

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Bakalářská práce

Zahrnutí vlivu různých vřetenových jednotek do teplotně-mechanického
modelu frézovacího centra

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pícha** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **466604**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Zahrnutí vlivu různých vřetenových jednotek do teplotně mechanického modelu frézovacího centra

Název bakalářské práce anglicky:

Including of impact of different spindle units into thermo-mechanical model of milling centre

Pokyny pro vypracování:

Na dodaných naměřených datech (teploty, NC data a deformace na špičce nástroje) provede student analýzu vlivu 3 vřetenových jednotek na změnu teplotně-mechanického chování frézovacího centra; Rešerše metod pro minimalizaci teplotních deformací obráběcích strojů, zpracování dodaných naměřených dat, tvorba kompenzačních modelů pro jednotlivé vřetenové jednotky, vyhodnocení a citlivostní analýza kompenzačního modelu na změnu vřetenové jednotky; grafický rozsah práce 0 stran; textový rozsah práce 40-60 stran.

Seznam doporučené literatury:

J. Mayr, et al., "Thermal issues in machine tools," CIRP Ann.Manuf.Technol., vol. 61, no. 2, p. 771-791, 2012; R. Ramesh, et al., "Error compensation in machine tools - a review: Part II: thermal errors," Int.J.Mach.Tools Manuf., vol. 40, no. 9, pp. 1257-1284, 2000; M. Weck, et al., "Reduction and compensation of thermal errors in machine tools," Annals of the CIRP, vol. 44, no. 2, pp. 589-598, 1995; J. Bryan, "International Status of Thermal Error Research (1990)," CIRP Ann.Manuf.Technol., vol. 39, no. 2, pp. 645-656, 1990; M. Mareš, 'Modelování teplotně mechanických systémů frekvenčními přenosovými funkcemi,' Praha: ČVUT v Praze, Ph.D. thesis. 131 p, 2014.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Martin Mareš, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

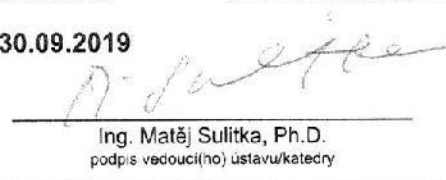
Ing. Otakar Horejš, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **21.07.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**


Ing. Martin Mareš, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.


29. 4. 2019

Datum převzetí zadání


Podpis studenta



Prohlášení

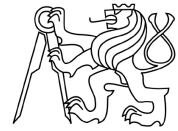
Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v přiloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

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

V Praze dne 19. 7. 2019

.....

podpis



Poděkování

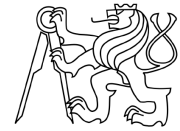
Nejvíce bych chtěl poděkovat panu Ing. Martinu Marešovi, Ph.D. za jeho cenné rady a poskytnutí informací a za to, že i navzdory jeho pracovnímu vytížení mi byl nápomocen s vlastním řešením této práce a ochotně komunikoval při řešení zadaného tématu. Dále děkuji panu Ing. Otakaru Horejšovi, Ph.D. za odborné konzultace.

Chtěl bych také poděkovat své rodině, přítelkyni a kamarádům, že měli pochopení pro tvorbu bakalářské práce a respektovali časovou náročnost, kterou bylo nutné pro tuto práci obětovat. Chci jim poděkovat především za to, že mě často podporovali ve chvílích, kdy se mi při studiu ne příliš dařilo.



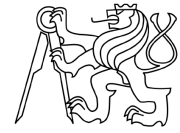
Anotace

Autor:	Petr Pícha
Název BP:	Zahrnutí vlivu různých vřetenových jednotek do teplotně-mechanického modelu frézovacího centra
Rozsah práce:	73 str., 49 obr., 24 tab.
Školní rok vyhotovení:	2019
Škola:	ČVUT FS
Ústav:	Ú12135 – ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Martin Mareš, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Otakar Horejš, Ph.D.
Zadavatel:	ČVUT FS
Využití:	Tvorba robustního kompenzačního matematického modelu, který lze aplikovat na 3 různé typy vřetenových jednotek.
Klíčová slova:	teplotní deformace, lineární deformace, kompenzace, kalibrace, přenosové funkce
Anotace:	Bakalářská práce se zabývá zpracováním naměřených dat na 5osém vertikálním frézovacím centru. Výsledkem práce je kalibrace teplotně-mechanického systému. Byla provedena aplikace kompenzačních modelů na ověřovací experimenty a následně proběhla analýza vlivu změny vřetenové jednotky na teplotní chyby stroje.



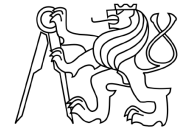
Annotation

Author:	Petr Pícha
Title of bachelor dissertation:	Including of impact of different spindle units into thermo mechanical model of milling centre
Extent:	73 p., 49 fig., 24 tab.
Academic year:	2019
University:	CTU, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135 – Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Martin Mareš, Ph.D.
Consultant:	Ing. Otakar Horejš, Ph.D.
Submitter of the Theme:	CTU, Faculty of Mechanical Engineering
Application:	Creating of the robust compensation mathematical model that can be applied to 3 different types of spindle units
Key words:	thermal errors, linear deformation, compensation, calibration, transfer functions
Annotation:	Bachelor dissertation deals with processing of measured data on 5-axis vertical milling center. The result of the work is calibration of thermo-mechanical system. The application of compensatory models for verification experiments was performed and then the analysis of the effect of the change of the spindle unit on the temperature error of the machine was carried out.

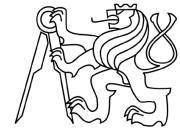


Přehled použitých veličin a jednotek

A		kladný směr rotace kolem osy X
a	$[\mu\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$	váhový koeficient vstupu do systému
b	$[\mu\text{m}]$	váhový koeficient výstupu ze systému
C		kladný směr rotace kolem osy Z
c	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	měrná tepelná kapacita
E	$[\text{MPa}]$	modul pružnosti materiálu
$e(t)$	$[\text{°C}]$	odchylka odhadu přenosové funkce
fit	$[\%]$	kvalita aproximace
g		koeficient zesílení přenosové funkce
Mk	$[\text{Nm}]$	kroučící moment
n	$[\text{ot. /min}], [\text{s}]$	otáčky vřetena; časové zpoždění
Q, Q	$[\text{cm}^3/\text{min}], [\text{J}]$	úběr materiálu; teplo; buzení
<i>residuum</i>		rozdíl mezi naměřenou a simulovanou hodnotou
t	$[\text{hod}]$	čas
$u(t)$	$[\mu\text{m}]$	obecný vstup do systému závislý na čase
X	$[\mu\text{m}]$	kladný směr strojní osy; posunutí na špičce nástroje
x	$[\mu\text{m}]$	délka n-rozměrného vektoru
Y		kladný směr strojní osy
\bar{Y}		aritmetický průměr z vektoru měřené veličiny
Y_{HAT}	$[\mu\text{m}], [^\circ\text{C}]$	vektor simulovaných hodnot
$y(t)$		obecný výstup ze systému závislý na čase
Z		kladný směr strojní osy; Z-transformace
z		komplexní proměnná
γ	$[\text{K}^{-1}]$	součinitel teplotní roztažnosti
Δpk	$[\mu\text{m}]$	kvalita aproximace metodo peak to peak
ΔT	$[\text{K}]; [^\circ\text{C}]$	rozdíl naměřených teplot
δ	$[\text{mm}]; [\mu\text{m}]$	deformace



ε		přenosová funkce
λ	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	součinitel tepelné vodivosti
ρ	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	hustota materiálu



Zkratky

ANN	umělé neuronové sítě (<i>Artificial Neural Networks</i>)
ARMAX	<i>Autoregressive Moving Average Exogenous Inputs Model</i>
ARX	autoregresivní model s externím vstupem (<i>Autoregressive Model with External Input</i>)
angl.	anglicky
BP	bakalářská práce
cRIO	diagnostická jednotka (<i>Real-time Embedded Industrial Controller</i>)
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze
ETVE	kalibrace vlivu teploty okolí (<i>Environmental Temperature Variation Error</i>)
FDEM	<i>Finite Differences Element Method</i>
FLC	<i>Fuzzy Logic Compensation</i>
ISO	mezinárodní organizace pro normalizaci (<i>International Organisation for Standardization</i>)
MKD	metoda konečných diferencí
MKP	metoda konečných prvků
MLRA	vícenásobná lineární regresní analýza (<i>Multiple Linear Regression Analysis</i>)
MQL	minimální množství řezné kapaliny (<i>Minimum Quantity of Lubrication</i>)
max.	maximum
min.	minimum
NC data	data z řídicího systému stroje
NDE	korekce jmenovité diferenciální roztažnosti
NI	<i>National Instruments</i>
NN	Neuronové sítě (<i>Neural Networks</i>)
Obr.	obrázek
OE	model výstupní chyby (<i>Output Error Model</i>)
OS	obráběcí stroj
PF	přenosová funkce
PLC	průmyslový programovatelný logický automat (<i>Programmable Logic Controller</i>)
Pt 100	platinové odporové teplotní čidlo



RCMT	Výzkumné centrum pro strojírenskou výrobní techniku a technologii
Tab.	tabulka
TCP	špička nástroje (<i>Tool Center Point</i>)
VŘ	vřeteno
SW	software



Obsah

Přehled použitých veličin a jednotek.....	8
Zkratky.....	10
1 Úvod.....	14
2 Stav řešené problematiky.....	16
2.1 Deformace obráběcích strojů.....	16
2.1.1 Deformace způsobené geometrií a kinematikou stroje.....	16
2.1.2 Teplotní deformace obráběcích strojů.....	16
2.1.3 Ostatní deformace.....	19
2.2 Způsoby snížení teplotních deformací výrobních strojů.....	19
2.2.1 Konstrukční úpravy stroje.....	19
2.2.2 Numerické modelování teplotních deformací.....	23
2.2.3 Kompenzační metody minimalizace teplotních chyb.....	24
2.3 Způsoby měření teplotních chyb.....	28
2.3.1 Zkouška teplotních deformací způsobených rotací vřetena.....	29
3 Nastavení experimentu.....	30
3.1 Záznam veličin.....	31
3.1.1 Použitý hardware.....	31
3.1.2 Měření teplotní deformace.....	32
3.1.3 Měření teploty.....	32
3.2 Přehled experimentů.....	33
3.3 Podmínky experimentů.....	33
4 Zpracování naměřených dat.....	34
4.1.1 Vřeteno 1.....	35
4.1.2 Vřeteno 2.....	37
4.1.3 Vřeteno 3.....	40
5 Matematický aparát.....	43



5.1	Odhad parametrů a použití PF	43
5.2	Vyhodnocení kvality aproximace	44
6	Aproximační modely teplotních chyb	45
6.1	Popis teplotně mechanických modelů	45
6.2	Úloha A	46
6.2.1	Kalibrační experiment VŘ 1 - identifikace PF	46
6.2.2	Aplikace PF modelu VŘ 1 na ověřovací experiment VŘ 1	50
6.2.3	Aplikace PF modelu VŘ 1 na ověřovací experiment VŘ 2	51
6.2.4	Aplikace PF modelu VŘ 1 na ověřovací experiment VŘ 3	53
6.3	Úloha B	55
6.3.1	Aplikace zesíleného PF modelu VŘ 1 na ověření VŘ 2	55
6.3.2	Aplikace zesíleného PF modelu VŘ 1 na ověření VŘ 3	56
6.4	Úloha C	57
6.4.1	Kalibrační experiment VŘ 2 - identifikace PF	57
6.4.2	Aplikace PF modelu VŘ 2 na ověřovací experiment VŘ 2	59
6.4.3	Kalibrační experiment VŘ 3 - identifikace PF	59
6.4.4	Aplikace PF modelu VŘ 3 na ověřovací experiment VŘ 3	61
7	Závěr	63
	Seznam použité literatury	65
	Seznam použitého softwaru	68
	Seznam obrázků	69
	Seznam tabulek	72
	Seznam příloh	73



1 Úvod

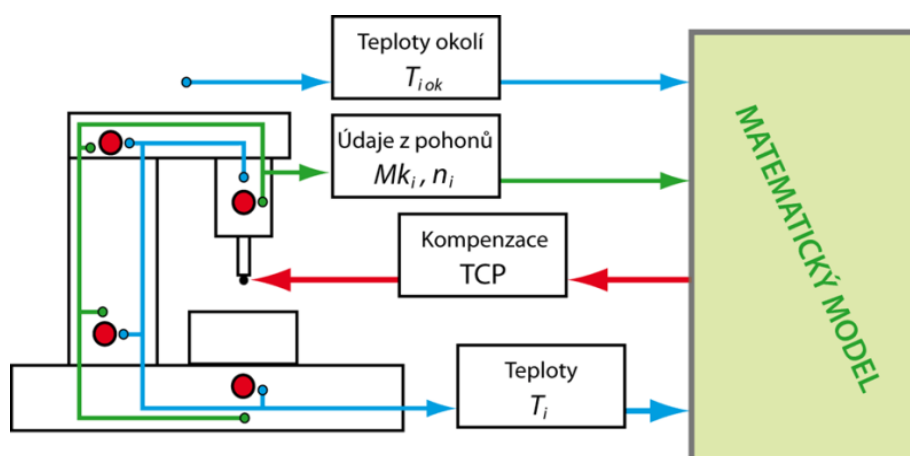
V průběhu let, kdy byla provedena celá řada výzkumů a měření teplotních deformací na různých typech strojů, bylo obecně zjištěno, že teplotní chyby stroje tvoří 40 až 70 % z celkové výrobní odchylky způsobené všemi zdroji nepřesností [1]. Dá se tedy říci, že jednou z nejdůležitějších vlastností, kterou je potřeba se z hlediska přesnosti obráběcího stroje zabývat, je teplotní chování. O důležitosti této problematiky v průmyslových aplikacích přesvědčuje fakt, že za posledních dvacet let byla vydána celá řada norem (*ISO 13041-8 (2004)*, *ISO 10791-10 (2007)*, *ISO 230-3 (2007)* atd.) zabývajících se přesným definováním postupů měření tepelných deformací a parametrů strojů s cílem správného odhadování tepelného chování výrobních strojů a jejich součástí.

V současnosti, kdy se obráběcí stroje ubírají cestou moderních trendů jako jsou zvětšování řezných a posuvových rychlostí, zvyšování otáček vřeten, zvyšování úběru třísky Q, popřípadě i suchým či MQL obráběním, jsou kladeny stále vyšší požadavky na výrobní přesnost obráběcích strojů [2]. Tyto nároky mají také za následek, že s nimi rostou i vyšší nepřesnosti z hlediska teplotních deformací na špičce nástroje (teplotní chyby). Deformace jsou způsobeny relativním posunem mezi nástrojem a obrobkem, díky teplotní deformaci části stroje, která vzniká působením změny tepla. V prostoru obráběcího stroje se tak vyskytují propady a zdroje tepla, které jsou spojené s chodem stroje (tření v pohyblivých vazbách) a samotným procesem obrábění (odvod třísek), případně na tento prostor hraje poměrně zásadní vliv i okolí, ve kterém se stroj nachází. Firmy zabývající se výrobou na obráběcích strojích často mají pro teplotní vlivy z okolí poměrně jednoduché řešení, a to ve formě klimatizovaných hal [3]. Bohužel si takové zázemí nemůže každý výrobce dovolit. Z tohoto důvodu si musí výrobci zvolit cestu levnějšího řešení implementací určité komponenty na stroj nebo pomocí softwarové kompenzace, buďto metodou přímou, kdy si stroj odměří určité posunutí pomocí sondy a koriguje tak deformaci pojezdy v osách (přerušení technologického procesu) nebo metodou nepřímou, kdy vznikne kompenzační matematický model, který se přímo implementuje do řídicího systému stroje (nedochází k přerušení procesu). Druhá ze zmíněných metod minimalizace je jak ekonomicky, časově tak i konstrukčně výhodná. Důvodem je, že se do již hotové konstrukce stroje nemusí zasahovat.



Motivací práce je tvorba robustního kompenzačního matematického modelu teplotních chyb stroje (viz. Obr. 1), který povede ke zvýšení přesnosti stroje, úspoře času potřebného ke kalibraci a k úspoře náročnosti tvorby kompenzačního nástroje. Tvorba kvalitního, avšak časově nenáročného modelu je z ekonomického hlediska velice důležitá a vede ke snížení celkových provozních nákladů při zachování pořizovací hodnoty stroje.

Hlavním cílem této bakalářské práce je seznámení s celkovou problematikou teplotních chyb obráběcích strojů, seznámení s jednotlivými druhy kompenzačních aparátů pro jejich minimalizaci. Proběhla kalibrace teplotně-mechanického systému, na naměřených datech – teploty, NC data a deformace na špičce nástroje v ose Z. Výsledkem práce je tvorba kompenzačního aparátu teplotních chyb frézovacího centra, následný rozbor a citlivostní analýza kompenzačního modelu na změnu jednoho z hlavních zdrojů tepla vyskytujícím se na obráběcím stroji – vřetenové jednotky, která způsobuje nejvýznamnější teplotní chybu na stroji.



Obr. 1: Ilustrační obrázek [4].



2 Stav řešené problematiky

2.1 Deformace obráběcích strojů

Ačkoliv se obráběcí stroj jeví jako dokonalá tuhá soustava a zdá se, že jediný vliv na deformaci stroje bude mít pouze teplotní roztažnost materiálu způsobující teplotní chyby, vznikají na obráběcím stroji deformace různých druhů. Mají na ně vliv především geometrie, kinematika a dynamika stroje či špatné polohování stroje. Velice důležitá je i tuhost jednotlivých komponent stroje, jelikož ovlivňuje řezný proces (vibrace, chvění apod.) a kvalitu upnuté obrobku ve stroji [5].

2.1.1 Deformace způsobené geometrií a kinematikou stroje

- Geometrické chyby – montážní vřle způsobené konstrukčními chybami, špatná jakost povrchu jednotlivých konstrukčních prvků, poddimenzované součásti, volba nevhodného materiálu, opotřebení (např. tření v ložiskách) [5].
- Kinematické chyby – způsobené nevhodným pohybem jednotlivých os, chyby v řídicím systému stroje, realizace lineárního pohybu, kruhové interpolace [5].

2.1.2 Teplotní deformace obráběcích strojů

Hlavní zdroje tepla, které jsou znázorněné na Obr. 2, lze rozdělit na zdroje:

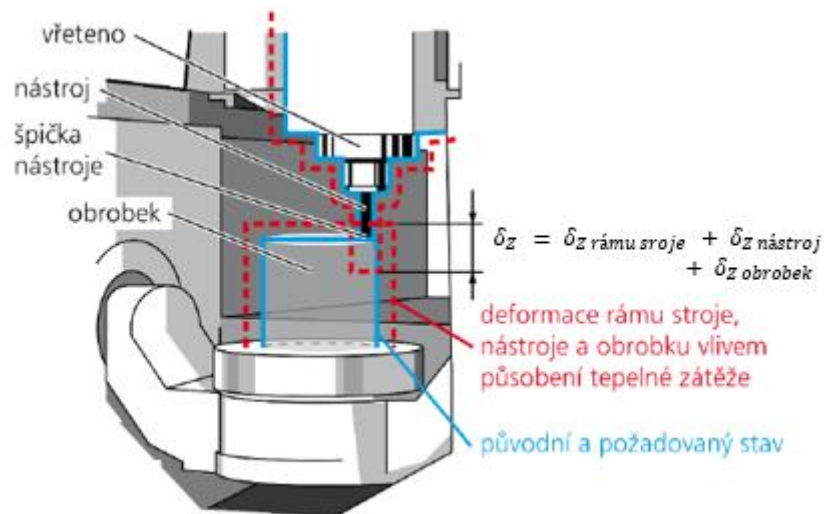
- Vnitřní – ložiska, převodovky, pohonné jednotky a spojky, vřetenové jednotky, vedení (pohybový kuličkový šroub, lineární vedení apod.), řezný proces (odvod třísek), chlazení emulzí apod. [6].
- Vnější – jedná se především o zdroje z okolí stroje jako sluneční záření, osvětlení a topení v hale, teplo vznikající od ostatních strojů a obsluhy, otevírání vrat a oken ve výrobní hale. Velkou roli hraje i geografická poloha, ve které se OS nachází, dále pak roční období a mění se teploty během dne a noci [6].



Obr. 2: Zdroje a propady tepla v obráběcím stroji [7].

Výsledná teplotní chyba vznikající důsledkem tepelné zátěže (viz. Obr. 3) se obvykle skládá ze tří částí:

- deformace rámu stroje (vliv vnitřních i vnějších zdrojů tepla),
- prodloužení nástroje (vliv řezného procesu),
- deformace obrobku.



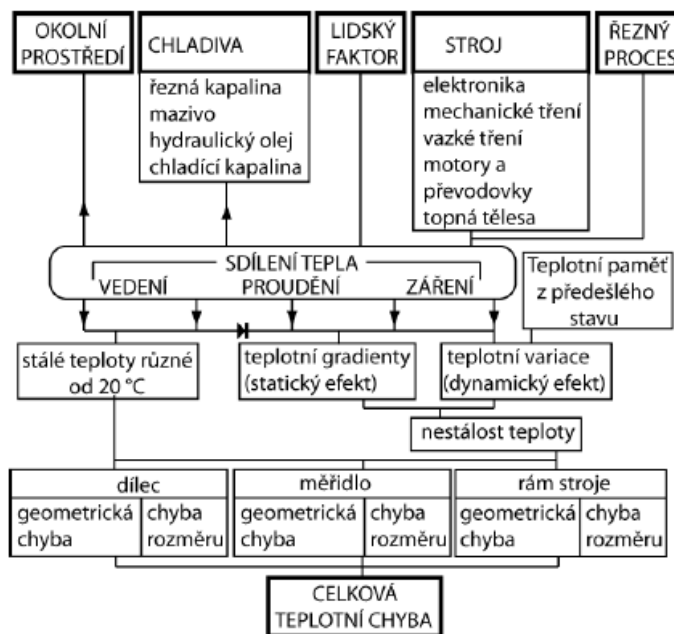
Obr. 3: Působení tepelné zátěže [2].

Deformaci mezi stolem (obvyklá poloha obrobku) a TCP lze zapsat následujícím způsobem:

$$\delta_Z = \delta_Z \text{ rámu stroje} + \delta_Z \text{ nástroj} + \delta_Z \text{ obrobek} \quad (1)$$



Na vznik teplotních chyb obráběcího stroje má vliv spousta faktorů, jak je patrné z Obr. 4.



Obr. 4: Schéma teplotních vlivů působících na obráběcí stroj [7].

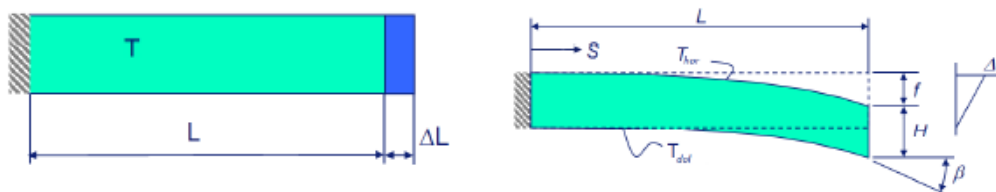
Mezi hlavní vlivy patří především princip sdílení tepla (vedení, proudění, záření) [7], teplotní roztažnost jednotlivých částí stroje a rozmístění jednotlivých zdrojů a propadů tepla. Teplotní chyba na obráběcím stroji lze rozdělit na 2 složky:

- lineární (Obr. 5 vlevo)

Dochází k relativnímu prodloužení délky komponent obráběcího stroje v důsledku rovnoměrného ohřátí, vyskytují se v lineárních pohybových osách stroje (X, Y, Z), dají se jednodušeji a levně softwarově kompenzovat [8].

- úhlová (Obr. 5 vpravo)

Dochází k určitému úhlovému vychýlení vlivem nerovnoměrného rozložení teplotního pole. Úhlové deformace jsou velice obtížně kompenzovatelné, u tříosých obráběcích strojů je dokonce nutno na stroj umístit tzv. akční členy jako jsou různé mechatronické systémy, členy zajišťující zdroje a propady tepla. Ty jsou schopné úhlové deformace s vhodnou kompenzační metodou odstranit [8].



Obr. 5: Lineární (vlevo) a úhlová (vpravo) deformace [9].

2.1.3 Ostatní deformace

Ostatní deformace vyskytující se na OS mohou být způsobeny menší tuhostí upnutí obrobku ve stroji, chybným nastavením přípravků a příslušenství apod. [5].

2.2 Způsoby snížení teplotních deformací výrobních strojů

2.2.1 Konstrukční úpravy stroje

Míře teplotních deformací je snaha obvykle předejít, a to díky vhodné predikci teplotního chování stroje již v konstrukční fázi. Teplotní deformace závisí především na druhu použité konstrukce OS a volbě použitého materiálu. Dále je potřeba tepelné zdroje a propady vhodně rozmístit, či je dostatečným způsobem izolovat od rámu stroje. Další možností je teplotní deformace do značné míry eliminovat přidáním chlazením OS či komponent [5], [8].

Volba vhodného materiálu

Při volbě druhu materiálu je potřeba posuzovat základní fyzikální vlastnosti daného materiálu, které ovlivňují určité technické a provozní vlastnosti stroje (viz Tab. 1). Mezi technické a provozní vlastnosti stroje se řadí dynamická a statická tuhost, hmotnost, momenty setrvačnosti jednotlivých dílců, tlumení, tepelná a dlouhodobá stabilita apod. Pro konstrukci nosné soustavy OS lze využít různé materiály, nejčastěji se využívá šedá litina, ocel a ocelolitina. Tyto nejčastěji používané materiály se vyznačují výborným poměrem hmotnosti a tuhosti, co se týče ceny, jsou také velice výhodné oproti různým nestandardním materiálům jako je např. granit a polymerbeton, které jsou zároveň velice křehké a jejich využitelnost je tím pádem více omezená. Nestandardní materiály (na rozdíl od litiny a oceli) vynikají výbornou schopností odolávat teple (nízký součinitel teplotní roztažnosti).



Tab. 1: Fyzikální parametry materiálů [10].

Parametr	Modul pružnosti [MPa]	Měrná hmotnost [kg/m ³]	Součinitel teplotní roztažnosti [K ⁻¹]
Materiál			
Ocel	$2,1 \times 10^5$	7850	$11,1 \times 10^{-6}$
Ocelolitina	$1,7 \times 10^5$	7400	$9,5 \times 10^{-6}$
Polymerbeton	$0,4 - 0,6 \times 10^5$	2300 - 2500	$8,2 - 14 \times 10^{-6}$
Beton	$0,2 \times 10^5$	2500	11×10^{-6}
Granit	$0,9 \times 10^5$	3000	8×10^{-6}
Hliník	$0,7 \times 10^5$	2700	$23,8 \times 10^{-6}$
Titan	$1,1 \times 10^5$	4500	$10,8 \times 10^{-6}$

Mezi další relevantní materiálové vlastnosti patří měrná tepelná kapacita a tepelná vodivost. Měrná tepelná kapacita c (měrné teplo) je množství tepla potřebného k ohřátí 1 kilogramu látky o 1 stupeň. Vyjadřuje, jak moc je konstrukce stroje stabilní vůči změnám teploty. Tepelná vodivost je schopnost daného kusu konstrukce vést teplo. Představuje rychlost, s jakou se teplo šíří z jedné části látky do jiných, chladnějších částí a je vyjádřena součinitelem tepelné vodivosti λ [5].

Volba vhodné konstrukce rámu stroje

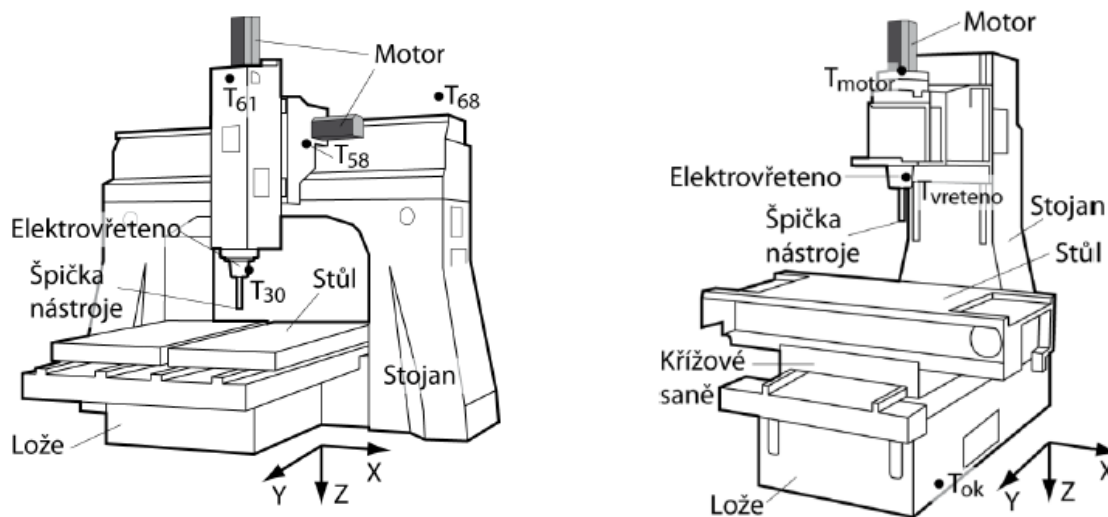
Nosné struktury stroje lze rozdělit následujícím způsobem:

- Otevřená
- Uzavřená
- Geometricky symetrická
- Geometricky asymetrická

Z hlediska teplotních deformací se vyplatí volit konstrukci, která je geometricky symetrická a zároveň uzavřená (viz. Obr. 6 vlevo), jelikož v ní dochází při vhodném rozmístění tepelných zdrojů k rovnoměrnému šíření tepla, které způsobí to, že deformace působí „proti sobě“ a tím pádem se vzájemně vyruší. Oproti asymetrickým konstrukcím (viz. Obr. 6 vpravo), u kterých dochází k výrazné tvorbě úhlových deformací (obtěžně kompenzovatelných), vyniká symetrická obecně zásadní výhodou a tou je, že teplo způsobuje dominantní lineární teplotní chyby, které lze jednodušeji kompenzovat. Nevýhodou uzavřených konstrukcí může být horší přístup do pracovního prostoru.



Nejčastěji se u symetrických konstrukcí využívá portálové uspořádání typu „horní gantry“ a klasické portálové uspořádání [3], [5], [8].



Obr. 6: Portálové uspořádání rámu stroje (vlevo), teplotně asymetrický rám (vpravo) (upraveno) [11].

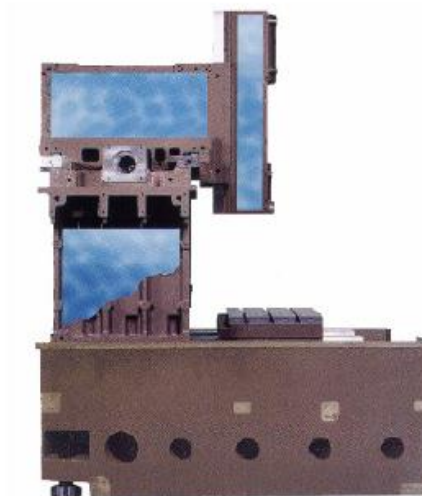
Tepelná stabilizace a chladicí systémy

Nedílnou součástí vhodně navržené konstrukce by mělo být zaručení dostatečného odvodu vznikajícího tepla, a to chlazením jednotlivých zdrojů tepla, protékáním či profukováním celých rámu, a především zajištěním plynulého odvodu třísek z pracovního prostoru stroje [3], [5]:

- Lokální chlazení – Používá se především ke chlazení vnitřních zdrojů tepla, které jsou největšími činiteli: pohybové šrouby (vnitřní chlazení kuličkových šroubů), ložiska, převodovky, pohonné jednotky, vřetenové jednotky. Chladicí medium je dopraveno k jednotlivým komponentám a dále putuje do chladiče, který se obvykle nachází mimo stroj. Struktura chlazení je ve stroji často složitě rozvětvená. Nevýhodou lokálního chlazení se tak z hlediska tepelné stabilizace stává způsob užití chladicích agregátů a okruhů chladicí kapaliny. V určitých fázích nemůže být jedna část chladicí větve uchlazena z důvodu intenzivního vývinu tepla (např. vysoké otáčky vřetene), zatímco jiná je chlazená příliš. To vede k nechtěnému smršťování a roztahování částí stroje [5].
- Protékané rámy – Při použití protékaného rámu je chlazení integrováno přímo do nosné struktury stroje (viz. Obr. 7). Vzniklé teplo je v krátkém čase odváděno



od místa zdroje tepla a rozvede se do celé struktury stroje a do zásobníků chladicího média tak, aby byla všude stejná nebo podobná teplota. Velkou výhodou tohoto chlazení je, že nedochází k rychlým změnám teploty vlivem pracovního cyklu stroje. Nevýhodou je konstrukční náročnost řešení a vysoká cena samotného řešení a provozu takového rámu. Nejčastěji se pak toto řešení využívá na strojích určených k dokončovacím operacím, hlavně u brusek [5], [9].



Obr. 7: Chlazený rám [5].

- Třískové hospodářství – Vznikající teplo od technologického procesu, který probíhá v pracovním prostoru OS, závisí především na volbě rezných podmínek a samotné schopnosti nástroje i stroje odvádět teplo. Teplo se předává mezi obrobkem, třískou a nástrojem. Proto je jedním z nejdůležitějších požadavků rychlý a plynulý odvod třísek z pracovního prostoru stroje. Vhodné je zaměřit se také na krytování pracovního prostoru stroje.

Úprava pracovního prostředí

Kromě vhodně navržené konstrukce OS by měly být uživatelem stroje zajištěny vhodné podmínky ve výrobní hale (okolí stroje). Jelikož jsou naše klimatické podmínky v průběhu roku značně odlišné (to samé se dá říci i během střídání dne a noci), je potřeba zajistit vhodné klimatické prostředí pro OS. Ideální řešení tak nastává, pokud výroba probíhá v klimatizované hale. Její provoz je však drahý a slouží především pro výrobu nejpřesnějších dílců. Pokud klimatizování haly není možné, měly by být dodrženy



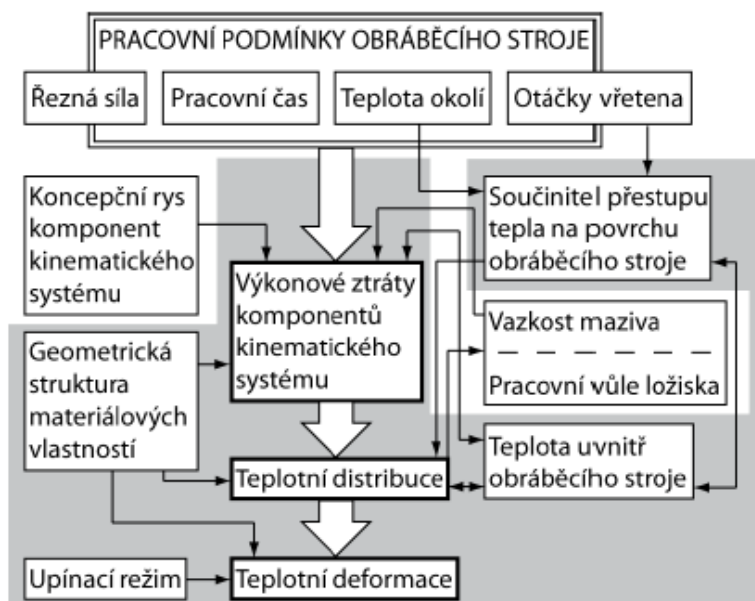
alespoň základní zásady provozu stroje ve výrobní hale, tj. snížení výkyvů teploty okolí v hale na minimum, odclonění záření (slunečního a dalších zdrojů tepla v okolí) a minimalizace proudění vzduchu [3].

2.2.2 Numerické modelování teplotních deformací

Tvorba komplexního teplotně mechanického modelu celého OS v nestacionární podobě, který by byl schopen predikovat teplotní deformaci stroje, je velmi složitá a prozatím v praxi neřešitelná. K zisku takového modelu by bylo nutné detailně modelovat nejen samotný stroj, ale i interakci stroje s časově proměnným okolím. Dá se tedy říci, že vliv vnějšího okolí tak hraje při samotném modelování výraznou roli, pokud výroba neprobíhá v klimatizovaných halách, kde lze zajistit dostatečně kvalitní stálost okolního prostředí [3], [7].

Metoda konečných prvků

MKP se používá pro numerickou analýzu tepelných charakteristik částí stroje s využitím dostupných komerčních software jako je např. Ansys [12], Abaqus [13] apod. V porovnání s analytickým výpočtem a experimentálním měřením, software pro numerickou analýzu umožňuje získat komplexní znalosti o tepelných vlastnostech částí stroje ještě před jeho výrobou, což šetří čas a náklady na analytické výpočty a experimenty. Jenže v samotné úloze se vyskytuje velká řada parametrů, okrajových a počátečních podmínek (viz. Obr. 8). Řada vstupních parametrů do úlohy může být vzájemně závislá, což ji dále komplikuje. Samotný model MKP respektuje určitý časový interval, ze kterého získá teplotní pole pro výpočet prostorových teplotních deformací. Analýza nosných struktur tak probíhá v ustáleném teplotním stavu [7], [14], [15].



Obr. 8: Faktory ovlivňující OS, okrajové podmínky pro MKP model [7].

Metoda konečných diferencí

MKD využívá podobných principů jako MKP, avšak s tím rozdílem, že zatímco MKP využívá diskrétního časového intervalu (konkrétního okamžiku) ke stanovení teplotního pole, ze kterého následně vypočítá teplotní prostorové deformace, MKD vyřeší teplotní přechodový děj na základě problému přestupu tepla a s tímto přechodovým dějem nadále pracuje pro získání prostorových teplotních deformací [7], [15].

Kombinace MKP a MKD

Vhodnou kombinací předchozích dvou numerických simulačních metod MKP a MKD vznikne model FDEM, který využívá výhody obou zmíněných metod [7], [15].

2.2.3 Kompenzační metody minimalizace teplotních chyb

Před samotným použitím některého ze způsobů kompenzace teplotních chyb je nutné znát přesnou hodnotu teplotní chyby a na základě její znalosti zvolit vhodnou metodu kompenzace.

Teplotně-deformační analýza OS se skládá ze tří následujících fází:

- Identifikace – analýza struktury stroje, zjištění druhů chyb, zjištění optimální polohy pro teplotní čidla.



- Modelování a odhad – zpracování modelů, zpracování chybových map, numerický odhad chyb.
- Kompenzace – implementace kompenzačního systému, implementace kompenzačních algoritmů nebo kompenzačních map do řídicího systému.

Kompenzační metody je možno rozdělit na:

- Metody přímé – Využívají měřících sond v obráběcím stroji. V reálném čase se naměří konkrétní hodnoty deformací pomocí doteků sond. Tyto deformace jsou okamžitě kompenzovány řídicím systémem stroje, což je značná výhoda oproti nepřímým metodám. Nevýhodou těchto metod je vysoká pořizovací cena sond a samotné měření, jelikož dochází k pravidelnému přerušování pracovního cyklu stroje vedoucího k určitým prostojům ve výrobě [3], [9].
- Metody nepřímé – SW kompenzace teplotních chyb, která je z hlediska nákladů velice výhodná oproti ostatním metodám. Naměřené vstupy v korelaci s teplotními deformacemi se pomocí aproximačních matematických modelů přepočítávají na hodnoty potřebné pro kompenzaci, které jsou následně zadávány do řídicího systému stroje. Nevýhodou těchto metod je obtížná oddělitelnost teplotních deformací od deformací způsobených ostatními vlivy. Pro tvorbu modelu, který by měl co nejlépe odpovídat skutečným vlastnostem stroje, je potřeba provést mnoho kalibračních experimentů [3], [9].

Práce se dále podrobněji zabývá aplikací nepřímé metody kompenzace teplotních chyb OS.

Vícenásobná lineární regresní analýza

MLRA je statická a jedna z nejrozšířenějších metod aproximace teplotních deformací na OS. Většina typů řídicích systémů OS tuto funkci standardně nabízí. Obecně slouží k popisu rozsahu, směru a intenzity vztahu mezi různými vzájemně nezávislými veličinami a spojitě závislou. K určení hlavních zdrojů tepla a následných váhových koeficientů se využívá metoda nejmenších čtverců pro aproximaci deformace v jednotlivých osách OS [3], [7].



Výhoda samotné metody spočívá v tom, že kompenzační algoritmus se získá poměrně rychle a jednoduše, jelikož MLRA modely se často sestaví na základě empirických dat (zisk koeficientů) z pouze jednoho kalibračního měření pro zvolený pracovní režim [3].

Nevýhodou této metody je přesnost a spolehlivost odhadu teplotních odchylek, a to z důvodu toho, že MLRA modely zcela nerespektují principy vedení tepla a z principu postrádají informace z míst, kde nejsou umístěny teplotní senzory. Proto se rozmístění, počet teplotních čidel a způsob zisku samotných koeficientů polynomické funkce stává poměrně složitou otázkou [3].

Neuronové sítě

ANN je další v literatuře často používaných metod řešící problém teplotních deformací OS. Sítě ANN se využívá pro výpočetní modely v oblasti umělé inteligence. Podobně jako v biologických síťových strukturách, kde určité zkušenosti jsou uloženy v dendritech (nervových zakončeních), funguje umělá neuronová síť na podobném principu, jen s tím rozdílem, že u nich se zkušenosti ukládají v jejich matematickém ekvivalentu – váhách. Váhová funkce následně vyhodnotí důležitost vstupní informace do systému a udává ji určitý váhový koeficient. Ve své podstatě je umělá neuronová síť mnoho jednoduchých a navzájem propojených procesů [7], [16].

Výhodou ANN oproti jednodušším algoritmům je, že mohou pracovat i s nekompletními, či porušenými daty, jelikož není potřeba znát předchozí stavy spojující teploty a deformace. Další výhodou je schopnost provádět operace automaticky a není požadována další výrazná analýza uživatelem. Nicméně ANN není jednoduché naprogramovat ve velmi jednoduchých PLC. ANN je v podstatě *černá skříňka*, která není závislá na operátorovi, což není vždy vhodné, jelikož může být zdrojem chyb. Také je potřeba snižovat počet senzorů z důvodu ceny stroje a přídatných zařízení a náročných okolních podmínek [7], [9], [16].

Fuzzy logika

FLC, nazývaná též mlhavá logika, je matematická kompenzační metoda, která má své kořeny v kvantové fyzice. Základním pojmem fuzzy logiky je tzv. fuzzy množina, která obsahuje neostré hranice a umožňuje tak možnosti prvků do dané množiny patřit i s jistou pravděpodobností. Fuzzy logika narozdíl od výrokové logiky může pracovat



i s jinými výroky než 0 a 1 jako např. „menší“, „větší“. V podstatě lze říci, že operuje se všemi hodnotami z intervalu $\langle 0;1 \rangle$. FLC není založena na matematickém modelu a využívá se tam, kde není možné použít matematický model nebo kde matematický model je příliš složitý [7], [9].

Přenosové funkce

PF popisuje vztah mezi zdrojem tepla (Q_A – buzení) v místě vzniku a odezvou (X_B – posunutí na špičce nástroje) na tento zdroj v jiném místě na konstrukci OS (viz. Obr. 9). Neboli vyjadřuje vztah mezi vstupními a výstupními parametry termodynamického systému. Jedná se o analogii s mechanickou přenosovou funkcí [7].

	<u>Dynamická analýza</u>	<u>Teplotní analýza</u>
Buzení		
Odezva	$m \cdot \ddot{x}(t) + b \cdot \dot{x}(t) + k \cdot x(t) = f(t)$ $[m \cdot s^2 + b \cdot s + k] \cdot X(s) = F(s)$ $MPF = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{m \cdot s^2 + b \cdot s + k}$	$D_{AB}(s) = \frac{X_B(s)}{Q_A(s)}$ $X_B(s) = D_{AB}(s) \cdot Q_A(s)$

Obr. 9: Porovnání mezi dynamickou a teplotní analýzou [7].

Metoda PF naruší od metod jako jsou MLRA, či ANN respektuje základní principy sdílení tepla a má mnohem větší schopnost systematickosti a aplikovatelnosti na různé typy OS a tím pádem mnohem širší uplatnění při tvorbě komplexního matematického modelu [3], [16].

Výhodou je, že dochází k redukci teplotních čidel, která jsou vázána na teplotně mechanické jevy. Z hlediska časové a modelovací náročnosti patří PF k jedné z nejrychlejších metod minimalizace teplotních chyb.



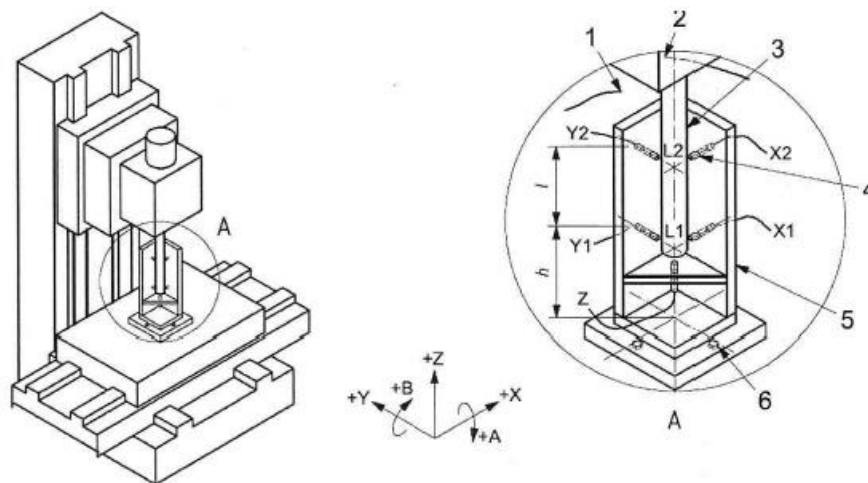
Oproti MLRA modelům se u PF jeví značná výhoda a to taková, že umístění teplotních senzorů je jednoznačné. Senzor je potřeba umístit co nejbližší aktivního zdroji tepla. Navíc se může využít interních dat z řídicího systému stroje (otáčky, zatížení vřetena či pohybových os atd.) jako dalších vstupů do modelu [3], [7].

2.3 Způsoby měření teplotních chyb

Měření teplotních deformací a teplot pro stroje je popsáno v mezinárodní normě ČSN ISO 230-3 [17], která stanovuje 3 typy zkoušek:

- Zkouška pro určení chyby vzniklé v důsledku kolísání environmentální teploty (ETVE, ve vlastním řešení BP se neuvažuje).
- Zkouška tepelných deformací způsobených rotací vřetena.
- Zkouška tepelných deformací způsobených pohybem v lineárních osách (ve vlastním řešení BP se neuvažuje).

Norma stanovuje, že stroj během zkoušky musí být: plně funkční, smontován, umístěn na základ a napájen energií. Stroj a samotné měřicí zařízení musí být chráněny před vnějšími tepelnými vlivy. Zkouška se provádí při stanovené teplotě 20 °C anebo se používá korekce jmenovité diferenciální roztažnosti (NDE). Norma dále stanovuje, že všechny tři zkoušky se provádí na nezatíženém stroji, tedy nezahrnují vliv řezného procesu. Dle normy se měření provádí pomocí velmi přesných bezkontaktních snímačů, umístěných ve speciálním přípravku určeného k měření úhlových i lineárních deformací (viz. Obr. 10). Z pravidla bývá přípravek osazen 5 deformačními snímači. Tyto snímače zaznamenávají odchylku od původní pozice přesného měřicího trnu upnutého ve vřeteni během tepelného ovlivňování stroje. Vyhodnocení zkoušky se provádí graficky a vyjadřuje závislost teplotních deformací a teploty na čase [2], [17].



Legenda

- | | |
|-----------------------------------|--------------------------------------|
| 1 snímač teploty okolního vzduchu | 4 snímače lineárního přestavení |
| 2 snímač teploty ložiska vřetena | 5 přípravek |
| 3 zkušební tm | 6 přípravek k přišroubování ke stolu |

Obr. 10: Ukázka uspořádání zkoušky na obráběcích strojích se svislou osou vřetena (upraveno) [17].

2.3.1 Zkouška teplotních deformací způsobených rotací vřetena

Při zkoušce teplotních deformací způsobených rotací vřetena norma doporučuje použít jeden z těchto režimů:

- Konstantní frekvence otáčení, která odpovídá určitému procentu maximální frekvence otáčení (dále v práci nazvaný jako kalibrace).
- Proměnné spektrum frekvence otáčení (dále v práci nazvaný jako verifikace či ověření).

Při zkoušce se hodnotí vliv ohřívání stroje na schopnost udržení stálé polohy nástroje vzhledem k obrobku [17].



3 Nastavení experimentu

Měření probíhalo na 5osém vertikálním frézovacím centru typu „horní gantry“ (maximální rozsahy jednotlivých os X: 700 [mm], Y: 820 [mm], Z: 550 [mm]), na kterém se postupně vyměnily 3 vřetenové jednotky. Tyto vřetenové jednotky jsou v práci nadále označeny zkratkou a čísly VŘ 1, VŘ 2 a VŘ 3 pro lepší orientaci. Technické parametry jednotlivých vřeten jsou uvedeny v Tab. 2.

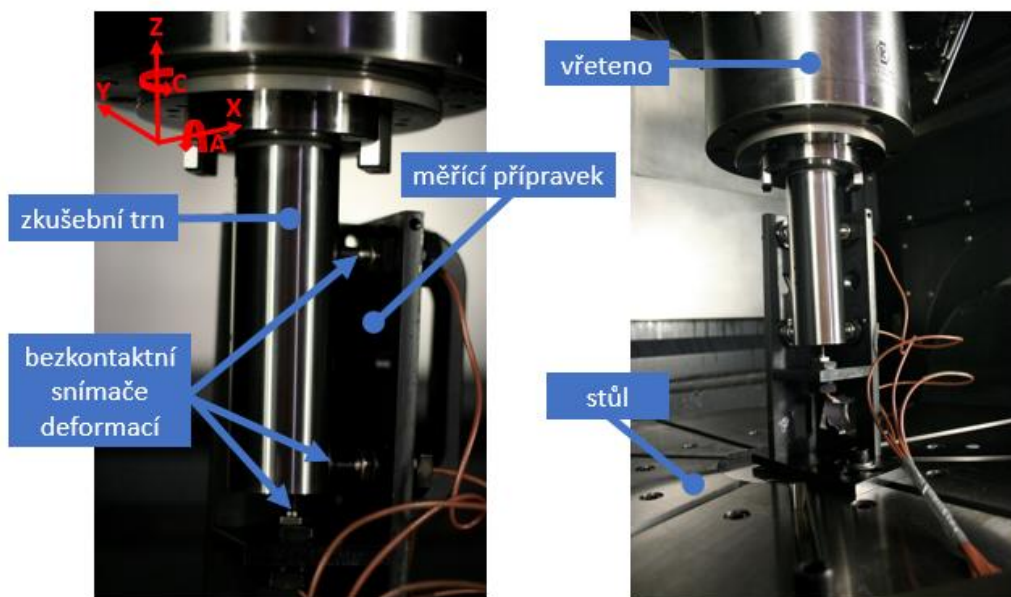
Tab. 2: Označení a parametry vřeten.

název	označení	maximální otáčky [ot. /min]	výkon [kW]	kroucí moment [Nm]	označení vřetena výrobcem
vřeteno 1	VŘ 1	10 000	26	340	112.56.8.FOS
vřeteno 2	VŘ 2	18 000	35	130	100.46.4.FHS
vřeteno 3	VŘ 3	12 000	48	48	100.46-666.393

VŘ 1 je určeno pro hrubovací operace. Vyznačuje se nižšími maximálními otáčkami, ale nejvyšším možným kroucím momentem. Pro dokončovací operace se používá VŘ 2 s nejvyššími možnými otáčkami 18 000 ot. /min. Semi-finišovací operace zajišťuje VŘ 3.

Měření probíhalo v jedné konfiguraci os stroje X, Y, Z, A a C. Experimenty proběhly v souladu s normou ČSN ISO 230-3 [17], čili nedocházelo k dalšímu teplotnímu ovlivnění od řezného procesu.

Dále je na Obr. 11 (poskytnutý vedoucím práce) uvedeno, jakým způsobem byl experiment uspořádán.



Obr. 11: Uspořádání experimentu.

Uspořádání experimentu se skládá z těchto částí:

- Zkušební trn zastupující nástroj.
- Měřicí přípravek (normalizovaná svařená konstrukce pro rozmístění deformačních senzorů) pevně uchycen ke stolu (obvyklá pozice obrobku).
- Pětice bezkontaktních snímačů pro záznam teplotních deformací ve směru os X , Y a Z a úhlových složek směrů X a Y .
- Vřeteno
- Otočný stůl (polohován v měřicí pozici 0°)

3.1 Záznam veličin

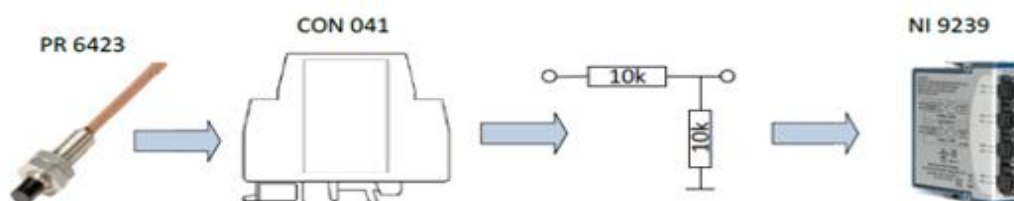
3.1.1 Použitý hardware

Veškeré měřené veličiny byly ukládány se vzorkovací frekvencí 1 s měřicí ústřednou cRIO od společnosti National Instruments [18] se softwarem LabVIEW [19]. K zařízení cRIO lze připojit měřicí karty (tzv. vstupní/ výstupní I/O moduly řady C od téže firmy). Do ústředny se dále ukládala data z řídicího systému stroje načtená přes Profibus rozhraní [20].



3.1.2 Měření teplotní deformace

Pro bezkontaktní měření posunutí čela rotujícího trnu v osách X, Y, Z byl použit snímač na principu vířivých proudů řady PR 6423 od společnosti PROFESS [21]. Čidla jsou dále připojena k převodníkům CON 041 [22], na které navazuje napěťový dělič s kartou NI 9239 [23]. Řetězec zapojení je uveden na Obr. 12.

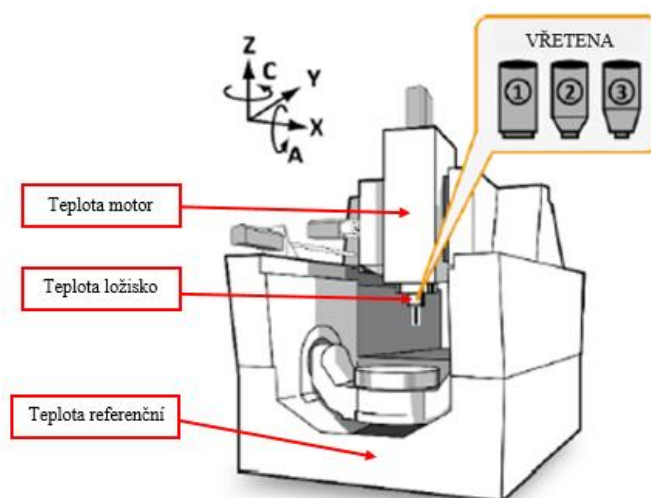


Obr. 12: Řetězec pro měření relativního posunutí mezi nástrojem a obrobkem: čidlo PR 6423, převodník NOC 04, napěťový dělič a karta NI 9239 [2].

3.1.3 Měření teploty

Pro měření teploty byla použita teplotní odporová čidla Pt 100 [24] ve čtyřvodičovém zapojení. Rozmístění teplotních čidel je znázorněno na Obr. 13. Čidla jsou určena pro měření strojních komponent (teplota motoru a ložiska) a jako volné elementy Pt 100 pro měření teploty okolí (čidlo zabudováno na konstrukci OS – teplota referenční). Všechny teplotní senzory jsou ve třídě A, 3850 ppm/°C.

Pro odporové teplotní senzory je k snímání teplot použito měřících karet NI 9217 [25] a NI 9219 [26].



Obr. 13: Skica struktury stroje s rozmístění teplotních čidel (upraveno) [27].



3.2 Přehled experimentů

Pro dobrou orientaci v naměřených datech je uveden základní přehled jednotlivých experimentů (viz. Tab. 3).

- Kalibrace – stroj ve fázi ohřevu tepelně buzen volnou rotací vřetena konstantní rychlostí.
- Verifikace – stroj ve fázi ohřevu buzen volnou rotací vřetena s proměnnou rychlostí.

Tab. 3: Přehled provedených experimentů.

vřeteno	experiment	otáčky [ot. /min]	poznámka
VŘ 1	kalibrace	8000	
	verifikace	SPEKTRUM 1	0 - 10 000 otáček, změna otáček každou půl hodinu
VŘ 2	kalibrace	9000	
	verifikace	SPEKTRUM 2	500 - 18 000 otáček, změna otáček každou hodinu
VŘ 3	kalibrace	4000	
	verifikace	SPEKTRUM 3	1 000 - 8 000 otáček, změna otáček každé 2 hodiny

Přesné hodnoty otáček verifikačních experimentů v konkrétních časech jsou uvedeny na grafech v kapitole 5.

3.3 Podmínky experimentů

Z důvodu časové náročnosti zpracování a vyhodnocení experimentálních dat se řešení matematického modelu váže k následujícím zjednodušením:

- Zanedbání vlivu okolní teploty.
- Deformace pouze v ose Z (dominantní směr deformací, osa vřetena).
- Uvažovány jsou pouze fáze ohřevu (z důvodu transparentnosti výsledků).
- Veškerá naměřená data byla poskytnuta vedoucím bakalářské práce. Autor práce nemohl do procesu jejich získání zasáhnout.



4 Zpracování naměřených dat

Při popisu teplotních deformací, které vznikají v důsledku aktivity zdrojů, či propadů tepla je určený postup vedoucí k výsledné minimalizaci teplotních chyb OS.

Kalibrace

Jedná se o experimentální měření, za předem definované aktivity zdrojů tepla (v tomto případě otáčky vřetena). U kalibrace se řeší přechod z jednoho termodynamického rovnovážného stavu (stroje s okolním prostředím) do stavu druhého (do ustálení struktury stroje za aktivity zkoumaného zdroje tepla) a pozoruje se odezva (přechodový děj) teplotně mechanického systému na aktivní zdroj či propad tepla. Nejdůležitější podmínkou je kvalitní (nerušený, především vlivem okolního prostředí) záznam přechodové charakteristiky, ze které se následně identifikuje PF.

Identifikace

V identifikaci je důležité vhodně popsat teplotní deformaci kalibrovaného teplotního zdroje či propadu tepla (identifikace vhodné PF). V samotné fázi identifikace je zásadní volba vhodného buzení PF.

Verifikace

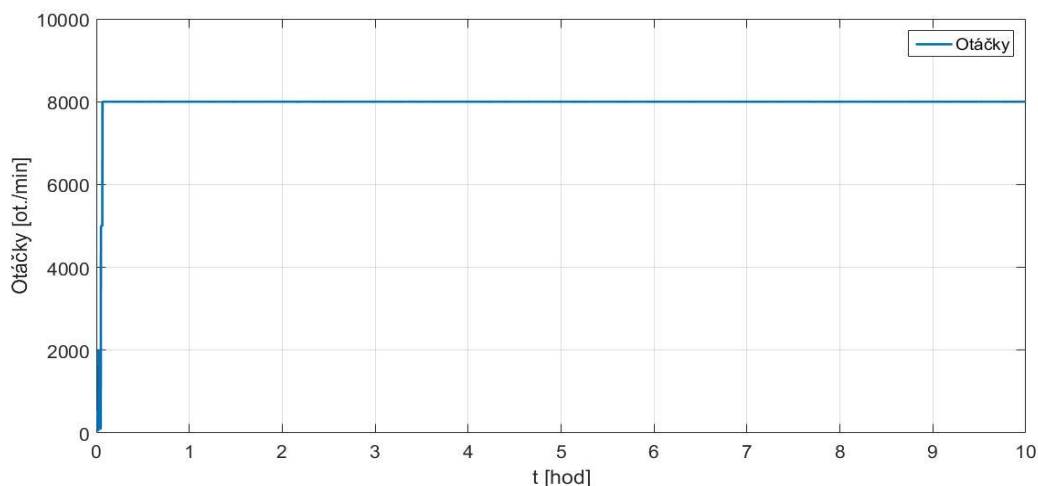
Prověření, co možná největšího počtu možných stavů, které mohou během provozu popisovaného zdroje či propadu tepla nastat. Čím více proběhne verifikačních experimentů, tím více bude výsledný matematický kompenzační model robustní a dokáže lépe predikovat teplotní chování teplotně mechanického systému (OS).

Kalibrační a verifikační experimenty byly provedeny pro jednotlivá vřetena VŘ 1, VŘ 2 a VŘ 3 (viz. Tab. 2). Výsledkem provedených experimentů uvedených v Tab. 3 jsou grafy popisující otáčky, teploty a teplotní deformace v ose Z jednotlivých vřeten.



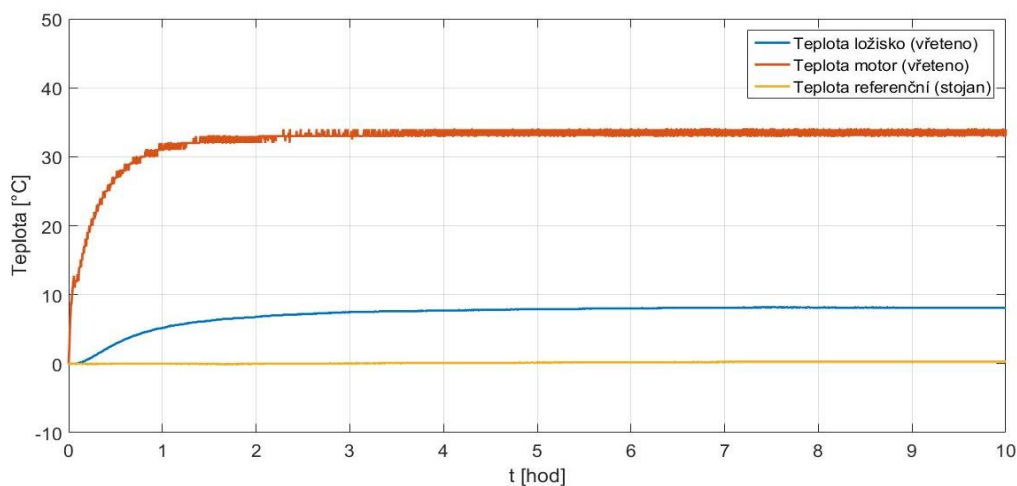
4.1.1 Vřeteno 1

Na Obr. 14 je znázorněn průběh otáček během kalibrace VŘ 1 při konstantních otáčkách 8000 ot. /min.



Obr. 14: Kalibrace VŘ 1 - průběh otáček.

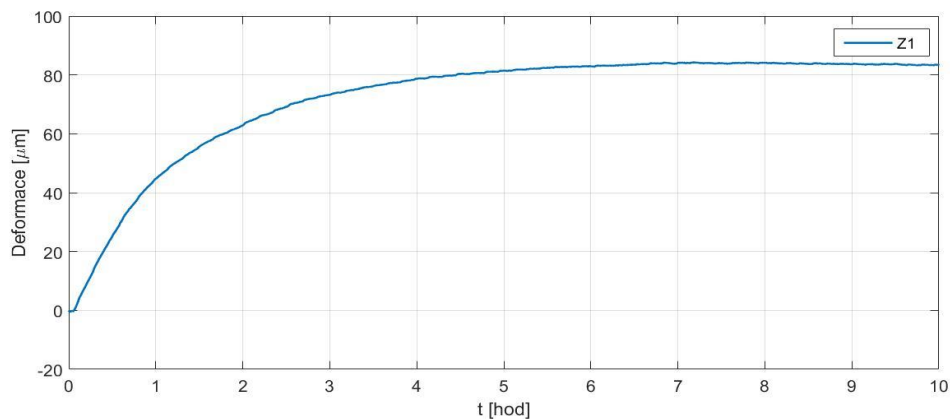
Na Obr. 15 lze vidět postupné dosažení rovnovážného teplotního stavu ložiska a motoru, kdy počáteční teplotní strmý růst je způsoben skokovým nárůstem otáček.



Obr. 15: Kalibrace VŘ 1 - průběh teplot.

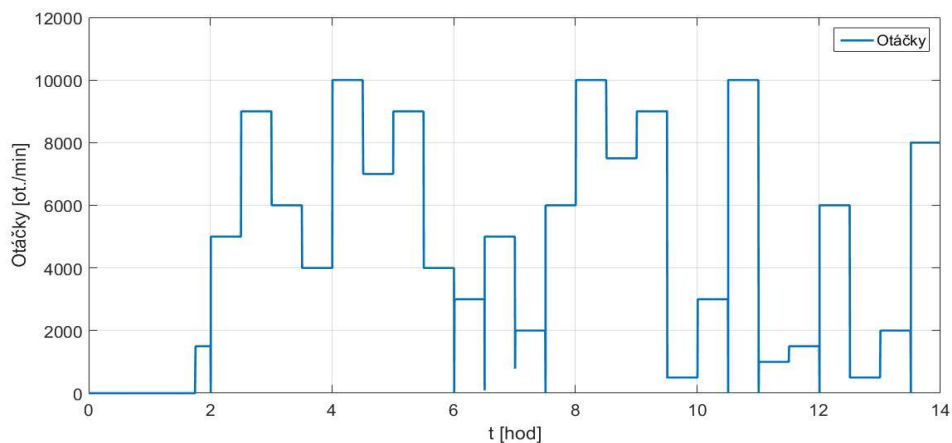


Na Obr. 16 je znázorněna deformační odezva rámu stroje v ose Z způsobená teplotním ovlivněním rotace vřetena frézovacího centra.

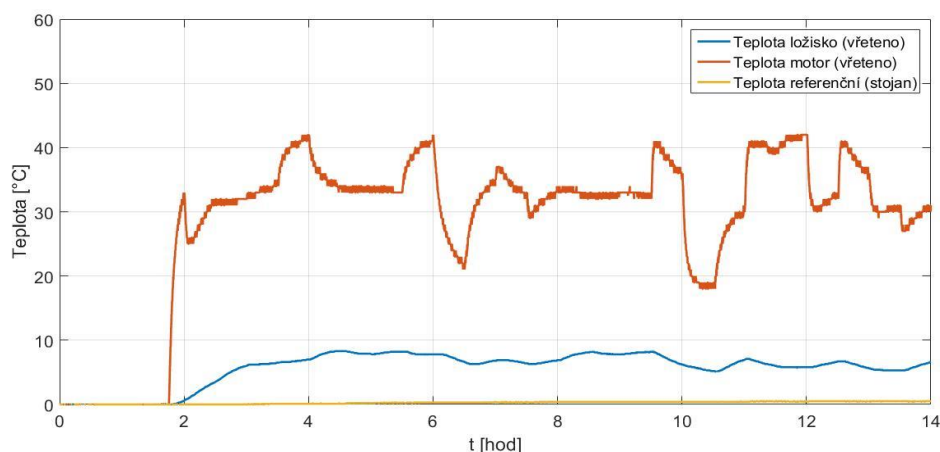


Obr. 16: Kalibrace VŘ 1 - průběh deformací do osy Z.

Verifikační experiment VŘ 1 je graficky znázorněn na Obr. 17. Z grafu lze vyčíst průběh otáček v konkrétním čase. Na Obr. 18 lze vidět průběh teplot ložiska a motoru. Průběh teplot kolísá vlivem otáčkového spektra.

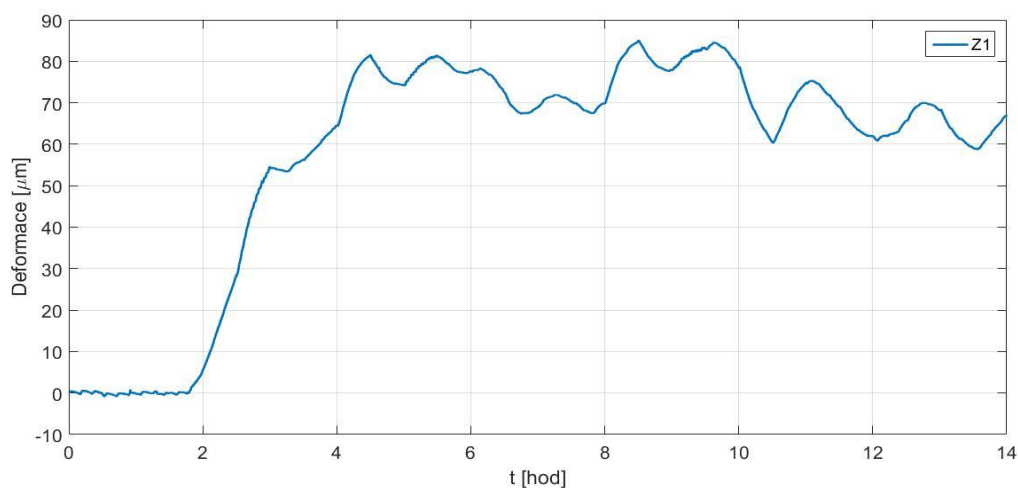


Obr. 17: Verifikace VŘ 1 - průběh otáček.



Obr. 18: Verifikace VŘ 1 - průběh teplot.

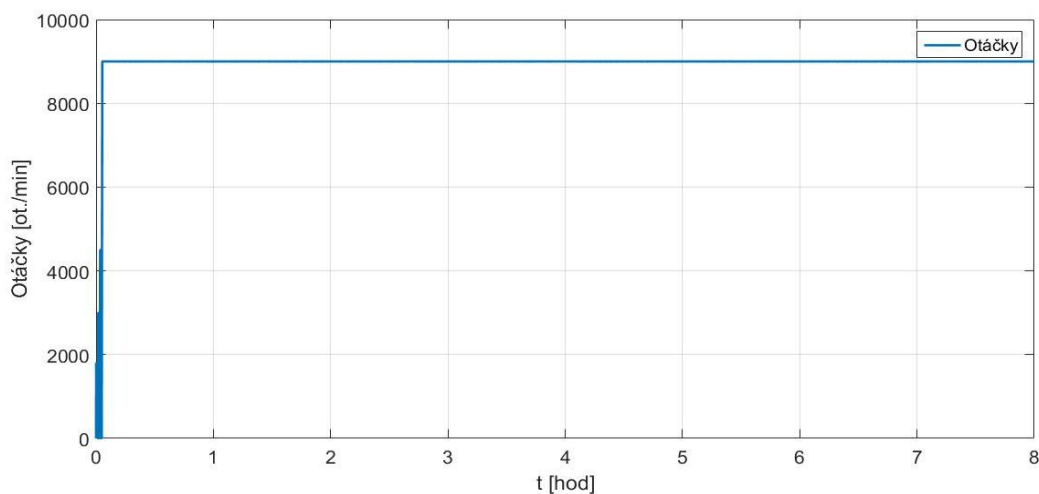
Obr. 19 zobrazuje průběh deformací do osy Z.



Obr. 19: Verifikace VŘ 1 - průběh deformací do osy Z.

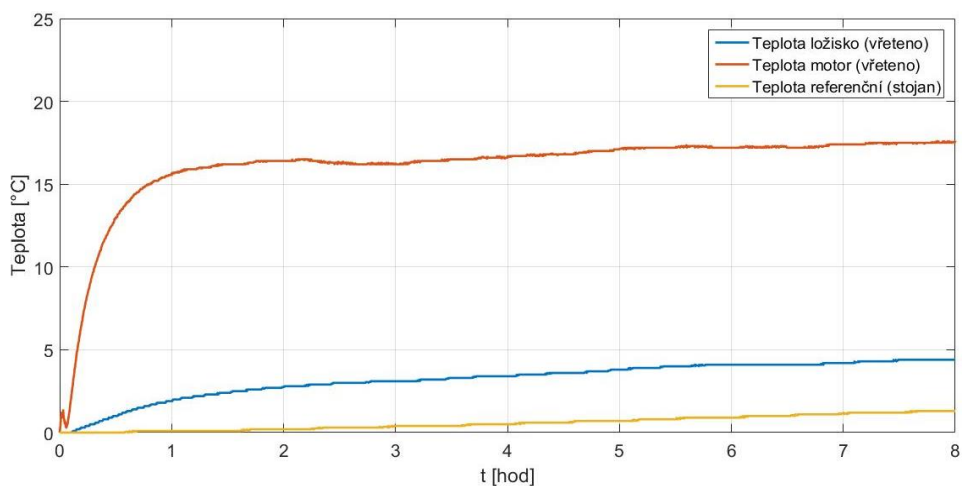
4.1.2 Vřeteno 2

Na Obr. 20 je znázorněn průběh otáček během kalibrace VŘ 2 při konstantních otáčkách 9000 ot. /min.



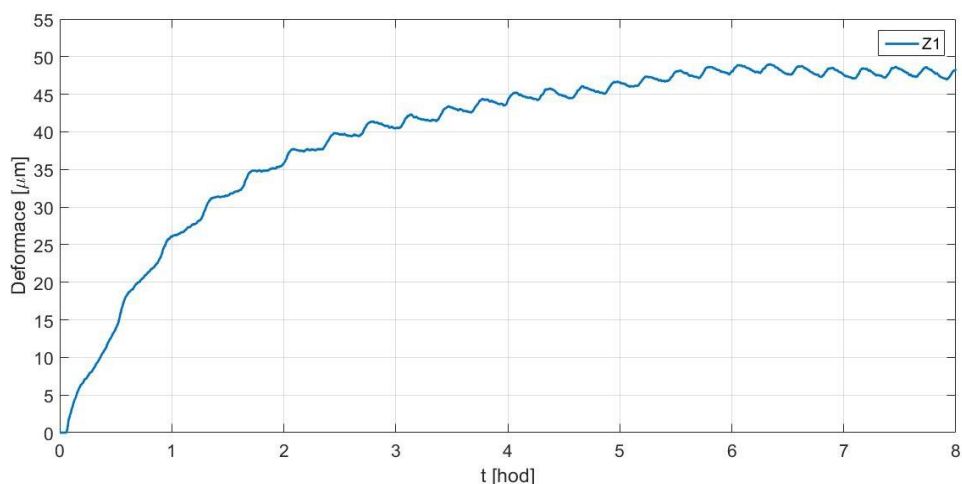
Obr. 20: Kalibrace VŘ 2 - průběh otáček.

Na Obr. 21 je zobrazen průběh teplot kalibrace pro VŘ 2. Z průběhu referenční teploty (žlutá křivka) lze usoudit, že pro kvalitní aproximaci bude vhodné do matematického aparátu uvažovat i vliv od okolní teploty.

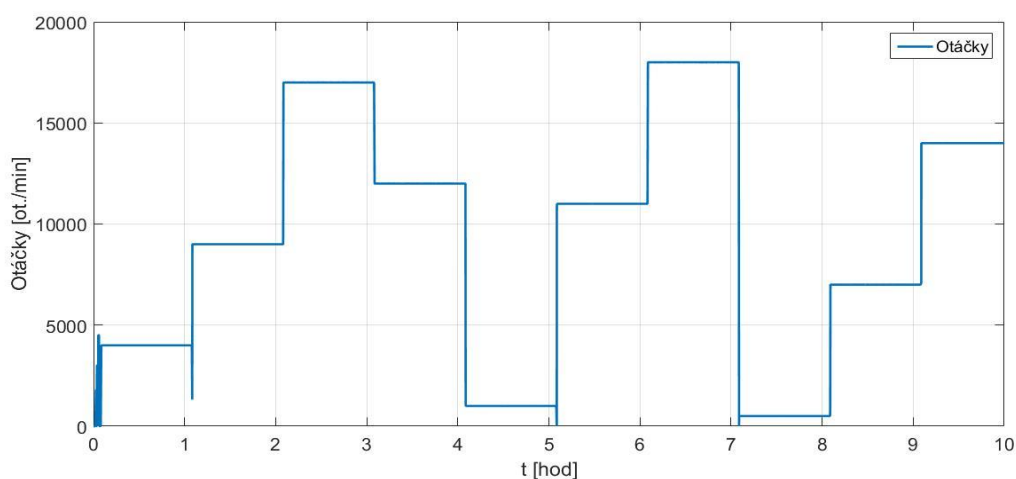


Obr. 21: Kalibrace VŘ 2 - průběh teplot.

Na Obr. 22 je znázorněna deformační odezva v ose Z pro kalibraci VŘ 2 a na Obr. 23 je vidět spektrum otáček pro verifikační experiment VŘ 2.

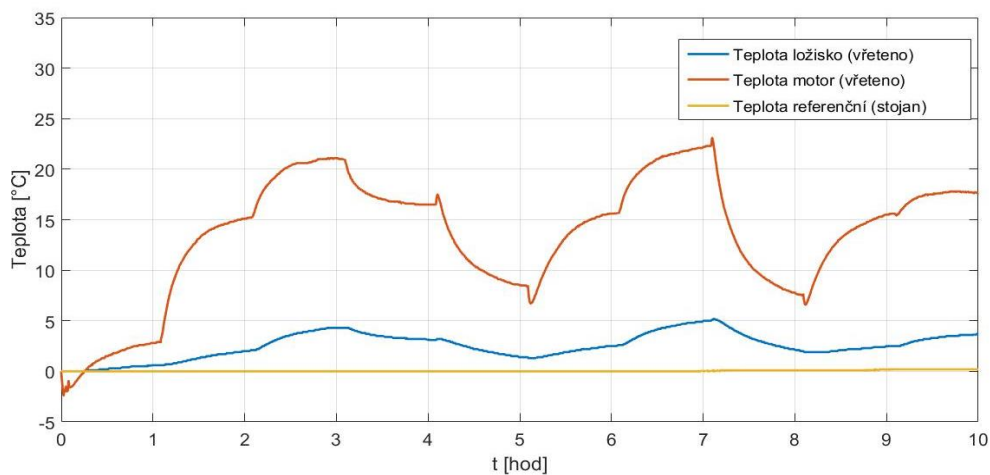


Obr. 22: Kalibrace VŘ 2 - průběh deformací do osy Z.

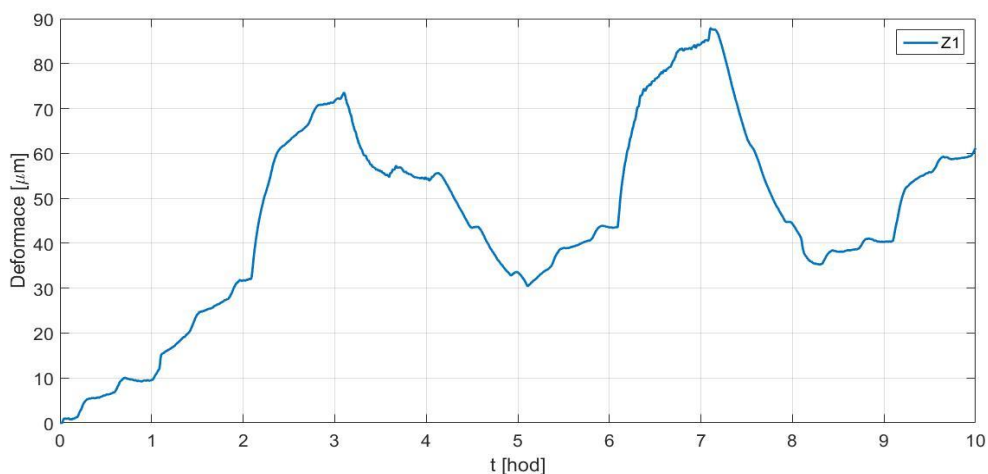


Obr. 23: Verifikace VŘ 2 - průběh otáček.

Obr. 24 ukazuje průběhy teplot během verifikačního experimentu u VŘ 2. Obr. 25 ukazuje deformační odezvu v ose Z pro verifikaci VŘ 2.



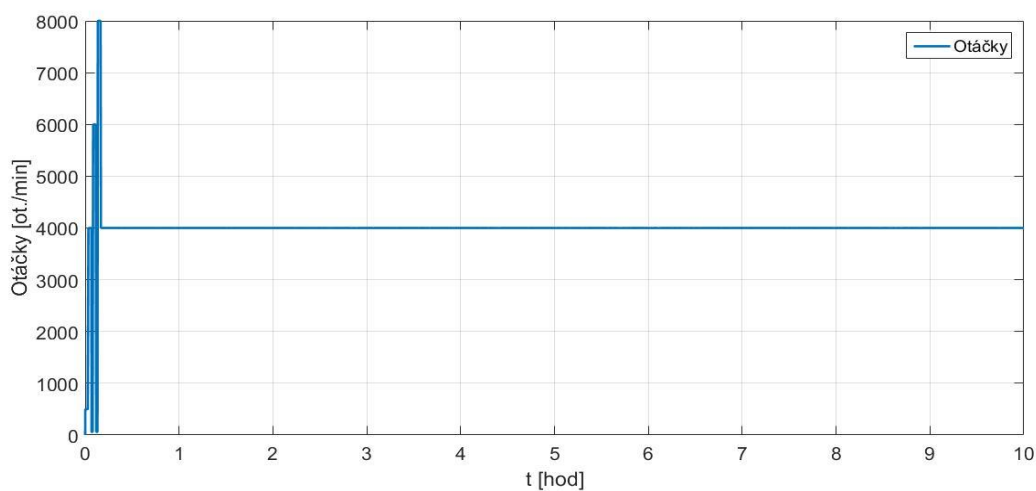
Obr. 24: Verifikace VŘ 2 - průběh teplot



Obr. 25: Verifikace VŘ 2 - průběh deformací do osy Z.

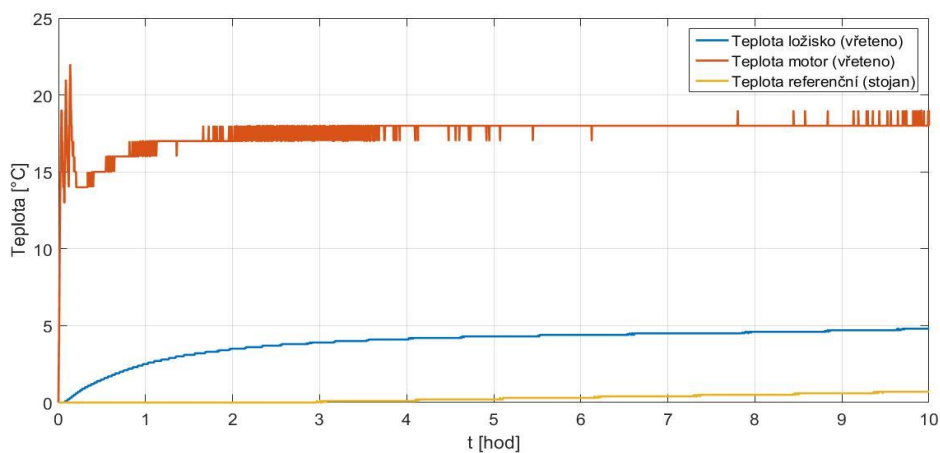
4.1.3 Vřeteno 3

Na Obr. 26 je znázorněn graf průběhu otáček při kalibraci VŘ 3.

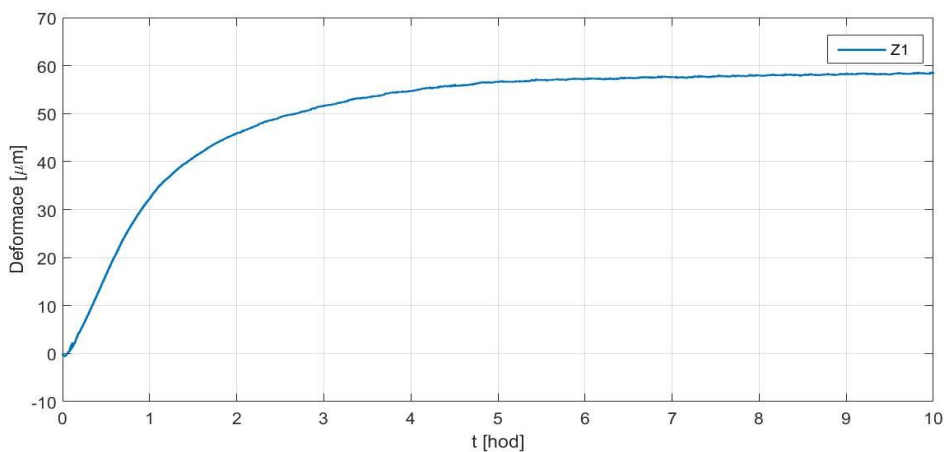


Obr. 26: Kalibrace VŘ 3 - průběh otáček.

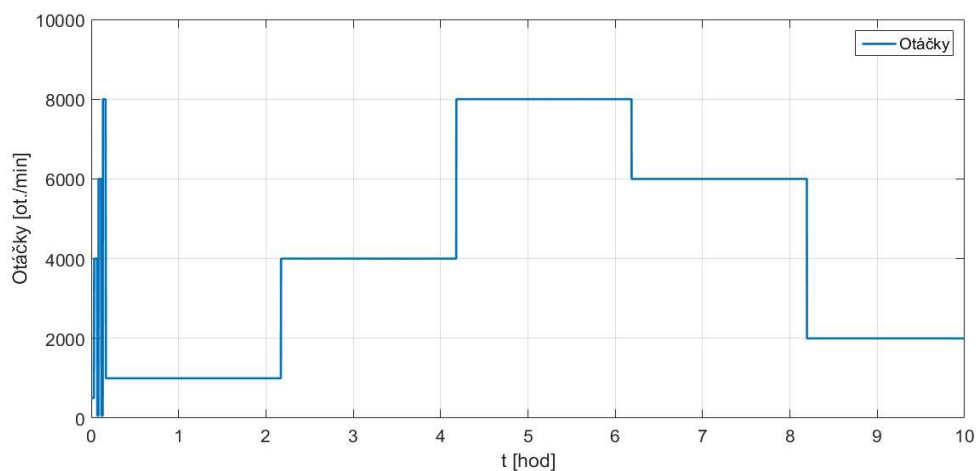
Na Obr. 27 je znázorněn průběh teplot kalibrace VŘ 3. Z průběhu referenční teploty je patrné, že by bylo potřeba vliv okolí stroje zvažovat při tvorbě kompenzačního aparátu. Obr. 28 představuje deformační odezvu rámu stroje při kalibraci VŘ 3. Dále na Obr. 29 je znázorněno spektrum otáček při verifikačním experimentu VŘ 3.



Obr. 27: Kalibrace VŘ 3 - průběh teplot.



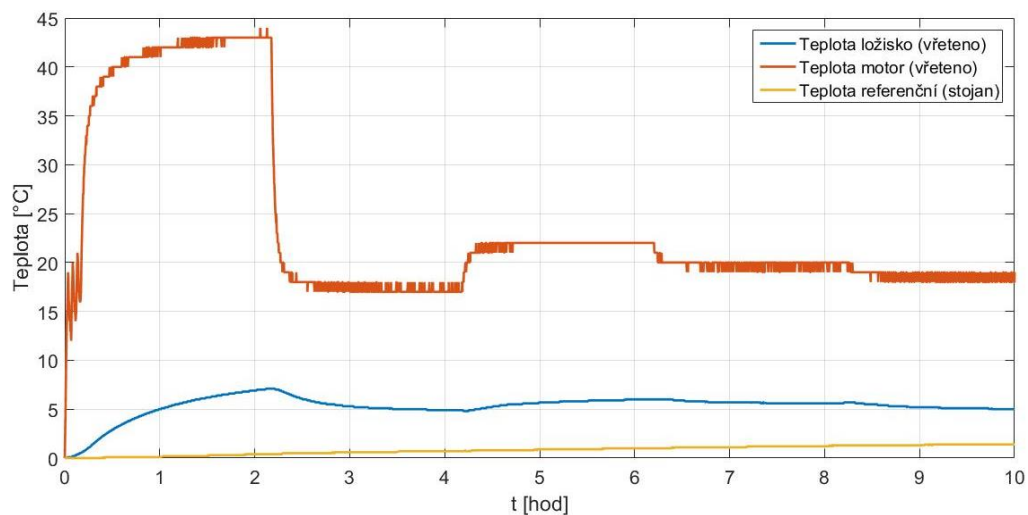
Obr. 28: Kalibrace VŘ 3 - průběh deformací do osy Z.



Obr. 29: Verifikace VŘ 3 - průběh otáček.

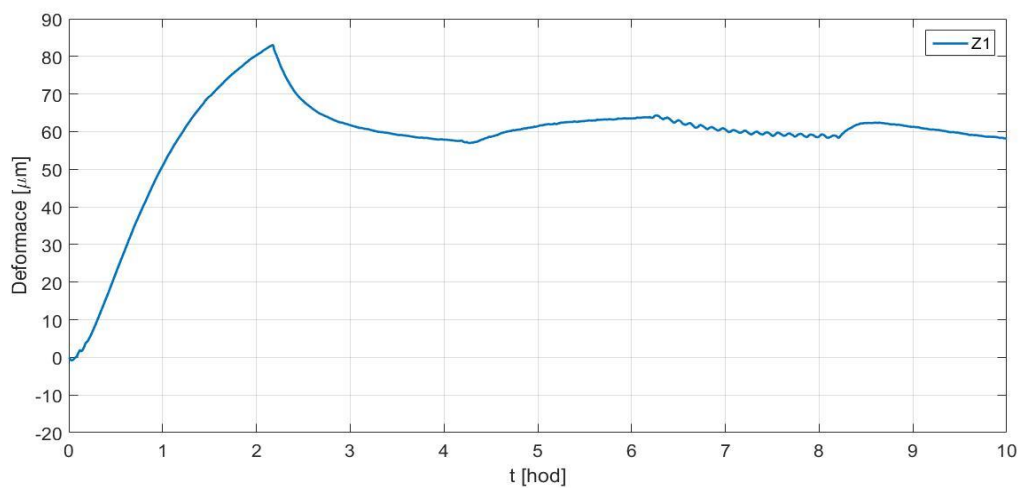


Obr. 30 ukazuje, jakým způsobem se v průběhu času při verifikaci VŘ 3 vyvíjely průběhy teplot.



Obr. 30: Verifikace VŘ 3 - průběh teplot.

Obr. 31 představuje deformační odezvu rámu stroje na tepelné působení VŘ 3 při verifikačním experimentu.



Obr. 31: Verifikace VŘ 3 - průběh deformací do osy Z.



5 Matematický aparát

Na půdě ČVUT v Praze (RCMT) jsou již delší dobu vyvíjeny pokročilé SW teplotní kompenzace na principu přenosových funkcí [3]. Z důvodu toho, že tento typ kompenzace se velice dobře ujal, především z hlediska časové náročnosti a kvality aproximace, bude PF využita i v řešení bakalářské práce jako vhodný matematický aparát. Výhody a použití PF již byly zmíněny v odstavci 3.6.4.

5.1 Odhad parametrů a použití PF

Pro odhad parametrů PF jsou použity lineární parametrické modely ARX a OE (oba jsou speciálními případy autoregresivního modelu ARMAX). Pro odhad parametrů PF jednou ze zmíněných metod je s výhodou použit program Matlab (verze R2017a), resp. *System Identification Toolbox* [28]. Program Matlab je využit i pro veškeré výpočty a grafické experty interpretace naměřených a simulovaných dat této bakalářské práce.

Tyto metody odhadu parametrů umožňují stanovit koeficienty PF ve tvaru podílu polynomů libovolného řádu z průběhu posloupnosti změřených hodnot vstupu u a výstupu y . Metody předpokládají diskrétní měření signálů (s určitou vzorkovací frekvencí), čímž se získají odpovídající si číselné posloupnosti hodnot [7].

Výsledná PF s odhadnutými parametry metodou ARX nebo OE má v obecném zápisu v časové oblasti následující tvar:

$$y(t) = \varepsilon \cdot u(t) + e(t) \quad (2)$$

PF z rovnice (2) lze rozepsat ve tvaru podílu polynomů:

$$Z(y(t)) = \frac{a_n z^{-n} + \dots + a_1 z^{-1} + a_0 z^0}{b_m z^{-m} + \dots + b_1 z^{-n} + b_0 z^0} \cdot Z(u(t)); \text{ kde } m > n, \quad (3)$$

kde odchylka $e(t)$ je nadále zanedbána.

Po nahrazení komplexní proměnné časovým zpožděním vzorkovací frekvence a vyjádřením hledané výstupní hodnoty teplotně mechanického systému, lze diferenční formu PF v diskrétní časové oblasti zavést rovnicí (4).



$$y(k) = \frac{u(k-n)a_n + \dots + u(k-1)a_1 + u(k)a_0 - y(k-m)b_m - \dots - y(k-1)b_1}{b_0}, \quad (4)$$

kde $k-n$ ($k-m$) znamená n – násobné (m – násobné) zpoždění ve vzorkovací frekvence. Forma PF z rovnice (4) je vhodná pro praktické výpočty v programu Matlab a přehledná pro práci s naměřenými diskrétními vstupy [11], [27].

5.2 Vyhodnocení kvality aproximace

Chyba aproximace je vyjádřena tzv. residuem. To představuje teplotní posunutí na špičce nástroje ve směru osy Z získané po aplikaci kompenzačního algoritmu.

Jedná se o rozdíl naměřených teplotních deformací v nekompenzovaném stavu a simulovaných teplotních deformací aproximačním modelem vyjádřených vztahem:

$$residuum = \delta_{Z-EXP} - \delta_{Z-SIM}, \quad (5)$$

kde hodnota δ_{Z-EXP} znamená měřený výstup (deformace ve směru osy Z) a δ_{Z-SIM} je simulovaná (predikovaná) teplotní deformace vyjádřená PF modelem.

Pro vyhodnocení kvality aproximace simulovaných průběhů vůči naměřeným hodnotám jsou v práci využity dvě metody [7], [11], [27]:

- *fit* (metoda na základě nejmenších čtverců, kde 100 % = úplná shoda modelu a naměřených hodnot) poskytující globální pohled na kvalitu aproximace:

$$fit = \left(1 - \frac{\|Y - Y_{HAT}\|}{\|Y - \bar{Y}\|}\right) \cdot 100 \quad (6)$$

Zde použitá norma matematického objektu z rovnice (6) má smysl délky n -rozměrného vektoru $x_n = (x_1, x_2, \dots, x_n)$:

$$\|x\| = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2} \quad (7)$$

- *peak to peak* (označena Δpk). Metoda dává do poměru rozdíl minima a maxima zkoumaného průběhu. Poskytuje informaci o lokální aproximační kvalitě:

$$\Delta pk = 100 - \left(\frac{100}{|\max(Y) - \min(Y)|}\right) \cdot |\max(residuum) - \min(residuum)| \quad (8)$$



6 Aproximační modely teplotních chyb

Vlastní řešení bakalářské práce spočívá v analýze vzájemných vazeb teplotně mechanického chování změřených vřetenových jednotek. K této analýze byl zvolen tříbodový postup (označen jako úloha A, B, C) shrnutý v Tab. 4. Výsledkem je zhodnocení tvorby kompenzačního aparátu z pohledu kalibrační a modelovací časové náročnosti.

Tab. 4: Přehled a význam úloh.

označení úlohy	popis	Poznámka
A	PF model z vřetena 1 bude aplikován na ověřovací experimenty vřeten 1, 2 a 3, s následným vyhodnocením kvality aproximace.	Nutná pouze kalibrace a verifikace vřetena 1.
B	Aplikace zesílení PF modelu z vřetena 1 na ověřovací experimenty vřeten 2 a 3, vyhodnocení kvality aproximace.	Nutná pouze kalibrace vřetena 1 a verifikační měření vřeten 1, 2 a 3.
C	Autonomní PF modely pro vřetena 1, 2 a 3 s následnou aplikací na ověřovací měření vřeten 1, 2 a 3, vyhodnocení kvality aproximace	Nutná kalibrace a verifikace všech vřeten.

6.1 Popis teplotně mechanických modelů

Vřetenová jednotka disponuje dvěma hlavními zdroji tepla během svého provozu:

- Teplo od ložisek vřetena
- Teplo od motoru vřetena

Dále jsou zkoumány a porovnány oba vstupy (od ložisek a motoru vřetena) na kvalitu aproximace PF modelů.

Pro teplotně-deformační model se vstupem od teploty ložisek vřetena je zavedena obecná rovnice:

$$\delta = \Delta T_{LOZ} \cdot \varepsilon_i, \quad (9)$$

kde ΔT_{LOZ} je změna teploty ložiska vřetena v relativních souřadnicích (teplota je na vstupu do PF vynulována z důvodu zamezení nežádoucích počátečních podmínek).

Analogicky platí rovnice i pro teplotně-deformační model se vstupem od teploty motoru vřetena:

$$\delta = \Delta T_{MOT} \cdot \varepsilon_i, \quad (10)$$



kde ΔT_{MOT} je změna teploty motoru vřetena v relativních souřadnicích, ε_i v rovnicích (9) a (10) představuje přenosovou funkci aproximující teplotní chyby v důsledku rotace vřetena a δ označuje deformaci v ose Z. Tyto obecné rovnice najdou své uplatnění v úlohách A a C.

Pro úlohu B je navržena aplikace zesílení přenosové funkce koeficientem zesílení g_i . Tímto způsobem je možné rovnici (10) pro teplotně-deformační model s teplotním vstupem od ložisek vřetena zapsat ve tvaru rovnice (11).

$$\delta = \Delta T_{LOZ} \cdot \varepsilon_i \cdot g_i \quad (11)$$

Analogicky je možné přepsat rovnici (11) s teplotním vstupem od motoru vřetena do rovnice (12):

$$\delta = \Delta T_{MOT} \cdot \varepsilon_i \cdot g_i \quad (12)$$

Získání koeficientu zesílení g_i je navrženo experimentálním odhadem. Experimentální odhad koeficientu zesílení je vyjádřen rovnicí (13).

$$g_i = \frac{peak_Z1}{peak_simul_Z1} \quad (13)$$

kde $peak_Z1$ je nejvyšší hodnota naměřené deformace a $peak_simul_Z1$ je nejvyšší hodnota simulované deformace.

6.2 Úloha A

V této úloze je aplikována PF získaná z kalibrace VŘ 1 na ověřovací experimenty VŘ 1, VŘ 2 a VŘ 3 bez dalších úprav. Jedná se o navrženou úlohu s minimálními nároky na kalibraci a modelování.

6.2.1 Kalibrační experiment VŘ 1 - identifikace PF

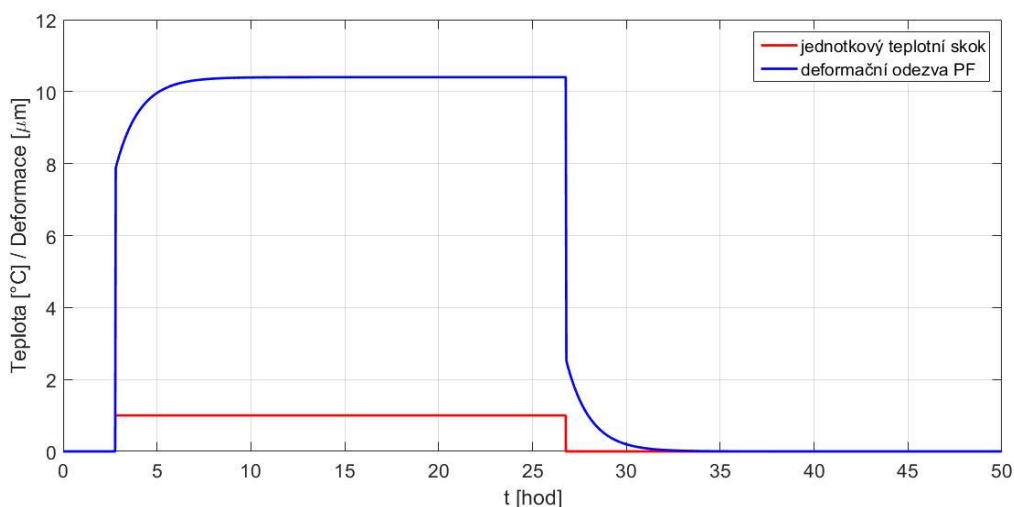
Před samotnou aplikací PF na verifikační experimenty vřeten je nutné provést identifikaci systému. Teplotní vstupy a deformační výstup naměřené během kalibrace VŘ 1 jsou uvedeny na Obr. 15 a Obr.16. Identifikace systému spočívá v odhadu řádů čitatele a jmenovatele přenosové funkce a aplikaci metod ARX a OE k odhadu koeficientů PF. Stabilita odhadnuté PF je kontrolována odezvou systému



na jednotkový skok budící veličiny. Pro odhad koeficientů PF a její stability byl využit skript v softwarovém prostředí Matlab uvedený v příloze č. 1 poskytnutý vedoucím práce.

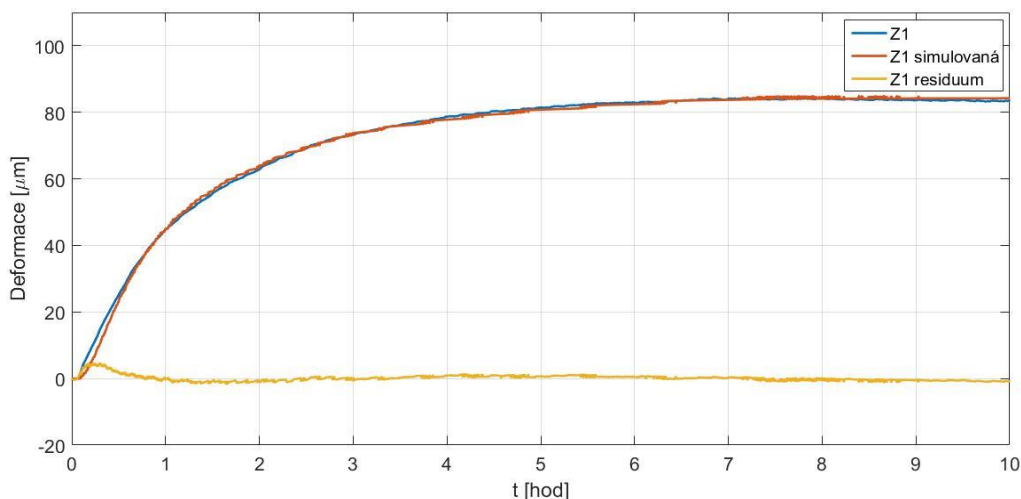
Experimentálně bylo zjištěno, že pro odhad přenosové funkce VŘ 1 je výhodnější použít parametrický model OE z důvodu lepší kvality aproximace oproti modelu ARX.

Na Obr. 32 je znázorněna kontrola stability přenosové funkce. Dá se říci, že se jedná o stabilní funkci nižšího řádu bez kmitavého průběhu.



Obr. 32: Deformační odezva PF VŘ 1 ložiska na jednotkový teplotní skok.

Na Obr. 33 je znázorněna identifikace pro model ložiska VŘ 1. Na uvedeném grafu je popsána skutečná naměřená deformace $Z1$, deformace simulovaná $Z1$ a residuum $Z1$ znázorňující kvalitu kompenzace teplotní chyby. Koeficienty PF jsou uvedeny v Tab. 6 na konci odstavce.



Obr. 33: Kalibrace VŘ 1, model ložiska – graf naměřené a simulované deformace včetně residua.



Teplotně-deformační model s teplotním vstupem od ložisek VŘ 1 je uveden v následující rovnici:

$$\delta_Z = \Delta T_{1_LOZ} \cdot \varepsilon_{1_LOZ}, \quad (14)$$

kde ΔT_{1_LOZ} je teplota ložisek VŘ 1 v relativních souřadnicích a ε_{1_LOZ} je PF získaná identifikací z kalibračního měření (Obr. 33).

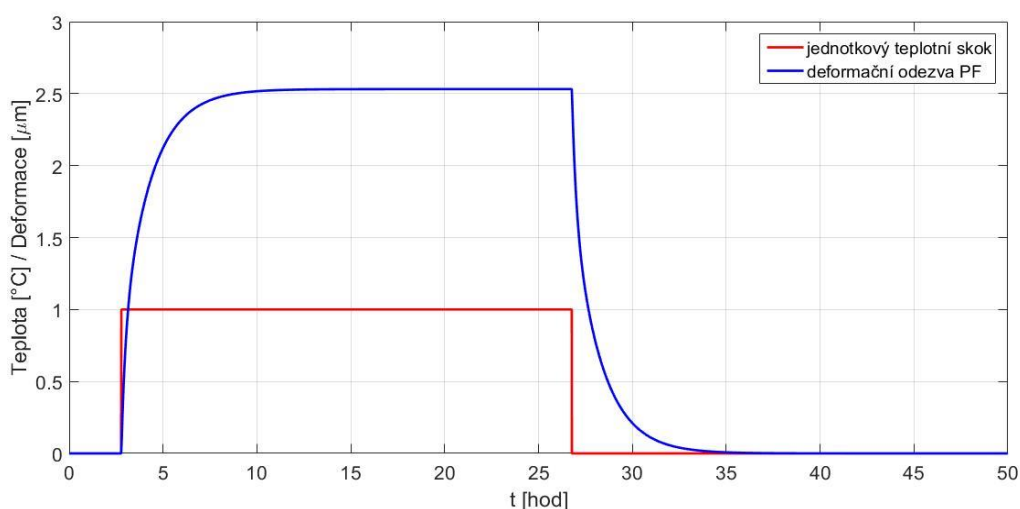
Vyhodnocení kvality aproximace pro teplotně-deformační model se vstupem od teploty ložisek VŘ 1 je uvedeno tabulce Tab. 5.

Tab. 5: Vyhodnocení kalibrace VŘ 1, model se vstupem od teploty ložisek.

osa	fit [%]	Δpk [μm]	
		před kompenzací	po kompenzací
Z	95	85	6

Stejný postup jako u teplotně-deformačního modelu se vstupem od teploty ložisek je proveden i pro teplotně-deformační model se vstupem od teploty motoru vřetena.

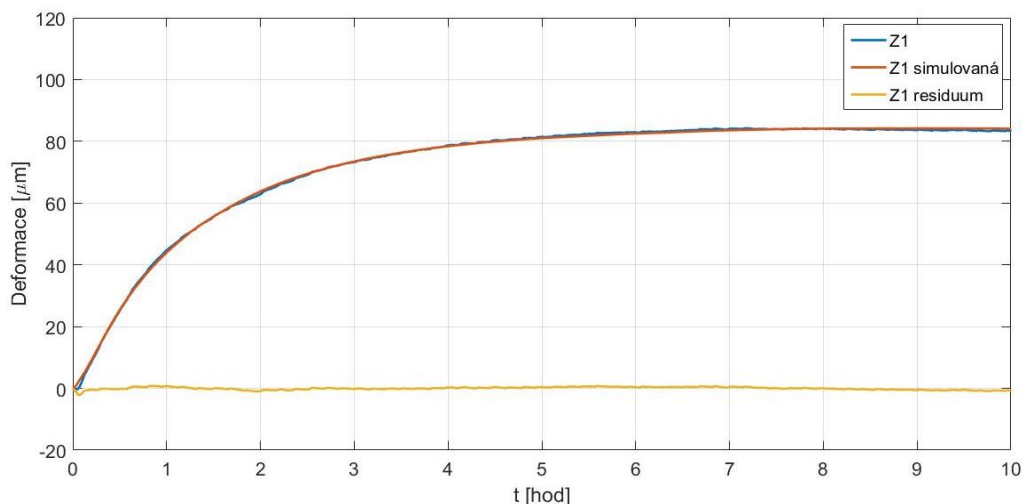
Obr. 34 znázorňuje kontrolu stability přenosové funkce pomocí jednotkového teplotního skoku. PF lze považovat za stabilní. Řád polynomů a metoda odhadu koeficientů PF je shodná modelu s teplotním vstupem od ložisek vřetena.



Obr. 34: Deformační odezva PF motoru VŘ 1 na jednotkový teplotní skok.



Na Obr. 35 jsou znázorněny křivky kalibrace a identifikace pro model s teplotním vstupem od motoru vřetena.



Obr. 35: Kalibrace VŘ 1, model motoru – graf naměřené simulované deformace včetně residua.

Aproximační model s teplotním vstupem od motoru VŘ 1 je popsán rovnicí (15):

$$\delta = \Delta T_{1_MOT} \cdot \varepsilon_{1_MOT}, \quad (15)$$

kde ΔT_{1_MOT} je teplota motoru VŘ 1 v relativních souřadnicích a ε_{1_MOT} je PF získaná identifikací z kalibračního měření (viz Obr. 35).

Tab. 6 udává vyhodnocení kvality aproximace pro teplotně-deformační model se vstupem od teploty motoru VŘ 1.

Tab. 6: Vyhodnocení kalibrace VŘ 1, model motoru.

osa	fit [%]	Δpk [μm]	
		před kompenzací	po kompenzací
Z	97	85	3

V Tab. 7 jsou vypsány všechny kalibrační koeficienty přenosových funkcí modelů založených na teplotních vstupech od ložisek a motoru.

Tab. 7: Kalibrační koeficienty přenosových funkcí VŘ 1.

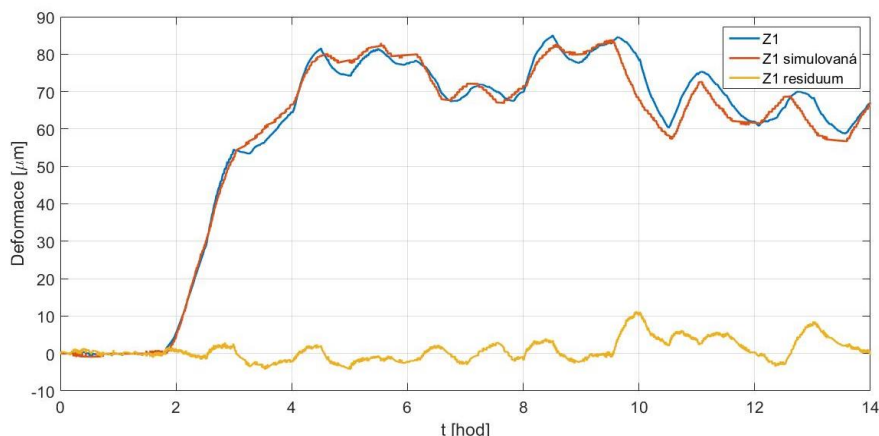
aproximace	metoda OE				
	kalibrační konstanty				
	a_0	a_1	b_0	b_1	b_2
	[$\mu m^2 \cdot ^\circ C^{-1}$]	[$\mu m^2 \cdot ^\circ C^{-1}$]	[μm]	[μm]	[μm]
ε_{1_LOZ}	3,313	-3,312	1	-1,577	0,577
ε_{1_MOT}	0,001	-0,001	1	-1,999	0,999



6.2.2 Aplikace PF modelu VŘ 1 na ověřovací experiment VŘ 1

Identifikované PF z kalibračního experimentu VŘ 1 budou aplikovány na ověřovací experiment stejného vřetena.

Aplikace modelu z rovnice (14) je znázorněna na Obr. 36, jejíž výsledkem je simulovaná deformace $Z1$. Graf dále obsahuje naměřenou deformaci a residuum.



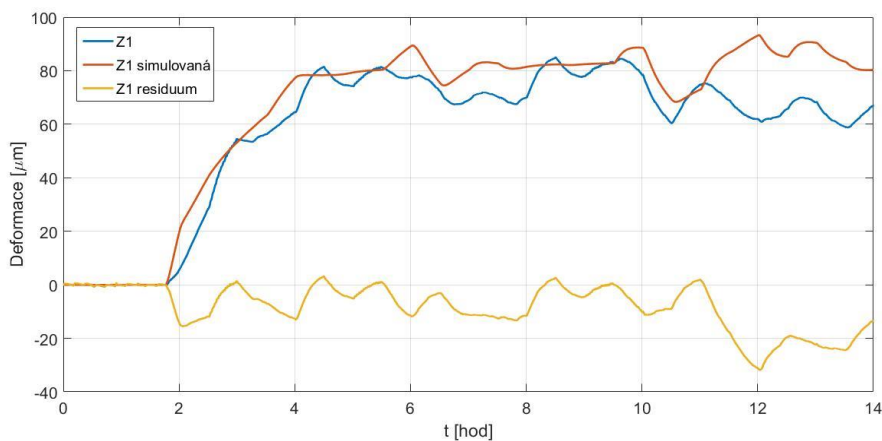
Obr. 36: Verifikace VŘ 1, model ložiska – graf naměřené a simulované deformace včetně residua.

Výsledky kvality aproximace verifikačního experimentu modelu ložiska VŘ 1 jsou shrnuty v následující tabulce Tab. 8.

Tab. 8: Vyhodnocení verifikace VŘ 1, model ložiska.

osa	fit [%]	Δpk [μm]	
		před kompenzací	po kompenzací
Z	89	86	14

Na Obr. 37 je znázorněna aplikace PF ε_{1_MOT} (rovnice (15)) na verifikaci VŘ 1.



Obr. 37: Verifikace VŘ 1, model motoru – graf naměřené a simulované deformace včetně residua.



Tab. 9 zobrazuje vyhodnocení kvality aproximace verifikačního experimentu modelu se vstupem od teploty motoru VŘ 1.

Tab. 9: Vyhodnocení verifikace VŘ 1, model motoru.

osa	fit [%]	Δpk [μm]	
		před kompenzací	po kompenzací
Z	57	86	35

Aplikací modelu se základem v PF ε_{1_MOT} (rovnice (15)) nebylo dosaženo dostatečné aproximační kvality oproti modelu se vstupem od teploty ložisek vřetena.

6.2.3 Aplikace PF modelu VŘ 1 na ověřovací experiment VŘ 2

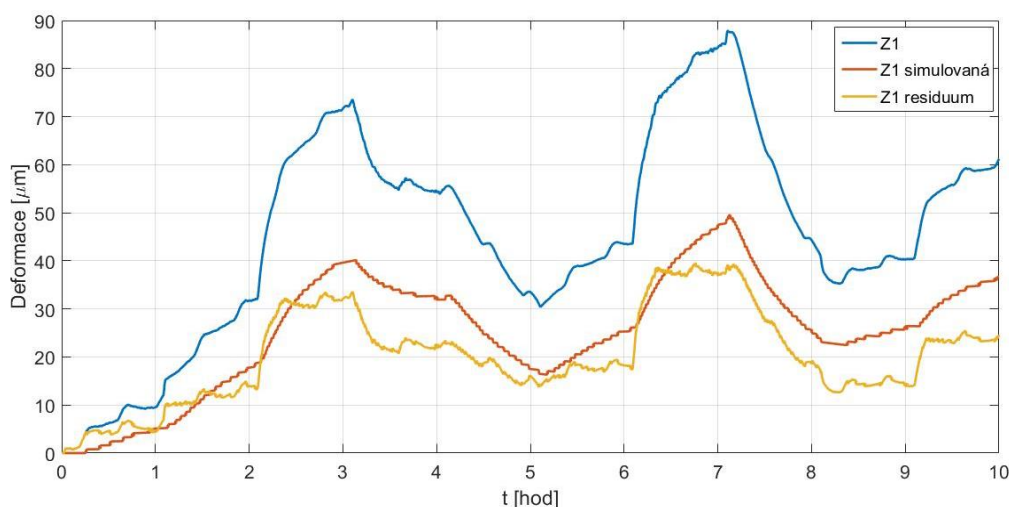
Při aplikaci na ověřovací experiment VŘ 2 (nastavení, teplotní vstupy a změřená deformační odezva viz. Obr. 20 až Obr. 22) je využito modelů z rovnice (14) a (15).

Teplotně-deformační model se vstupem od teploty ložisek VŘ 2 je přepisem rovnice (14) dán vztahem:

$$\delta_Z = \Delta T_{2_LOZ} \cdot \varepsilon_{1_LOZ}, \quad (16)$$

kde ΔT_{2_LOZ} je teplota ložiska VŘ 2 v relativních souřadnicích.

Obr. 38 ukazuje aplikaci PF ε_{1_LOZ} na verifikační experiment modelu s teplotním vstupem od ložiska VŘ 2.



Obr. 38: Verifikace VŘ 2, model ložiska – graf naměřené a simulované deformace včetně residua.



V Tab. 10 je uvedeno vyhodnocení kvality aproximace verifikačního experimentu modelu ložiska VŘ 2.

Tab. 10: Vyhodnocení verifikace VŘ 2, model ložiska.

osa	fit [%]	Δpk [μm]	
		před kompenzací	po kompenzací
Z	0	88	40

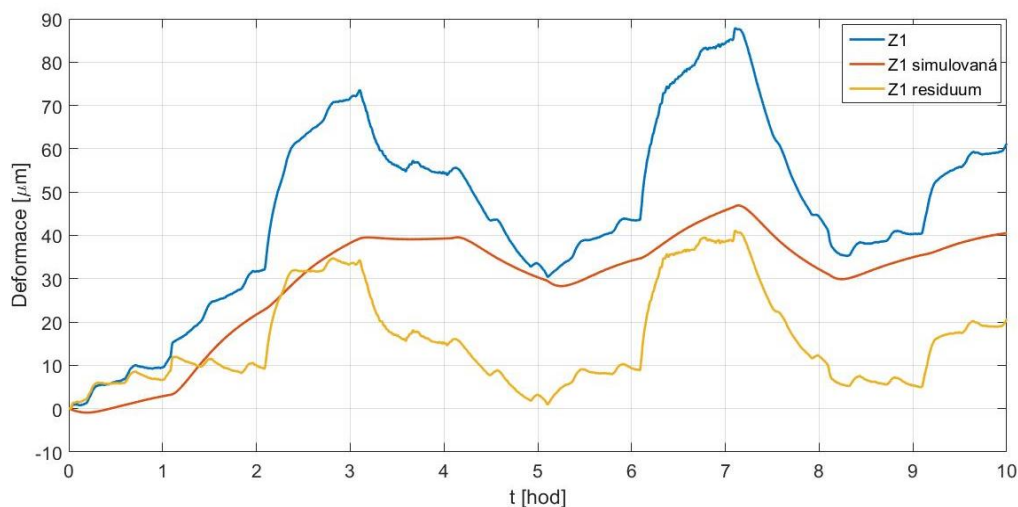
Aproximaci lze vyhodnotit jako nevyhovující.

Teplotně-deformační model se vstupem od teploty motoru VŘ 2 lze zapsat přepisem rovnice (15) do následujícího tvaru:

$$\delta = \Delta T_{2_MOT} \cdot \varepsilon_{1_MOT}, \quad (17)$$

kde ΔT_{2_MOT} je teplota motoru VŘ 2 vyjádřená v relativních souřadnicích.

Na Obr. 39 je znázorněna aplikace rovnice (17) na verifikační experiment VŘ 2.



Obr. 39: Verifikace VŘ 2, model motoru – graf naměřené a simulované deformace včetně residua.

V Tab. 11 je uvedeno vyhodnocení kvality aproximace verifikačního experimentu modelu motoru VŘ 2.

Tab. 11: Vyhodnocení verifikace VŘ 2, model motoru.

osa	fit [%]	Δpk [μm]	
		před kompenzací	po kompenzací
Z	8	88	41

Výsledek aplikace neprokázal dobrou kvalitu proložení skutečné naměřené deformace deformací simulovanou.



6.2.4 Aplikace PF modelu VŘ 1 na ověřovací experiment VŘ 3

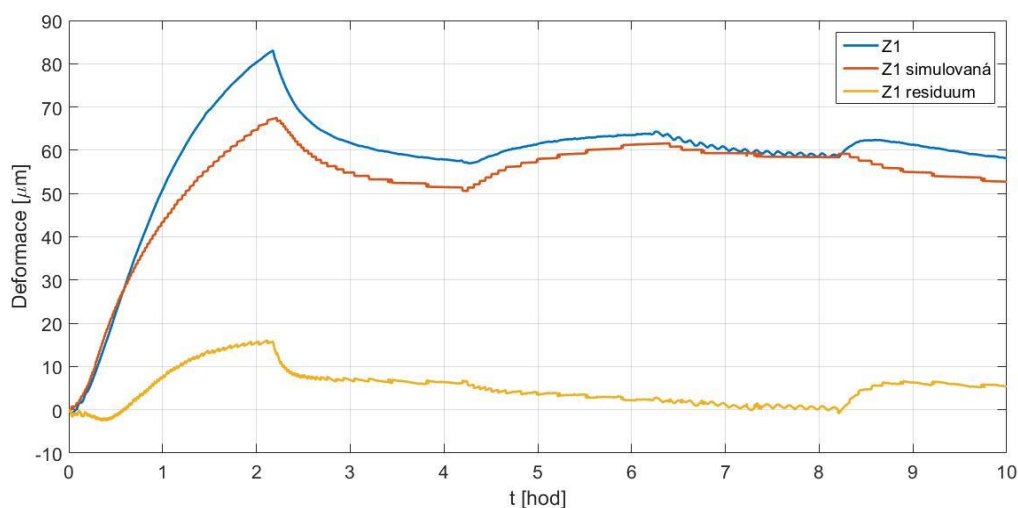
Při aplikaci na ověřovací experimenty VŘ 3 jsou využity opět PF identifikované během kalibrace VŘ 1 (rovnice (14) a (15)).

Teplotně-deformační model s teplotním vstupem od ložisek VŘ 3 je dán přepisem rovnice (14) ve tvaru:

$$\delta_Z = \Delta T_{3_LOZ} \cdot \varepsilon_{1_LOZ}, \quad (18)$$

kde ΔT_{3_LOZ} je změna teploty ložiska VŘ 3.

Obr. 40 ukazuje znázornění aplikace PF ε_{1_LOZ} na verifikační experiment modelu ložiska VŘ 3. Znázorněny jsou průběhy skutečné deformace $Z1$, simulované deformace $Z1$ a residua popisujícího stav po kompenzaci.



Obr. 40: Verifikace VŘ 3, model ložiska – graf naměřené a simulované deformace včetně residua.

Vyhodnocení kvality aproximace verifikačního experimentu modelu ložiska VŘ 3 je uvedeno v Tab. 12.

Tab. 12: Vyhodnocení verifikace VŘ 3, model ložiska.

osa	fit [%]	Δpk [μm]	
		před kompenzací	po kompenzací
Z	54	84	19

Ačkoliv dochází k redukci teplotních chyb, výsledky aplikace modelu VŘ 1 na ověřovací experiment VŘ 3 jsou nedostatečné.

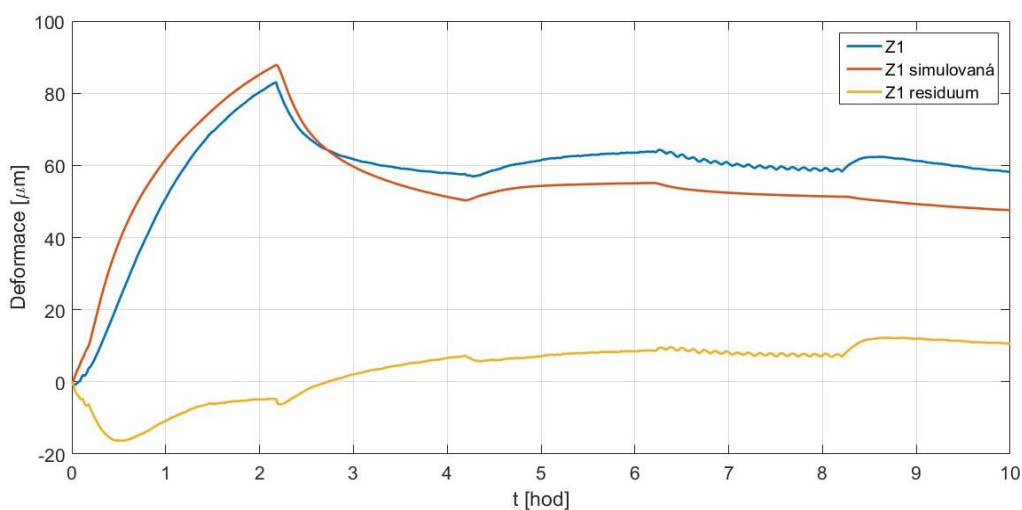


Teplotně-deformační model s teplotním vstupem od motoru VŘ 3 je pro úlohu A dán přepisem rovnice (15) do následujícího tvaru:

$$\delta = \Delta T_{3_MOT} \cdot \varepsilon_{1_MOT}, \quad (19)$$

kde ΔT_{3_MOT} je teplota motoru VŘ 3 v relativních souřadnicích.

Obr. 41 znázorňuje aplikaci PF ε_{1_MOT} na verifikační experiment VŘ 3.



Obr. 41: Verifikace VŘ 3, model motoru – graf naměřené a simulované deformace včetně residua.

Vyhodnocení kvality aproximace verifikačního experimentu modelu motoru VŘ 3 je znázorněno v Tab. 13.

Tab. 13: Vyhodnocení verifikace VŘ 3, model motoru.

osa	fit [%]	Δpk [μm]	
		před kompenzací	po kompenzací
Z	38	84	29

Výsledky aplikace modelu VŘ 1 s teplotním vstupem od motoru VŘ 3 na ověřovací experiment VŘ 3 jsou nedostatečné.

Z uvedených výsledků je zcela zřejmé, že teplotně-deformační model motoru nedokázal dostatečně aproximovat skutečné naměřené deformace. Z důvodu této skutečnosti se tak v dalším řešení nebude tento model uvažovat.



6.3 Úloha B

V úloze B proběhla aplikace zesílení na získaný PF model z kalibrace VŘ 1. Koeficienty zesílení byly získány experimentální metodou (viz. rovnice (16)). Koeficienty zesílení byly násobeny již získané simulované deformace osy Z z úlohy A.

6.3.1 Aplikace zesíleného PF modelu VŘ 1 na ověření VŘ 2

V tabulce Tab. 14 je uveden získaný koeficient zesílení VŘ 2.

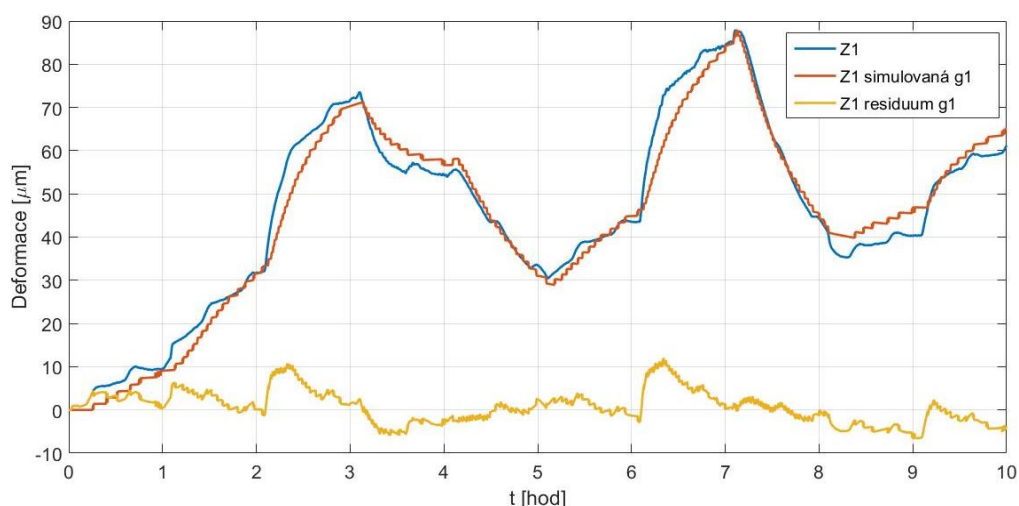
Tab. 14: Koeficient zesílení VŘ 2.

teplotní model ložiska VŘ 2	g_1	1,774
-----------------------------	-------	-------

Zesílený teplotně-deformační model se vstupem od teploty ložiska VŘ 2 je uveden rovnicí (20).

$$\delta = \Delta T_{2_LOZ} \cdot \varepsilon_{1_LOZ} \cdot g_1 \quad (20)$$

Na Obr. 42 je znázorněn průběh teplotních deformací při aplikaci zesílení pro verifikační experiment VŘ 2.



Obr. 42: Verifikace VŘ 2, aplikace zesílení na model ložiska – graf naměřené a simulované deformace včetně residua.



Vyhodnocení kvality aproximace zesíleného modelu VŘ 1 se vstupem teploty ložiska VŘ 2 je uvedeno v Tab. 15.

Tab. 15: Vyhodnocení verifikace VŘ 2, zesílený model ložiska.

osa	fit [%]	Δpk [μm]	
		před kompenzací	po kompenzací
Z	82	88	19

Aplikace dosahuje poměrně kvalitního výsledku díky vhodnému zesílení.

6.3.2 Aplikace zesíleného PF modelu VŘ 1 na ověření VŘ 3

V tabulce Tab. 16 je uveden koeficient zesílení VŘ 3.

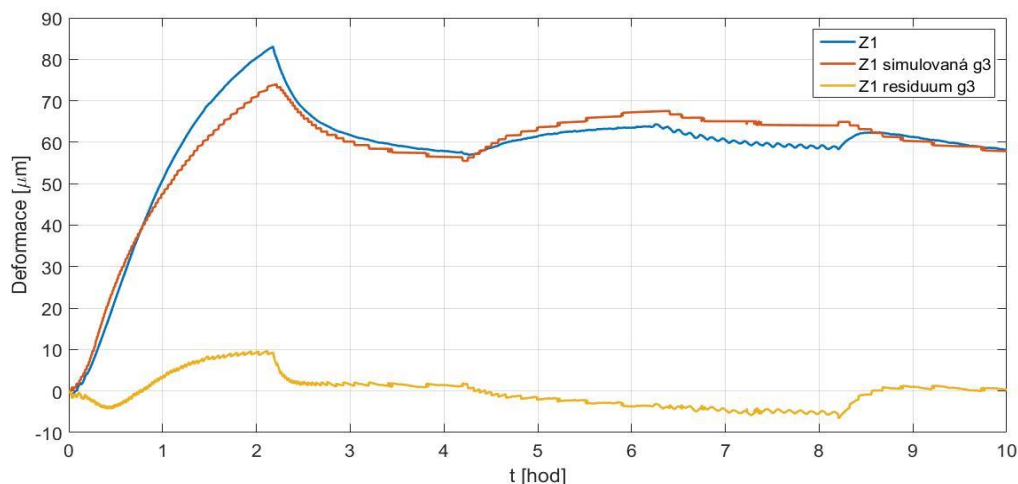
Tab. 16: Koeficient zesílení VŘ 3.

teplotní model ložiska VŘ 3	g_2	1,097
-----------------------------	-------	-------

Zesílený teplotně-deformační model VŘ 1 se vstupem od teploty ložisek VŘ 3 je uveden v rovnici (21).

$$\delta = \Delta T_{3_LOZ} \cdot \varepsilon_{1_LOZ} \cdot g_2 \quad (21)$$

Na Obr. 43 je znázorněn průběh teplotních deformací při aplikaci zesílení pro verifikační experiment modelu ložiska VŘ 3.



Obr. 43: Verifikace VŘ 3, aplikace zesílení na model ložiska – graf naměřené a simulované deformace včetně residua.



Vyhodnocení kvality aproximace zesíleného verifikačního experimentu modelu ložiska VŘ 3 je znázorněno v Tab. 17.

Tab. 17: Vyhodnocení verifikace VŘ 3, zesílený model ložiska.

osa	fit [%]	Δpk [μm]	
		před kompenzací	po kompenzací
Z	73	84	16

Aplikace dosahuje opět poměrně kvalitního výsledku díky vhodnému zesílení. Celkově z výsledků úlohy B lze konstatovat, že aplikace zesílení je vhodnou součástí teplotně-deformačního modelu se značným potenciálem v praktických aplikacích.

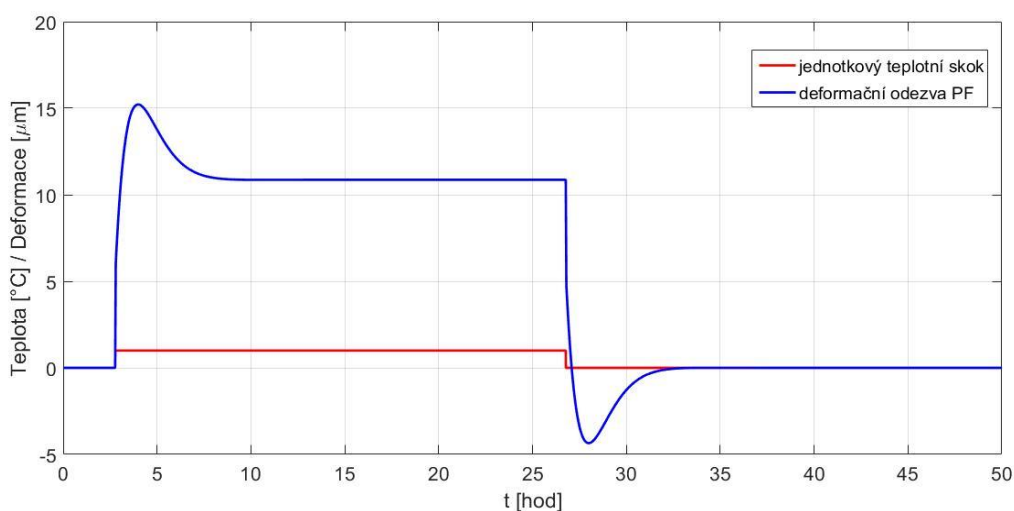
6.4 Úloha C

V této úloze jsou aplikovány nově identifikované PF VŘ 2 a VŘ 3 z příslušných kalibrací na ověřovací testy odpovídajících vřeten.

6.4.1 Kalibrační experiment VŘ 2 - identifikace PF

Experimentální metodou bylo zjištěno, že pro odhad PF VŘ 2 je výhodnější použít parametrický model ARX z důvodu lepší kvality aproximace oproti modelu OE.

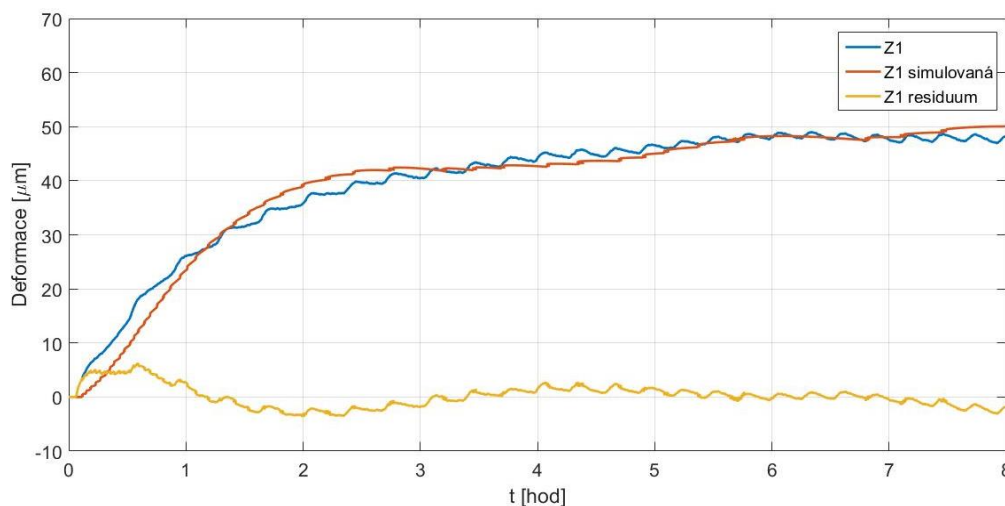
Na Obr. 44 je graficky znázorněna kontrola stability identifikované PF. Funkce se jeví jako stabilní.



Obr. 44: Deformační odezva PF ložiska VŘ 2 na jednotkový teplotní skok.



Na Obr. 45 je znázorněna kalibrace a identifikace modelu s teplotním vstupem od ložisek VŘ 2. Model teplotních kompenzací je uveden v rovnici (22). Kalibrační koeficienty PF jsou uvedeny v Tab. 18.



Obr. 45: Kalibrace VŘ 2, model ložiska – graf naměřené a simulované deformace včetně residua.

$$\delta_z = \Delta T_{2_LOZ} \cdot \varepsilon_{2_LOZ} \quad (22)$$

Tab. 18: Kalibrační koeficienty přenosové funkce VŘ 2.

aproximace	metoda ARX						
	kalibrační konstanty						
	a_0	a_1	a_2	a_3	b_0	b_1	b_2
	$[\mu\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$	$[\mu\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$	$[\mu\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$	$[\mu\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$	$[\mu\text{m}]$	$[\mu\text{m}]$	$[\mu\text{m}]$
ε_{2_LOZ}	2,5807	-3,0009	-2,2406	2,6909	1	-1,9994	0,9994

Vyhodnocení kvality aproximace kalibračního experimentu modelu ložiska VŘ 2 je uvedeno v Tab. 19.

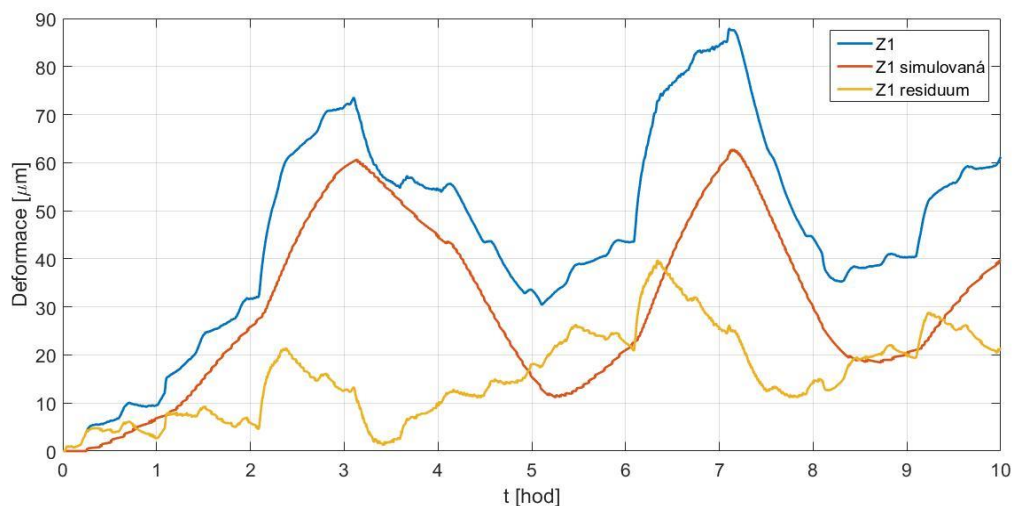
Tab. 19: Vyhodnocení kalibrace VŘ 2, model ložiska.

osa	fit [%]	Δpk [μm]	
		před kompenzací	po kompenzací
Z	82	49	10



6.4.2 Aplikace PF modelu VŘ 2 na ověřovací experiment VŘ 2

Aplikace modelu z rovnice (22) na verifikaci VŘ 2 je znázorněna na Obr. 46.



Obr. 46: Verifikace VŘ 2, model ložiska – graf naměřené a simulované deformace včetně residua.

Vyhodnocení kvality aproximace verifikačního experimentu modelu ložiska VŘ 2 je uvedeno v Tab. 20.

Tab. 20: Vyhodnocení verifikace VŘ 2, model ložiska.

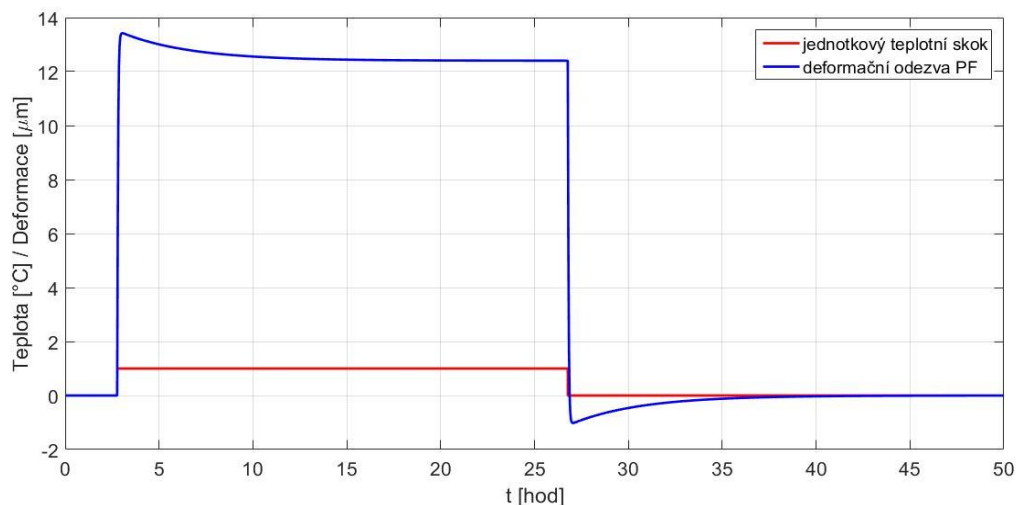
osa	fit [%]	Δpk [μm]	
		před kompenzací	po kompenzací
Z	14	88	40

Nízká aproximační kvalita je pravděpodobně způsobena zanedbáním vlivu okolního prostředí v kompenzačním modelu.

6.4.3 Kalibrační experiment VŘ 3 - identifikace PF

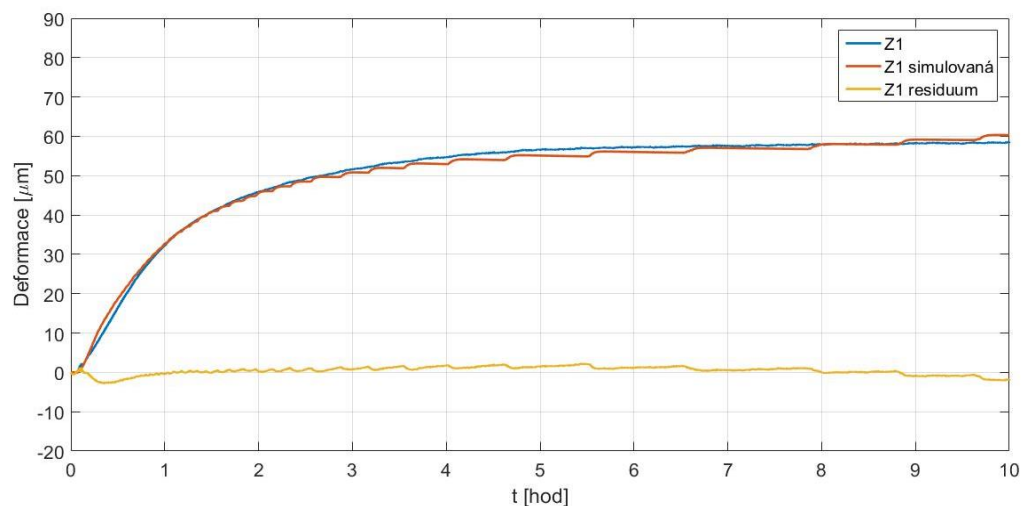
Pro odhad přenosové funkce VŘ 3 byl i tomto případě vhodnější model ARX z důvodu lepší kvality aproximace oproti modelu OE.

Obr. 47 znázorňuje kontrolu stability identifikované přenosové funkce. Z přechodové charakteristiky lze usoudit, že se jedná o funkci vyššího řádu, jelikož opět obsahuje složky překmitů a poté se ustálí do rovnovážného stavu. Přenosová funkce se projevuje stabilně.



Obr. 47: Deformační odezva PF ložiska VŘ 3 na jednotkový teplotní skok.

Obr. 48 ukazuje odezvu identifikované PF v průběhu kalibračního měření pro model s buzením od teploty ložisek VŘ 3.



Obr. 48: Kalibrace VŘ 3, model ložiska – graf naměřené a simulované deformace včetně residua.

Model teplotních kompenzací je uveden v rovnici (23).

$$\delta_Z = \Delta T_{3_LOZ} \cdot \varepsilon_{3_LOZ} \quad (23)$$

Kalibrační koeficienty identifikované PF lze nalézt v Tab. 21.



Tab. 21: Kalibrační koeficienty přenosové funkce VŘ 3.

aproximace	metoda ARX				
	kalibrační konstanty				
označení PF	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
	$[\mu\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$	$[\mu\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$	$[\mu\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$	$[\mu\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$	$[\mu\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$
ε_{3_LOZ}	0,0856	0,0639	-0,1119	-0,0375	0
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4
	$[\mu\text{m}]$	$[\mu\text{m}]$	$[\mu\text{m}]$	$[\mu\text{m}]$	$[\mu\text{m}]$
	1	-0,985	-0,3268	-0,3709	0,6827

Vyhodnocení kvality aproximace je uvedeno v tabulce Tab. 22.

Tab. 22: Vyhodnocení kalibrace VŘ 3, model ložiska.

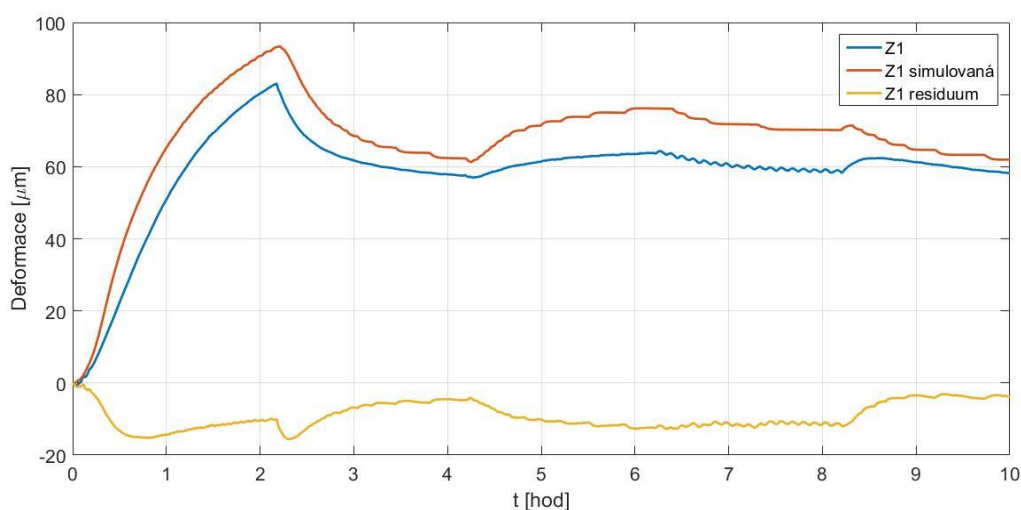
osa	fit [%]	Δpk [μm]	
		před kompenzací	po kompenzací
Z	91	59	5

Identifikovaná PF vykazuje velice dobrou aproximační kvalitu PF.

6.4.4 Aplikace PF modelu VŘ 3 na ověřovací experiment VŘ 3

Z kalibračního experimentu VŘ 3 byla získána přenosové funkce, která byla dále aplikována na ověřovací experiment VŘ 3.

Výsledek aplikace modelu z rovnice (23) je znázorněn na Obr. 49.



Obr. 49: Verifikace VŘ 3, model ložiska – graf naměřené a simulované deformace včetně residua.



Vyhodnocení kvality aproximace naměřené hodnoty modelem teplotních chyb VŘ 3 je uvedeno v tabulce Tab. 23.

Tab. 23: Vyhodnocení verifikace VŘ 3, model ložiska.

osa	fit [%]	Dpk [μm]	
		před kompenzací	po kompenzací
Z	29	84	16

Aplikací modelu se základem v PF ε_{3_LOZ} se výsledná teplotní chyba sice zredukovala, přesto je jeho aproximační kvalita nedostatečná pravděpodobně vzhledem k faktu, že model nerespektuje vliv změny okolní teploty.



7 Závěr

V teoretické části práce proběhlo seznámení s celkovou problematikou teplotních deformací OS. Byly popsány druhy nepřesností, se kterými je možné se u OS setkat, přičemž teplotní chyba hraje v jejich přesnosti výraznou roli. Dále byly rozděleny jednotlivé typy konstrukcí rámu OS, především z hlediska teplotně mechanického chování. Bylo zpracováno, jakým způsobem lze teplotní chybu minimalizovat s uvedením několika metod. Na závěr teoretické části proběhlo seznámení s měřením teplotních deformací na strojích, zúročené v praktické části práce.

V praktické části bylo popsáno uspořádání celého experimentu (nastavení jednotlivých čidel a měřicího přípravku). Dále bylo definováno, jakým způsobem budou provedeny aproximace naměřené hodnoty deformací. Popsány byly metody vyhodnocení kvality aproximace a celkový matematický aparát založený na PF, vyvíjený na půdě ČVUT. Praktické využití PF podporuje malá časová náročnost modelování a jejich dobré aproximační schopnosti teplotně-deformačních přechodových jevů. Byly definovány hlavní zdroje tepla vyskytující se ve vřetenech OS. Na základě informací z teplotních čidel umístěných v blízkosti zdrojů tepla pak vznikly aproximační modely.

Následně proběhla kalibrace trojice vřeten a aplikace identifikovaných modelů na verifikační experimenty. Struktura stroje zůstává stejná, pouze se mění jednotlivá frézovací vřetena. Byly popsány a rozděleny úlohy (A, B a C) analýzy teplotně mechanického chování struktury stroje v závislosti na změně vřetenové jednotky.

V úloze A, kdy proběhla aplikace PF modelu vřetena 1 na verifikace vřeten 1, 2 a 3 byl závěr takový, že teplotně-deformační model motoru nedokázal dostatečně přesně aproximovat naměřenou deformaci, proto se v dalších úlohách již neuvažoval. Nejlepšího výsledku v této úloze, dle očekávání, dosáhla aplikace PF na vřeteno 1, kdy pro teplotně-deformační model založený na teplotě ložisek klesla deformace z původních 86 mikrometrů na 14 mikrometrů.

V úloze B proběhlo zesílení teplotně-deformačního modelu z úlohy A a aplikace opět na verifikační testy vřeten 2 a 3. Oproti nezesílenému stavu bylo možné pozorovat zlepšení, a to pro vřeteno 2 z původních 40 na 19 mikrometrů a pro vřeteno 3 z 19 na 16.

V úloze C proběhla identifikace autonomních modelů vřeten 2 a 3 a následná aplikace na ověřovací testy příslušných vřeten. Závěrem úlohy C lze konstatovat, že pro kvalitní aproximaci nelze z modelů teplotních chyb vyloučit vliv okolního prostředí.



Pro kvalitnější hodnoty aproximací by se tak do teplotně-deformačních modelů ložiska vřeten 2 a 3 musel zahrnout i vliv okolní teploty, aby se dosáhlo robustního kompenzačního matematického modelu, což je již nad rozsahový rámec této bakalářské práce. V práci by bylo vhodné pokračovat v rámci práce diplomové v navazujícím studiu.

Z uvedených výsledků v tabulce Tab. 24 pro úlohu B vyplývá, že teplotně mechanické modely (s bází v PF a ve znalosti teploty ložisek) zkoumaných vřetenových jednotek a stejné struktury stroje mají dostatečnou lineární závislost. Zesilující koeficient modelu jediného vřeten obстойně aproximuje teplotní chyby způsobené aktivitou ostatních vřeten. Tento výsledek je z pohledu úspory modelovacího a kalibračního nároku považován za úspěšný.

Pro kvalitní aproximaci naměřených dat je ovšem nutné udělat kalibraci na každém vřetenu zvlášť a poté aplikovat získanou PF na příslušnou konfiguraci stroje. Tak se zajistí kompenzační algoritmus, který je schopen kvalitně predikovat jeho teplotní chování. Takové modely teplotních chyb je nutné vybavit aproximací vlivu okolního prostředí stroje a vhodně zvolit jejich vstupy.

Tab. 24: Závěrečné shrnutí výsledků úloh

vřeteno	měření	teplotní model	metoda vyhodnocení		
			fit [%]	Δp_k [μm]	
				před	po
úloha A					
VŘ 1	verifikace	LOŽISKO	89	86	14
		MOTOR	57	86	35
VŘ 2	verifikace	LOŽISKO	0	88	40
		MOTOR	8	88	41
VŘ 3	verifikace	LOŽISKO	54	84	19
		MOTOR	38	84	29
úloha B					
VŘ 2	verifikace	LOŽISKO	82	88	19
VŘ 3	verifikace	LOŽISKO	73	84	16
úloha C					
VŘ 2	verifikace	LOŽISKO	14	88	40
VŘ 3	verifikace	LOŽISKO	29	84	16



Seznam použité literatury

- [1] BRYAN, J. *International status of thermal error research (1990)*. CIRP annals, 1990, 39.2: 645-656.
- [2] HOREJŠ, O.; MAREŠ, M.; HORNYCH, J. *Výsledek na stroji - KOVOSVIT MAS - 2017: využití software pro zpracování a posouzení vlivu technologického procesu na teplotní chyby obráběcího stroje*. Praha: Ústav výrobních strojů a zařízení, Fakulta strojní, ČVUT v Praze, 2012, s. 33.
- [3] HOREJŠ, O. *Pokročilé teplotní kompenzace portálového obráběcího centra*. MM průmyslové spektrum, 2013, s. 2.
- [4] *WP06 - Kompenzace a minimalizace teplotních deformací obráběcích strojů* [online]. 2018 [cit. 2018-10-28] Dostupné z: <http://www.rcmt.cvut.cz/vyzkumny-program/cz/first/1141>.
- [5] HOREJŠ, O. a další. *Závěrečná zpráva projektu 1.4.2 za rok 2009*. V-09-032. Praha: VCSVTT, 2009.
- [6] RAMESH, R.; MANNAN, M. A.; POO, A. N. *Error compensation in machine tools - a review: Part II: thermal errors*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40.9: 1257-1284.
- [7] MAREŠ, Martin. *Modelování teplotně mechanických systémů frekvenčními přenosovými funkcemi*. Praha: České vysoké učení technické, 2014.
- [8] HOREJŠ, O.; MAREŠ, M. *Kompenzace teplotních úhlových chyb strojů* [online]. 2018 [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kompenzace-teplotnich-uhlovych-chyb-stroju.html>.
- [9] HORÁK, Karel. *Kompenzace teplotně způsobených úhlových deformací obráběcích strojů pomocí Peltierových článků*. Praha: České vysoké učení technické, 2012, s. 104.
- [10] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. Praha: MM Publishing, 2006. ISSN 1212-2572, s. 420.



- [11] HOREJŠ, O.; MAREŠ, M.; HORNYCH, J. *A general approach to thermal error modelling of machine tools. In: Machines et usinage à grande vitesse (MUGV).* Clermont Ferrand, Francie: 2014, s. 10.
- [12] ANSYS. ANSYS [online]. 2018 [cit. 2018-11-17] Dostupné z:
<https://www.ansys.com/>.
- [13] Dassault systems. *Abaqus* [online]. 2018 [cit. 2018-11-17] Dostupné z:
<https://www.3ds.com/products-services/simulia/>.
- [14] BORORVAN, P. *Cesty ke zvýšení produktivity při obrábění složitých obrobků* [online]. 2018 [2018-10-21]. Dostupné z:
https://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/ze-zivota-vyzkumneho-centra/cesty-ke-zvyseni-produktivity-pri-obrabeni-slozitych-obrobku-3_30334.html.
- [15] MAYR, Josef, et al. *Thermal issues in machine tools.* CIRP annals, 2012, 61.2: 771-791.
- [16] HANZAL, J. *Metody kompenzace teplotní chyby obráběcího stroje.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2017, s. 69.
- [17] ČSN ISO 230-3. *Zásady zkoušek obráběcích strojů: Část 3: Určení tepelných vlivů.* Praha: UNMZ, Zář 2010.
- [18] National Instruments. *The CompactRIO Platform* [online]. 2018 [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <http://www.ni.com/compactrio/>.
- [19] National Instruments. *LabVIEW* [online]. 2018 [cit. 2018-12-13] Dostupné z:
<https://www.ni.com/cs-cz/shop/labview/select-edition.html>.
- [20] National Instruments. *CompactRIO PROFIBUS Master/Slave Module* [online]. 2018 [cit. 2018-12-13] Dostupné z:
<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/cs/nid/208383>.
- [21] PROFESS. *Bezkontaktní snímač pracující na principu vířivých proudů - PR 6423* [online]. 2018 [cit. 2018-12-13]. Dostupné z:
<https://www.profess.cz/mms/cs/produkty/snimace-drahy-na-principu-virivych-proudu>.



- [22] PROFESS. *Konvertor ke snímačům na principu vířivých proudů - CON 041* [online]. 2018 [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <https://www.profess.cz/mms/cs/produkty/snimace-drahy-na-principu-virivych-proudu>.
- [23] National Instruments. *National Instruments - NI 9239* [online]. 2018 [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/cs/nid/208797>.
- [24] ČSN EN 60751 (258340) *A Průmyslové platinové odporové teploměry a platinové teplotní senzory*. Praha: UNMZ, 2014.
- [25] National Instruments. *National Instruments - NI 9217* [online]. 2018 [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/cs/nid/208804>.
- [26] National Instruments. *National Instruments - NI 9219* [online]. 2018 [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/cs/nid/208789>.
- [27] HOREJŠ, O.; MAREŠ, M.; HORNYCH, J. *Thermal errors of a 5-axis CNC milling centre equipped with different spindle units*. Praha: Ústav výrobních strojů a zařízení, Fakulta strojní, ČVUT v Praze, 2019, s. 4.
- [28] MathWorks. *MATLAB* [online]. 2019 [cit. 2019-01-15]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.



Seznam použitého softwaru

Adobe Illustrator CS5

MATLAB R2017a

Microsoft Excel 2010

Microsoft PowerPoint 2010

Microsoft Word 2010



Seznam obrázků

Obr. 1: Ilustrační obrázek [4].....	15
Obr. 2: Zdroje a propady tepla v obráběcím stroji [7].....	17
Obr. 3: Působení tepelné zátěže [2].....	17
Obr. 4: Schéma teplotních vlivů působících na obráběcí stroj [7].....	18
Obr. 5: Lineární (vlevo) a úhlová (vpravo) deformace [9].....	19
Obr. 6: Portálové uspořádání rámu stroje (vlevo), teplotně asymetrický rám (vpravo) (upraveno) [11].	21
Obr. 7: Chlazený rám [5].....	22
Obr. 8: Faktory ovlivňující OS, okrajové podmínky pro MKP model [7].	24
Obr. 9: Porovnání mezi dynamickou a teplotní analýzou [7].	27
Obr. 10: Ukázka uspořádání zkoušky na obráběcích strojích se svislou osou vřetena (upraveno) [17].	29
Obr. 11: Uspořádání experimentu.	31
Obr. 12: Řetězec pro měření relativního posunutí mezi nástrojem a obrobkem: čidlo PR 6423, převodník NOC 04, napěťový dělič a karta NI 9239 [2].	32
Obr. 13: Skica struktury stroje s rozmístění teplotních čidel (upraveno) [27].	32
Obr. 14: Kalibrace VŘ 1 - průběh otáček.....	35
Obr. 15: Kalibrace VŘ 1 - průběh teplot.	35
Obr. 16: Kalibrace VŘ 1 - průběh deformací do osy Z.	36
Obr. 17: Verifikace VŘ 1 - průběh otáček.....	36
Obr. 18: Verifikace VŘ 1 - průběh teplot.....	37
Obr. 19: Verifikace VŘ 1 - průběh deformací do osy Z.....	37
Obr. 20: Kalibrace VŘ 2 - průběh otáček.....	38
Obr. 21: Kalibrace VŘ 2 - průběh teplot.	38
Obr. 22: Kalibrace VŘ 2 - průběh deformací do osy Z.	39
Obr. 23: Verifikace VŘ 2 - průběh otáček.....	39
Obr. 24: Verifikace VŘ 2 - průběh teplot.....	39
Obr. 25: Verifikace VŘ 2 - průběh deformací do osy Z.....	40
Obr. 26: Kalibrace VŘ 3 - průběh otáček.....	40
Obr. 27: Kalibrace VŘ 3 - průběh teplot.	41
Obr. 28: Kalibrace VŘ 3 - průběh deformací do osy Z.	41



Obr. 29: Verifikace VŘ 3 - průběh otáček.....	41
Obr. 30: Verifikace VŘ 3 - průběh teplot.....	42
Obr. 31: Verifikace VŘ 3 - průběh deformací do osy Z.....	42
Obr. 32: Deformační odezva PF VŘ 1 ložiska na jednotkový teplotní skok.....	47
Obr. 33: Kalibrace VŘ 1, model ložiska – graf naměřené a simulované deformace včetně residua.....	47
Obr. 34: Deformační odezva PF motoru VŘ 1 na jednotkový teplotní skok.	48
Obr. 35: Kalibrace VŘ 1, model motoru – graf naměřené simulované deformace včetně residua.....	49
Obr. 36: Verifikace VŘ 1, model ložiska – graf naměřené a simulované deformace včetně residua.....	50
Obr. 37: Verifikace VŘ 1, model motoru – graf naměřené a simulované deformace včetně residua.....	50
Obr. 38: Verifikace VŘ 2, model ložiska – graf naměřené a simulované deformace včetně residua.....	51
Obr. 39: Verifikace VŘ 2, model motoru – graf naměřené a simulovaná deformace včetně residua.....	52
Obr. 40: Verifikace VŘ 3, model ložiska – graf naměřené a simulované deformace včetně residua.....	53
Obr. 41: Verifikace VŘ 3, model motoru – graf naměřené a simulované deformace včetně residua.....	54
Obr. 42: Verifikace VŘ 2, aplikace zesílení na model ložiska – graf naměřené a simulované deformace včetně residua.....	55
Obr. 43: Verifikace VŘ 3, aplikace zesílení na model ložiska – graf naměřené a simulované deformace včetně residua.....	56
Obr. 44: Deformační odezva PF ložiska VŘ 2 na jednotkový teplotní skok.....	57
Obr. 45: Kalibrace VŘ 2, model ložiska – graf naměřené a simulované deformace včetně residua.....	58
Obr. 46: Verifikace VŘ 2, model ložiska – graf naměřené a simulované deformace včetně residua.....	59
Obr. 47: Deformační odezva PF ložiska VŘ 3 na jednotkový teplotní skok.....	60
Obr. 48: Kalibrace VŘ 3, model ložiska – graf naměřené a simulované deformace včetně residua.....	60



Obr. 49: Verifikace VŘ 3, model ložiska – graf naměřené a simulované deformace
včetně residua.....61



Seznam tabulek

Tab. 1: Fyzikální parametry materiálů [10].	20
Tab. 2: Označení a parametry vřeten.	30
Tab. 3: Přehled provedených experimentů.	33
Tab. 4: Přehled a význam úloh.	45
Tab. 5: Vyhodnocení kalibrace VŘ 1, model se vstupem od teploty ložisek.	48
Tab. 6: Vyhodnocení kalibrace VŘ 1, model motoru.	49
Tab. 7: Kalibrační koeficienty přenosových funkcí VŘ 1.	49
Tab. 8: Vyhodnocení verifikace VŘ 1, model ložiska.	50
Tab. 9: Vyhodnocení verifikace VŘ 1, model motoru.	51
Tab. 10: Vyhodnocení verifikace VŘ 2, model ložiska.	52
Tab. 11: Vyhodnocení verifikace VŘ 2, model motoru.	52
Tab. 12: Vyhodnocení verifikace VŘ 3, model ložiska.	53
Tab. 13: Vyhodnocení verifikace VŘ 3, model motoru.	54
Tab. 14: Koeficient zesílení VŘ 2.	55
Tab. 15: Vyhodnocení verifikace VŘ 2, zesílený model ložiska.	56
Tab. 16: Koeficient zesílení VŘ 3.	56
Tab. 17: Vyhodnocení verifikace VŘ 3, zesílený model ložiska.	57
Tab. 18: Kalibrační koeficienty přenosové funkce VŘ 2.	58
Tab. 19: Vyhodnocení kalibrace VŘ 2, model ložiska.	58
Tab. 20: Vyhodnocení verifikace VŘ 2, model ložiska.	59
Tab. 21: Kalibrační koeficienty přenosové funkce VŘ 3.	61
Tab. 22: Vyhodnocení kalibrace VŘ 3, model ložiska.	61
Tab. 23: Vyhodnocení verifikace VŘ 3, model ložiska.	62
Tab. 24: Závěrečné shrnutí výsledků úloh.	64



Seznam příloh

Textové přílohy

Příloha 1 - Program z MATLABU

Elektronické přílohy (CD)

bakalářská_práce_Pícha.pdf

kompletní_výsledky.rar

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Bakalářská práce

Zahrnutí vlivu různých vřetenových jednotek do teplotně-mechanického
modelu frézovacího centra

Textové přílohy



Příloha 1 - Program z Matlabu

```
%% cas

t = (0:length(step)-1)';
t_hod = t/3600;

%% PF Model - ziskani modelu

in = TEPLOTA_MOTOR_VRETENO_0_ODECET; % zadej zmereny vstup v
relativnich souradnicich (vynulovanou teplotu)
out = Z1; % zadej zmereny vystup (deformace)

a = 2; % řád čitatele PF (max 4)
b = 1; % řád jmenovatele (max 4)

t = (0:length(in)-1)';

% priprava step signalu
step = zeros(183800,1);
step(10000:96400)=1;
t_step = (0:length(step)-1)';
% 1 - arx
PF1_arx = arx([out,in],[a,b,0],'Focus','simulation');
% [PF1_arx_step,time_step] = step(PF1_arx);
[num,den] = tfdata(PF1_arx);
TF = tf(num,den,1);
PF1_arx_simul = lsim(TF,in,t);
PF1_arx_step = lsim(TF,step,t_step);
PF1_arx_FITT = (1-((norm(out-PF1_arx_simul))/norm(out-
mean(out))))*100;
clear num den TF
% 4 - oe220
PF2_oe = oe([out,in],[a,b,0],'InitialState','Auto');
[num,den] = tfdata(PF2_oe);
TF = tf(num,den,1);
PF2_oe_simul = lsim(TF,in,t);
PF2_oe_step = lsim(TF,step,t_step);
PF2_oe_FITT = (1-((norm(out-PF2_oe_simul))/norm(out-mean(out))))*100;
clear num den TF in out t_step

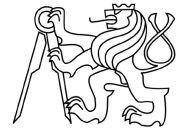
%% Aplikace PF modelu

in = TEPLOTA_LOZISKO_VRETENO_0_ODECET; % zadej zmereny vstup (teplotu)
PF = PF2_oe; % zadej PF identifikovaneho systemu

[num,den] = tfdata(PF);
t = (0:length(in)-1)';
TF = tf(num,den,1);
Z1_simul = lsim(TF,in,t);

clear num den in TF PF

%% FITT - aproximační kvalita
```



```
sim = Z1_simul; % zadej simulovanou hodnotu
mer = Z1; % zadej nameranou hodnotu

FITT_Z1 = (1-((norm(mer-sim))/norm(mer-mean(mer))))*100;
Z1_reziduum = mer-sim;

clear sim mer
%% Vynulování vektorů
TEPLOTA_LOZISKA_VRETENO_0 = TEPLOTA_LOZISKA_VRETENO -
TEPLOTA_LOZISKA_VRETENO(1)
TEPLOTA_MOTOR_VRETENO_0 = TEPLOTA_MOTOR_VRETENO -
TEPLOTA_MOTOR_VRETENO(1)
TEPLOTA_REFERENCNI_STOJAN_0 = TEPLOTA_REFERENCNI_STOJAN -
TEPLOTA_REFERENCNI_STOJAN(1);

%% Peak to Peak reziduum
y_horni = 28.31; % zadej hodnotu horního peaku z grafu
y_dolni = 0; % zadej hodnotu dolního peaku z grafu
P2P = y_horni + y_dolni;

clear y_horni y_dolni

%% Peak to Peak DEF_Z
y_horni = 82.86; % zadej hodnotu horního peaku z grafu
y_dolni = 0.7847; % zadej hodnotu dolního peaku z grafu
P2P_DEF_Z = y_horni + y_dolni;

clear y_horni y_dolni

%% Peak to Peak reziduum_koef
y_horni = 9.695; % zadej hodnotu horního peaku z grafu
y_dolni = 6.553; % zadej hodnotu dolního peaku z grafu
P2P_reziduum_koef_g4 = y_horni + y_dolni;

clear y_horni y_dolni
%% Peak to peak
P2P_DEF_Z = 87.85; % Zadej hodnotu P2P_DEF_Z
P2P_REZ = 28.31; % Zadej hodnotu P2P_REZ
Peaktpeak = 100 - ((P2P_REZ/P2P_DEF_Z)*100)

clear P2P_DEF_Z P2P_REZ
%% Koeficient přenosobení g1
hornimerena = 83.01;
hornisimulovana = 87.82;
g1 = hornimerena/hornisimulovana; %koeficient
Z1_simulkoef_g1 = g1*Z1_simul;

%FITT - aproximační kvalita
sim = Z1_simulkoef_g1; % zadej simulovanou hodnotu
mer = Z1; % zadej nameranou hodnotu
FITT_Z1_koef_g1 = (1-((norm(mer-sim))/norm(mer-mean(mer))))*100;
Z1_reziduum_koef_g1 = mer-sim;
clear hornimerena hornisimulovana sim mer

%% Koeficient přenosobení g2
hornimerena = 57;
```



```

hornisimulovana = 50.33;
g2 = hornimerena/hornisimulovana; %koeficient
Z1_simulkoef_g2 = g2*Z1_simul;

%FITT - aproximální kvalita
sim = Z1_simulkoef_g2; % zadej simulovanou hodnotu
mer = Z1; % zadej naměřenou hodnotu
FITT_Z1_koef_g2 = (1-((norm(mer-sim))/norm(mer-mean(mer))))*100;
Z1_reziduum_koef_g2 = mer-sim;
clear hornimerena hornisimulovana sim mer

%% Koeficient přenosobení g3
hornimerena = 64.05;
hornisimulovana = 54.97;
g3 = hornimerena/hornisimulovana; %koeficient
Z1_simulkoef_g3 = g3*Z1_simul;

%FITT - aproximální kvalita
sim = Z1_simulkoef_g3; % zadej simulovanou hodnotu
mer = Z1; % zadej naměřenou hodnotu
FITT_Z1_koef_g3 = (1-((norm(mer-sim))/norm(mer-mean(mer))))*100;
Z1_reziduum_koef_g3 = mer-sim;
clear hornimerena hornisimulovana sim mer

%% Koeficient přenosobení g4
hornimerena = 58.51;
hornisimulovana = 51.32;
g4 = hornimerena/hornisimulovana; %koeficient
Z1_simulkoef_g4 = g4*Z1_simul;

%FITT - aproximální kvalita
sim = Z1_simulkoef_g4; % zadej simulovanou hodnotu
mer = Z1; % zadej naměřenou hodnotu
FITT_Z1_koef_g4 = (1-((norm(mer-sim))/norm(mer-mean(mer))))*100;
Z1_reziduum_koef_g4 = mer-sim;
clear hornimerena hornisimulovana sim mer

%% Odečtení teploty okolí od teploty modelu MOTOR
TEPLOTA_MOTOR_VRETENO_0_ODECET = TEPLOTA_MOTOR_VRETENO_0 -
TEPLOTA_REFERENCNI_STOJAN_0;

%% Odečtení teploty okolí od teploty modelu LOŽISKO
TEPLOTA_LOZISKO_VRETENO_0_ODECET = TEPLOTA_LOZISKA_VRETENO_0 -
TEPLOTA_REFERENCNI_STOJAN_0;

```