. M _s (Nm) – spínací mom. M _z (Nm) – mom. zatíž.
	Teplo v rozepnutém stavu	$Q = 0,104 \cdot M_o \cdot \Delta n$ (W)	M _o (Nm) – zbytk. moment Δn (min ⁻¹) – rel. ot. obou skupin lamel
Ložiska	Valivá	$Q = 1,05 \cdot 10^{-4} \cdot F \cdot r \cdot n \cdot \mu$ (W)	F (N) – zatíž. lož. v (mm) – poloměr čepu n (min ⁻¹) – vel. otáček μ – souč. typu lož.
	Hydrodynamická	$Q = 628 \frac{d \cdot l \cdot v^2}{m} \cdot \eta$ (W) nebo $Q = 1,72 \cdot 10^{-4} \frac{d^3 \cdot n^2 \cdot l}{m} \cdot \eta$ (W)	d (cm) průměr čepu, l (cm) – délka lož. v (m.s ⁻¹) – obvod. rychl. čepu η (Po.s) dyn. viskozita maziva m (μm) – vůle ložiska n (min ⁻¹) – otáčky
	Hydrostatická	Teplo v 1 buňce $Q_b = 1,67 \cdot 10^{-5} \cdot p_b \cdot V_b \cdot 10^{-6} \cdot A \frac{v}{h} \cdot \eta$ (W) Celk. teplo v hydrostat. Okruhu $Q_c = 1,67 \cdot 10^{-5} \cdot p_b \cdot V_c \cdot \frac{2-\eta_c}{\eta_c} + \sum_t^{k_b} Q_b$ (W)	P _v (Pa) – tlak v buňce V _b (l.mm ⁻¹) množ. ol. proték 1 buňkou A (cm ²) těs. Plocha kolem buňky V (cm.s ⁻¹) – kluzná rychlost h (cm) – výška mezery η (Po.s) dynamická viskozita maziva Vč (l.min ⁻¹) množství dod. čerp. η_c (1) – celková účinnost čerp. Q _b (W) tepelný výkon v 1 buňce K _b (1) – počet buňek
Převody	Ozubenými koly	Teplo se určí z účinnosti pro 1 pár (dvojici)	$\eta = 0,98 - 0,99$ čelní s přím. a šik. zuby $\eta = 0,96 - 0,98$ šroub. a kužel
	Řemeny		$\eta = 0,95 - 0,98$ – s 1 řem. klín. $\eta = 0,92 - 0,94$ – s více klín. $\eta = 0,98 - 0,99$ – ozub. řemen
	Řetězové		$\eta = 0,96$ – článkový $\eta = 0,95 - 0,98$ – válečkový
	Pohybový šroub a matice		$\eta \leq 0,5$ – kluzné h. dyn., samosvorné $\eta = 0,9$ – KŠM – s předpětím klesá
Hydraulický obvod	Čerpadla	$Q = 1,67 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta p \cdot V \cdot \frac{1-\eta_c}{\eta_c}$ (W)	$\eta_c = 0,7 - 0,8$ – lopatkové $\eta_c = 0,8 - 0,9$ – pístové $\eta_c = 0,75 - 0,9$ – zubové p (Pa) – tlak V (l.min ⁻¹) – množství
	Hydromotory		Hydromotory $\eta = 0,85 - 0,88$
	Hydr. prvky (ventily, rozvaděče)	$Q = 1,67 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta p \cdot V$ (W)	V (l.min ⁻¹) – množství Δp (Pa) – tlak. spád na prvku
Řezný proces	Soustružení Frézování Vývrtávání Obrázení	$Q_c = 0,0167 \cdot F_z \cdot v$ (W) $Q_c = Q_t + Q_o + Q_n + Q_p$	F _z (N) – tečná složka řezné síly v (m.min ⁻¹) – řezná rychlost Q _t – teplo do třísek, Q _n – teplo do nástr. Q _o – teplo do obrobku Q _p – teplo do okolí
	Vrtání		Výjimka! Vrtání Q _o = 50 – 70 % Q _n = 5 – 15 %

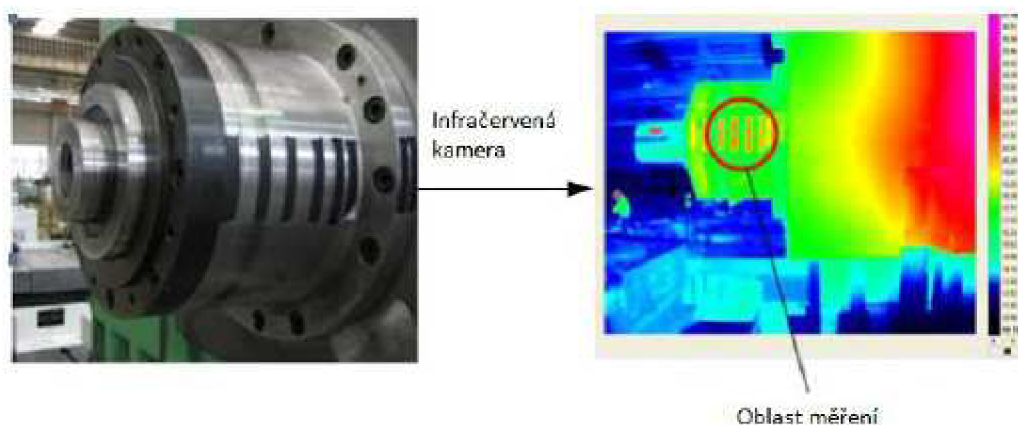
4 PŘÍSTUPY KE KOMPENZACI TEPELNÉ CHYBY

4.1 Úvod do měření

Přestože teoretickou analýzou a numerickou simulací lze poskytnout velké množství informací o tepelných charakteristikách vřetena, analytické řešení a výsledky simulace je stále potřeba ověřit experimenty. Na straně druhé je přesnost numerické simulace omezena spolehlivostí zadání výsledků (síla zdrojů tepla a koeficienty přenosu tepla), které závisí na dobrém definování hraničních podmínek. Kromě toho experimentální testy poskytují praktické a spolehlivé údaje o tepelných charakteristikách vřetena, které mohou být použity pro další modelování a kompenzaci tepelné chyby.[4]

4.2 Měření teplot

Snímače teplot, jako jsou odporové teploměry PT100 či PT1000, jsou obvykle upevněny na povrchu vřetenových prvků, konzole a rámu. Pro měření teploty jsou nejčastěji použity termistory s negativním teplotním koeficientem (NTC termistory - negastor), termistory s kladným teplotním koeficientem (PTC termistory - pozistor) a termočlánky. Některé snímače jsou tak malé, že mohou být nainstalovány ve vřeteníku.[4]



Obr. 3 Měření teploty vřetena pomocí infračervené kamery [4]

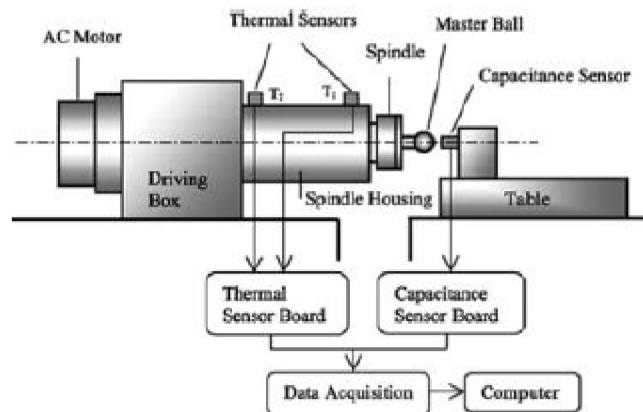
S vývojem infračerveného zobrazování se infračervená kamera dnes stává populární metodou v oblasti testování teploty. Měřením intenzity infračerveného záření emitovaného studovaným objektem lze přímo a rychle vyhodnocovat rozložení teploty v reálném čase přímo z infračervených obrazů. Infračervené zobrazování je metodou bezkontaktního měření teploty, která nepřetržitě poskytuje živé tepelné obrazy a jejich teploty. Díky tomu je tato metoda vhodná k měření teplot při otáčení vřetena. Na obr. 3 je ukázáno měření teploty vřetena infračervenou kamerou. Vzhledem k tomu, že odrazivost povrchu vřetena je vysoká, odráží se na povrchu teplota okolního prostředí, což zkresluje údaj o skutečné teplotě vřetena. Ačkoli snímání teplotního pole vřetena bezdotykovou infračervenou kamerou je bezpečné, její přesnost je oproti kontaktním snímačům nižší. A to z důvodu možného zachycení záření z jiných zdrojů tepla. Kromě toho infračervený snímek zobrazuje pouze teplotu povrchu.[4]

Měření teploty lze provádět pomocí následujících teplotních senzorů:[6]

- Dotykové
 - Odporové kovové senzory – platinové, niklové
 - Odporové polovodičové senzory
 - NTC termistory
 - PTC termistory
 - Termoelektrické senzory
- Bezdotykové
 - Tepelné detektory infračerveného záření
 - Kvantové detektory infračerveného záření
 - Termogram
 - Termovize

4.3 Měření odchylky v místě nástroje

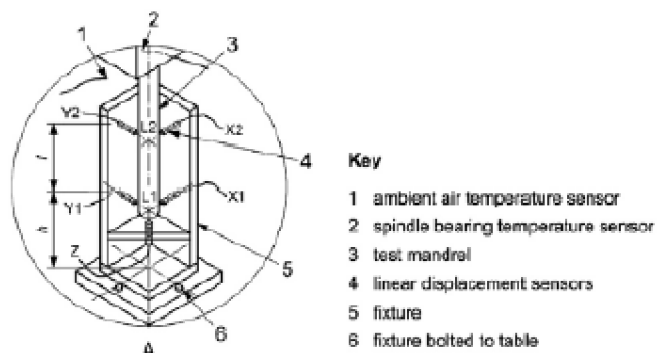
Mezi nejpoužívanější přístroje pro testování tepelné chyby patří kapacitní snímače polohy, snímače vířivého proudu či laserové snímače pro měření mezery apod. Pro měření tepelné odchylky v místě nástroje je používáno experimentální uspořádání složené z měřicí koule tzv. Master ball a kapacitního snímače. Uspořádání je ukázáno na obr. 4. Master ball byl nejprve namontován do drážky pro vřeteno a kapacitní snímač byl upevněn ke stolu. Otáčením měřicí koule dochází k tepelné deformaci, která je zapříčiněna především nárůstem teploty v předním ložisku a v převodové skříně. [4]



Obr. 4 experimentální uspořádání měření odchylky v místě nástroje

Podle normy ISO 230-3 je tepelná chyba 5 DOF zkoušena typickým uspořádáním znázorněným na obr. 5. Do vřeteníku je namontován zkušební trn a snímače posuvu držáku jsou připevněny ke stolu. Snímač posuvu X1 a X2 byl namontován paralelně na jedné straně testovací tyče, zatímco Y1 a Y2 byly upevněny na druhé straně. Úhel mezi X1, Y1 a X2, Y2 je 90°. Použitím tohoto zařízení je možné získat axiální tepelnou chybu (směr osy Z), dvě radiální tepelné chyby (směr osy X a Y).[4]

Laserový interferometr může být použit pro vyhodnocení tepelné chyby vřetena. Tepelné chyby vřetena lze dosáhnout odčítáním naměřených hodnot po tepelném zkreslení a původní hodnoty naměřené před spuštěním vřetena. Tato metoda měření má následující výhody. Například vyhodnocení tepelné chyby vřetena lze stanovit s rozlišením 1 nm. Hodnota vzorkování může dosáhnout až 2,5 MHz, což znamená, že tepelná chyba může být testována i za vysoké rychlosti otáčení.[4]



Obr. 5 Typické testovací nastavení [4]

Pro velký počet senzorů je měření teploty a tepelné chyby náročné na čas a spotřebu energie. Výsledky testování lze použít k ověření správnosti teoretické a numerické analýzy. Na základě naměřených dat může být vyvinut kompenzační model tepelné chyby a následně může být provedena samotná kompenzace.[4]

Měření odchylky v místě nástroje lze provádět:

- Indukčními senzory
- Kapacitními senzory
- Laserovým interferometrem

4.4 Výběr míst pro měření teploty

Jak bylo uvedeno výše, teploty jsou měřeny umístěním teplotních snímačů na povrch zkoumaných objektů. Instalace snímačů nemohou být prováděny náhodně a ve velkém počtu, protože by se tím zvýšilo pracovní zatížení a náklady na měření teploty. Navíc počet a umístění teplotních čidel má vliv na přesnost modelování tepelné chyby a její kompenzaci. Z toho důvodu se snaží vědečtí pracovníci studovat metody výběru optimálních bodů pro teplotní čidla. Tyto optimální body, jsou nazvány teplotně citlivými body. Jedná se o body, jejichž změny teploty mají podstatný vliv na tepelnou chybu celého stroje. Tepelná chyba může být přesně vypočtena a uspokojivě kompenzována podle modelu tepelné chyby postaveného na základě teplotně citlivých bodů.[4]

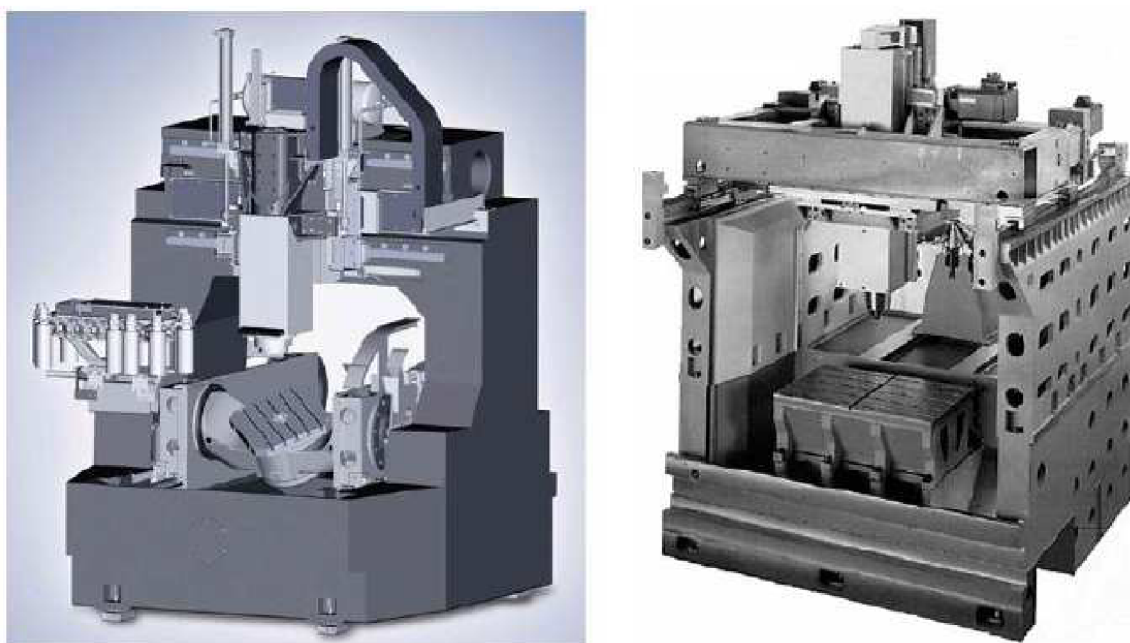
Místa pro měření teploty se převážně nachází u nějakého zdroje tepla, například přední ložisko, zadní ložisko, motor, teplota okolí, vřeteník, chlazení, chlazení motoru, chlazení předního ložiska, atd.[7]

5 PASIVNÍ KOMPENZACE

5.1 Materiály

Mezi obecné aspekty materiálů pro konstrukce obráběcích strojů, patří konstrukční vlastnosti (statická a dynamická tuhost, únavová pevnost, tlumení, tepelná a dlouhodobá stabilita, nízká hmotnost), fyzikální vlastnosti použitých materiálů, dále uspořádání a tvar komponent.[8]

Na konstrukce obráběcích strojů jsou používány nejrůznější materiály. Je to například ocel, přírodní kámen, keramika, polymerbeton, porézní a vyztužené kompozitní materiály. Kromě toho jsou používány i kombinace materiálů či hybridní materiály. Na obr. 15 je ukázána struktura obráběcích center.[8]



Obr. 6 Struktura obráběcích strojů[8]

Výběr materiálu a konstrukční uspořádání silně závisí na cílové aplikaci obráběcího stroje. Významný vliv na přesnost a výkon stroje má vysoká tuhost, tlumení, nízká tepelná roztažnost a dále tepelná a dlouhodobá stabilita konstrukcí. Taktéž tepelné vlastnosti materiálů, jako je tepelná kapacita, tepelná vodivost, koeficient tepelné objemové roztažnosti, výrazně ovlivňují chování obráběcího stroje.[8]

5.1.1 Ocel, litina a kovové materiály

Mezi nejčastěji používané materiály patří ocel, litina a různé kovové materiály. Pro různá strukturální řešení jsou používány kovové konstrukce společně s hybridními a kombinovanými materiály.[8]

V ultra přesných strojích a metrologických materiálech pro konstrukci rámců s minimální teplotní roztažností je často používán materiál s názvem INVAR, což je slitina železa a niklu, který poskytuje velmi nízký ba i dokonce negativní koeficient tepelné

roztlačnosti. Mezi další používané materiály patří například Invar-36 či "SUPER INVAR", které se vyznačují nízkým koeficientem tepelné roztlačnosti.[8]

5.1.2 Přírodní kámen a keramika

Přírodní kámen je využíván především na rámy a stoly obráběcích strojů pro svou nízkou tepelnou vodivost, nízkou tepelnou roztlačnost a vysoká teplotní stabilita.[8]

V dnešní době je keramika často používána na různé struktury vysoce přesných strojů. V následujícím seznamu jsou nejznámější keramické materiály:[8]

- Hliníková keramika – Malá tepelná deformace;
- Keramika z karbidu křemíku – O 50% nižší teplotní roztlačnost oproti standartní bílé keramice:[8]
- Jemnozrnný keramický materiál NEXCERA:[8]
- Polykrystalická oxidová keramika – téměř nulová teplotní roztlačnost;
- Neporézní Li-Al-křemičitý oxid skelné keramiky – Nízká teplotní roztlačnost je dosažena kombinací skleněné fáze s kladným koeficientem teplotní roztlačnosti a krystalické fáze s negativním koeficientem teplotní roztlačnosti:[8]

5.1.3 Polymerbeton / minerální odlitek

DIN 51290-3 poskytuje standard při zkoušení polymerbetonu pro použití ve strojírenství. Ve srovnání s ocelí a litinou poskytuje minerální odlitek nižší koeficient tepelné roztlačnosti a mnohem nižší tepelnou vodivost, ale při vyšší tepelné kapacitě. Díky tomu mohou být vytvořeny tepelně stabilnější rámy stroje. Avšak vzhledem k nízké tepelné vodivosti může dojít k nehomogenním teplotním polím vlivem vnitřních zdrojů tepla. Na druhé straně minerální odlitky umožňují přímou integraci chladicích okruhů během lití. Společnost IFT (Magdeburg, Německo) vyvinula uzavřené porézní minerální odlitky, které umožňují proudění chladicí kapaliny (obr. 7). [8]



Obr. 7 Porézní minerální odlitek pro aktivní chlazení[8]

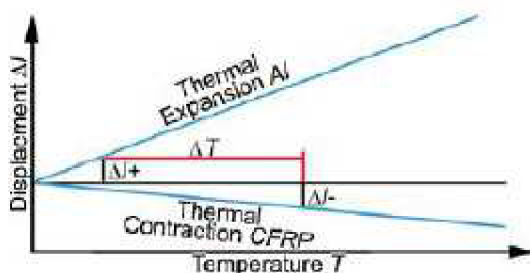
5.1.4 Vláknové a kompozitní materiály

Materiály, jež jsou vyztuženy vlákny, jsou složeny z krátkých či dlouhých vláken nebo zpevněných částic. Vytuže mohou být z vláken (grafit, křemík, Karbid, nitrid křemíku, oxid hlinitý, tenké monokrystaly), vláken (polymery, keramika nebo sklo, aramid, Sklo, uhlík, oxid hlinitý, karbid křemíku, polykrystalický nebo Amorfní) nebo vláken (ocel, molybden, wolfram). Existují i Tzv. E-skleněná vlákna (elektrický izolátor), S-skleněná vlákna (s Vyšší síla), C-skleněná vlákna (s vyšším obsahem bóru a Chemické odolnosti) a skleněná vlákna ECR bez bóru.[8]

Většina běžně používaných plastů jsou vyztuženy skelnými vlákny (GFRP), uhlíkovými vlákny (CFRP). Ostatní vláknové materiály jsou vyztuženy aramidem (AFRP).[8]

Mechanické vlastnosti závisí na síle vlákna, objemu a orientaci vláken, kritické délce vláken a na matici. Kompozity vyztužené jednosměrným vláknem mají nejvyšší mechanické vlastnosti ve směru vláken. Během konstrukčního řešení musí být pečlivě zvážena směr vlákna vzhledem ke struktuře směrů vnitřních sil. S vhodným uspořádáním orientace vlákna mohou mít tepelnou roztažnost blízké nule.[8]

V dnešní době umíme kompenzovat tepelné posuvy vyplývající z kladné délkové teplotní roztažnosti dané strojní komponenty prostřednictvím vyvoláním tepelného namáhání v opačném směru použitím materiálu mající negativní délkové teplotní roztažnosti. Pro tento účel se používá například materiál CFRP - Carbon fiber reinforced polymer viz obr. 8. Avšak zde je třeba vzít v úvahu anizotropii materiálů. Protože požadovaná materiálová vlastnost negativní tepelné roztažnosti existuje pouze ve směru vlákna. Například u kompozitního materiálu s vyztuženými aramidovými vlákny je tepelná roztažnost ve směru vlákna negativní a hodnota tepelné roztažnosti napříč vlákny je pozitivní.[9]



Obr. 8 Princip různorodé expanze u materiálů.[9]

5.2 Konstrukce

Tepelné deformace mohou být sníženy popřípadě eliminovány metodou prevence chyb, která je řešena v konstrukční fázi obráběcího stroje. Jedna z metod pro minimalizaci tepelné chyby je návrh tepelně symetrické konstrukce. Avšak tato metoda má určitou nevýhodu. Konkrétně jako tepelně symetrické mohou být navrženy pouze některé osy a zpravidla minimálně jedna osa musí být aktivně kompenzována. Navíc ne všechny obráběcí stroje mohou být navrženy jako tepelně symetrické.[10, 11]

5.3 Chlazení

Jedním z dalších způsobů minimalizace tepelné chyby je řízení množství přenášeného tepla do vřetenového systému, rámu stroje, lože, atd. Děje se to například začleněním chladicích plášťů kolem vřetenových ložisek, průtokovým chlazením lože a rámu stroje, chlazením šroubů a matic apod. Chlazení zapříčiňuje rychlejší odvod tepla tak, aby v jednotlivých systémech obráběcího stroje zůstávalo méně tepla vedoucí k tepelné roztažnosti. Dále chladicí boxy v místnosti mohou být použity ke snížení tepla přenášeného z prostředí do obráběcího stroje.[4] Nicméně chlazení v rozsáhlejších měřítku není používáno pro svoji neekonomičnost.

6 AKTIVNÍ KOMPENZACE

6.1 Podstata kompenzace

Kompenzace tepelné chyby je proces, při kterém je chyba korigována nastavením polohy nástroje a obrobku, obvykle za použití stávajících os strojů. Ve srovnání s metodami regulace a zamezení tepelné chyby je kompenzace tepelné chyby výhodnější a hospodárnější. Je to proto, že na jedné straně nepotřebuje žádný extra drahý hardware, jako jsou pokročilé materiály či různé druhy chlazení, a na straně druhé může být realizován v jakékoli fázi navrhování nebo stavby obráběcího stroje.[4, 12]

Podstata kompenzace tepelné chyby obráběcího stroje spočívá v jejich měření či prognóze v reálném čase a následném zavedení správných korekcí do řídicího systému či dráhy nástroje. Metody kompenzace chyb jsou rozděleny:[13]

- Přímé metody založené na snímačích, jež jsou založené na měření chyb.
- Nepřímé metody založené na snímačích, jež jsou založené na prognózování chyb s využitím matematických modelů.
- Nepřímé bez sensorové metody založené na prognóze chyb pomocí matematického modelu, který využívá interní data stroje, např. otáčky vřetena.
- Hybridní metody založené na prognóze chyb, které jsou založené na použitých matematických modelech využívající informace jako je odměřování teploty a charakteristické deformace bodů struktury obráběcích strojů. Je také nutné vzít v úvahu vnitřní data obráběcího stroje jako je rychlost otáčení vřetena, posuv, teplota motoru či kuličkového šroubu, atd.

Obecně platí, že analýza, testování a teplotně strukturální modelování jsou základní přípravné práce ke kompenzaci tepelné chyby. Celkový proces kompenzace tepelné chyby je následující:[4]

- Analýza a studium rozložení teploty a odchylky polohy v místě nástroje, a to teoreticky, numericky a experimentálně;
- Sestavení modelu tepelných chyb, které většinou popisují vztah mezi teplotami a teplotními chybami na základě výsledků analýzy nebo testování;
- Předpovídání a kompenzace tepelných chyb podle modelu.

6.2 Modelování tepelné chyby

Po analýze a měření tepelných charakteristik vřetena jsou studovány vztahy mezi teplotami a tepelnými chybami vytvářením modelů založených buď na výsledcích numerické simulace, nebo na experimentálních datech. Během posledních několika let vědci zkoumali druhy strategií pro stanovení modelu tepelné chyby. Ideálním cílem je najít optimalizovaný model tepelné chyby s vysokou přesností a robustností, protože model určuje korektnost a účinnost následné kompenzace tepelné chyby.[4]

6.2.1 FEM - Finite element method

Volně přeloženo jako metoda konečných prvků. Vedle analytické metody je často používána metoda konečných prvků (FEM) k získání číselného řešení teplotního pole vřetena na základě diferenciálních rovnic v maticovém tvaru, viz rovnice (8).

$$C \cdot \dot{T} + H \cdot T = Q \quad (8)$$

Kde C a H jsou matice tepelné kapacity a tepelné vodivosti; T je teplotní vektor diskrétních uzlů; Q je vektor tepelného zatížení.

K numerické analýze tepelných charakteristik vřetena se využívá některých komerčních výpočetních softwarů, jako jsou například ANSYS, ABAQUS nebo Marc & Mentat. V porovnání s analytickým výpočtem a experimentálním měřením software pro numerickou analýzu umožňuje inženýrům získat komplexní znalosti o tepelných vlastnostech vřetena ještě před jeho vybudováním, což šetří čas a náklady na analytické výpočty a experimentální testy. Pokud je dobře definováno tepelné zatížení (generování tepla) a hraniční podmínky (koeficienty přestupu tepla), lze zaručit přesnost číselného řešení. Obr. 18 znázorňuje obecné procesy numerické simulace pomocí komerčního softwaru.[4]

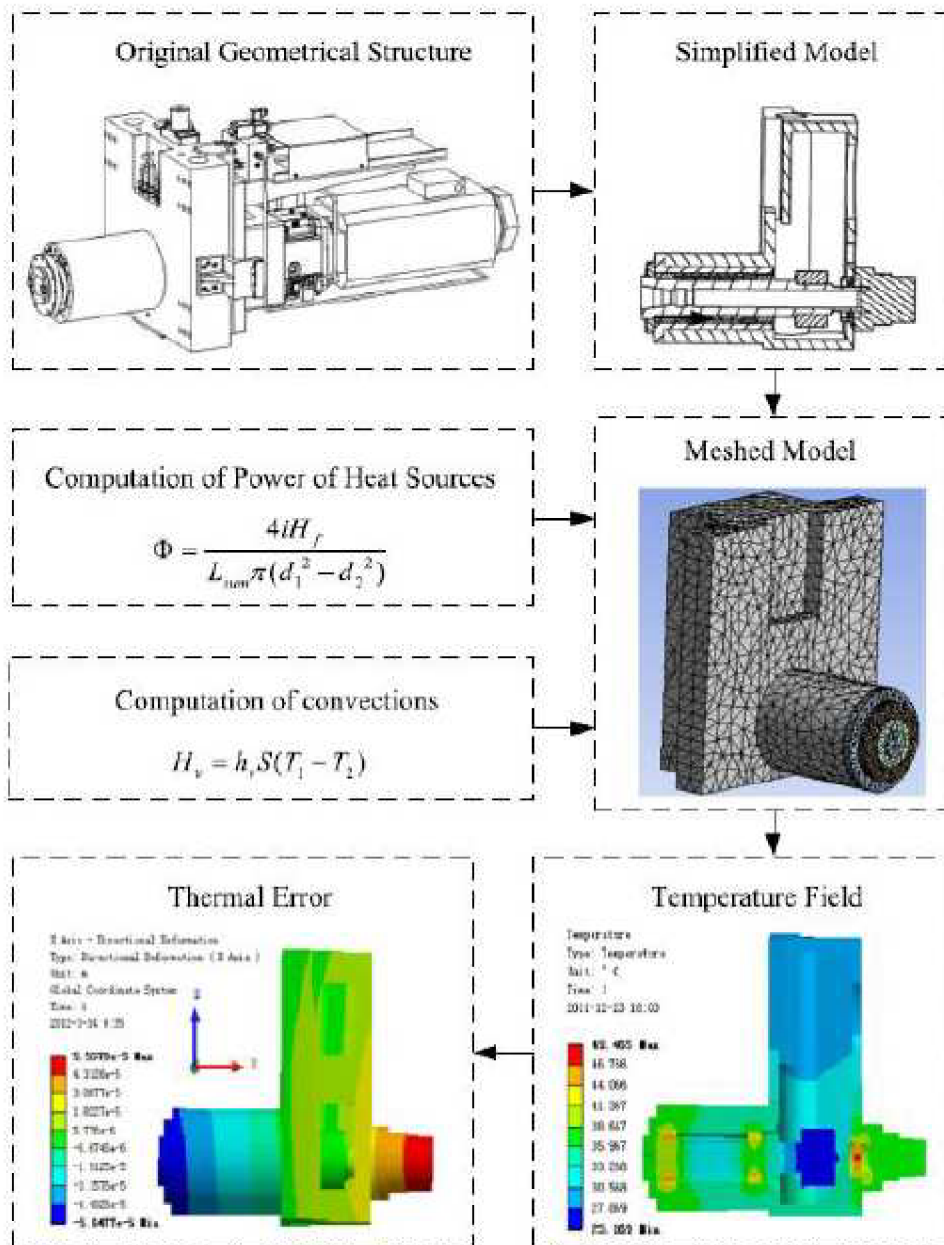
Například v softwaru ANSYS byl postaven termomechanický model otáčejícího vřetena. Na základě vytváření tepla ve vřetenových prvcích a tepelné konvekce nad vnějším povrchem bylo předpovězeno teplotní pole vřetena společně s tepelnou chybou. Výsledky simulace ukázaly, že rychlost vřetena a průtok mazací kapaliny mají určité účinky na tepelné charakteristiky vřetena.[4, 14]

6.2.2 FDM - Finite difference method

Volně přeloženo jako metoda konečných rozdílů. Metoda konečných rozdílů je další běžně používanou metodou numerické analýzy pro zjištění tepelných charakteristik vřetena. V Bossmannově a Tuovském výzkumu byl prezentován model toku energie. Model byl schopen prokázat distribuci výkonu vřetenového systému, přičemž byla ukázána dráha průtoku vstupního výkonu a směry přenosu tepla mezi různými částmi vřetena. Na základě výpočtu tvorby tepla a přenosu tepla byl vyvinut tepelný model, který byl rozložen na 56 prvků. Předpokládalo se, že teplo bylo přenášeno z jednoho prvku na sousední vedení a dále konvekcí na chladicí kapalinu.[4]

6.2.3 FDEM - Finite difference element method

Tato metoda kombinuje výhody FEM a FDM. Mayr rozdělil numerickou analýzu pomocí FDEM na dva samostatné kroky. Nejprve bylo simulováno teplotní rozložení systému, který je založený na FDM, ve kterém byly přijaty implicitní metody numerické integrace. To pomohlo ušetřit výpočetní čas. V druhém kroku byla použita metoda FEM pro řešení tepelně indukovaných chyb.[4]



Obr. 9 Obecné procesy numerické simulace

6.2.4 Regresní analýza

Regresní analýza je jedna z mnoha metod, která je často používána pro modelování. Je schopna zkoumat vztah mezi kvantitativními proměnnými odezvami a jednou nebo více kvantitativními vysvětlujícími proměnnými.[4]

Nepřímé kompenzační metody založené na senzorech, pro určení matematického modelu chyb ve formě polynomu, obvykle využívají lineární nebo nelineární regresi. Na základě toho jsou zavedeny korekce chyb strojního zařízení. Tato funkce je často používána hlavně pro kompenzaci tepelných chyb. Vstupní údaje těchto funkcí jsou teplotní hodnoty získané ze snímačů umístěných na obráběcím stroji, zatímco jejich výstup je ve formě potřebných korekčních hodnot pro řízené osy. Hlavní problém zde spočívá v lokalizaci těchto zdrojů tepla, které v největší míře ovlivňují změnu přesnosti obráběcích nástrojů. To se

obvykle provádí na základě technické dokumentace obráběcího stroje a numerické analýze výsledků identifikačních měření teplot a tepelných posunů. Taková numerická analýza ověřená experimentálně umožňuje velmi přesnou identifikaci chybového modelu pro široký rozsah změn provozních parametrů, podmínek obrábění a vlivu prostředí. Na místech, kde podle analýzy vzrůstá výrazně teplota, jsou nainstalovány snímače teploty.[13]

Zde jsou uvedeny tři běžné typy regresních metod, konkrétně regresní analýza s více proměnnými, autoregresní model a regrese sledování projekce pro modelování tepelné chyby vřetena.

6.2.4.1 MRA - Multivariable regression analysis

Volně přeloženo jako Multi-variabilní regresní analýza. V [15] je testován nárůst teploty tělesa vřetena a tepelný růst vřetena za čtyř různých řezných podmínek. Bylo zjištěno, že přesný teplotní chybový model nelze dosáhnout za jediné teploty, jelikož existuje mnoho možností týkajících se pracovních podmínek. Proto při více než jedné proměnné, jako jsou teploty různých bodů na vřetenovém systému, rychlosti vřetena apod., je použita metoda regresní analýzy s více proměnnými (MRA). Nejběžněji používaný regresní model vícevrstevného modelu tepelné chyby vřetena je napsán rovnicí (11).[4]

$$Y = \beta X + \varepsilon \quad (11)$$

Kde Y představuje tepelnou chybu vřetena v určitém směru; X je maticí vstupních dat (teplota, rychlost vřetena apod.); β je koeficient modelu regrese s více proměnnými a ε je chyba.

V [19] je stanoven nový robustní regresní model založený na MRA. Experimentálním měřením bylo ověřeno, že maximální reziduum může být sníženo na 1,8 μm z 25 μm v ose Z a 0,7 μm ze 7 μm v ose Y. Fyzický význam modelu MRA je snadno pochopitelný a jeho robustnost vůči podmínkám lze zlepšit pečlivým výběrem vstupních proměnných.[4]

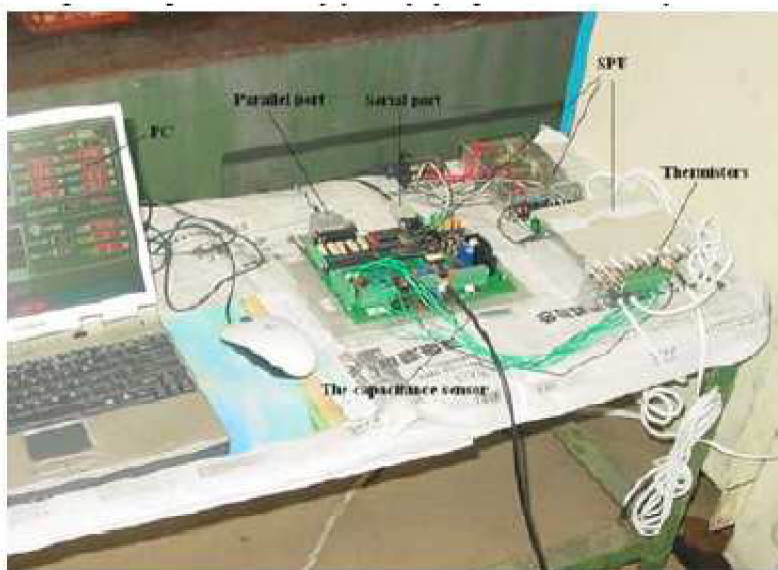
6.2.4.2 Autoregresní model

Autoregresní model je dalším typem regresního modelu, který je populární pro datové modelování časových řad. Tato metoda modelování je často používána, jelikož tepelná chyba vřetena se plynule mění s časem, dokud nedosáhne ustáleného stavu. [4]

Na základě autoregresní metody byly vyvinuty čtyři různé modely, a to model založený na teplotě, rychlosti, model vycházející z posunu a model hybridních proměnných. Výsledky testování a modelování ukázaly, že model založený na posunu měl nejlepší predikční přesnost, avšak přesnost by mohla být ještě zlepšena přijetím modelu hybridních proměnných.[4]

6.2.4.3 PPR - Projection pursuit regression

Volně přeloženo jako regresní metoda projekce, což je metoda založená na metodě projekce (PP). Původním účelem PP bylo vybírání "zajímavých" nízko-dimenzionálních projekcí velkého rozměru. PPR je metoda pro odhad hladkých funkcí několika proměnných z hlučných rozptýlených dat. Použitím PPR v [16] byl vytvořen model tepelné chyby vřetena založený na 15 teplotních proměnných. Ve výsledcích testů bylo ukázáno, že zbytková chyba byla menší než 5 μm . Kromě toho byly provedeny řezné experimenty s cílem ověřit účinnost tepelné kompenzace chyb založené na modelu PPR. Při těchto řezných zkouškách bylo provedeno obrábění 40 hřídelů a po kompenzaci byly chyby v průměru sníženy z 34 na 5 μm . [4]



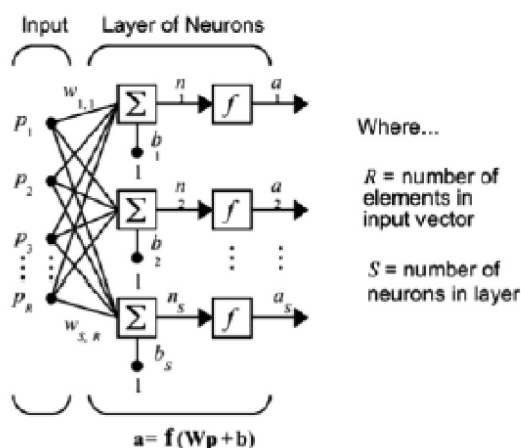
Obr. 10 Kompenzační systém tepelné chyby

Systém kompenzace tepelné chyby je ukázán na obr. 10. Před kompenzací byly teplotní signály z 15 optimální bodů měřeny termistory. Poté byly signály zpracovány pomocí jednotky na zpracování signálu a poslány do databáze PC přes sériový port. V dalším kroku byl vybudován model tepelné chyby a následně proběhla jeho optimalizace. Optimalizovaný model byl poslán zpět do digitálního signálového procesoru (DSP). Hodnota kompenzace byla nakonec získána a odeslána do CNC regulátoru paralelním portem. Poté, co byla zpětná vazba přidána k řídicímu signálu servomotoru, kompenzace tepelné chyby mohla začít. Termistory, kapacitní čidlo, sériový port, paralelní port, SPU a počítač je zobrazen na obr. 19. [16]

6.2.5 Neuronová síť

Neuronová síť (NN) nebo jinak umělá neuronová síť (ANN), je jednou z nejužitečnějších metod mapování vztahů mezi multi-variabilními vstupy a výstupy [17, 18]. Jelikož má dobrý výkon při tvorbě nelineárních funkcí, bývá používána v různých oblastech výzkumu. Pro modelování tepelné chyby založené na neuronové síti jsou teploty chápány jako vstupy a tepelné chyby jsou chápány jako výstupy. Struktura obecné jednovrstvé napájecí sítě je znázorněna na obr. 11, kde \mathbf{p} představuje vstupní vektor, \mathbf{a} jsou výstupy. Nejprve

neuronové sítě se musí být zaučeny na základě naměřených dat, a až po zaučení dokáže neuronová síť předpovídat tepelné chyby vřetena.[4]



Obr. 11 Struktura jednovrstvé sítě [4]

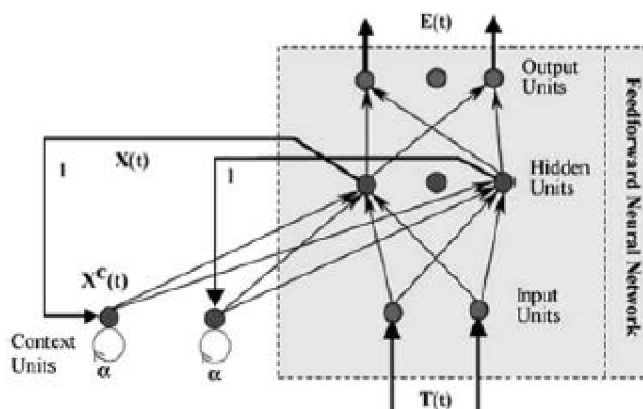
Dále jsou uvedeny čtyři typy neuronových sítí, konkrétně neuronová síť se zpětným šířením sítě, RBF síť, integrovaná rekurentní neuronová síť a Elmanova síť.

6.2.5.1 Neuronová síť se zpětným šířením chyby (BP)

BP je nejrozšířenější síť pro modelování tepelné chyby. Má dobrý výkon při mapování a předpovídání tepelné chyby vřetena, taktéž dobrou robustnost a dlouhodobě je využívána v různých obráběcích strojích[19]. Nicméně tato síť opět musí být zaučena. Pro překonání především dlouhého zaučování, v [20] byl vytvořen model tepelné chyby pomocí neuronové sítě založené na genetickém algoritmu, který zlepšil míru konvergence a přesnost předpovědi.[4]

6.2.5.2 RBF – Radial basis function network

RBF síť je neuronová síť se třemi vrstvami, a to vstupní, výstupní a skrytou vrstvou. Významnou výhodou RBF je vysoká rychlost výcviku. Při použití BP pro modelování tepelné chyby vřetena přesnost nastavení a predikce závisí do značné míry na neuronech, prahových hodnotách a závažích. Nicméně, při výměně BP za RBP a přijetí příslušné základní funkce sítě by mohly tyto problémy být vyřešeny[19].[4]



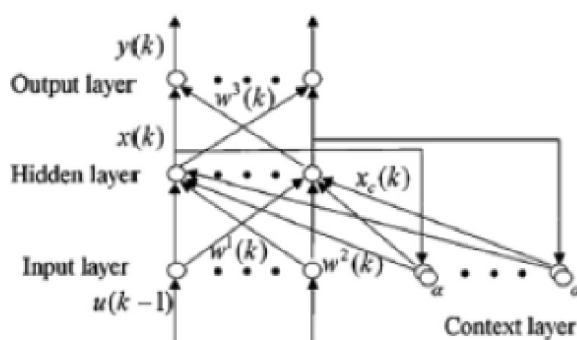
Obr. 12 Rekurentní neuronová síť[4]

6.2.5.3 IRNN – Integrovaná rekurentní neuronová síť

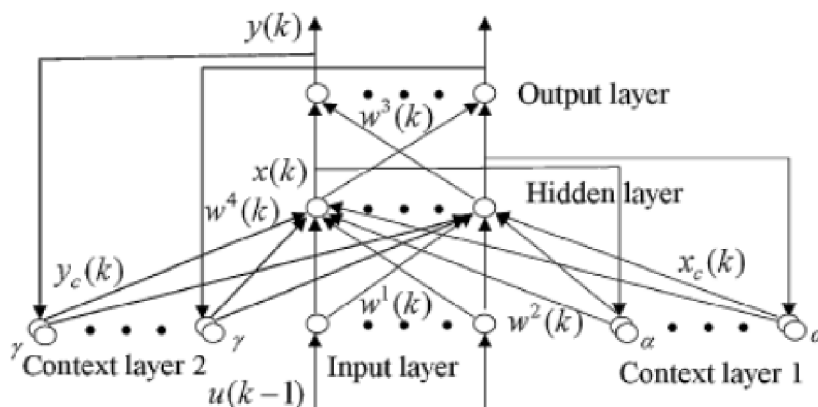
Sítě BP a RBF jsou napájecí sítě, ve kterých jde informační tok pouze jedním směrem, a to dopředu, od vstupních neuronů skrz skrytou vrstvu (pokud existuje) k výstupním neuronům. Sítě se zpětnou vazbou se nazývají modely dynamických neuronových sítí. Mají lepší robustnost v modelování tepelné chyby, ačkoli tepelně elastický proces se mění nelineárně za různých pracovních podmínek. Na základě opakující se neuronové sítě (RNN), v [21] byl vyvinut model IRNN. Obr. 12 znázorňuje strukturu RNN se zpětnovazební smyčkou. Provedením relativního testování chyb, byla přesnost modelování IRNN porovnána s RNN, vícevrstvou neuronovou sítí s předstihem (MFN) a multi-variacioním regresním modelem (MRA) a srovnávací výsledky jsou uvedeny v tabulce 2. Bylo ukázáno, že IRNN má mnohem lepší výkon než ostatní modely.[4]

Tabulka 2 Srovnávací výsledky modelů [4]

	Modeling		Testing 1		Testing 2	
	σ (μm)	Relative error (%)	σ (μm)	Relative error (%)	σ (μm)	Relative error (%)
IRNN	0.2890	2.41	3.3623	19.69	3.5472	19.47
RNN	0.6549	3.54	7.5630	29.66	4.8485	20.32
MFN	0.5760	3.51	8.5272	53.20	5.1767	27.73
MRA	1.0613	9.95	11.2754	52.62	8.7613	31.15



Obr. 13 Elmanova síť [4]



Obr. 14 Modifikovaná Elmanova síť [22]

6.2.5.4 EN – Elmanova síť

Elmanova síť je typická rekurentní síť se zpětnou vazbou od výstupních neuronů a skryté vrstvy ke vstupním neuronům. Struktura EN je znázorněna na obr. 13. V [22] je navržena modifikovaná EN síť pro odhad radiálních a axiálních teplotních chyb na základě výsledků simulace FEA. Zbytkové chyby mezi simulačními a předpokládanými daty získanými z modelu byly poměrně malé. Byly provedeny také experimenty s cílem ověřit správnost a účinnost modelování tepelné chyby podle EN. Ukázalo se, že model EN měl vyšší předpovědní přesnost ve srovnání s modelem RBF. Struktura modifikované EN sítě je na obr. 14. Kromě těchto široce používaných modelů neuronových sítí popsanych výše je mnoho jiných neuronových sítí[23].[4]

6.2.6 Teorie šedého systému

V roce 1982 založil Deng novou metodiku nazvanou teorie šedého systému. Má výhodu při řešení neurčitých systémů s neúplnými informacemi a nepřesnými údaji. Vytvořením a získáváním užitečných informací z dostupných malých vzorků je možné studovat vlastnosti systému[24]. Jinými slovy, modelování založené na teorii šedé soustavy je jednodušší, pohodlnější a nezávisí na masivní a úplné datové informaci.

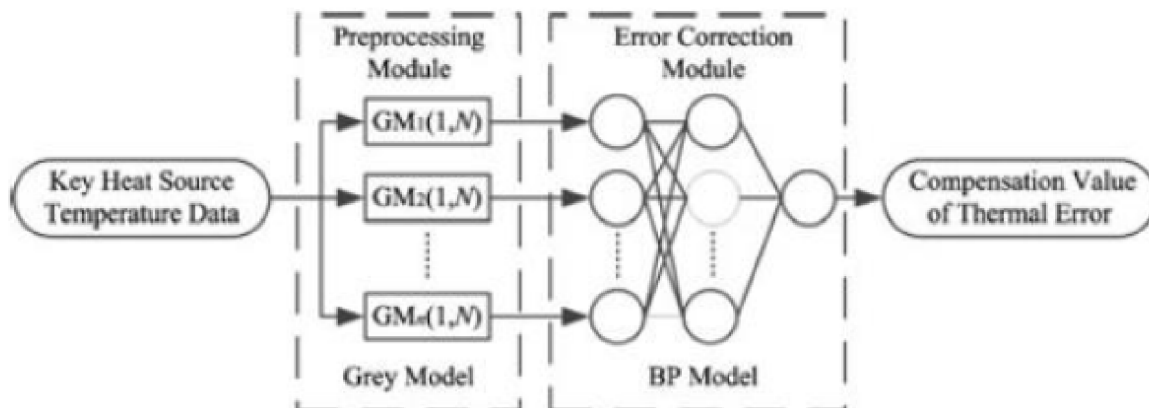
GM (1,1) je nejobvyklejší model šedého systému, který byl široce používán při modelování tepelné chyby. Na základě naměřených teplotních údajů a tepelné chyby radiálního vřetena v [25] byly postaveny tři druhy modelů GM (1,1), a to celkový model dat GM (1,1), nový informační model GM (1,1) a metabolický model GM (1,1). Ve Výsledcích modelování bylo ukázáno, že metabolický model GM (1,1) měl lepší přesnost a robustnost, neboť jeho predikční přesnost byla o 7,2% a o 15,46% vyšší než u ostatních dvou modelů.[4]

Navíc při kompenzaci chyby obráběcích strojů je teorie šedého systému používána také k podpoře jiných nástrojů matematického modelování, jako jsou neuronové sítě, lineární regrese či fuzzy logika. Příkladem použití metody teorie šedého systému je minimalizace teplotních senzorů, které mají být použity pro definování korekční funkce.[13]

6.2.7 SGNN - Serial grey neural network

Podle šedé teorie jsou výstupy šedých modelů s různou délkou datové sekvence poněkud odlišné. Proto je v této práci popsána nová metoda, která využívá síť BP pro integraci různých šedých modelů do nově kombinovaného predikčního modelu SGNN, aby bylo dosaženo vyšší přesnosti než u tradiční sítě BP a šedého modelu. Jak je znázorněno na obr. 15, SGNN lze rozdělit na dvě části: modul předběžného zpracování a modul pro opravu chyb. Nejprve hrají důležitou roli šedé modely s různou délkou datové sekvence. V první části se nachází modul pro předběžné zpracování původních teplotních chyb a dat o teplotě tepelného zdroje, který stanovuje diferenciální rovnici prvního řádu. V druhé části modulu se nachází BP síť, která přijímá předpokládané tepelné chyby předběžně zpracované šedým modelem, jež má provést nelineární optimalizaci. Pro tradiční síť BP používanou jako model předpovědi tepelné chyby jsou vstupy definovány jako teplota tepelného zdroje, zatímco výstupy jsou předpokládané tepelné chyby. Vstupy sítě BP v modulu pro opravu chyb v tomto příspěvku jsou však tepelné chyby předvídané šedými modely, zatímco výstup je konečnou předpovědní hodnotou tepelné chyby. Taková metoda zpracování dat pomáhá sjednotit

fyzický význam vstupů a výstupu tak, aby bylo dosaženo relativně vysoké srovnatelnosti při měření a nakonec bylo dosaženo zvýšení přesnosti předpovědi.[24]



Obr. 15 Schéma SGNN[24]

6.2.8 PGNN – Parallel grey neural network

V modelu PGNN pro předpověď tepelné chyby je využitý nejprve jeden šedý model a jedna BP síť. Poté kombinační algoritmus kombinuje výsledky z GM modelu a z BP modelu, z důvodu získání konečných dat ke korekci tepelné chyby. Podstata modelu PGNN spočívá v kombinaci predikce, který překonává nevýhody obou modelů. Model PGNN může plně využívat informace z výzkumného objektu a jeho komponentních modelů tak, aby získal vyšší přesnost předpovědi.[24]

6.2.9 SVM - Support vector machines

Volně přeloženo jako metoda strojového učení s učitelem. Je to další modelovací metoda, která v poslední době přitahuje mnoho pozornosti. Modelovací metoda SVM používá nadřazený princip nazvaný minimalizace strukturálních rizik (SRM). Na základě principu SRM se SVM snaží minimalizovat horní hranici generalizační chyby[26]. Proto se stále více vědců pokouší použít SVM pro modelování tepelné chyby vřetena. Ve [26] jsou testovány teploty a tepelné chyby při různých otáčkách vřetena a bylo zjištěno, že při menším množství dat pro modelování, přesnost předpovědi a robustnost modelu MRA byly špatné. Nicméně model SVM měl vyšší přesnost předpovědi, i přes změněné pracovní podmínky.[4]

6.2.10 Fuzzy logika

Fuzzy logiku lze aplikovat všude, kde není možné použít matematický model nebo tam, kde matematický model je příliš složitý. Fuzzy Logika se skládá ze tří bloků:[13]

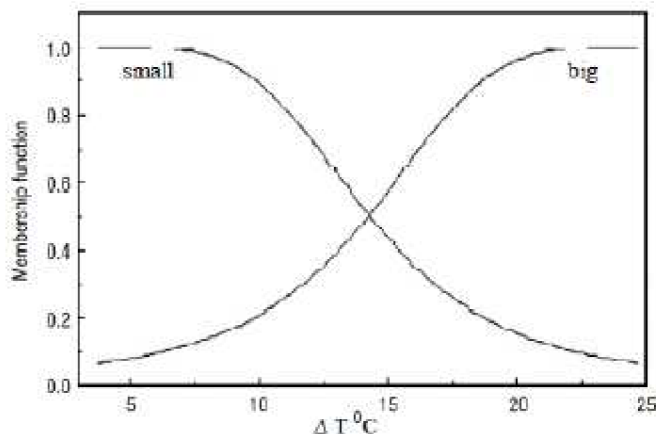
- Fuzzifikační blok, který transformuje číselné hodnoty na jazykové.
- Inferenční blok se sadou pravidel.
- Defuzzifikační blok definující výstupní hodnoty

Stejně jako v případě metody regrese nebo metody neuronové sítě byly na stroji umístěny snímače teploty. Pro měření tepelných posunů vřetena byly použity bezdotykové senzory. V závislosti na rychlosti otáčení vřetena a hodnotě posuvu byly definovány tři provozní rozsahy stroje: zastavení, pomalý chod, rychlý chod. Tyto pracovní cykly obráběcího stroje byly spuštěny v náhodném pořadí. Během každého cyklu byly shromážděny údaje o teplotách jednotlivých komponentů stroje a o tepelném posuvu vodorovného frézovacího centra. Na tomto základě bylo možné posoudit vztah mezi posunem a teplotou. Zpočátku bylo na stroji instalováno velké množství snímačů teploty. Při velkém množství snímačů, však vznikl problém s optimalizací modelu. Z tohoto důvodu byla použita tzv. Zpětná eliminace, tzn., data ze snímačů, která neměla žádný významný vliv na umístění špičky vřetena, byla odmítnuta. Po provedení optimalizace byly vybrány tři senzory, pro které byly definovány dvě jazykové proměnné - malé, velké (obr. 15). Dále byly použity fuzzy hodnoty pro vytvoření podmíněných instrukcí, které mohou být zapsány.[13]

Pokud ΔT je malá, pak tepelný posun =...

Pokud ΔT je velká, pak tepelný posun =...

Kde ΔT je přírůstek teploty v měřicím bodě, který má nejvýznamnější vliv na změny polohy vřetena.

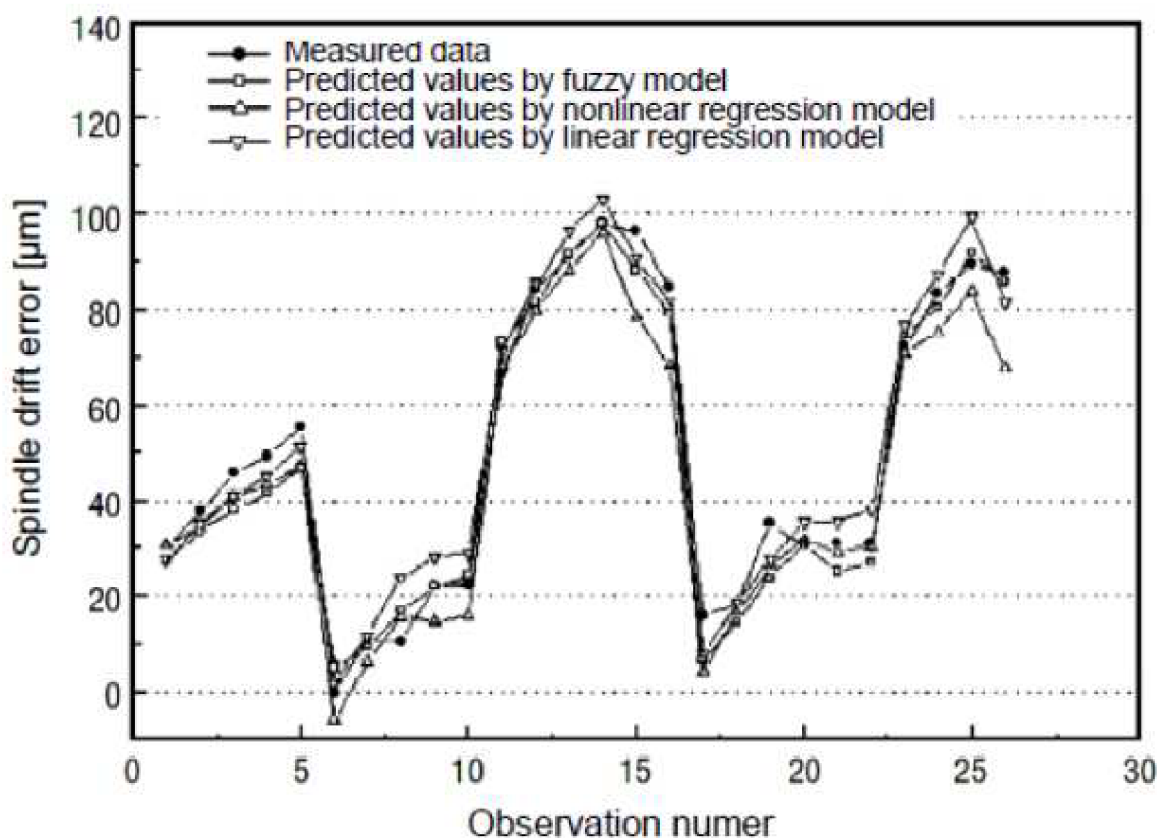


Obr. 16 Zobrazení jazykové proměnné teplot [13]

Obr. 16 představuje porovnání naměřených chybových hodnot s chybou získanou použitím modelu fuzzy logiky, model lineární regrese a nelineárního regresního modelu. Na základě obr. 17 může fuzzy logika správně předpovídat hodnoty chyb při použití menšího množství senzorů než množství, jaké používají modely založené na lineární regresi či nelineární regresi. Taktéž modely založené na fuzzy logice jsou méně komplikované a současně umožňují omezit náklady.[13]

6.3 Bez-senzorové kompenzace chyby

Byla provedena řada vědeckých výzkumů zaměřených na ověření možností uplatnění tzv. bez-senzorové metody kompenzace chyb u obráběcích strojů. Taková to bez-senzorová metoda je založena na tepelné kompenzaci chyby obráběcího stroje založeného pouze na jeho interních datech. Nepoužívá teplotní senzory speciálně distribuované na různých místech obráběcího stroje, jako u metod založených na senzorech. Kompenzace je realizována na základě dříve definované tepelné charakteristiky obráběcího stroje, který závisí na rychlosti otáčení vřetena a signálech ze snímačů, které jsou standardně umístěny. Tuto metodu však lze použít pouze v případě, kdy jsou teploty a posuny v souladu s podmínkami inerciálního prvku prvního řádu a pokud jsou opakovatelné. Ve výsledcích experimentálních výzkumů je ukázáno, že těchto dějů se těžce dosahuje. K dosažení úplné opakovatelnosti tepelného chování obráběcích strojů by bylo nutné aplikovat speciální postupy individuální dokonalosti každého obráběcího stroje. Známé příklady použití takové metody se týkají obráběcích strojů s relativně nízkými otáčkami vřetena.[13]

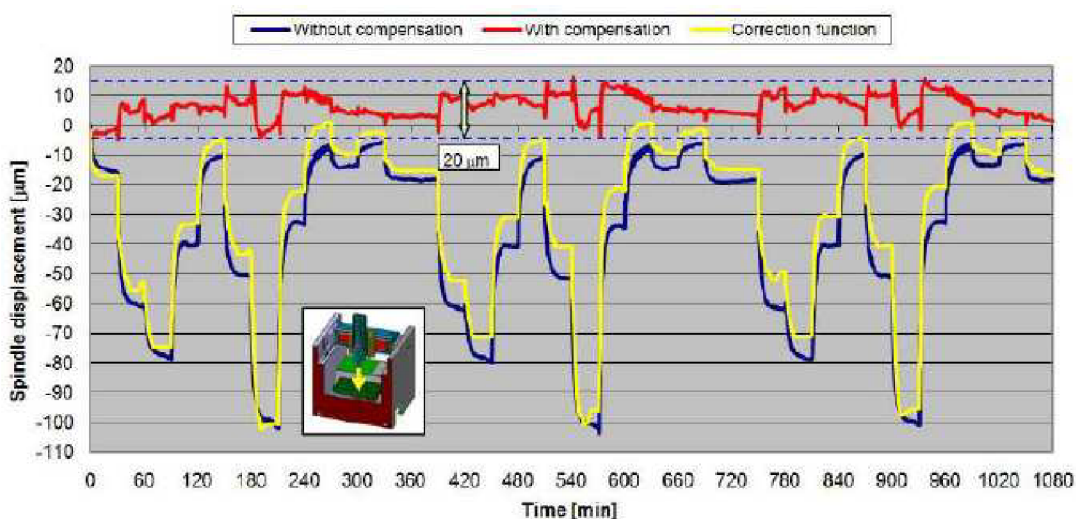


Obr. 17 Srovnání naměřených chybových hodnot [13]

6.4 Hybridní kompenzace

Ve výzkumu kompenzace tepelné chyby vřetena byly přijaty externí kompenzační operátory, aby realizovaly kompenzace. Externí kompenzátory se vztahují k těm systémům, které implementují kompenzaci čtením kompenzačních signálů z externího hardwaru přes I/O porty, a poté pomocí CNC regulátoru nastaví polohu osy či posunutí souřadnic. Obecně je externím kompenzátozem počítač, který je zodpovědný za vývoj modelu tepelné chyby na základě experimentálních nebo numerických simulačních dat a výpočtu hodnot kompenzace z daného modelu. Zpočátku jsou měřeny teploty, tepelná chyba a další související parametry. Shromážděné signály jsou zpracovány pomocí jednotky pro zpracování signálu. Poté jsou data odeslána do PC přes sériový port pro zjištění modelu tepelné chyby vřetena. Pomocí PC se tepelné chyby předpovídají a odešlou do PLC jako hodnota kompenzace přes I/O port. CNC řadič přijímá signály z PLC I/O portů v každém kompenzačním intervalu a kompenzace je nakonec dosažena změnou příkazu pohybu servo-řídícího systému nebo posunutím původních souřadnic.[4]

Hybridní kompenzace navíc spojuje metody založené na bez-senzorovém a senzorové snímání chyby, které používají zcela odlišné parametry pro generování korekční funkce. Ve vysokorychlostních obráběcích strojích žádný z těchto jednotlivých způsobů nezajišťuje dosažení plně uspokojivých výsledků. Právě proto byla zpracována tzv. hybridní kompenzace, která propojuje senzorové a bez-senzorové metody, využívající snímače pro měření teploty a na vnitřní data stroje, zejména na otáčky vřetena. Na základě výzkumů bylo zjištěno, že u vysokorychlostních obráběcích strojů se kromě tepelných chyb, objevuje problém náhlých posunů vřetena v axiálním směru v důsledku změny otáček. Chyba vyplývající z posunů vřetena dosahuje až několik desítek μm . Tato chyba se následně překrývá s tepelnou chybou. Metoda hybridní kompenzace používá snímače k měření teploty pro kompenzaci tepelných posunů, zatímco interní data stroje v podobě otáček vřetena se používají k vyrovnání posunů vřetena. Velikost takových posunů může být získána z experimentálních dat na obráběcím stroji nebo může být definována zpracovaným matematickým modelem. Pro představu na obr. 28 je zobrazen průběh posunutí vřetena bez kompenzace (modrá čára), s posunem po korekci (žlutá čára) a s kompenzací (červená čára).[13]



Obr. 18 Zobrazení průběhu posunutí vřetena [13]

Za účelem překonání omezení modelování na základě jedné metody jsou navrženy hybridní modely, které kombinují výhody dvou různých přístupů.[2]

V [27] byl navržen hybridní model podpory vektorového modelu stroje (SVM)-Bayesian Network (BN), ve kterém experimentální data byla klasifikována podle konkrétních pracovních podmínek pomocí BN modelu a pak vztah mezi teplotami a tepelnou chybou byl mapován na základě modelu SVM. Tento hybridní model byl schopný přesně předpovídat tepelnou chybu vřetena při různých provozních podmínkách. Podobně v [28] byl spojen SVM s neuronovou sítí (NN), aby byl vytvořen hybridní model. Za účelem ověření nadřazenosti hybridního modelu oproti modelům založeným na dalších dvou samostatných metodách (SVM a NN) byla tepelná axiální chyba vřetena při 2000 ot/min předpovězena těmito třemi modely a také měřena v praxi. Ve Výsledcích bylo ukázáno, že všechny prediktivní chyby byly kontrolovány v rozmezí 0,5 μm , ale střední absolutní procentní chyba hybridního modelu byla 1,95%, zatímco hodnota SVM a NN byla 2,74% a 2,63%. V [24] je představen nový model tepelné chyby, šedé neuronové sítě (GNN), složený ze šedé teorie systémů a neuronové sítě. V experimentálních výsledcích tepelné chyby axiálního vřetena bylo ukázáno, že GNN má lepší přesnost a robustnost než tradiční šedý model nebo neuronová síť. Přijetím různých druhů matematických metod jsou mapovány vztahy mezi teplotami a teplotními chybami.[4]

7 REŠERŠE VÝZKUMNÝCH CENTER

Projekty byly nalezeny na následujících internetových stránkách:

- http://cordis.europa.eu/projects/home_en.html
- <http://www.wsa.rwth-aachen.de/cms/WSA/Forschung/~hbdt/Forschungsprojekte/lidx/1/>
- <http://www.cutsim.de/en/projekte/index.html>
- <https://www.ifw.uni-hannover.de/ifw-beendete-projekte.html>
- <http://gepris.dfg.de/gepris/OCTOPUS?task=showSearchSimple>
- <http://141.30.75.25/SFBweb/index.php/thermo-energetic-design-of-machine-tools/project-area-a/>
- <http://www.irtg2057.de/research-program.html>
- <http://www.rcmt.cvut.cz/projekty/cz/>
- <http://141.30.75.25/SFBweb/>

Při vyhledávání byly použity následující klíčová slova:

- Thermal error,
- Thermal modelling,
- Thermal error modelling
- Thermal error compensation,
- Thermal deformation,
- Machine tool,
- ANFIS
- Grey system theory
- Temperature-sensitive point
- Support vector regression model
- Fuzzy clustering

Tabulka 3 Instituce a jejich projekty

Rok	Instituce	Název	Hlavní řešitelé	Kontakt	Výstup
2017 - 2020	ČVUT - RCMT	Zvyšování přesnosti multifunkčních soustružnických center	Ing. Horných Jan, Ph.D.		
2017 - 2019	ČVUT - RCMT	Vřeteník HS180 pro horizontální vyvrtávačky	Ing. Sulitka Matěj, Ph.D.		
2017	Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU)	Robust and Thermo-energetically Optimized Temperature Control of Machine Tools' Frames by Means of Fluid Power Systems	Steffen Ihlenfeldt; Jürgen Weber	steffen.ihlenfeldt@tu-dresden.de; mailbox@ifd.mw.tu-dresden.de	
2016 - 2018	ČVUT - RCMT	Optimalizace výkonového a technologického využití víceosých strojů	Ing. Sulitka Matěj, Ph.D.		
2015	Technische Universität Chemnitz	Model Predictive Parameter and State Estimation and Optimal Sensor Placement	Professor Dr. Roland Herzog	roland.herzog@mathematik.tu-chemnitz.de	
2015	Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU)	Identification of environment parameters of thermo-elastic models and correction algorithms based on high-dimensional characteristic diagrams	Dr.-Ing. Janine Glänzel Professor Dr.-Ing. Steffen Ihlenfeldt	janine.glaenzel@iwu.fraunhofer.de steffen.ihlenfeldt@tu-dresden.de	
2012 - 2014	ČVUT - RCMT	Komplexní řešení teplotních deformací obráběcích strojů	Ing. Smolík Jan, Ph.D.		

2011	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen	Modells and methods for measuring and balancing the energy distributed in grinding processes	Professor Dr.-Ing. Fritz Klocke Dr.-Ing. Patrick Mattfeld	f.klocke@wzl.rwth-aachen.de; p.mattfeld@wzl.rwth-aachen.de;	
2011	Technische Universität Dresden Institut für Fluidtechnik	Thermo-energetic modelling of fluid power systems	Professor Dr.-Ing. Jürgen Weber	mailbox@ifd.mw.tu-dresden.de	
2011	Technische Universität Dresden Institut für Festkörpermechanik	Simulation of active machine tool models	Professor Dr.-Ing. Michael Beitelschmidt Professor Dr.-Ing. Ralph Stelzer	michael.beitelschmidt@tu-dresden.de; ralph.stelzer@tu-dresden.de	
2011	Technische Universität Dresden Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik	Structure based models for the correction of thermal deformations of machine tools	Dr.-Ing. Bernd Kauschinger Dr.-Ing. Andreas Mühl	bernd.kauschinger@tu-dresden.de muehl@iwm.mw.tu-dresden.de	
2011 - 2019	DFG	Project Thermo-Energetic Design of Machine Tools	Sarah Vieler; Michael Burghold; Yona Frekers;	vieler@wsa.rwth-aachen.de burghold@wsa.rwth-aachen.de frekers@wsa.rwth-aachen.de	
2011	Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU)	Deformations of cutting tool and clamping devices and workpiece fixture devices and of the impact on cutting edge and workpiece deflections targeting on their optimization and compensation	Professor Dr.-Ing. Welf-Guntram Drossel; Professor Dr.-Ing. Matthias Putz;	frekers@wsa.rwth-aachen.de matthias.putz@iwu.fraunhofer.de	

2011	Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie (IPT)	Concept to determine thermo-elastic deformations by directly measuring local shifts using structurally integrated sensors	Professor Dr.-Ing. Christian Brecher; Dr.-Ing. Christian Wenzel	c.brecher@wzl.rwth-aachen.de christian.wenzel@ipt.fraunhofer.de	
2011	Technische Universität Chemnitz	Modelling and optimisation of power losses in electrical drives and their thermal coupling with machine tools	Professor Dr.-Ing. Ralf Werner	ralf.werner@hrz.tu-chemnitz.de	
2011	Technische Universität Dresden Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik	Measurement of behaviour and operating state relevant values along the thermal effect-chain for analysis, evaluation, simulation and correction on the example of a specific test bed machine	Dr.-Ing. Jens Müller Professor Dr.-Ing. Ralph Stelzer	jens.mueller@tu-dresden.de ralph.stelzer@tu-dresden.de	
2011 - 2013	ČVUT - RCMT	Stroj MCU320V-5X	Ing. Smolík Jan, Ph.D		
2011 - 2012	ČVUT - RCMT	Zvyšování jakosti obrobku potlačením teplotních deformací a kmitání mezi nástrojem a obrobkem	Ing. Burian David, Ph.D.		
2010	ČVUT - RCMT VCSVTT	Vývoj moduálního tepelně stabilního měřicího rámu pro obráběcí stroje	Ing. Vyroubal Jiří, Ph.D.		Development of Modular Thermally-Stabilized Measuring Frame for Machine Tools

2010 - 2016	DFG	Development of a Model for Calculating and Compensation of thermo-elastic Profile Defects and dimensional Errors in dry Machining	Marc Deppermann	deppermann@wsa.rwth-aachen.de	
2009 - 2010	ČVUT - RCMT VCSVTT	Tepelně stabilní konstrukce strojů a aplikace na MCV1000	doc. Ing. Bach Pavel, CSc		
2008 - 2011	FIDIA S.P.A.	Plug-in ADAPtronic MODules for real-time errors (Thermal & Vibration) compensation and superfine positioning in reconfigurable high precision machine tools	Anna Ostino	Tel.: +39-011-2227111	ADAMOD (Plug-in adaptronic modules for real-time errors (thermal & vibration) compensation and superfine positioning in reconfigurable high precision machine tools)
2007 - 2008	ČVUT - RCMT VCSVTT	Vývoj obráběcího centra s posuvným portálem po samostatných ložích	Ing. Smolík Jan, Ph.D.		Tepelné chování obráběcího centra FRUQ 400
2007 - 2013	Technische Universität München Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften	Simulationsbasierte Methodik zur Analyse der thermisch bedingten Verlagerung von Werkzeugmaschinenkomponenten	Professor Dr.-Ing. Jörg Franke Professor Dr.-Ing. Michael Friedrich Zäh		FE Analysis for Thermal Behaviour of Machine Tools; Experimental Evaluation of the Thermal Machine Tool Behavior for Model Updating; Modeling of the Thermomechanical Process Effects on Machine Tool Structures; Simulation des thermischen Maschinenverhaltens;
2006	ČVUT - RCMT VCSVTT	Vývoj portálového obráběcího centra FVC 160 CNC se zásobníkem nástrojů	Ing. Smolík Jan, Ph.D.		Měření teplotních deformací na stroji FVC 120 CNC

2006 - 2007	ČVUT - RCMT VCSVTT	Vývoj portálového obráběcího centra s přestavitelným příčnickem	Ing. Smolík Jan, Ph.D.		Tepelné chování obráběcího centra FRPQ 300
2005 - 2011	ČVUT v Praze – RCMT VUT v Brně – UVSSR VCSVTT	Výzkum strojírenské výrobní techniky a technologie	prof. Ing. Houša Jaromír, DrSc		Konstrukce protékaných ráků; Modelování teplotních a teplotně-mechanických jevů tepelnými přenosovými funkcemi; Chlazení obráběcích strojů;
2005 - 2006	ČVUT - RCMT VCSVTT	Zrychlení výrobního procesu u horizontálních obráběcích center vyráběných v TOS VARNSDORF a.s.	Ing. Smolík Jan, Ph.D.		Teplotně mechanická analýza pohybové osy X stroje SPEEDtec
2005 - 2010	Technische Universität Berlin Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF)	Adaptronische Kompensation von Winkelverlagerungen an Werkzeugmaschinen-Hauptspindeln	Professor Dr.-Ing. Eckart Uhlmann		Kompensation thermischer Verlagerungen an Werkzeugmaschinen durch Einsatz von CFK-Strukturen; Compensation of Thermal Deformations at Machine Tools using Adaptronic CRP-Structures; Application of CFRP Structures for Compensation of Thermal Strains at Machine Tools
2000 - 2004	ČVUT v Praze – RCMT VUT v Brně – UVSSR VCSVTT	Centrum pro strojírenskou výrobní techniku a technologii	prof. Ing. Houša Jaromír, DrSc		Tepelné chování stroje WRD 130; Teplotní pole karuselu SKL 12; Chlazení lineárních motorů Siemens a tepelné chování stroje MCFV 5050 LN;
2000 - 2003	FIDIA S.P.A.	Měření a kompenzace statické a kvazi-statické chyby na frézovacím centru	Jean-Pierre KRUTH B. RAUHUT	Jean-Pierre KRUTH Tel.: +32-16-322490 B. Rauhut Tel.: +49-241-8027409	3D thermal compensation of machine tools and thermal compensation of driving components; Thermal error study and elimination on machine tools; Minimising temperature milling machinery errors;

8 PRAKTICKÁ ČÁST

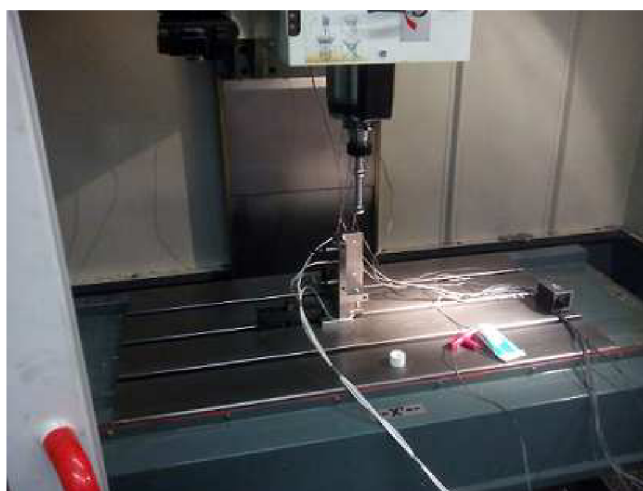
8.1 Změření teplotních odchylek na 3-osém frézovacím stroji

Měření probíhalo na frézovacím stroji s označením MCV 754 QUICK od firmy KOVOSVIT MAS viz Obr. 19. Zkouškou byly zjištěny tepelné deformace způsobené otáčením vřetena. Účelem zkoušky je zjištění tepelných vlivů, jež vznikají během otáčení vřetena a deformací stroje mezi nástrojem a obrobkem. Měření probíhalo dle normy ČSN ISO 230-3. Pro zkoušky tohoto typu je vyroben přípravek, ve kterém jsou upevněny kapacitní snímače a zkušební trn, jež je upevněn ve vřeteníku, viz obr. 20. Absolutní hodnota z pravítek pohybových os stroje v místě měření je následující:

- Osa X: 381,505 mm
- Osa Y: 240,140 mm
- Osa Z: -489,06 mm



Obr. 19 MCV 754 QUICK



Obr. 20 Měřící zařízení

Celkově bylo ustaveno 7 teplotních čidel, 6 čidel bylo umístěno na konzole a na vřeteníku viz obr. 21 a poslední čidlo bylo umístěno do stejné výšky jako přední konec vřetena, aby snímalo teplotu okolního prostředí kolem stroje. Při zkoušce byl použit režim konstantní frekvence otáčení. Konkrétně rychlost otáčení vřetena činilo 5000 ot/min. Snímače postupně zaznamenávaly hodnoty každé 2 sekundy po dobu 170 minut. Začátek zkoušky byl stanoven na 8:50 ranní. Teplota okolního prostředí byla 18,7 °C. A zastavení otáček bylo vykonáno v 10:30. Od této doby probíhalo chladnutí.



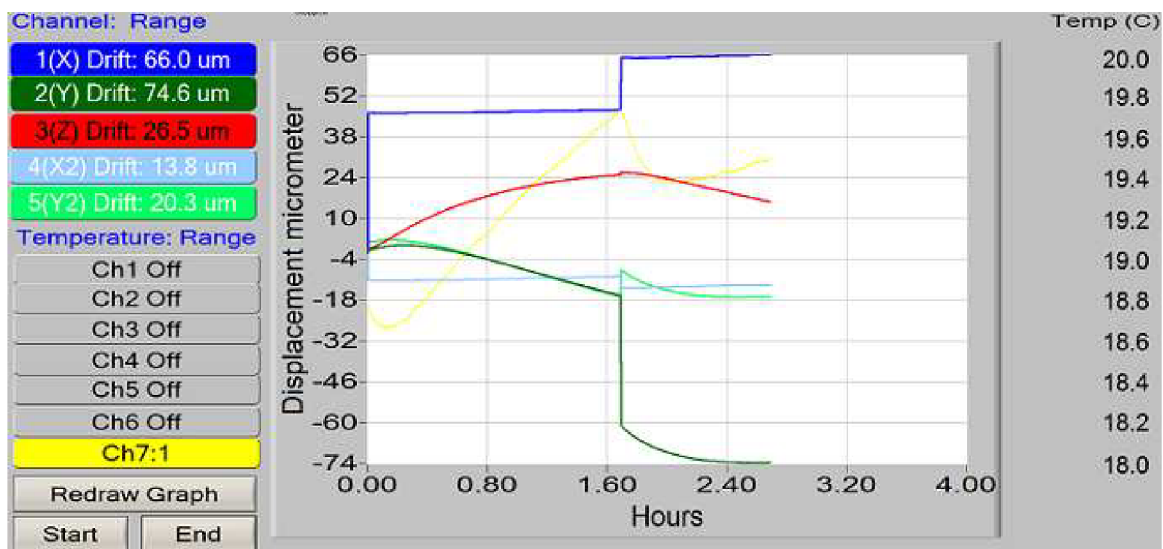
Obr. 21 Rozmístění teplotních čidel

Zkouškou byly zjištěny následující údaje:

Chyby v jednotlivých osách

Čidla	Rozdíly teplot [°C]						
	1	2	3	4	5	6	7
Během prvních 60 minut	2,7	2,2	1,8	1,5	1,3	0,7	0,2
Během doby otáčení vřetena (100 min)	5,5	5,7	5,2	4,6	4,0	2,9	0,9
Osy	X	Y	Z	X2	Y2		
Max. Chyby [μm]	2,5	28,3	29,5	0,8	16,3		

Měřicí zařízení v průběhu zkoušky postupně zaznamenává hodnoty do diagramu níže.



Obr. 22 Průběh tepelných chyb v průběhu experimentu

V okamžiku prudkého skoku se jedná o chybu danou excentricitou chodu vřetene. Pro zjištění maximální chyby musí být tento skok odečten a průběh odchylky vyhlazen.

8.2 Metodický návrh vlastního řešení teplotní kompenzace

Průzkumy ukazují, že tepelná chyba je jedním z hlavních faktorů, které ovlivňují přesnost obráběcích strojů. Existují 3 hlavní způsoby eliminace teplotních chyb.

- Metoda regulace teploty
- Návrh teplotně stabilní konstrukce
- Kompenzace tepelné chyby

Metoda regulace teploty není snadná, protože mechanismus regulace teploty vždy zaostává za nárůstem teploty. Návrh teplotně stabilní konstrukce je taktéž obtížný, jelikož analýza procesu přenosu tepla je velmi složitá díky nepravidelné struktuře obráběcího stroje. Technologie pro řízení kompenzace tepelné chyby je nevhodnějším přístupem, poněvadž hledí na ekonomičnost a navíc lze tento systém s menšími úpravami uzpůsobit pro každý obráběcí stroj.

8.2.1 Tepelný model

Pro úspěšné modelování a kompenzace tepelné chyby je jedním z klíčových kroků identifikace tepelné chyby. V podstatě existují dvě metody pro stanovení tepelného modelu obráběcích strojů.[29]

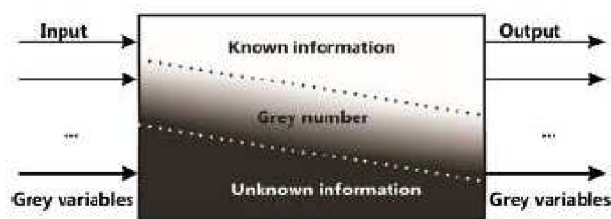
- Teoretický model
- Datový model

Teoretický model je realizován na základě numerické analýzy pomocí metody konečných prvků. Obvykle je rozložení teploty předpovězeno na základě diferenciálních rovnic získaných z analýzy přenosu tepla.[29]

Datový model lze prakticky stanovit na základě shromážděných parametrů daného systému za pomoci různých metod, vícenásobné regrese, neuronových sítí či fuzzy logiky. V tomto návrhu kompenzace tepelné chyby je použita šedá neuronová síť.[29]

8.2.2 Modelování tepelné chyby

Teorie šedého systému se zaměřuje na řešení problémů zahrnující neúplné informace. Koncept šedého systému lze ilustrovat obr. 1. Tzv. šedé číslo zná rozsah hodnot, ale nezná přesnou hodnotu. Toto číslo může být interval nebo obecné číslo nastavené tak, aby reprezentovalo určitý stupeň nejistoty informací. GM (1, N) je nejpoužívanější implementace. Nejdůležitější charakteristikou šedého systému je tzv. Accumulated Generating Operation (AGO). AGO zvyšuje počet lineárních znaků a snižuje náhodnost vzorků. Na základě existujícího modelu byl vytvořen zdokonalený model šedého systému GMC(1, N).[30]



Obr. 23 Koncept šedého systému[30]

Umělé neuronové sítě mají určité výhody oproti jiným empirickým modelům. Konkrétně mají velkou kapacitu pro zpracování informací a možnost sebevzdělávání. Avšak mají i nevýhody, jako je např. potřeba velkého počtu učebních vzorků či dlouhý čas výcviku.[30]

Vzhledem k tomu, že způsob prezentace výsledků neuronové sítě a šedého systému jsou v určité části podobné, mohou být tyto dva způsoby spojeny. Výhody obou způsobů lze využít k vybudování vysoce výkonného modelu s potřebou minimálního množství výcvikových dat. Spojením vznikne model GNNMCI(1, N).[30]

8.2.2.1 GNNMCI (1, N)

Využití daného algoritmu lze shrnout do následujících bodů:[30]

- Pro každou vstupní řadu je vypočítána výstupní hodnota pro každou vrstvu.
- Aby se zabránilo zachycení v lokálním minimu, je přijat algoritmus PSO pro výcvik modelu GNNMCI (1, N).
- Aktualizuje na základě rovnic polohu a rychlost každé částice.
- Pokud hodnota chyby splňuje požadavek modelu nebo předem stanovenou dobu je předána dále a výcvik je ukončen, pokud ne, tak se opakuje předešlý krok.
- Export optimálního řešení W_i .

PSO algoritmus se využívá k optimalizaci parametrů šedé neuronové sítě. Algoritmus PSO byl vyvinut Eberhartem a Kennedym jako alternativa k jiným vývojovým technikám.[30]

8.2.3 Experimentální postup

V návrhu je zkoumán tříosý frézovací stroj s označením MCV 754 Quick, který je znázorněn na obr. 2. Stroj je sestaven ze tří lineárních os X, Y, Z. Rychloposuv v osách X, Y, Z činí pokaždé 30 m/min a pracovní rozsah je 754, 500, 550 mm. Vřetenou má maximální otáčky 10000 ot/min.

- 1) Prvním krokem při modelování tepelných chyb tohoto stroje je provedení identifikace konstrukčních prvků a zdrojů tepla, které nejvíce přispívají k tvorbě tepelné chyby.
- 2) Umístění senzorů - S ohledem na strukturu frézovacího stroje v této práci je použito 15 teplotních senzorů umístěných na různých místech stroje, včetně hlavních zdrojů tepla, jako je motor vřetenou a dalších částí, jako je vertikální sloupek či základna stroje.
- 3) Počáteční měření - Pro identifikaci citlivých bodů měření bude probíhat 24 hodin při otáčkách 7200 ot/min. Předpokládá se, že nejvyšší teploty budou naměřeny v blízkosti vřetenových ložisek, převodového pásu a motoru vřetenou.
- 4) Výběr bodů - Po počátečním měření vybereme tři body pro vytvoření tepelného modelu. Kromě toho čtvrtý bod umístíme na základnu stroje, aby měřil teplotu okolního prostředí. Takže na stroji budou namontované čtyři teplotní snímače, viz tabulka 1. Abychom zajistili vyšší přesnost předpokládaného modelu, všechny teploty jsou měřeny senzory RTD PT1000.

Lze předpokládat, že teploty naměřené kolem vřetenové hlavy budou výrazně vyšší než teplota na základně stroje.

Model tepelné kompenzace může být navržen a simulován v programu MATLAB. Navíc zmiňovaný program může také pomocí termografických snímků generovat tzv. virtuální teplotní snímače, na jejichž základě mohou být vybrány teplotně citlivé body.

Tabulka 4 Umístění snímačů teploty

Snímač	Rozmístění
T1	Nedaleko zadních ložisek vřetenou
T2	Řemenový převod v hlavě vřetenou
T3	Motor vřetenou
T4	Základna stroje, teplota prostředí

- 5) Integrovaný model bude navržen takto:[30]
 - 1-AGO (first-order Accumulated Generating Operation) bude použit na zvýšení lineárních charakteristik a snížení náhodnosti měřených dat
 - Model GNNMCI(1,N) je optimalizován algoritmem PSO.
 - IAGO (Inverse Accumulated Generating Operation) bude použit pro výpočet tepelné chyby a generování hodnoty konečné kompenzace.
- 6) Ověření platnosti modelu bude použito křížového ověření. Jakmile chyba dosáhne svého minima, dosáhneme nejvhodnějšího modelu.

Navrhovaný model GNNMCI (1, N) by měl vykazovat lepší výkon než konvenční modely. Dále navrhovaná metoda je snadno rozšířitelná, tzn., že alternativní nebo dodatečné snímače mohou být nasazeny s minimální potřebou přestavby. To znamená, že pro větší

přesnost mohou být do modelu zahrnuty i další strukturální prvky. Kompenzační systém GNNMCI (1, N) je flexibilní, rychlý a efektivně realizovatelný[30].

Vysvětlení zkratk:

- GM - Grey prediction model;
- GMC - Grey prediction model with convolution integral;
- GNNMCI - Grey Neural Network Model with Convolution Integral;

9 ZÁVĚR

Tepelná chyba vřetena, která je hlavním zdrojem nepřesnosti obráběcího stroje, může být účinně snížena pomocí regulace, eliminace či kompenzace tepelné chyby. Analýza, testování, modelování a kompenzace tepelné chyby jsou hlavními kroky ke snížení tepelné chyby. Kromě numerické analýzy se provádějí experimenty za účelem zjištění tepelného chování stroje. Teplotní pole obráběcího stroje se získává pomocí dotykových či bezdotykových snímačů teploty. Množství a umístění snímačů je klíčové, jelikož na tom závisí přesnost a robustnost kompenzačního modelu tepelné chyby. Výsledky experimentů mohou být použity k vytvoření modelu tepelné chyby.

Tato práce představuje aktuální metody kompenzace teplotní chyby. Přibližuje základní procesy teoretické, numerické analýzy a experimentální zkoušky. Soustřeďuje se na různé přístupy a metody používané při testování, výběru tepelně citlivých bodů, modelování a kompenzace tepelné chyby.

Dále byly změřeny teplotní odchylky způsobené otáčením vřetena u obráběcího stroje MCV 754 Quick od firmy KOVOSVIT MAS. A pro případ testovaného obráběcího stroje byl navržen metodický návrh kompenzace tepelné chyby, který je založený na šedé neuronové síti s konvolučním integrálem. Množství senzorů použitých v modelu byl minimalizován z celkového počtu 15 senzorů na 4 senzory. Výsledný kompenzační model GNNMCI (1, N) je flexibilní, rychlý a velmi dobře realizovatelný.

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] LI, Yang, Ji ZHAO a Shijun JI. A reconstructed variable regression method for thermal error modeling of machine tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2016. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-016-9648-3
- [2] ABDULSHAHED, Ali M., Andrew P. LONGSTAFF a Simon FLETCHER. The application of ANFIS prediction models for thermal error compensation on CNC machine tools. *Applied Soft Computing Journal* [online]. 2015, **27**, 158–168. ISSN 15684946. Dostupné z: doi:10.1016/j.asoc.2014.11.012
- [3] KAUSCHINGER, Bernd a Steffen SCHROEDER. Uncertainties in Heat Loss Models of Rolling Bearings of Machine Tools. *Procedia CIRP* [online]. 2016, **46**, 107–110. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2016.03.168
- [4] LI, Yang, Wanhua ZHAO, Shuhuai LAN, Jun NI, Wenwu WU a Bingheng LU. A review on spindle thermal error compensation in machine tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2015, **95**(99), 20–38. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2015.04.008
- [5] WECK, Manfred. Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 2: Konstruktion und Berechnung. 2013, 715.
- [6] CHALOUPKA, Roman. *Srovnání senzorů pro měření teploty v. B.m.*, 2013. Vysoké učení technické.
- [7] YANG, Jun, Hu SHI, Bin FENG, Liang ZHAO, Chi MA a Xuesong MEI. Thermal error modeling and compensation for a high-speed motorized spindle. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2015, **77**(5–8), 1005–1017. ISSN 14333015. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-014-6535-7
- [8] MÖHRING, Hans Christian, Christian BRECHER, Eberhard ABELE, Jürgen FLEISCHER a Friedrich BLEICHER. Materials in machine tool structures. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 2015, **64**(2), 725–748. ISSN 17260604. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2015.05.005
- [9] MAYR, Josef, Jerzy JEDRZEJEWSKI, Eckart UHLMANN, M. ALKAN DONMEZ, Wolfgang KNAPP, Frank HÄRTIG, Klaus WENDT, Toshimichi MORIWAKI, Paul SHORE, Robert SCHMITT, Christian BRECHER, Timo WÜRZ a Konrad WEGENER. Thermal issues in machine tools. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 2012, **61**(2), 771–791. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2012.05.008
- [10] LIU, Kuo, Yu LIU, Mingjia SUN, Yuliang WU a Tiejun ZHU. Comprehensive thermal compensation of the servo axes of CNC machine tools. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2016, **85**(9–12), 2715–2728. ISSN 14333015. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-015-8142-7
- [11] VYROUBAL, Jiri. Compensation of machine tool thermal deformation in spindle axis direction based on decomposition method. *Precision Engineering* [online]. 2012, **36**(1),

121–127. ISSN 01416359. Dostupné z: doi:10.1016/j.precisioneng.2011.07.013

- [12] LI, Yang a Wanhua ZHAO. Axial thermal error compensation method for the spindle of a precision horizontal machining center. *2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2012* [online]. 2012, 2319–2323. Dostupné z: doi:10.1109/ICMA.2012.6285706
- [13] ENGINEERING, Machine. Paweł TUREK 1 Jerzy J Ę DRZEJEWSKI 1 Wojciech MODRZYCKI 1 METHODS OF MACHINE TOOL ERROR COMPENSATION. 2010, **10**(4).
- [14] CHEN, Dongju, Marc BONIS, Feihu ZHANG a Shen DONG. Thermal error of a hydrostatic spindle. *Precision Engineering* [online]. 2011, **35**(3), 512–520. ISSN 01416359. Dostupné z: doi:10.1016/j.precisioneng.2011.02.005
- [15] CHEN, Jenq-shyong. 089o-69ss(95)oeogç~ i A STUDY OF THERMALLY INDUCED MACHINE TOOL ERRORS IN REAL CUTTING CONDITIONS. 1996, **36**(12), 1401–1411.
- [16] QIANJIAN, Guo a Yang JIANGUO. Application of projection pursuit regression to thermal error modeling of a CNC machine tool. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2011, **55**(5–8), 623–629. ISSN 02683768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-010-3114-4
- [17] EL OUAFI, Abderrazak, Michel GUILLOT a Nouredine BARKA. An Integrated Modeling Approach for ANN-Based Real-Time Thermal Error Compensation on a CNC Turning Center. *Advanced Materials Research* [online]. 2013, **664**, 907–915. ISSN 10226680. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.664.907
- [18] LI, Yang, Wanhua ZHAO, Wenwu WU, Bingheng LU a Yubao CHEN. Thermal error modeling of the spindle based on multiple variables for the precision machine tool. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2014, **72**(9–12), 1415–1427. ISSN 14333015. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-014-5744-4
- [19] RUIJUN, Liang, Ye WENHUA, Haiyan H. ZHANG a Yang QIFAN. The thermal error optimization models for CNC machine tools. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2012, **63**(9–12), 1167–1176. ISSN 02683768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-012-3978-6
- [20] HUANG, Yanqun, Jie ZHANG, Xu LI a Liangjv TIAN. Thermal error modeling by integrating GA and BP algorithms for the high-speed spindle. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2014, **71**(9–12), 1669–1675. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-014-5606-0
- [21] YANG, Hong a Jun NI. Dynamic neural network modeling for nonlinear, nonstationary machine tool thermally induced error. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2005, **45**(4–5), 455–465. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2004.09.004
- [22] YANG, Zhiyong, Minglu SUN, Weiqian LI a Wenyong LIANG. Modified Elman network for thermal deformation compensation modeling in machine tools. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2011, **54**(5–8), 669–676. ISSN 02683768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-010-2961-3

- [23] ABDULSHAHED, Ali M., Andrew P. LONGSTAFF, Simon FLETCHER a Alan MYERS. Thermal error modelling of machine tools based on ANFIS with fuzzy c-means clustering using a thermal imaging camera. *Applied Mathematical Modelling* [online]. 2015, **39**(7), 1837–1852. ISSN 0307904X. Dostupné z: doi:10.1016/j.apm.2014.10.016
- [24] ZHANG, Yi, Jianguo YANG a Hui JIANG. Machine tool thermal error modeling and prediction by grey neural network. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2012, **59**(9–12), 1065–1072. ISSN 02683768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-011-3564-3
- [25] LI, Y.-X., J.-G. YANG, Q.-J. GUO, X.-S. WANG a J.-H. SHEN. Application of hybrid prediction model to thermal error modeling on NC machine tools. *Shanghai Jiaotong Daxue Xuebao/Journal of Shanghai Jiaotong University*. 2006, **40**(12), 511–518. ISSN 10062467.
- [26] MIAO, En Ming, Ya Yun GONG, Peng Cheng NIU, Chang Zhu JI a Hai Dong CHEN. Robustness of thermal error compensation modeling models of CNC machine tools. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2013, **69**(9–12), 2593–2603. ISSN 02683768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-013-5229-x
- [27] RAMESH, R., M. A. MANNAN, A. N. POO a S. S. KEERTHI. Thermal error measurement and modelling in machine tools. Part II. Hybrid Bayesian Network - Support vector machine model. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2003, **43**(4), 405–419. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/S0890-6955(02)00264-X
- [28] LIN, Weiqing, Weiqing LIN a Jianzhong FU. Support Vector Machine and Neural Network United System for NC Machine Tool Thermal Error Modeling. 2010, (Icnc), 4305–4309.
- [29] CHEN, Tsung Chia, Chia Jung CHANG, Jui Pin HUNG, Rong Mao LEE a Cheng Chi WANG. Real-time compensation for thermal errors of the milling machine. *Applied Sciences* [online]. 2016, **6**(5). ISSN 14545101. Dostupné z: doi:10.3390/app6040101
- [30] ABDULSHAHED, Ali M., Andrew P. LONGSTAFF, Simon FLETCHER a Akshay POTDAR. Thermal error modelling of a gantry-type 5-axis machine tool using a Grey Neural Network Model. *Journal of Manufacturing Systems* [online]. 2016, **41**, 130–142. ISSN 02786125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmsy.2016.08.006

11 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

11.1 Seznam tabulek

Tabulka 1 přehled vnitřních zdrojů tepla u obráběcích strojů [31].....	20
Tabulka 2 Srovnávací výsledky modelů [5]	35
Tabulka 3 Instituce a jejich projekty.....	44
Tabulka 4 Umístění snímačů teploty	53

11.2 Seznam obrázků

Obr. 1 Tepelný příčinný řetězec obráběcích strojů a nejistot modelování[3].....	15
Obr. 2 Tepelné rušivé vlivy [31].....	19
Obr. 3 Měření teploty vřetena pomocí infračervené kamery [5]	21
Obr. 4 experimentální uspořádání měření odchylky v místě nástroje	22
Obr. 5 Typické testovací nastavení [5]	23
Obr. 6 Struktura obráběcích strojů[8]	25
Obr. 7 Porézní minerální odlitek pro aktivní chlazení[8]	26
Obr. 8 Princip různorodé expanze u pokročilých materiálů.[9].....	27
Obr. 9 Obecné procesy numerické simulace.....	31
Obr. 10 Kompenzační systém tepelné chyby.....	33
Obr. 11 Struktura jednovrstvé sítě [5].....	34
Obr. 12 Rekurentní neuronová síť[5].....	34
Obr. 13 Elmanova síť [5]	35
Obr. 14 Modifikovaná Elmanova síť [22]	35
Obr. 15 Schéma SGNN[24]	37
Obr. 16 Zobrazení jazykové proměnné teplot [13].....	38
Obr. 17 Srovnání naměřených chybových hodnot [13].....	39
Obr. 18 Zobrazení průběhu posunutí vřetena [13].....	40
Obr. 19 MCV 754 QUICK.....	49
Obr. 20 Měřicí zařízení	49
Obr. 21 Rozmístění teplotních čidel	50
Obr. 22 Průběh tepelných chyb v průběhu experimentu.....	51
Obr. 23 Koncept šedého systému[30].....	52

12 PŘÍLOHY

Souhrn nejnovějších vědeckých prací

Rok	Země	Instituce	Autor	Kontakt	Práce
2016	Čína	School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology; College of Engineering, Qufu Normal University,	Chengxin Zhang, Feng Gao, Yan Li	qfzcx sd@163.com (C. Zhang), gf2713@126.com (F. Gao).	Thermal error characteristic analysis and modeling for machine tools due to time-varying environmental temperature
		School of Mechanical Science and Engineering, Jilin University	Yang Li, Ji Zhao, Shijun Ji	Ji Zhao - jzhao@jlu.edu.cn	A reconstructed variable regression method for thermal error modeling of machine tools
		School of Mechanical Science and Engineering, Jilin University	Yang Li, Ji Zhao, Shijun Ji	Ji Zhao - jzhao@jlu.edu.cn	A reconstructed variable regression method for thermal error modeling of machine tools
		Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology; Department of Mechanical Engineering, National Taiwan University	En-ming Miao, Hui Liu, Kuang-chao Fan, Xuan-xuan Lv, Yi Liu	En-ming Miao - miaoem@163.com	Analysis of CNC machining based on characteristics of thermal errors and optimal design of experimental programs during actual cutting process
		School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology	Hui Liu, En Ming Miao, Xin Yuan Wei, Xin Dong Zhuang	En-ming Miao - miaoem@163.com	Robust modeling method for thermal error of CNC machine tools based on ridge regression algorithm
		College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University; College of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University; State Key Laboratory, Shenyang	Kuo Liu, Yu Liu, Mingjia Sun, Xiaolei Li, Yuliang Wu	Kuo Liu - liukuo0727@qq.com	Spindle axial thermal growth modeling and compensation on CNC turning machines

		Machine Tool CO.			
	Taiwan	Department of Mechanical Engineering, National Chin-Yi University of Technology	Tsung-Chia Chen, Chia-Jung Chang, Jui-Pin Hung, Rong-Mao Lee and Cheng-Chi Wang	arish.man@msa.hinet.net (C.-J.C.); maxmou@ncut.edu.tw (R.-M.L.); ctchen@ncut.edu.tw;	Real-Time Compensation for Thermal Errors of the Milling Machine
	UK	Centre for Precision Technologies, University of Huddersfield, Queensgate,	Ali M. Abdulshahed, Andrew P. Longstaff, Simon Fletcher, Akshay Potdar	aa_shahed@yahoo.com (A.M. Abdulshahed).	Thermal error modelling of a gantry-type 5-axis machine tool using a Grey Neural Network Model
2015	Čína	Institute of Manufacturing Engineering, Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University	Liping Wang, Haitong Wang, Tiemin Li, Fengchun Li	Liping Wang - wanglpthu@163.com Tiemin Li - litmthu@163.com	A hybrid thermal error modeling method of heavy machine tools in z-axis
		School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xian University of Technology Qufu Normal University, Rizhao	Chengxin Zhang, Feng Gao, Zhenhua Meng, Bohan Zhao,	Chengxin Zhang - qfzcx_sd@163.com Feng Gao - gf2713@126.com	A novel linear virtual temperature constructing method for thermal error modeling of machine tools
2015	Čína	School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University,	Qianjian Guo, Rufeng Xu, Tingyi Yang, Lei He, Xiang Cheng Zhiyong Li JG Yang	Qianjian Guo - guoqianjian@163.com	Application of GRAM and AFSACA-BPN to thermal error optimization modeling of CNC machine tools
		School of Mechanical Engineering, Nanjing Institute of Technology, College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing College of Information Technology,	Ting Zhang, Wenhua Ye, Yicai Shan	Ting Zhang - tingnjit@163.com	Application of sliced inverse regression with fuzzy clustering for thermal error modeling of CNC machine tool
		College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University	Kuo Liu, Yu Liu, Mingjia Sun, Yuliang Wu, Tiejun	Kuo Liu - liukuo0727@qq.com	Comprehensive thermal compensation of the servo axes of CNC machine tools

		College of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University State Key Laboratory, Shenyang Machine Tool (Group) Co., Ltd,	Zhu		
		School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University	Sitong Xiang, Jianguo Yang	S. Xiang - stone.xiangst@gmail.com	Error map construction and compensation of a NC lathe under thermal and load effects
		School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology Qufu Normal University	Chengxin Zhang, Feng Gao, Yaxiao Che, Yan Li	Chengxin Zhang - qfzcx_sd@163.com Feng Gao - gf2713@126.com	Thermal error modeling of multisource information fusion in machine tools
		College of Mechanical Engineering, Jilin University, State Key Laboratory, Shenyang Machine Tool Co.	Kuo Liu, Mingjia Sun, Yuliang Wu, Tiejun Zhu	Kuo Liu - liukuo0727@qq.com	Thermal Error Modeling Method for a CNC Machine Tool Feed Drive System
		School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology; School of Transportation and Vehicle Engineering, Shandong University of Technology	Qianjian Guo, Rufeng Xu and Xiaoni Qi	Qianjian Guo uoqianjian@163.com	Thermal Error Prediction and Compensation of YK3610 Hobbing Machine Based on BP Neural Networks
		State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University	Wenlong Feng, Zihan Li, Qunying Gu, Jianguo Yang	W. Feng fwl06122693@gmail.com	Thermally induced positioning error modelling and compensation based on thermal characteristic analysis
	Čína, UK	School of Mechanical Engineering, Wuhan University of Technology; Key Laboratory of Fiber Optic Sensing Technology and Information ; School of Mechanical Engineering, University of Birmingham	Quan Liu, Junwei Yan, Duc Truong Pham, Zude Zhou, Wenjun Xu, Qing Wei, Chunqian Ji	Junwei Yan - junweiyang@whut.edu.cn	Identification and optimal selection of temperature-sensitive measuring points of thermal error compensation on a heavy-duty machine tool
2015	Čína, USA	School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei	En ming Miao, Yi Liu, Hui Liu, Zenghan Gao,	miaoem@163.com (E. Miao).	Study on the effects of changes in temperature-sensitive points on thermal

		University of Technology Department of Mechanical Engineering, University of Kentucky	Wei Li		error compensation model for CNC machine tool
		State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University S.M. Wu Manufacturing Research Center, College of Engineering, The University of Michigan	Yang Li, Wanhua Zhao, Shuhuai Lan, Jun Ni, Wenwu Wu, Bingheng Lu	28916381@qq.com (Y. Li), whzhao@mail.xjtu.edu.c n (W. Zhao).	A review on spindle thermal error compensation in machine tools
	švýcar sko	Institute for Machine Tools and Manufacturing, ETH Zurich,	Josef Mayr, Michael Egeter, Sascha Weikert, Konrad Wegener	mayr@iwf.mavt.ethz.ch (J. Mayr), egeterm@student.ethz.c h (M. Egeter), weikert@iwf.mavt.ethz. ch (S. Weikert), wegener@iwf.mavt.ethz .ch (K. Wegener).	Thermal error compensation of rotary axes and main spindles using cooling power as input parameter
	Rakou sko, Němec ko	Institute of Manufacturing Technology and Quality Management (IFQ), Otto- von-Guericke-University Magdeburg, Magdeburg, Machine Tool Laboratory (WZL), University of Aachen, Institute of Production Management, Technology and Machine Tools (PTW), Technical University of Darmstadt, Institute of Production Science (WBK), Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Institute for Production Engineering and Laser Technology (IFT), Technical University of Vienna	Hans-Christian Mohring, Christian Breche, Eberhard Abele, Jurgen Fleischer, Friedrich Bleicher	hc.moehring@ovgu.de (H.-C. Mohring).	Materials in machine tool structures

2014	Čína	School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei	Miao En-ming, Gong Ya-yun, Dang Lian-chun, Miao Ji-chao	gdxz08@126.com (G. Ya-yun)	Temperature-sensitive point selection of thermal error model of CNC machining center
		The National Engineering Research Center of Manufacturing Equipment Digitization The National NC System Engineering Research Center, School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology	Bo Tan, Xinyong Mao, Hongqi Liu, Bin Li, Songping He, Fangyu Peng, Ling Yin	tanb@hust.edu.cn (B. Tan), maoxyhust@163.com (X. Mao), liuhongqi328@163.com (H. Liu), li_bin_hust@163.com (B. Li), hesongping@mail.hust.edu.cn (S. He), zwm8917@263.net (F. Peng),	A thermal error model for large machine tools that considers environmental thermal hysteresis effects
2014	Čína	State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University	J.Yang, H. Shi, B.Feng, L.Zhao, C.Ma, X. Mei	softyj@163.com	Applying neural network based on fuzzy cluster pre-processing to thermal error modeling for coordinate boring machine
		School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University	Zihan Li, Jianguo Yang, Kaiguo Fan, Yi Zhang	Z. Li - lizihan123@sjtu.edu.cn	Integrated geometric and thermal error modeling and compensation for vertical machining centers
		School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology	Zhang Hongxin, Guo Qianjian	hongxin-zhang@outlook.com, email:guoqianjian@163.com	Research on Volumetric Error Measurement, Modeling and Compensation for NC Machine Tools
		State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University	Yang Li, Wanhua Zhao, Wenwu Wu, Bingheng Lu	Y. Li - 289163861@qq.com	Thermal error modeling of the spindle based on multiple variables for the precision machine tool
	Japonsko	Department of Micro Engineering, Kyoto University	Soichi Ibaraki, Yusuke Ota	ibaraki@prec.kyoto-u.ac.jp	A machining test to calibrate rotary axis error motions of five-axis machine tools

				(S. Ibaraki).	and its application to thermal deformation test
	Švýcarsko	Institute for Machine Tools and manufacturing(IWF), ETH Zurich	Josef Mayr, Michael Gebhardt, Benjamin B. Massow,	mayr@iwf.mavt.ethz.ch	Cutting fluid influence on thermal behavior of 5-axis machine tools
		Institute for Machine Tools and manufacturing(IWF), ETH Zurich	Michael Gebhardt, Josef Mayr, Nils Furrer, Tobias Widmer	mayr@iwf.mavt.ethz.ch	High precision grey-box model for compensation of thermal errors on five-axis machines
	UK	Centre for Precision Technologies, University of Huddersfield	Ali M. Abdulshahed, Andrew P. Longstaff, Simon Fletcher	Ali.Abdulshahed@hud.ac.uk, (A.M. Abdulshahed),	The application of ANFIS prediction models for thermal error compensation on CNC machine tools
2013	Čína	School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, HeFei University of Technology	En-Ming Miao, Ya-Yun Gong, Peng-Cheng Niu,	Y. Y. Gong - gdxz08@126.com	Robustness of thermal error compensation modeling models of CNC machine tools
	UK	University of Huddersfield, Queensgate	N. S. Mian, S. Fletcher, A. P. Longstaff, A. Myers	n.mian@hud.ac.uk	The significance of air pockets for modelling thermal errors of machine tools

