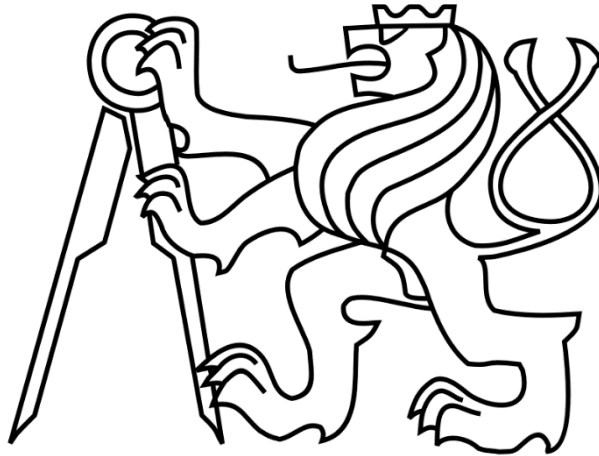


FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



# Diplomová práce

**Model teplotních deformací stroje a frézovacího nástroje zohledňující  
vliv řezného procesu**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Divíšek** Jméno: **Daniel** Osobní číslo: **465354**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní stroje a zařízení**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Model teplotních deformací stroje a frézovacího nástroje zohledňující vliv řezného procesu**

Název diplomové práce anglicky:

**Thermal deformation model of a machine tool and milling cutter including cutting process**

Pokyny pro vypracování:

Zpracování experimentálních dat z teplotně-deformačních experimentů s obráběním hliníku na pětiosém frézovacím centru. Výzkum linearity teplotně-mechanického systému stroje a nástroje (frézy) během provedených experimentů, analýza, zhodnocení. Porovnání a zhodnocení výsledků s obdobným testem s obráběním oceli; Osnova práce: 1. Rešerše metod pro minimalizaci teplotních deformací obráběcích strojů se zahrnutím řezného procesu. 2. Zpracování a interpretace naměřených dat během technologických zkoušek s obráběním hliníku. 3. Kalibrace sub-modelu řešícího část teplotních deformací od obrábění. 4. Verifikace kompenzačního modelu popisující teplotní deformace na špičce nástroje včetně vlivu obrábění, vyhodnocení a diskuze výsledků.; Rozsah grafické části: Grafy s naměřenými hodnotami teplot a deformací v čase. Grafické znázornění výsledků kompenzačních modelů a jejich porovnání.; Rozsah textové části: 60-80 stran.

Seznam doporučené literatury:

Incropera, F. P., DeWitt, D. P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Fifth Edition, John Wiley and Sons, New York, 2001. 981 p. ISBN 0-471-38650-2; Mayr, J. et al. Thermal issues in machine tools. CIRP Ann.Manuf.Technol. 2012, 61 (2), 771–791. ISSN 0007-8506; Horejš, O., Mareš, M., Hornych, J. Thermally induced displacements of machine tool structure, tool and workpiece due to cutting processes. In: Proceedings of the Conference on Thermal Issues in Machine Tools. Dresden: 2018, 269-278. ISBN 978-3-95735-085-5;

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

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

Datum zadání diplomové práce: **29.04.2021** Termín odevzdání diplomové práce: **25.07.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2021**

\_\_\_\_\_  
Ing. Otakar Horejš, 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

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém 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 21. 7. 2021

.....

podpis

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu své diplomové práce Ing. Otakaru Horejšovi, Ph.D. za odborné vedení práce, cenné rady, ochotu a čas, který mi při psaní této práce věnoval. Dále děkuji konzultantovi panu Ing. Martinu Marešovi, Ph.D., který byl při tvorbě práce nápomocen.

Toto téma diplomové práce je podpořené projektem "Strojírenská výrobní technika a přesné strojírenství" CZ.02.1.01./0.0/0.0/16\_026/0008404 prostřednictvím Operačního programu Výzkum, vývoj, vzdělávání (poskytovatel MŠMT ČR) a spolufinancován Evropskou unií.

## **Anotace**

Jméno autora:	Daniel Divíšek
Název diplomové práce:	Model teplotních deformací stroje a frézovacího nástroje zohledňující vliv řezného procesu
Rozsah práce:	99 str., 58 obr., 33 tab.
Školní rok vyhotovení:	2021
Škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 – Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí diplomové práce:	Ing. Otakar Horejš, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Martin Mareš, Ph.D.
Zadavatel:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Využití:	Vytvoření kompenzačního modelu pro obrábění slitiny hliníku.
Klíčová slova:	obrábění, řezný proces, teplotní deformace, kompenzační model, přenosové funkce
Anotace:	Diplomová práce se zabývá teplotními deformacemi stroje a nástroje během obráběcího procesu a možnostmi jejich eliminace. V rámci práce byl vytvořen kompenzační model pro eliminaci teplotních deformací stroje a nástroje během obrábění.

## Annotation

Author:	Daniel Divíšek
Title of master thesis:	Thermal deformation model of a machine tool and milling cutter including cutting process
Extent:	99 p., 58 fig., 33 tab.
Academic year:	2021
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135 – Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Otakar Horejš, Ph.D.
Consultant:	Ing. Martin Mareš, Ph.D.
Submitter of the Theme:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Application:	Development of a compensation model for machining aluminum alloy.
Key words:	machining, cutting process, thermal deformation, compensation model, transfer functions
Annotation:	The diploma thesis deals with thermal deformations of machine tool and the cutter during the machining process and the possibilities of their elimination. Within the work, a compensation model was developed to eliminate thermal deformations during machining.



## Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk .....	10
1 Úvod .....	12
2 Cíle práce .....	13
3 Úvod do problematiky teplotního chování obráběcích strojů .....	14
3.1 Teplo a jeho zdroje .....	14
3.2 Sdílení tepla .....	15
3.3 Teplotní chování obráběcích strojů při obrábění .....	17
3.4 Metody minimalizace teplotních chyb obráběcích strojů .....	19
3.4.1 Konstrukční fáze .....	20
3.4.2 Návrh chladicího systému .....	21
3.4.3 Teplotní kompenzace .....	24
3.4.4 Kvalita aproximace .....	30
3.5 Měření teplotního chování strojů .....	31
4 Experimentální výzkum teplotního chování stroje při obrábění .....	33
4.1 Popis experimentů .....	33
5 Zpracování naměřených dat .....	41
5.1 Zkrácení intervalu .....	41
5.2 Nulování .....	43
5.3 Filtrování .....	44
5.4 Přepočítání naměřeného výkonu .....	45
6 Výsledky experimentů s obráběním .....	47
6.1 Experiment č. 1 ( $a_p = 0,5$ mm) .....	48
6.2 Experiment č. 2 ( $a_p = 1$ mm) .....	49



6.3	Experiment č. 3 ( $a_p = 2,5$ mm).....	50
6.4	Experiment č. 4 (bez obrábění, tzv. Air Cutting) .....	51
6.5	Experiment č. 5 ( $a_p = 4$ mm).....	52
6.6	Experiment č. 6 ( $a_p = 4$ mm a $a_p = 5$ mm) .....	53
6.7	Shrnutí výsledků experimentů s obráběním .....	54
7	Modely teplotních deformací .....	55
7.1	Aplikace vytvořeného modelu a jeho úprava .....	55
7.1.1	Model č. 1.....	55
7.1.2	Model č. 2.....	58
7.2	Metoda PF.....	59
7.2.1	Model č. 3.....	59
7.2.2	Model č. 4.....	62
7.2.3	Model č. 5.....	64
7.2.4	Model č. 6.....	66
7.2.5	Model č. 7.....	67
7.3	Regresní analýza MLRA.....	69
7.3.1	Model č. 8.....	70
7.3.2	Model č. 9.....	71
7.3.3	Model č. 10 .....	73
7.3.4	Model č. 11 .....	74
7.3.5	Model č. 12 .....	76
7.4	Shrnutí výsledků modelů .....	77
7.5	Popis výsledného modelu .....	80
8	Porovnání chování při obrábění slitiny hliníku a oceli .....	83
8.1	Aplikace modelu č. 7 na obrábění oceli .....	83





8.2	Porovnání teplot a deformací při obrábění .....	84
8.2.1	Porovnání teplot při obrábění.....	84
8.3	Porovnání deformací při obrábění.....	88
9	Závěr.....	90
	Seznamy .....	92
	Seznam obrázků .....	92
	Seznam tabulek.....	94
	Seznam použité literatury .....	97
	Seznam použitého softwaru .....	99
	Seznam příloh .....	99



## Seznam použitých symbolů a zkratk

Symbol	Jednotka	Název
$a_p$	$[mm]$	hloubka třísky
$c_j$	$[J.kg^{-1}.K^{-1}]$	měrná tepelná kapacita
$fit$	$[%]$	kvalita aproximace
$F_c$	$[N]$	řezná složka obráběcí síly
$g$	$[-]$	zesílení deformace ložisek vřetene
$m$	$[kg]$	hmotnost
$m$	$[-]$	řád jmenovatele přenosové funkce
$n$	$[-]$	řád čitatele přenosové funkce
$n$	$[ot.min^{-1}]$	otáčky
$P$	$[kW]$	výkon
$\dot{q}$	$[-]$	plošná hustota tepelného toku
$Q$	$[J]$	teplo
<i>residuum</i>	$[\mu m]$	rodíl naměřené a simulované deformace
$t$	$[min], [hod]$	čas
$T$	$[K]$	teplota
$v_c$	$[m.min^{-1}]$	řezná rychlost
$z$	$[-]$	počet zubů frézy
$\alpha$	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$	součinitel přestupu tepla
$\beta$	$[K^{-1}]$	váhový koeficient
$\delta$	$[\mu m]$	deformace
$\varepsilon$	$[-]$	emisivita
$\lambda$	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$	součinitel tepelné vodivosti
$\vartheta$	$[^{\circ}C]$	vektor měřené teploty
$\sigma$	$[W.m^{-2}.K^{-4}]$	Stefanova – Boltzmannova konstanta



Symbol	Jednotka	Název
$\psi$	[°]	úhel nastavení frézy
ARX		parametrický lineární model (z angl. Autoregressive model with external input)
IR		infračervený
MLRA		vícenásobné lineární regresní analýzy (z angl. Multi Linear Regression Analysis)
MKP		metoda konečných prvků
MQL		obrábění s minimem chladící kapaliny (z angl. Minimum Quantity of Lubrication)
OE		parametrický lineární model (z angl. Output error model)
PF		přenosová funkce
TCP		špička nástroje (z angl. Tool center point)



## 1 Úvod

Jedním ze základních výrobních prostředků je obráběcí stroj. Jeho pomocí je vyráběna spousta předmětů, se kterými se člověk každodenně setkává. U každého výrobku vždy požadujeme určité specifické vlastnosti. Jednou z hlavních požadovaných vlastností výrobku je jeho přesnost. Dosahovaná přesnost výrobku závisí hlavně na přesnosti obráběcího stroje. V obráběcím stroji působí řada faktorů, které ji ovlivňují. Kromě vlastností, které jsou dány výrobou, montáží a opotřebením, je to především sdílení tepla, které vyvolává teplotní deformaci částí stroje, nástroje i výrobku samotného. Diplomová práce se zabývá hlavně popisem teplotních deformací stroje na špičce nástroje a možnostmi jejich eliminace.

Již několik let je v oboru obráběcích strojů trend zvyšování úběru třísky spolu s používáním těžko obrobitelných materiálů. V praxi se stále častěji používá ekologicky šetrné suché obrábění nebo MQL obrábění s minimálním přívodem chladicí kapaliny. Dále se zvyšují požadavky na pružnost a flexibilitu výroby, kdy se stroj nemůže ocitnout v teplotně kvazistabilním stavu. Z důvodu těchto požadavků a trendů dochází ke vzniku velkých a proměnlivých zdrojů tepla v celé konstrukci obráběcího stroje. V důsledku toho se v termomechanickém řetězci „stroj – nástroj – obrobek“ neustále mění teplotní pole a tím vznikají tvarové a objemové změny v konstrukci stroje, nástroje i obrobku. Dalším současným trendem jsou zvyšující se nároky na přesnost a stabilitu výroby. Proto se jedná o celosvětově velmi aktuální téma a problematika zvyšování přesnosti obráběcích strojů minimalizací teplotních deformací je v současné době podrobována intenzivnímu výzkumu a vývoji.



## **2 Cíle práce**

Hlavním cílem diplomové práce je vytvořit kompenzační model teplotních deformací stroje a frézovacího nástroje s ohledem na řezný proces. Následně stanovit hranici aplikovatelnosti modelů kalibrovaných za podmínek uvedených normou ISO ČSN 230-3.

Mezi dílčí cíle patří zpracování a interpretace naměřených dat během technologických zkoušek s obráběním hliníku, porovnání a zhodnocení výsledků s obdobným testem s obráběním oceli a analyzovat možnost přenositelnosti vytvořeného matematického modelu popisující teplotní deformace na špičce nástroje.



## **3 Úvod do problematiky teplotního chování obráběcích strojů**

### **3.1 Teplo a jeho zdroje**

Z kinetické teorie vyplývá, že teplo vzniká přeměnou kinetické energie uspořádaného pohybu částic na kinetickou energii neuspořádaného pohybu částic a naopak. Základní zdroje vzniku tepla v obráběcím stroji jsou následující [1]:

- ztráty v mechanických odporech
  - smykové tření
  - valivé odpory
  - viskózní třecí odpory
- ztráty v elektrickém zařízení
  - Joulovo teplo
  - ztráty v železe
- technologický proces

Zdroje tepla lze také rozdělit podle místa působení na vnější a vnitřní.

#### **Vnější zdroje tepla**

Vnější zdroje tepla jsou takové, které na obráběcí stroj působí z okolí. Jsou to například topná tělesa, ventilace ale i sousední stroje a agregáty (čerpadla). Vnějším zdrojem tepla je také sluneční svit přímo na stroj nebo průvan v okolí stroje. Nepříznivě mohou stroj ovlivnit také špatně odizolované základy stroje. Tyto zdroje tepla nesouvisí s funkcemi stroje (alespoň ne přímo) [2], [3].



### **Vnitřní zdroje tepla**

Vnitřní zdroje tepla jsou tepelné vlivy, působící v důsledku provozu stroje. Jsou způsobeny hlavně tepelnými ztrátami motorů, třením v převodech, ale hlavně samotným obráběním. Mechanická energie potřebná pro odebrání třísky se při obrábění převážně změní na teplo [2], [3].

V praxi vždy dochází ke kombinaci vnějších i vnitřních zdrojů.

### **3.2 Sdílení tepla**

#### **Vedení (konduktce)**

Vedení tepla je šíření mechanických forem energie mikroskopického pohybu částic hmoty v prostředí s teplotním gradientem. Hmotu v tomto případě můžeme považovat za kontinuum, ve kterém se vytvoří teplotní pole. Při odvození rovnice teplotního pole můžeme vycházet z empirického Fourierova zákona, který říká, že plošná hustota tepelného toku je úměrná teplotnímu gradientu a směřuje proti němu. Plošná hustota tepelného toku se v tomto případě vyjádří vztahem

$$\dot{q} = -\lambda \operatorname{grad}T, \quad (1)$$

kde  $\dot{q} = \frac{dq}{dt}$  je plošná hustota tepelného toku a  $\lambda$  [W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>] je součinitel tepelné vodivosti [1], [4], [5].

#### **Proudění (konvekce)**

Konvekce je způsob sdílení tepla mezi proudícími tekutinami a tuhými tělesy nebo mezi tekutinami navzájem. Částice tekutiny přijímají za pohybu teplo od tepelných zdrojů a přenášejí ho jako tepelnou formu energie. Konvekci dělíme podle způsobu proudění tekutiny na vynucenou a volnou. Je-li proudění tekutiny vyvoláno uměle (ofukování, čerpání), jedná se o vynucenou konvekci. Pokud je však proudění způsobeno pouze teplotními rozdíly jednotlivých částic, mluvíme o volné konvekci.



Typickým příkladem je přestup tepla na rozhraní mezi pevnou stěnou a tekutinou (okolní vzduch). Plošná hustota se v tomto případě vyjádří vzorcem

$$\dot{q} = \alpha \cdot (T_2 - T_1), \quad (2)$$

kde  $T_1$  [K] je teplota povrchu,  $T_2$  [K] je teplota vzduchu a  $\alpha$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ] je součinitel přestupu tepla [1], [4], [5].

### Záření (radiace)

Hmotný objekt zahřátý na termodynamickou teplotu  $T$  [K] přeměňuje část své vnitřní energie na elektromagnetické vlny. Ty mohou procházet tzv. průteplivým prostředím. Při dopadu na jiný hmotný objekt, který může elektromagnetické vlny pohlcovat, se alespoň část energie vlnění přemění opět na vnitřní energii tohoto přijímacího tělesa. Zbytek energie se odrazí. Poměr odražené a pohlcené energie je dán vlastností povrchu zvanou emisivita. Jedná se o bezrozměrnou veličinu, která nabývá hodnot v intervalu (0, 1) a značí se  $\varepsilon$ . Pokud je  $\varepsilon = 1$ , mluvíme o tzv. dokonale černém tělese, které má schopnost spojitě vyzařovat i pohlcovat elektromagnetické vlny v celém spektru vlnových délek. Plošnou hustotu tepelného toku sdíleného radiací zjistíme bilancováním plošných hustot toků zářivých energií sledovaného objektu dle vztahu

$$\dot{q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_2^4 - T_1^4), \quad (3)$$

kde  $\varepsilon$  je emisivita,  $\sigma$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ] je Stefan – Boltzmannova konstanta ( $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8}$ ),  $T_1$  [K] je teplota ozařovaného tělesa a  $T_2$  [K] je teplota zářiče [1], [4], [5].



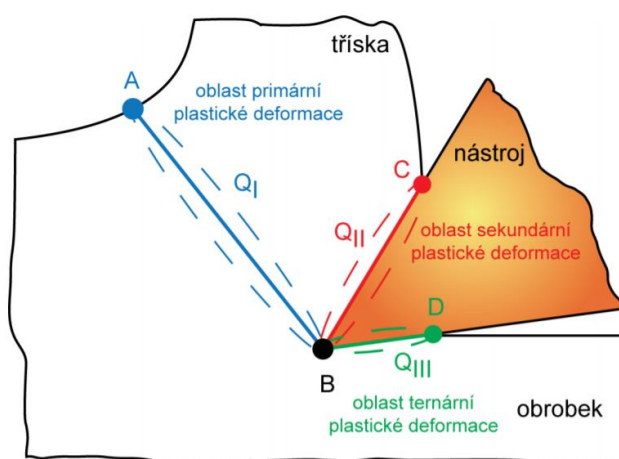
### 3.3 Teplotní chování obráběcích strojů při obrábění

Při obrábění dochází ke tvorbě třísky a jejímu odvodu z místa řezu. Tento děj je doprovázen vznikem určitého množství tepla. Ke vzniku tepla dochází transformací práce vynaložené na obrábění. Na teplo  $Q_c$  se přemění téměř všechna mechanická práce  $E$  vynaložená na proces řezání (95 – 99%). Celkové množství tepla  $Q_c$  vznikající za jednotku času lze pak vypočítat ze vztahu:

$$Q_c = F_c \cdot v_c \cdot t, \quad (4)$$

kde  $F_c$  [N] je řezná složka obráběcí síly,  $v_c$  [m.min<sup>-1</sup>] je řezná rychlost a  $t$  [min] je čas obrábění [6].

Při obrábění vzniká teplo ve třech oblastech, jak je vidět na Obr. 1. Mezi body A a B se nachází oblast primární plastické deformace. Vzniká v důsledku plastických a elastických deformací materiálu. Oblast sekundární plastické deformace je mezi body B a C. Zde dochází ke tření mezi třískou a čelem nástroje. V oblasti mezi body B a D z důvodu tření mezi hlavním hřbetem nástroje a přechodovou plochou obrobku vzniká teplo [7].



Obr. 1 - Oblasti vzniku tepla při obrábění [7]

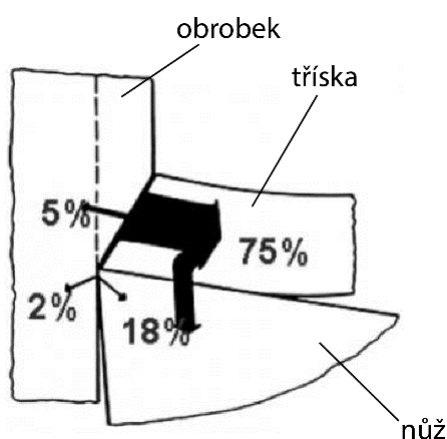


Tepla vzniklá při obrábění [18]:

- $Q_I$  [J] – teplo vzniklé v oblasti primární plastické deformace deformací ve střižné rovině;
- $Q_{II}$  [J] – teplo vzniklé v oblasti sekundární plastické deformace v důsledku tření mezi čelem nástroje a třískou;
- $Q_{III}$  [J] – teplo vzniklé třením hlavního hřbetu nástroje o přechodovou plochu obrobku.

Největší množství tepla vzniká v oblasti primární plastické deformace, poté v oblasti sekundární plastické deformace. Teplo vzniklé třením hlavního hřbetu nástroje o přechodovou plochu obrobku musí být co nejnižší. Vznik množství tohoto tepla lze ovlivnit vhodnou volbou nástroje. Je třeba volit úhel hřbetu nástroje co největší a zamezit výraznému opotřebování nástroje, které úhel hřbetu nástroje zmenšuje. Celkové množství vzniklého tepla také závisí na obráběném materiálu a řezných podmínkách [18].

Teplo z řezného procesu je odváděno do nástroje, obrobku, třísky a do okolního prostředí (znázorněno na Obr. 2).



Obr. 2 - Odvod tepla z místa řezu při soustružení ([8] a upraveno)



Odváděné teplo lze rozdělit na následující složky [18]:

- $Q_o$  [J] – teplo odvedené do obrobku;
- $Q_n$  [J] – teplo odvedené do nástroje;
- $Q_{tř}$  [J] – teplo odvedené do třísky;
- $Q_{pr}$  [J] – teplo odvedené do okolního prostředí.

Podíl jednotlivých složek je dán tepelnou vodivostí nástroje, obrobku, řeznými podmínkami, typem řezného procesu ale také geometrií nástroje a jeho opotřebením. Největší část tepla (cca 75 – 80 %) je odváděna z místa řezu třískou [2]. Obecně pro velikosti jednotlivých podílů platí následující nerovnost [18]:

$$Q_t > Q_o > Q_n > Q_{pr} . \quad (5)$$

Pokud se množství vzniklého tepla rovná množství tepla odvedeného, můžeme vytvořit rovnici tepelné bilance řezného procesu [18]:

$$Q_c = F_c \cdot v_c = Q_I + Q_{II} + Q_{III} = Q_o + Q_n + Q_{tř} + Q_{pr} . \quad (6)$$

Teplo vzniklé při obráběcím procesu se dále šíří třemi základními způsoby sdílení tepla (viz kap. 3.1) celou strukturou stroje, což dále způsobuje teplotní chyby celé soustavy a snižuje přesnost obráběcího stroje.

### 3.4 Metody minimalizace teplotních chyb obráběcích strojů

Sdílení tepla v prostoru obráběcího stroje spolu se silou ovlivňuje dosažitelnou přesnost stroje a razantně ji snižuje. Proto se snažíme tepelné působení různými způsoby minimalizovat. Proces minimalizace má následující fáze [6]:

- Konstrukční fáze
- Návrh chladicího systému
- Kompenzace



### 3.4.1 Konstrukční fáze

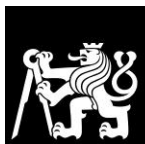
Při návrhu obráběcího stroje se snažíme o symetrickou a uzavřenou konstrukci. V těchto konstrukcích se teplo šíří rovnoměrněji a teplotní deformace působí vzájemně proti sobě. Tomu nejvíce odpovídá uspořádání typu Gantry nebo portálové uspořádání [1], [6].

V konstrukční fázi se také snažíme redukovat nebo izolovat zdroje tepla. Zásadní je všechny zdroje tepla umísťovat symetricky na konstrukci. Teplo lze také redukovat minimalizací tření v různých komponentech stroje, například kuličkové matice atd [1], [6].

Nemalým zdrojem tepla jsou elektroskříně nebo různé agregáty (např. olejový chladič nebo hydraulická čerpadla). U těchto zdrojů máme několik možností, jak je minimalizovat. Jednou z možností je pečlivě tyto zdroje odizolovat od samotného stroje. Výrobci obráběcích strojů nabízejí různé izolační kryty, které zabraňují sdílení tepla přímo do stroje. Izolaci u olejového chladiče můžeme dosáhnout tím, že ho umístíme v dostatečné vzdálenosti od samotné konstrukce stroje. Tyto „periferní zdroje tepla“ samozřejmě disponují ventilací. Proto je nutné proud vzduchu vycházející z periférií nasměřovat mimo nosnou konstrukci stroje [1], [6].

Při konstrukci obráběcího stroje můžeme volit různé materiály pro jednotlivé díly. Nejčastěji se používá ocel nebo litina. Tyto materiály mají vynikající poměr tuhosti a hmotnosti. Jejich nevýhodou je však vysoká hodnota součinitele teplotní roztažnosti  $\alpha$  a tepelné vodivosti  $\lambda$ , které negativně působí na geometrickou přesnost stroje. Z těchto důvodů v současnosti probíhá vývoj kompozitních materiálů. Kompozitní materiály používané při výrobě obráběcích strojů dělíme takto [9]:

- částicové kompozity – polymerní betony, přírodní žula;
- vláknové kompozity – na bázi uhlíkových vláken;
- keramika;



- hybridní struktury – kombinace více odlišných materiálů v rámci dílce.

Náklady na výrobu a zpracování kompozitních materiálů jsou u některých typů mnohonásobně vyšší než u oceli a litiny. Vzhledem k těmto nákladům nejsou tepelné parametry o moc lepší oproti konvenčním materiálům. Proto nejsou v současnosti kompozitní materiály moc využívány při stavbě obráběcích strojů [9].

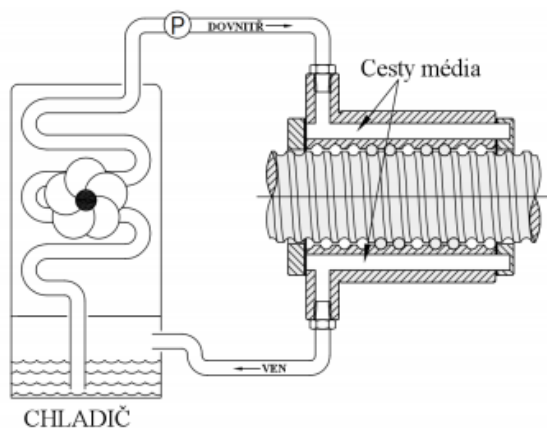
### 3.4.2 Návrh chladicího systému

Dalším způsobem, jak minimalizovat teplotní chyby je řízení proudění tepla do jednotlivých částí stroje. Motory obráběcích strojů jsou chlazeny buď vzduchem nebo kapalinou. U vzduchem chlazených elektromotorů dochází ke sdílení tepla nucenou konvekcí. Oproti tomu kapalinou chlazené elektromotory sdílí teplo mezi tělesem motoru a protékající kapalinou [6].

Při chlazení kuličkového šroubu záleží na tom, zda se pohybuje matice nebo šroub. Většinou dochází k zavedení chladicího systému do statické části soustavy šroub-matice. Obě možnosti jsou uvedeny na Obr. 3 a Obr. 4 [11].

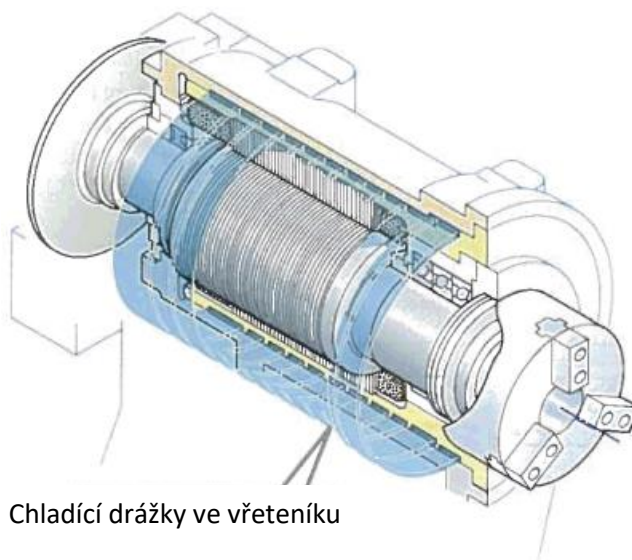


*Obr. 3 - Chlazení kuličkového šroubu - DMG Mori [10]*



*Obr. 4 - Chlazení kuličkové matice – HIWIN [11]*

Vřetenová jednotka je ve většině případů hlavním zdrojem tepla a teplotních chyb. Proto se chlazení vřetene věnuje řada výzkumů. Jednotliví výrobci jej řeší různě. Na Obr. 5 je ukázka tradičního řešení.



*Obr. 5 - Chlazení vřetenové jednotky ([6] a upraveno)*

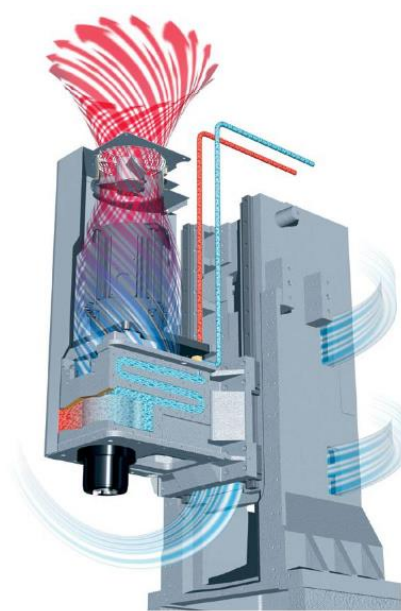


Dalším způsobem chlazení je protékání kapaliny konstrukcí stroje. Protékané části mají v sobě kanálky, kterými protéká voda nebo olej a ochlazuje konstrukci stroje. Na Obr. 6 je řešení od firmy Yasda.



*Obr. 6 - Protékaná konstrukce obráběcího centra Yasda YMC 430 Ver. II [12]*

Konstrukce však může být i profukována vzduchem. Tento způsob se objevuje například u chlazení vřeteníku obráběcího centra Haas (Obr. 7). Chladný vzduch vstupuje ze zadní části stroje a po průchodu skrz vřeteník vystupuje již ohřátý vrchní stranou mimo stroj.



*Obr. 7 - Chlazení vřeteníku obráběcího centra Haas [13]*



Obecně platí, že pokud vyžadujeme od stroje vysokou přesnost, je nutné nevystavovat ho přímému slunečnímu záření a zamezit přímému větrání na stroj. Také klimatizace, topení nebo jiné zdroje propadu tepla by neměly být směřovány přímo na konstrukci stroje.

### **3.4.3 Teplotní kompenzace**

Kompenzace je děj, při kterém dochází k minimalizaci chyby pomocí nastavení polohy nástroje a obrobku. Tento způsob je oproti dříve uvedeným výhodnější z hlediska nákladů na realizaci [2].

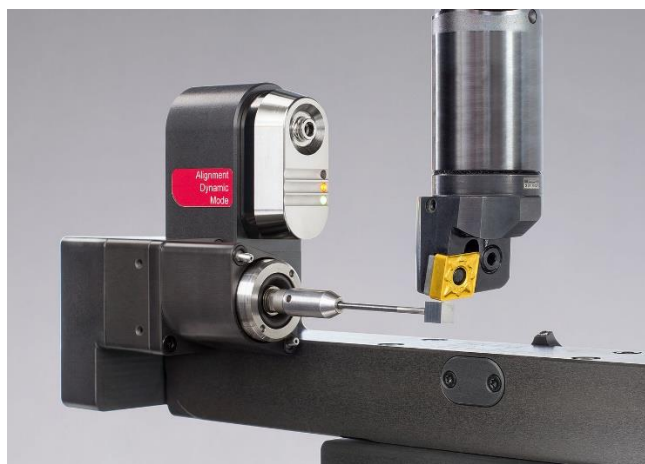
Kompenzace dělíme následovně:

- přímé;
- nepřímé;
- hybridní (využívají přímou i nepřímou kompenzaci).

#### **Přímé kompenzace**

Přímé kompenzace vycházejí z měření posunutí nástroje pomocí nástrojových nebo obrobkových měřících sond. Výhodou je, že známe reálné odchylky v reálném čase a není nutné kalibrovat matematický model. Nevýhodou je však, že měřící sondy nedokáží měřit odchylky během obrábění. Proto je nutné kvůli měření obrábění vždy přerušit. Přerušováním klesá produktivita výroby, a tím se také zvedají náklady na jednotlivé obrobky. Na Obr. 8 je měření nástroje pomocí nástrojové sondy BLUM [6].

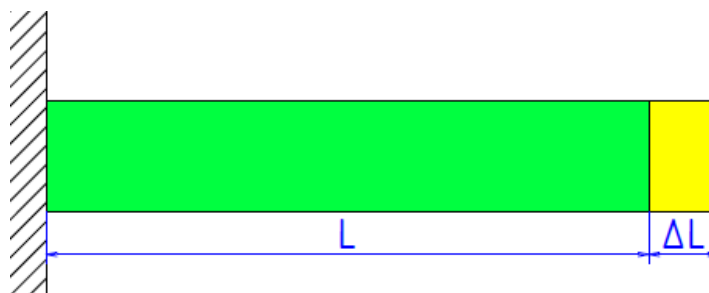




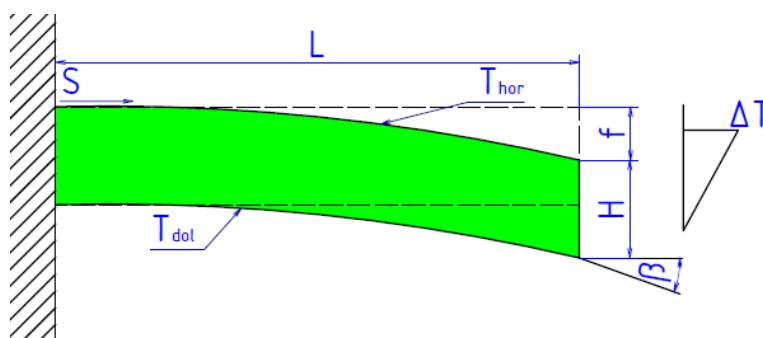
Obr. 8 - Nástrojová sonda BLUM [14]

### Nepřímé kompenzace

Nepřímé kompenzace vycházejí z matematického modelu. Na základě tohoto modelu jsou vypočítány korekce pro jednotlivé osy. Teplotní chyby můžeme rozdělit na lineární složky (Obr. 9) a úhlové složky (Obr. 10). Pomocí nepřímých kompenzací můžeme kompenzovat oba druhy. Softwarově lze kompenzovat lineární složky teplotních chyb tak, že budou vyslány požadavky do pohonů na posunutí v příslušné ose o vypočtenou korekci. Úhlové složky teplotních chyb jsou kompenzovány řízením chlazení nebo ohřevu. Obecně pro nepřímé kompenzace platí, že veškeré vzniklé matematické modely je nutné ověřit na kalibračním experimentu [6].



Obr. 9 - Lineární složka teplotních chyb



Obr. 10 - Úhlová složka teplotních chyb

Přehled metod nepřímé kompenzace [6]:

- vícenásobná lineární regresní analýza (Multi Linear Regression Analysis – MLRA);
- neurální sítě;
- MKP;
- přenosové funkce (PF);
- regulace chlazení, řízení topných elementů, atd.

### Regresní analýza

Princip vícenásobné lineární regresní analýzy (Multi Linear Regression Analysis – MLRA) je založen na popisu závislosti určité spojité proměnné na jedné nebo více dalších spojitých proměnných. Cílem je tuto závislost popsat pomocí vhodného matematického modelu. Matematický model představuje tato rovnice:

$$\delta = Y \cdot \beta . \quad (7)$$



Pro aproximaci jedné složky deformace z více známých průběhů teplot, měřených na stroji, lze rovnici (7) dále přepsat jako rovnici (8)

$$\delta = \beta_0 + \vartheta_1 \cdot \beta_1 + \vartheta_2 \cdot \beta_2 + \dots + \vartheta_n \cdot \beta_n, \quad (8)$$

kde  $\delta$  je vektor naměřených deformací,  $\beta_n$  jsou jednotlivé váhové koeficienty a  $\vartheta_n$  jsou vektory jednotlivých měřených teplot.

Hledané váhové koeficienty  $\beta$  získáme pomocí následující rovnice

$$\beta = (Y^T \cdot Y)^{-1} \cdot Y^T \cdot \delta. \quad (9)$$

Tato metoda je v oblasti nepřímé kompenzace u obráběcích strojů nejpoužívanější. Důvodem je několik výhod. Běžné řídicí systémy jsou na tyto kompenzace připraveny, a proto není jejich implementace tak náročná. Další výhodou je jednoduchost matematického popisu. Kalibrace koeficientů polynomické funkce zpravidla probíhá na datech pouze z jednoho měření. Obecně lze tedy říci, že se jedná o velmi rychlé řešení. Nevýhodou však je, že nejde o univerzální řešení. Empiricky stanovené funkce nerespektují principy sdílení tepla a přesnost kompenzace závisí na počtu měřených teplot a jejich rozmístění [6].

### Neurální síť

Vzorem této metody je chování biologických struktur. Jednotlivé výpočtové prvky pracují paralelně a na základě souboru vstupních dat vypočítávají výstupy. Vstupům je přidělována důležitost podle váhových funkcí. U neurální sítě je nutné mít velké množství kalibračních dat. Výhodou však je, že lze pracovat i s neúplnými nebo porušenými soubory dat [6].

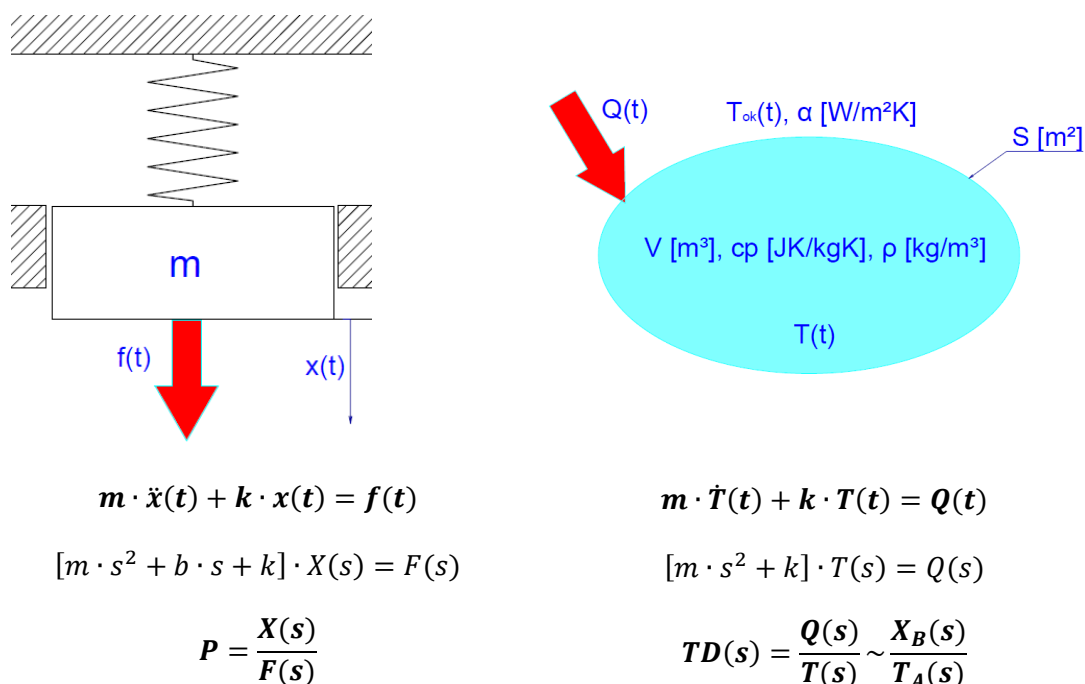


## Modely MKP

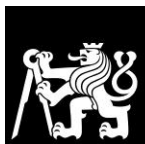
Řešení nepřímé kompenzace pomocí MKP modelu je časově velmi náročné a nehodí se pro kompenzování v reálném čase. Oproti modelům s analytickým výpočtem a experimentálním měřením nám tento model umožňuje získat přehled o tepelných vlastnostech jednotlivých částí stroje ještě před jeho výrobou. Tato metoda sebou ale nese celou řadu parametrů, okrajových a počátečních podmínek, které jsou obtížně zjistitelné [15].

## Přenosové funkce

Přenosová funkce (PF) obecně popisuje vztah mezi vstupem (buzením) a výstupem (odezvou) dynamického systému ve frekvenční oblasti. V teplotně-mechanické problematice je vstupem teplo měřené v místě vzniku a výstupem odezva na tento zdroj na jiném místě konstrukce obráběcího stroje (např. posunutí špičky nástroje). Schematicky je analogie vysvětlena na Obr. 11 [15].



Obr. 11 - Analogie mezi dynamickou a teplotní analýzou



Metoda PF respektuje principy sdílení tepla a je univerzálnější. Proto ji můžeme aplikovat na různé typy obráběcích strojů. Výhodou je také minimální množství čidel oproti regresní analýze. PF také využívají data z řídicího systému (otáčky, zatížení os atd.) [15].

Identifikace PF daného systému je podstatou této metody. PF lze stanovit třemi způsoby:

- Analyticky a následnou kalibrací systému – pro geometricky jednoduché úlohy;
- Odhadem a následnou kalibrací – pokud nelze PF stanovit analyticky, určí se odhadem z naměřené odezvy systému na jednotkové buzení, konstanty jsou určeny následnou kalibrací;
- Odhadem a následnou optimalizací – pokud nelze PF určit analyticky, určí se odhadem z naměřené odezvy systému na jednotkové buzení, konstanty jsou určeny následnou kalibrací.

Z předchozích výzkumů na ČVUT v Praze, Výzkumném centru pro strojírenskou výrobní techniku a technologii (dále jen RCMT) vyplývá, že pro popis systému jsou vhodné dva následující lineární parametrické modely [6]:

- ARX (z angl. *Autoregressive model with external input*)
- OE (z angl. *Output error model*)

ARX model je založen na lineární diferenciální rovnici, které dává do poměru vstup  $u(t)$  a výstup  $y(t)$

$$\begin{aligned} y(t_i) + a_1 y(t_i - 1) + \dots + a_{na} y(t_i - na) = \\ = b_1 u(t_i - nk) + \dots + b_{nb} u(t_i - nb - nk + 1) + e(t_i), \quad (10) \end{aligned}$$



kde  $t_i$  je  $i$ -tý časový okamžik,  $na$  a  $nb$  jsou řády ARX modelu a  $nk$  je časové zpoždění (pro diskretní systém  $nk = 1$ ) [6].

Rovnici (10) lze dále přepsat pomocí Z – přenosu na následující tvar:

$$Z(y(t)) = \frac{B(z)}{A(z)} \cdot Z(u(t)) + \frac{1}{A(z)} Z(e(t)), \quad (11)$$

kde  $Z$  je Z – transformace časově diskretizované funkce a  $z$  je komplexní proměnná. Při určování koeficientů je u modelu ARX využívána metoda nejmenších čtverců [6].

Model OE je opět založen na lineární diferenciální rovnici. V iteracích je použita prediktivní pravděpodobnostní metoda pro odhad koeficientů polynomů minimalizací velikosti chybového členu  $e(t)$  v následující rovnici

$$Z(y(t)) = \frac{B(z)}{A(z)} \cdot Z(u(t)) + Z(e(t)), \quad (12)$$

#### 3.4.4 Kvalita aproximace

U každého kompenzačního modelu můžeme určit jeho kvalitu aproximace vůči naměřeným hodnotám. Tuto kvalitu můžeme vyjádřit hodnotou *fit*. Tato kvalita aproximace vychází z metody nejmenších čtverců. Pokud dosáhne hodnoty 100 %, získali jsme absolutní schodu modelu s naměřeným průběhem.

$$fit = \left(1 - \frac{\|\delta - \delta_{SIM}\|}{\|\delta - \bar{\delta}\|}\right) \cdot 100, \quad (13)$$

kde  $\delta$  je vektor naměřených hodnot,  $\delta_{SIM}$  je vektor simulovaných hodnot a  $\bar{\delta}$  je aritmetický průměr naměřených hodnot. V rovnici (13) se používá matematická norma. Matematická norma obecně udává délku  $n$ -rozměrného vektoru  $x_n = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  ve tvaru

$$\|x\| = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}. \quad (14)$$



Dalším možným způsobem vyjádření kvality aproximace je pomocí *reziduum*. *Reziduum* je většinou součástí porovnání průběhů naměřené a simulované veličiny. V naší problematice kompenzačních modelů se v podstatě jedná o průběh deformace, který by byl naměřen na stroji po kompenzaci matematickým modelem.

$$reziduum = \delta - \delta_{SIM} . \quad (15)$$

### 3.5 Měření teplotního chování strojů

Existuje několik metod, jimiž můžeme získat data pro tvorbu SW modelu teplotních kompenzací. Dále si popíšeme metody, které vycházejí z normy ISO 230-3. Norma stanovuje 3 základní zkoušky [16]:

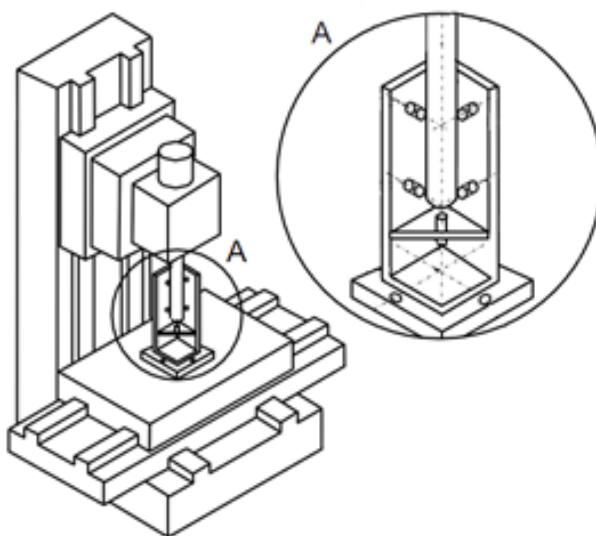
- Zkouška pro určení chyby vzniklé v důsledku kolísání enviromentální teploty (ETVE);
- Zkouška tepelných deformací způsobených rotací vřetena;
- Zkouška tepelných deformací způsobených pohybem v lineárních osách.

Norma také stanovuje několik podmínek během zkoušek. Stroj musí být plně funkční, umístěn na základech a připojen k napájení. Měření dle normy ISO 230-3 probíhá bez zatížení stroje, tedy bez řezného procesu. Vyvíjený kompenzační model má ale popisovat i vliv obrábění, a proto byl použit experiment s obráběním, který se odlišuje od experimentů dle normy ISO 230-3, viz výše. Tento experiment je popsán v kapitole 4.1. Stroj je nutné ochránit před průvanem, topením, klimatizací nebo sluncem. Před zahájením měření musí být stroj minimálně 24 hodin v klidu v daném prostředí. Teplota okolí musí odpovídat smluveným podmínkám (většinou 20 °C) [16], [22].

K měření, které vychází z normy se používá speciální přípravek (Obr. 12), který umožňuje měření deformace osy Z a zároveň naklápění v rovinách XZ, YZ. Tento



přípravek je osazen zpravidla 5 deformačními snímači, které zaznamenávají odchylku od původní pozice měřícího trnu. Tento přesný trn je upnut během měření ve vřetení stroje. Výsledkem měření jsou deformace, které se graficky vyhodnocují jako závislosti teplotních deformací a teploty na čase [16], [22].



*Obr. 12 - Uspořádání zkoušky teplotních deformací podle normy ISO 203-3 [16]*



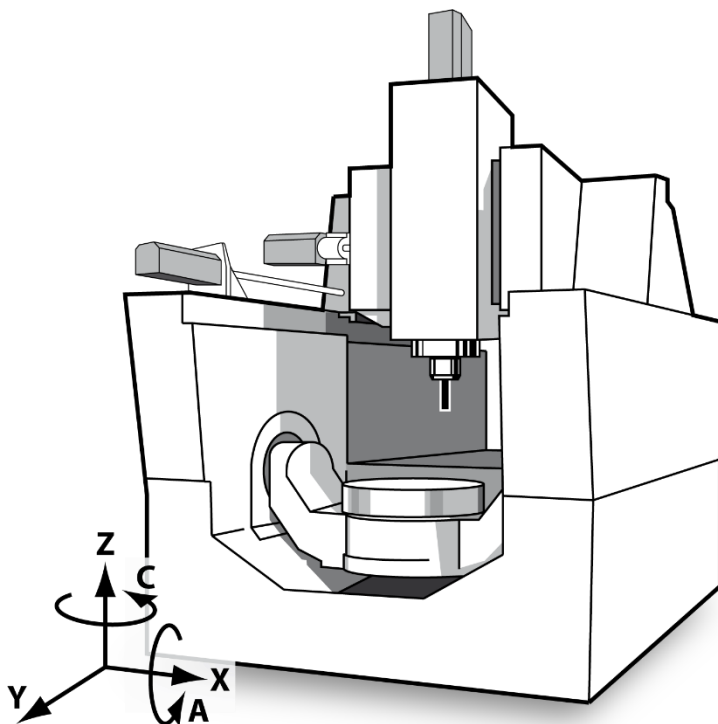


## 4 Experimentální výzkum teplotního chování stroje při obrábění

Má diplomová práce je založena na měření, které probíhalo v rámci dřívějšího výzkumu, který je popsán v [17]. Toto měření se skládalo z několika experimentů. V rámci nich bylo naměřeno mnoho veličin. Pro tuto práci jsou důležité pouze deformace a teploty. Dále bude stručně popsán celý experiment.

### 4.1 Popis experimentů

Veškeré experimenty byly prováděny na 5osém obráběcím centru typu horní gantry. Schéma uvedeno na Obr. 13.

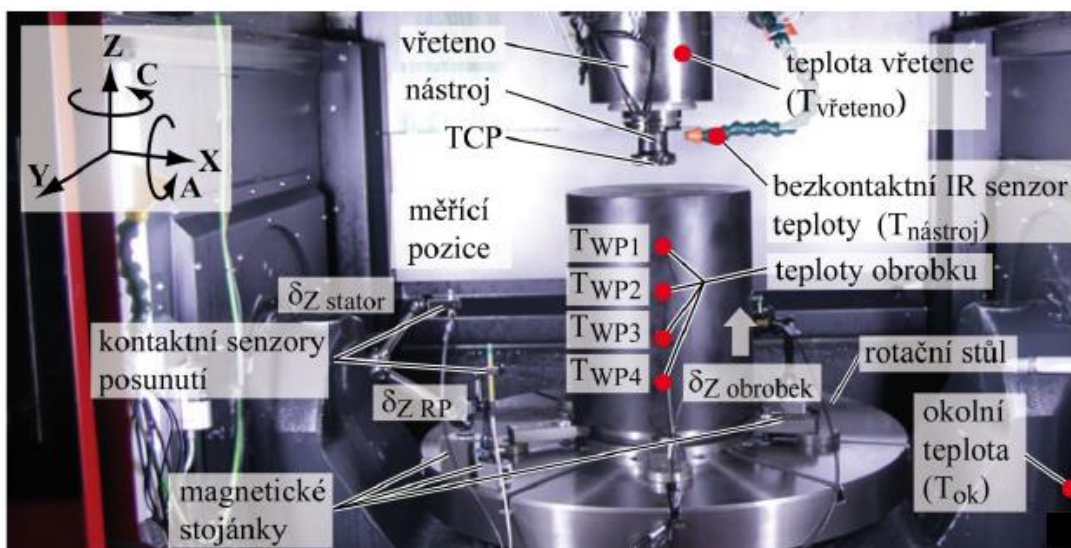


Obr. 13 - Schéma 5osého obráběcího stroje typu horní gantry [6]

Celkové uspořádání experimentu je na Obr. 14. Uvnitř stroje je ve výchozím stavu od výrobce rozmístěno několik odporových teplotních čidel typu Pt100 (třída A,



3850ppm/K) v blízkosti zdrojů a propadů tepla. Tyto zdroje jsou například ložiska vřetene, motory pohybových os atd. Naměřené teploty jsou zavedeny do řídicího systému stroje a slouží k diagnostickým účelům. Některé jsou však využity i jako vstupy do kompenzačních modelů [17], [23].



Obr. 14 - Celkové nastavení experimentu [17]

Stroj je v našem případě vybaven pyrometrem firmy Optris (Obr. 15), který je umístěn ve stroji pouze pro účely modelování teplotního chování. Pyrometr je vybaven infračerveným (IR) senzorem s optickým rozlišením 22:1 [17], [23].



Obr. 15 - Detail IR čidla (vlevo) a box s elektronikou pro IR čidlo (vpravo) [17]



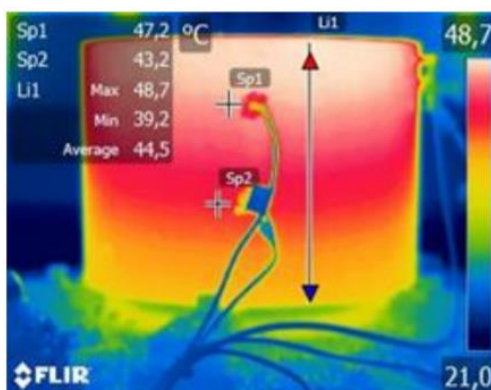
Naměřené teploty tímto bezkontaktním IR čidlem byly porovnávány s teplotami zjištěnými termovizní kamerou FLIR T640. Z předchozích výzkumů prováděných na ČVUT v Praze vyplývá, že IR čidlo Optris poskytuje dostatečnou přesnost pro měření teploty nástroje. IR senzor je na vřeteník připevněn pomocí speciálního přípravku a tělo celého čidla a kabel je chráněn flexibilní hadicí, která se používá pro přívod chladicí kapaliny do místa řezu (Obr. 16) [17], [23].



*Obr. 16 - Umístění IR senzoru ve flexibilní hadici [17]*

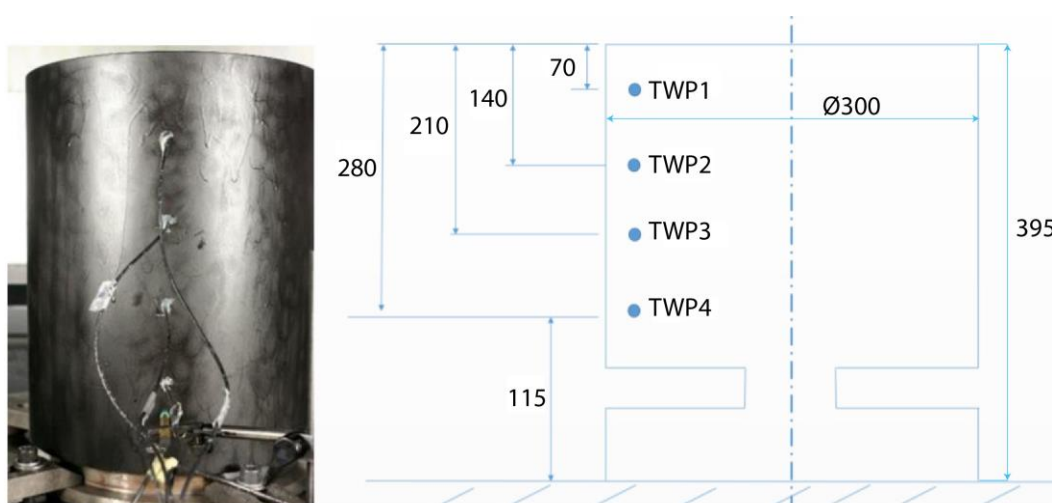
Pro účely měření byly nástroje opatřeny páskou s definovanou emisivitou. Během měření se vyskytl problém se zanášením IR čidla kovovým prachem. Tento problém byl řešen překrytím čidla potravinářskou folií, která je pro infračervené záření o vlnové délce 7 až 14  $\mu\text{m}$ , na rozdíl od skla, propustná. Tento problém je také možno řešit krytem optiky senzoru z germaniového skla od výrobce senzoru [17], [23].

Obrobek měl tvar válce a byl z konstrukční oceli nebo slitiny hliníku. Diplomová práce je zaměřena hlavně na data naměřená při obrábění slitiny hliníku. Vytvořený kompenzační model na základě těchto měření s obráběním hliníku je pak aplikován na experimenty z ocelí viz kap.8. Pro potřeby měření pomocí termovizní kamery FLIR T640 byl nastříkán barvou o definované emisivitě 0,96. Během celého měření byly pořizovány snímky obrobku i nástroje (ukázka snímků na Obr. 17) [17], [23].

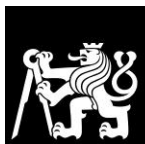


Obr. 17 - Termosnímek obrobku [19]

V obrobku byly připraveny 4 otvory pro vložení 4 odporových teplotních senzorů Pt100 a dále několik otvorů pro měření teplotní deformace obrobku ve směru strojní osy Z vůči rovině stolu. Tato deformace byla měřena kontaktními indukčními snímači posunutí od firmy MESING. Snímače byly upnuty pomocí magnetických stojánek na desku stolu. Umístění odporových teplotních čidel je zobrazeno na Obr. 18. Čidla byla zavrtána 10 mm do hloubky obrobku. Po odebrání vrstvy materiálu bylo nutné horní senzory postupně demontovat, aby nedošlo k jejich poničení [17], [23].



Obr. 18 - Umístění odporových teplotních čidel v obrobku ([17] a upraveno)

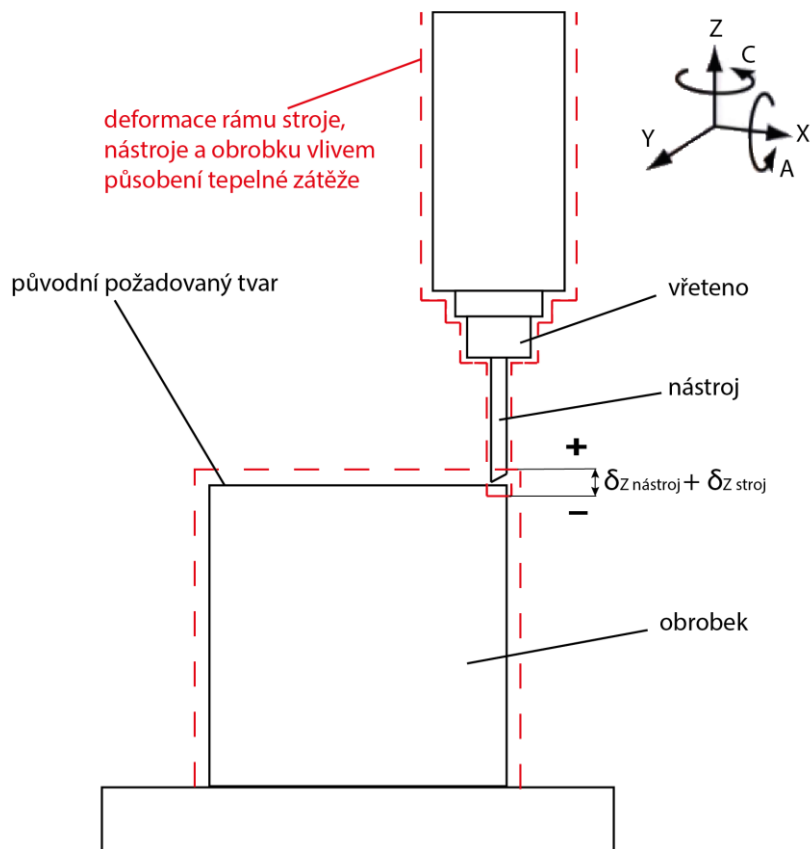


Teplotní deformace na špičce nástroje a statorové části vřetene ve směru strojní osy Z byly snímány dvojicí indukčních kontaktních senzorů od firmy MESING. Stejně jako při měření deformace obrobku byly snímače upnuty v magnetických stojáncích, které byly umístěny na desce stolu [17].

Celkem byly tedy měřeny 3 základní složky teplotních deformací, které udávají celkovou teplotní chybu řetězce stroj-nástroj-obrobek při uvažování řezného procesu. Teplotní chyba (pro zjednodušení budeme uvažovat pouze osu Z) naměřená mezi obrobkem (obráběným povrchem) a špičkou nástroje je složena ze 3 složek:

- Deformace rámu stroje  $\delta_{Z \text{ stroj}}$ ;
- Deformace nástroje vlivem řezného procesu  $\delta_{Z \text{ nástroj}}$ ;
- Deformace obrobku  $\delta_{Z \text{ obrobek}}$ .

Schematicky je celková teplotní chyba znázorněna na Obr. 19 [17], [23].



Obr. 19 - Celková teplotní chyba stroje



Při tvorbě modelu teplotních deformací budeme uvažovat pouze první dvě složky, tedy bez vlivu deformace obrobku. Po tomto zjednodušení bude celková deformace měřena mezi stolem (nikoli obrobkem) a špičkou nástroje [17], [23].

Výsledná teplotní deformace v místě nástroje (TCP) v ose Z je proto dána vztahem:

$$\delta_{Z RP} = \delta_{Z stroj} + \delta_{Z nástroj} \cdot \quad (10)$$

Veškeré experimenty probíhaly za sucha (bez chlazení řeznou kapalinou), ve všech případech se jednalo o čelní frézování. Pro všechny experimenty byl použit jednotný nástroj – fréza od firmy Sandvik CoroMill® 245 (Obr. 20) s vyměnitelnými destičkami (parametry jsou uvedeny v Tab. 1). Parametry obrábění jsou uvedeny v Tab. 2 [17].

Tab. 1 - Parametry nástroje

Označení frézy	Sandvik CoroMill® 245
Průměr frézy $D$ [mm]	63
Úhel nastavení $\psi$ [°]	45
Počet zubů $z$	5



Obr. 20 - Fréza (vlevo) a břitová destička (vpravo) Sandvik CoroMill® 245 [17]



Postup byl pro všechna měření totožný. Před zahájením byl stroj v ustáleném stavu s okolním prostředím. Průběh celého experimentu byl řízen pomocí připraveného NC programu [17].

Počátek měření probíhal v měřící pozici (v pracovním prostoru mimo obrobek, viz Obr. 14). Zde proběhl odečet počátečních deformací na špičce nástroje a čele vřetena, který trval 10 sekund. Poté nástroj odjel vykonat jeden cyklus obrábění. Po odebrání jedné vrstvy materiálu se vracel zpět do měřící pozice pro záznam změn deformací. Jeden cyklus úběru materiálu trval cca 20 minut a celý měřící cyklus cca 30 sekund. Tento proces se opakoval až do dosažení přibližné termodynamické rovnováhy stroje s aktivními zdroji a propady tepla (cca 4-5 hodin). Po ukončení frézovacích operací nástroj zůstal v měřící pozici pro záznam změn teplotních deformací při chladnutí celého systému. Po teplotním ustálení stroje, nástroje a obrobku s okolím byl test ukončen [17].

Parametry jednotlivých experimentů jsou uvedeny v Tab. 2.

Tab. 2 - Parametry experimentu [17]

číslo experimentu	1	2	3	4 (Air Cutting)	5	6
výkon $P$ [kW]	0,75	1,5	3,75	0	6	4
otáčky $n$ [ot.min <sup>-1</sup> ]	3119	3119	3119	3119	3119	3586 => 3119
hloubka třísky $a_p$ [mm]	0,5	1	2,5	-	4	4 => 5
řezná rychlost $v_c$ [m.min <sup>-1</sup> ]	617	617	617	617	617	710 => 617



Experiment č. 4 je tzv. Air Cutting. Při tomto experimentu nástroj projíždí zadanou řeznou dráhu, avšak bez přítomnosti obrobku. Dochází tedy k měření stroje bez zatížení řezným procesem.

Výkon uvedený v Tab. 2 je určen na základě výpočtu v kalkulačce od firmy Sandvik. Tato data byla ověřena v kapitole 5.4 na základě naměřených dat.





## 5 Zpracování naměřených dat

V rámci předchozího výzkumu bylo naměřeno několik datových sad. Každá sada obsahuje záznam naměřených veličin během celého experimentu (viz kap. 4). Experiment má několik fází. První fází je zahřívací cyklus, kdy se otáčky vřetene postupně zvyšují až na hodnotu cca 8 000 ot.min<sup>-1</sup>, aby nedošlo k poruše vřetena. Tím dochází k zahřátí všech mechanismů a motorů a stroj je připraven na samotné obrábění. Druhou fází je obrábění. V této fázi stroj opakuje cyklus operací popsany v kapitole 4.1. Po ukončení druhé fáze následuje fáze chladnutí celé soustavy. V této fázi je stroj ponechán v klidovém stavu několik hodin.

Pro tvorbu kompenzačních modelů se obvykle používá deformace špičky nástroje. Pro kvalitnější rozbor je vhodné použít také deformaci rotoru a statoru. Při experimentech, ze kterých vznikla data pro tuto práci byly však měřeny deformace čela vřetene, špičky nástroje a celého těla nástroje. Použití těchto deformací pro tvorbu kompenzačních modelů nijak neovlivní výslednou kvalitu modelů.

Protože je práce zaměřena na teplotní deformace, jsou také důkladně řešeny změny teplot nástroje, vřeteníku, stolu, pracovního prostoru a okolí. Pro celkové pochopení experimentu je nutné pozorovat i průběh otáček a výkonu vřetene.

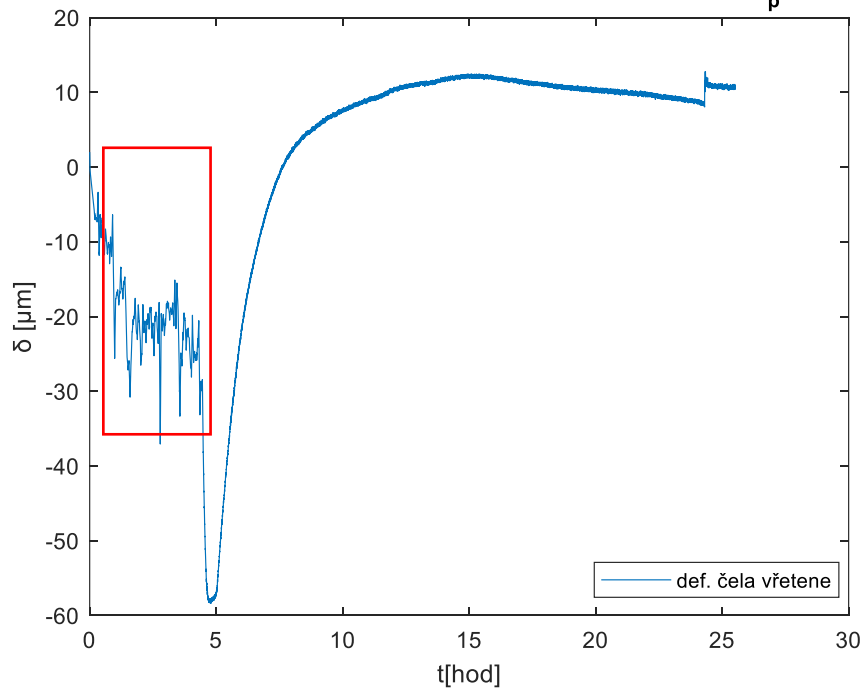
Před samotnou tvorbou kompenzačních modelů byly nutné následující úpravy dat.

### 5.1 Zkrácení intervalu

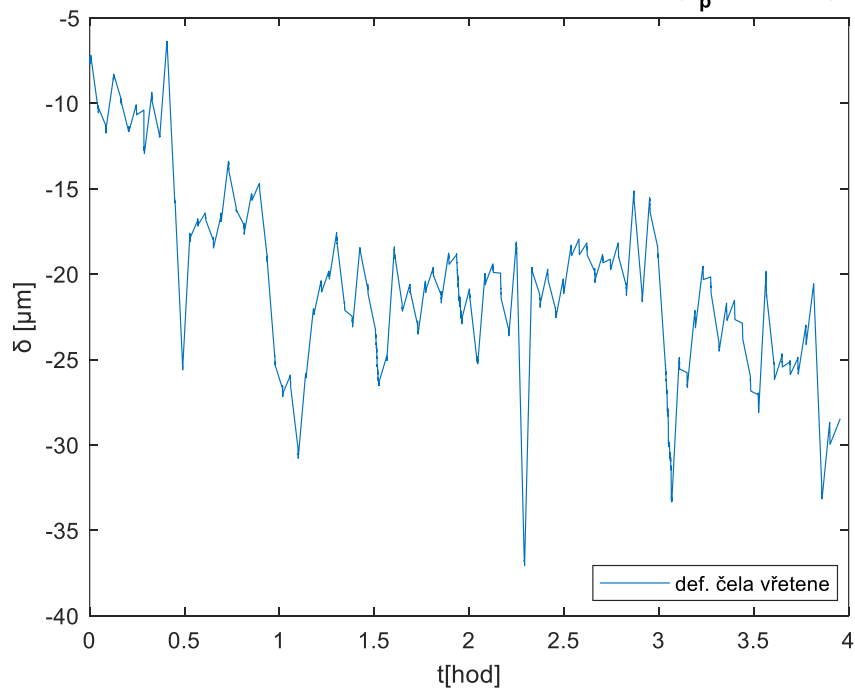
Pro tuto práci je důležitá pouze fáze obrábění. Proto je nutné data z experimentu zúžit pouze na časový interval, kdy docházelo k obrábění. Z průběhu otáček můžeme zjistit, jak je tento interval velký. Ukázka zkrácení intervalu je na Obr. 21, kdy došlo k vyříznutí 4hodinové fáze obrábění z grafu deformace čela vřetene při obrábění s hloubkou třísky  $a_p = 2,5$  mm.



Průběh deformace čela vřetene - celý průběh experimentu ( $a_p = 2,5 \text{ mm}$ )



Průběh deformace čela vřetene - fáze obrábění ( $a_p = 2,5 \text{ mm}$ )

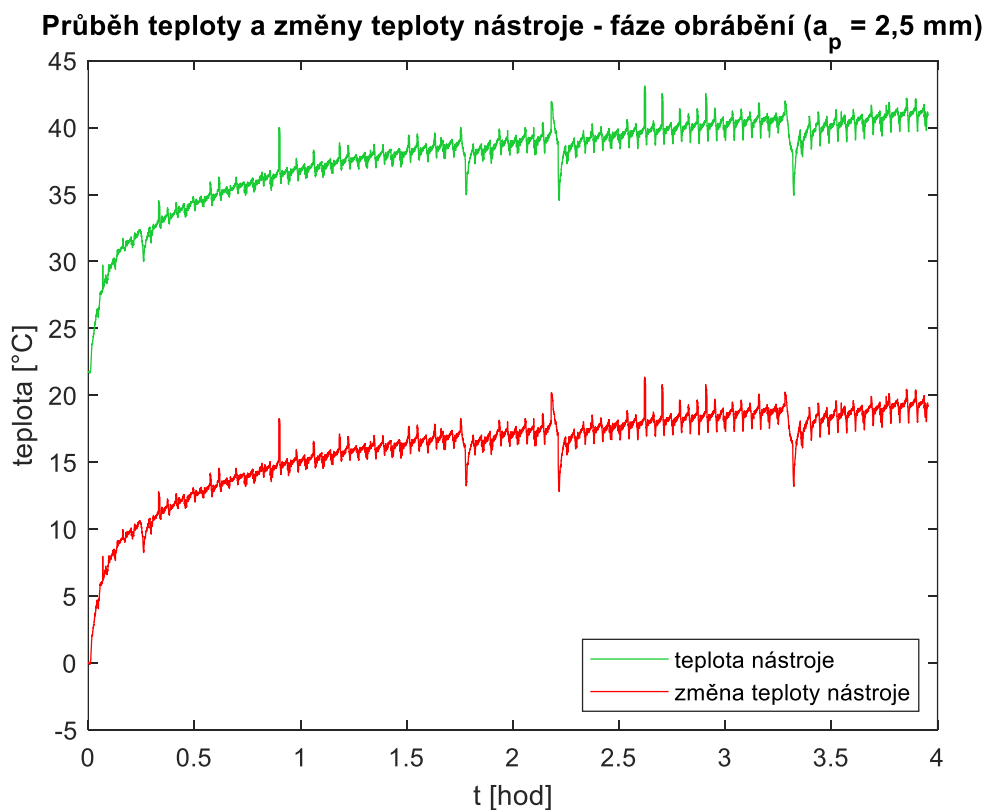


Obr. 21 - Zkrácení časového intervalu u deformace čela vřetene



## 5.2 Nulování

V rámci experimentů byly naměřeny průběhy jednotlivých teplot. Při tvorbě PF se pracuje se změnou teploty (teplotním rozdílem  $\Delta t$ ). Proto se musí naměřené teploty tzv. vynulovat. Nulování se provede prostým odečtením první naměřené hodnoty od všech naměřených teplot. Ukázka nulování je uvedena na Obr. 22, kdy došlo k odečtení 22 °C od všech hodnot naměřeného průběhu teploty nástroje při obrábění s hloubkou třísky  $a_p = 2,5$  mm.

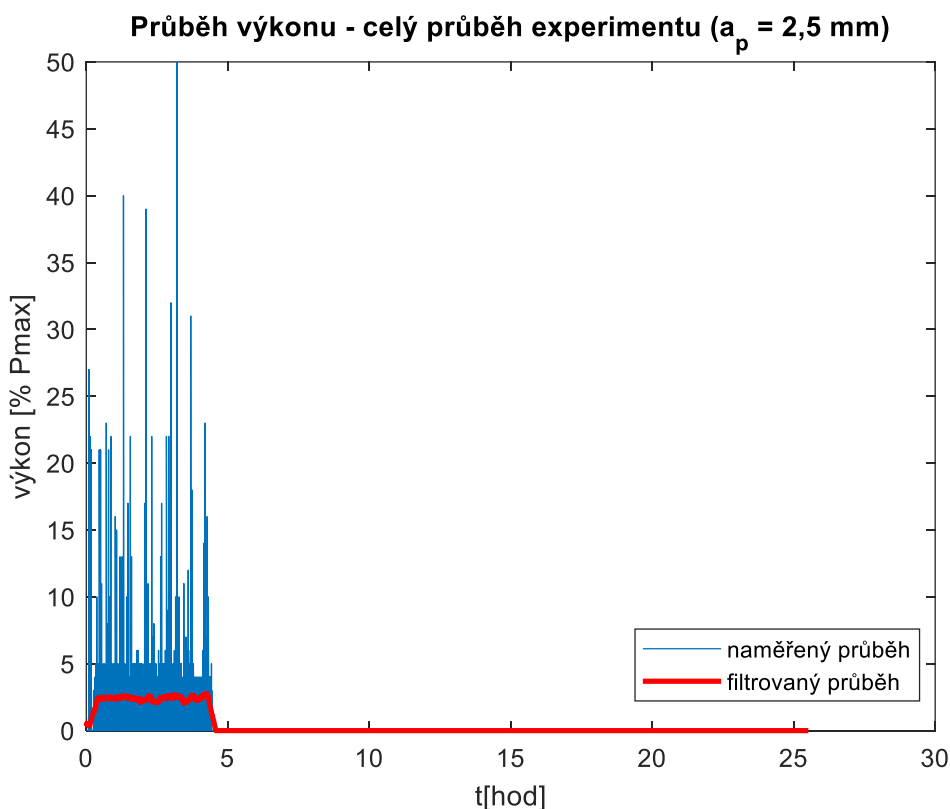


Obr. 22 - Ukázka nulování na průběhu teploty nástroje při obrábění

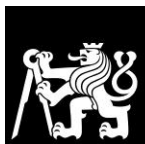


### 5.3 Filtrování

Naměřené průběhy některých veličin obsahují i šum. Tento šum je vhodné před použitím odfiltrovat. Pro odfiltrování použijeme plovoucí filtr. Plovoucí filtr byl naprogramován pomocí skriptu v programu MATLAB. Do programu se zadá vstupní filtrovaná veličina a proměnná *frame*. Tato proměnná představuje časové pásmo. Hodnoty z časového pásma se zprůměrují a tato průměrná hodnota se zapíše do nového datového souboru. Pro filtrování některých veličin v této práci bylo použito časové pásmo 900 vzorků. Ukázka filtrování je uvedena na Obr. 23, kde je naměřený a filtrovaný průběh výkonu při hloubkou třísky  $a_p = 2,5$  mm.



Obr. 23 - Ukázka filtrování na průběhu výkonu včetně při obrábění



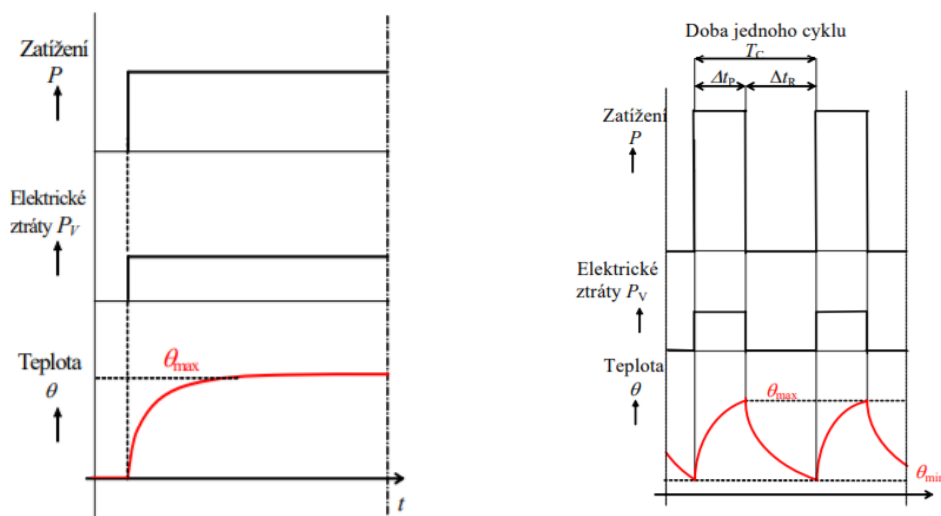
#### 5.4 Přepočet naměřeného výkonu

Každý experiment obsahuje informace o nastavení parametrů obrábění, jako je hloubka třísky, řezná rychlost, výkon vřetene atd. Výkon vřetene byl zjištěn na základě výpočtu v kalkulačce od firmy Sandvik. Po dosazení jednotlivých parametrů a informací o obráběném materiálu a nástroji získáme výsledný výkon. Tento výpočet byl prováděn již v rámci dřívějších výzkumů. Nyní bylo nutné vypočtenou hodnotu ověřit vzhledem k naměřenému průběhu výkonu.

Naměřený průběh výkonu je pouze procentuální podíl výkonu z maximálního výkonu vřetene. Z katalogového listu námi použitého vřetene byly zjištěny hodnoty maximálního výkonu  $P_{limit}$  pro jednotlivé režimy zatížení motoru. Konkrétně jsou v katalogu uvedeny pouze dva režimy [21]:

- **S1** – provoz při konstantním zatížení, který je dostatečně dlouhý pro dosažení ustálené teploty;
- **S6** – sled stejných pracovních cyklů, které zahrnují dobu provozu při konstantním zatížení a dobu chodu naprázdno (podíl dob uvádíme v %).

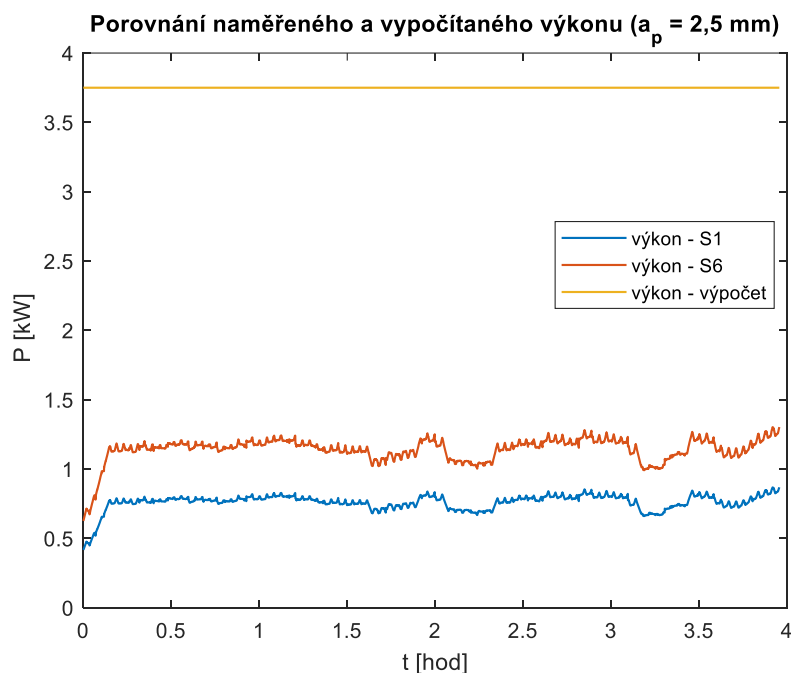
Na Obr. 24 můžeme vidět průběhy zatížení, elektrických ztrát a teploty při obou režimech zatížení.



Obr. 24 - Průběh zatížení - vlevo režim S1, vpravo režim S6 [21]



Přepoččet byl proveden pro oba režimy a následně porovnán s vypočtenou hodnotou výkonu. Ukázka zpracování je uvedena na Obr. 25, kde jsou zobrazeny průběhy přepočteného výkonu pro oba režimy a vypočtená hodnota pomocí kalkulačky Sandvik.



Obr. 25 - Porovnání naměřeného a vypočítaného výkonu (pro  $a_p = 2,5$  mm)

Z grafu na Obr. 25 můžeme určit přibližnou hodnotu skutečného výkonu. Tuto hodnotu určíme z průběhu výkonu při režimu S6. Přibližnou hodnotu skutečného výkonu získáme zprůměrováním průběhu po ustálení na určité hodnotě. Porovnání vypočtených a naměřených výkonů je uvedeno v Tab. 3.

Tab. 3 - Porovnání vypočteného a skutečného výkonu [17]

číslo experimentu	1	2	3	4 (Air Cutting)	5	6
výkon – výpočet [kW]	0,75	1,5	3,75	0	6	4
výkon – naměřeno [kW]	0,39	0,47	1,15	0,08	1,79	1,57



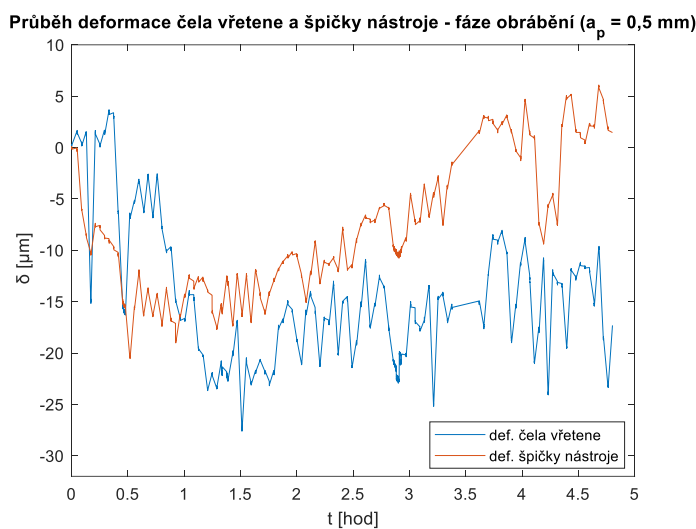
## **6 Výsledky experimentů s obráběním**

V následující kapitole jsou zobrazeny naměřené průběhy používaných deformací a teplot pro jednotlivé experimenty s obráběním hliníku. Na těchto datech byly aplikovány úpravy popsané v kapitole 5.

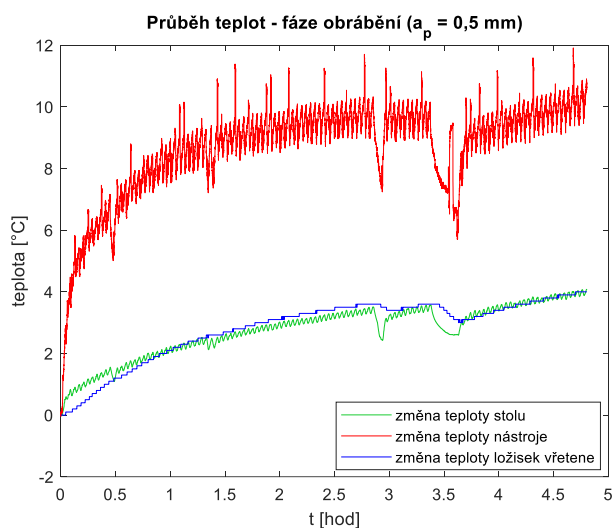


### 6.1 Experiment č. 1 ( $a_p = 0,5$ mm)

Prvním experimentem byl téměř 5 hodin dlouhý obráběcí cyklus popsán v kapitole 4.1. Během obrábění byla odebírána tříska o hloubce  $a_p = 0,5$  mm. Naměřené průběhy deformací jsou uvedeny na Obr. 26 a průběhy teplot na Obr. 27.



Obr. 26 - Průběh deformace čela vřetene a špičky nástroje při obrábění ( $a_p = 0,5$  mm)



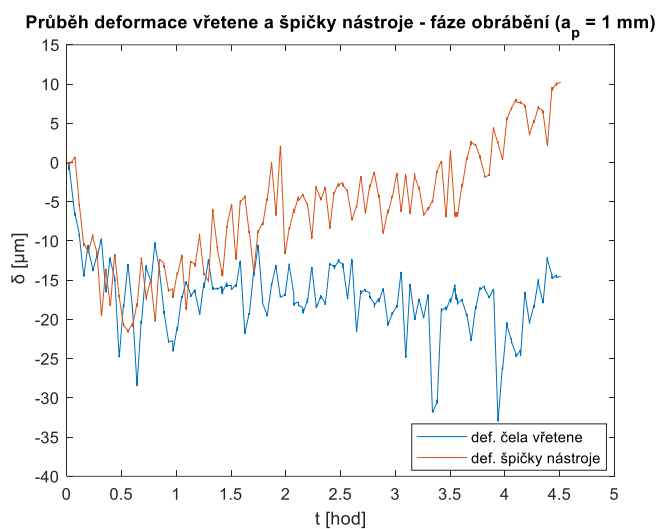
Obr. 27 - Průběh teplot při obrábění ( $a_p = 0,5$  mm)



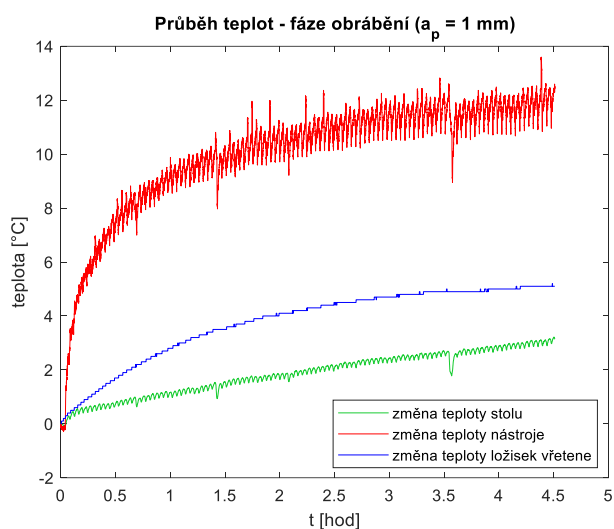


## 6.2 Experiment č. 2 ( $a_p = 1 \text{ mm}$ )

Druhým experimentem byl téměř 4,5 hodiny dlouhý obráběcí cyklus popsáný v kapitole 4.1. Během obrábění byla odebírána tříska o hloubce  $a_p = 1 \text{ mm}$ . Naměřené průběhy deformací jsou uvedeny na Obr. 28 a průběhy teplot na Obr. 29.



Obr. 28 - Průběh deformace čela vřetene a špičky nástroje při obrábění ( $a_p = 1 \text{ mm}$ )

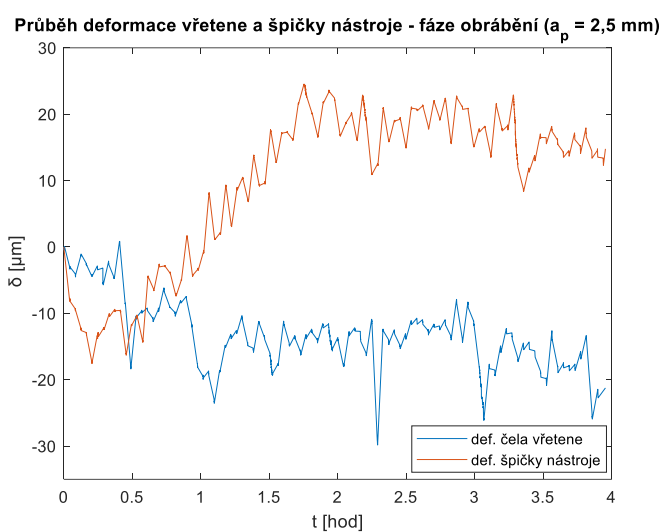


Obr. 29 - Průběh teplot při obrábění ( $a_p = 1 \text{ mm}$ )

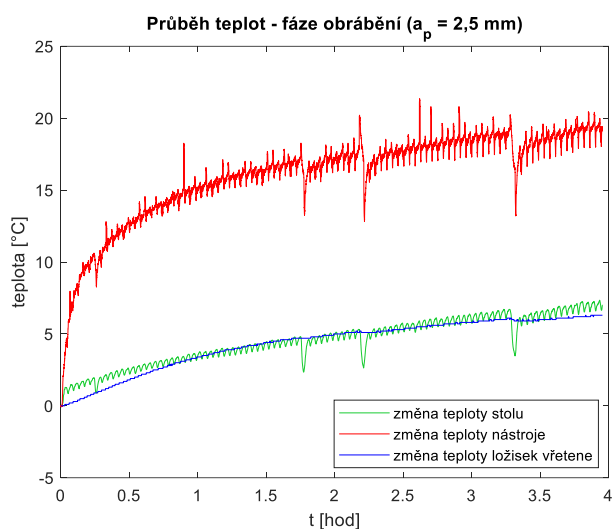


### 6.3 Experiment č. 3 ( $a_p = 2,5$ mm)

Třetím experimentem byl téměř 4 hodiny dlouhý obráběcí cyklus popsán v kapitole 4.1. Během obrábění byla odebírána tříska o hloubce  $a_p = 2,5$  mm. Naměřené průběhy deformací jsou uvedeny na Obr. 30 a průběhy teplot na Obr. 31.



Obr. 30 - Průběh deformace čela vřetene a špičky nástroje při obrábění ( $a_p = 2,5$  mm)

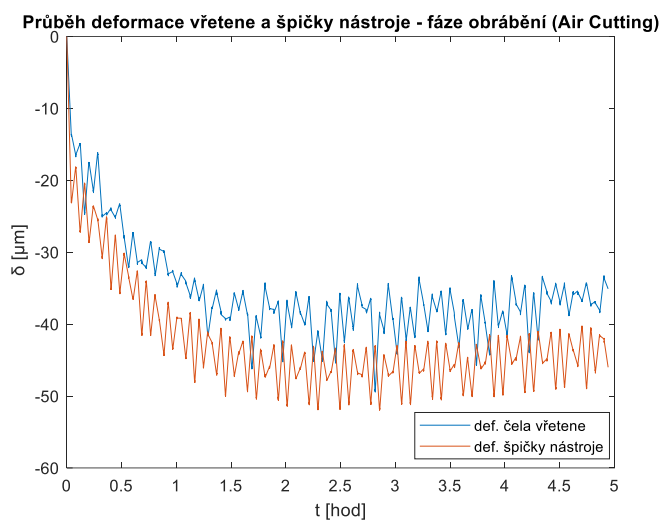


Obr. 31 - Průběh teplot při obrábění ( $a_p = 2,5$  mm)

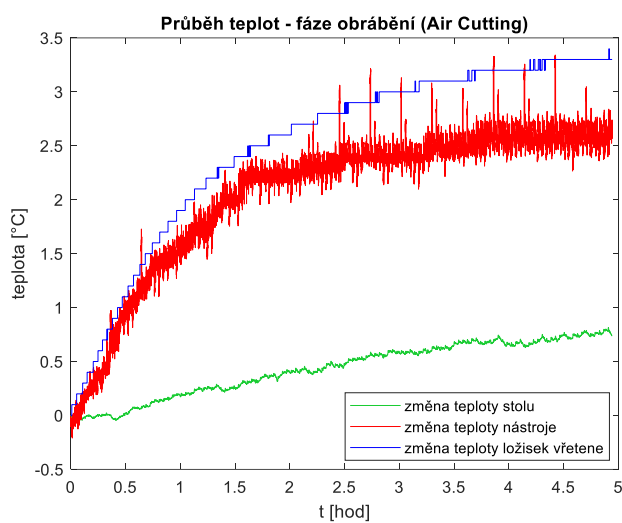


#### 6.4 Experiment č. 4 (bez obrábění, tzv. Air Cutting)

Dalším experimentem byl tzv. Air Cutting experiment. Při tomto experimentu nástroj projíždí zadanou řeznou dráhu, avšak bez přítomnosti obrobku. Dochází tedy k měření stroje bez zatížení řezným procesem. Naměřené průběhy deformací jsou uvedeny na Obr. 32 a průběhy teplot na Obr. 33.



Obr. 32 - Průběh deformace čela vřetene a špičky nástroje při obrábění (Air Cutting)

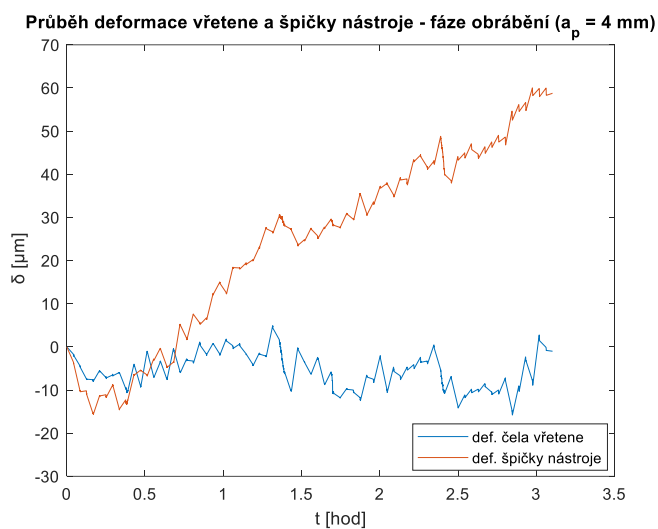


Obr. 33 - Průběh teplot při obrábění (Air Cutting)

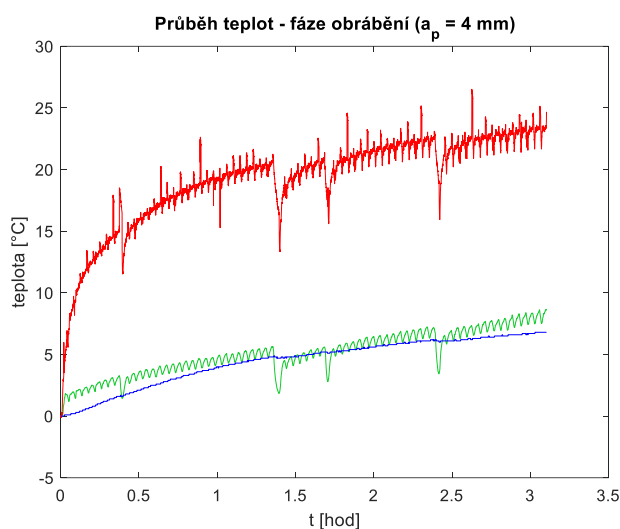


### 6.5 Experiment č. 5 ( $a_p = 4 \text{ mm}$ )

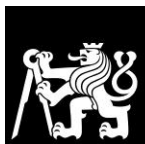
Pátým experimentem byl 3 hodiny dlouhý obráběcí cyklus popsán v kapitole 4.1. Během obrábění byla odebírána tříska o hloubka  $a_p = 4 \text{ mm}$ . Naměřené průběhy deformací jsou uvedeny na Obr. 34 a průběhy teplot na Obr. 35.



Obr. 34 - Průběh deformace čela vřetene a špičky nástroje při obrábění ( $a_p = 4 \text{ mm}$ )

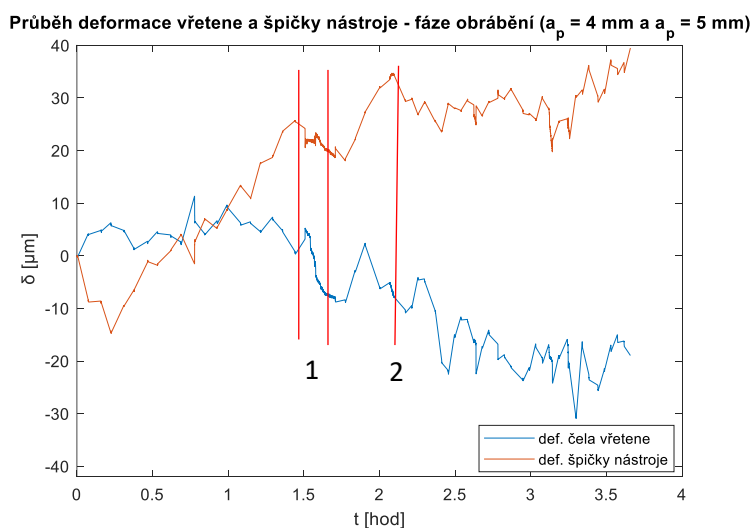


Obr. 35 - Průběh teplot při obrábění ( $a_p = 4 \text{ mm}$ )

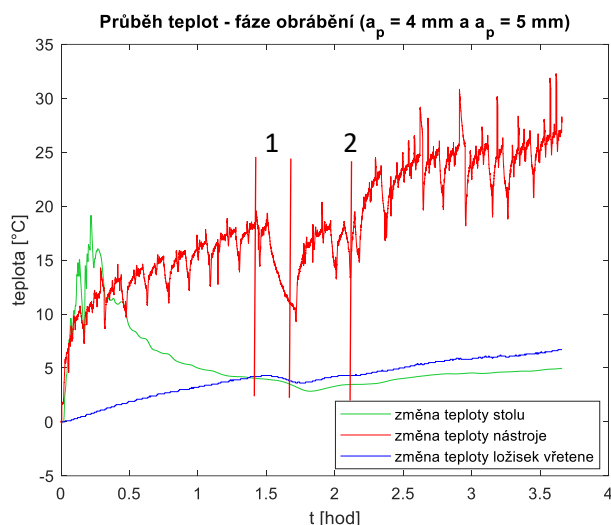


### 6.6 Experiment č. 6 ( $a_p = 4$ mm a $a_p = 5$ mm)

Posledním experimentem byl téměř 4 hodiny dlouhý obráběcí cyklus popsán v kapitole 4.1. Během obrábění byla nejdříve odebrána tříska o hloubce  $a_p = 4$  mm. Poté došlo ke změně technologických parametrů a až do konce experimentu byla odebrána tříska  $a_p = 5$  mm. Tento moment je v grafech znázorněn bodem 2. Experiment musel být přerušen kvůli poruše dopravníku třísek (v grafu znázorněno oblastí 1). Naměřené průběhy deformací jsou uvedeny na Obr. 36 a průběhy teplot na Obr. 37.



Obr. 36 - Průběh deformace čela vřetene a špičky nástroje při obrábění ( $a_p = 4$  mm a  $a_p = 5$  mm)



Obr. 37 - Průběh teplot při obrábění ( $a_p = 4 \text{ mm}$  a  $a_p = 5 \text{ mm}$ )

- 1 – porucha dopravníku třísek, přerušování experimentu  
2 – změna tech. parametrů ( $a_p = 5 \text{ mm}$ ,  $n = 3119 \text{ ot. min}^{-1}$ ,  $f = 3119 \text{ mm. min}^{-1}$ )

## 6.7 Shrnutí výsledků experimentů s obráběním

U téměř všech průběhů naměřených deformací se potýkáme s neočekávaným chováním. Deformace během obrábění vystoupá do plusových hodnot. Tento jev znamená zvětšování relativní vzdálenosti mezi špičkou nástroje a deskou stolu ve směru strojní osy Z, viz. Obr. 19. To odpovídá zkracování nebo zasouvání měřených částí směrem vzhůru do stroje. Důvod tohoto chování však není známý. Ke zpracování této práce jsou k dispozici pouze naměřená data z dřívějšího výzkumu. Z dat příčina tohoto jevu není patrná.

Důvodem neočekávaného chování může být odlišné chování slitiny hliníku oproti dříve zkoumaným materiálům (např. ocel). Dále zde nastal problém s nevyhovujícím odvodem třísek z pracovního prostoru. Třísky se hromadily v okolí stolu a tím docházelo k ovlivnění celé soustavy stroj – nástroj – obrobek.



## 7 Modely teplotních deformací

Úkolem této kapitoly je najít optimální model, který bude kompenzovat deformace během obrábění. Existuje mnoho možností, jak toho dosáhnout. Tato práce je zaměřena na následující metody:

- Aplikace již dříve vytvořeného modelu (model na principu PF);
- Metoda přenosových funkcí (PF);
- Regresní analýza (MLRA).

### 7.1 Aplikace vytvořeného modelu a jeho úprava

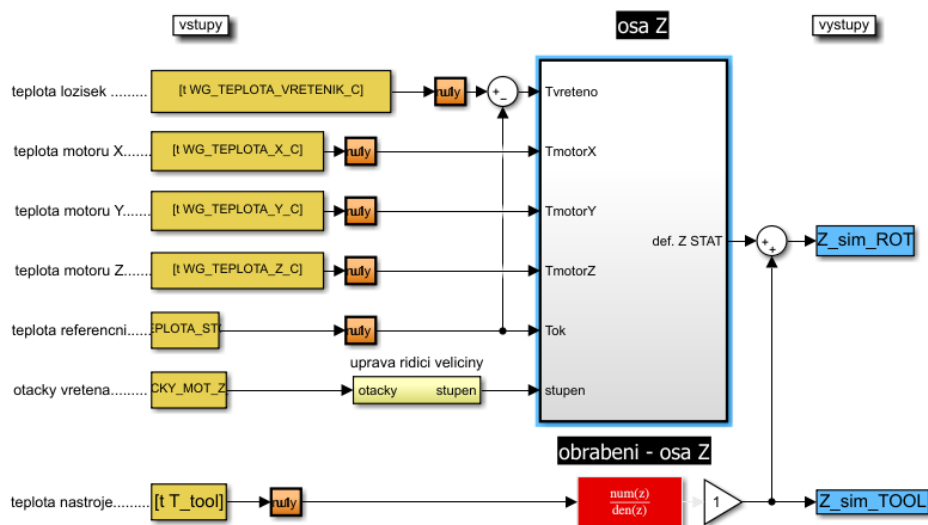
Během předchozího výzkumu vznikl kompenzační model, který je založen na několika PF. Tento model s dostatečnou kvalitou kompenzuje teplotní deformace při obrábění oceli. Struktura modelu je znázorněna na Obr. 38 [17].

#### 7.1.1 Model č. 1

Prvním použitým modelem je model tvořený a kalibrováný na obrábění oceli. Je založen na principu PF. Jeho struktura je uvedena na Obr. 38. Vstupy a výstupy tohoto modelu jsou uvedeny v Tab. 4.

Tab. 4 - Vstupy a výstupy modelu č. 1

Vstupy	Výstupy
Teplota ložisek vřetene	Deformace špičky nástroje
Teplota motoru osy X	Deformace těla nástroje
Teplota motoru osy Y	
Teplota motoru osy Z	
Teplota okolí	
Otáčky vřetene	
Teplota nástroje	

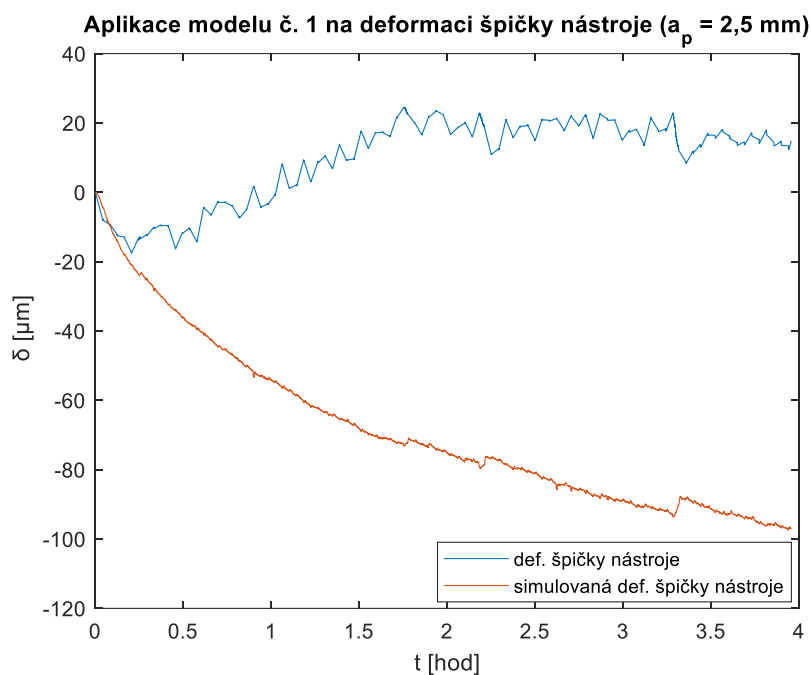


Obr. 38 – Struktura kompenzačního modelu pro obrábění oceli

Tento model, vzniklý na základě experimentů s obráběním oceli, je však nevyhovující a dostatečně nekompensuje teplotní chyby v případě obrábění hliníku (viz. Obr. 39). Hlavní příčinnou v odlišném teplotním chování je pravděpodobně množství a odvod třísek z pracovního prostoru. V případě slitiny hliníku se tento rozdíl projevuje i na deformaci stolu. Třísky na něm zůstávají a jeho deformace se chová nepředvídatelně.

Další rozdíl je v tom, že model pro obráběním oceli byl kalibrován na stroji jiného výrobního čísla s odlišným vřetenem než v případě obrábění hliníku.





Obr. 39 - Aplikace modelu č. 1 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 2,5$  mm)

Výsledkem aplikace je velký rozdíl mezi průběhy naměřené a simulované deformace špičky nástroje. *Reziduum* pro příklad s hloubkou třísky  $a_p = 2,5$  mm dosahuje maximální hodnoty **116 μm**. V Tab. 5 jsou uvedena *reziduum* pro všechny experimenty.

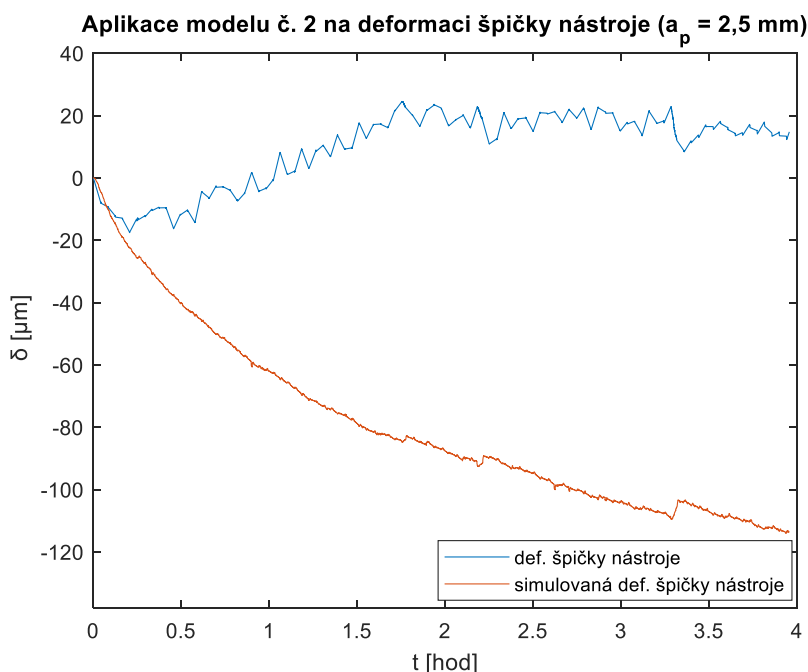
Tab. 5 - Maximální reziduum jednotlivých experimentů

Č. experimentu	1	2	3	4	5	6
Max. reziduum	57	81	116	29	170	151



### 7.1.2 Model č. 2

Druhý použitý model je téměř totožný s modelem č. 1. Jediným rozdílem bylo použití zesílení  $g = 1,25$ . Vynásobením složky deformace z teploty ložisek vřetene tímto zesílením získáme celkovou deformaci na špičce nástroje. Hodnota zesílení vychází z dřívějších výzkumů v RCMT, které jsou podrobně popsány v [20]. Zesílení by mělo kompenzovat odlišné vlastnosti vřetene. Vstupy a výstupy jsou totožné s modelem č. 1 a jsou uvedeny v Tab. 4.



Obr. 40 - Aplikace modelu č. 2 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 2,5$  mm)

Použití zesílení nepomohlo a tento model je opět nevyhovující (viz. Obr. 40). Z této aplikace vyplývá, že odlišné vlastnosti oceli a slitiny hliníku jsou při kompenzaci velmi zásadní.

Výsledkem aplikace je velký rozdíl mezi průběhy naměřené a simulované deformace špičky nástroje. *Reziduum* pro příklad s hloubkou třísky  $a_p = 2,5$  mm dosahuje maximální hodnoty **132  $\mu\text{m}$** . V Tab. 6 jsou uvedena *reziduum* pro všechny experimenty.



Tab. 6 - Maximální reziduum jednotlivých experimentů

Č. experimentu	1	2	3	4	5	6
Max. reziduum	66	94	132	27	188	168

## 7.2 Metoda PF

Další možností tvorby kompenzačního modelu je metoda PF. Následující modely jsou již tvořeny přímo z naměřených dat.

### 7.2.1 Model č. 3

Model č. 3 se skládá ze 2 PF. První PF je tvořena na základě testu bez obrábění (Air Cutting – nástroj objíždí řezné dráhy bez přítomnosti obrobku) a druhá na základě 2. měření (hloubka třísky  $a_p = 1$  mm). Vstupy a výstupy tohoto modelu jsou uvedeny v Tab. 7.

Tab. 7 - Vstupy a výstupy modelu č. 3

Č. experimentu	Vstupy	Výstupy
4 Air Cutting	Teplota ložisek vřetene	Deformace čela vřetene
2 $a_p = 1$ mm	Teplota nástroje	Deformace těla nástroje
<b>Součet</b>		<b>Deformace špičky nástroje</b>

Po sečtení výstupů z obou PF získáme simulovaný průběh deformace špičky nástroje ve směru osy Z.

K získání optimální PF musíme pomocí skriptu v softwaru MATLAB projít veškeré varianty složení polynomů PF. U každé varianty složení řádu čitatele (1 – 4) a jmenovatele (1 – 4) vytvoříme dva modely. Jeden je typu ARX a druhý typu OE. Pro každý model máme ihned k dispozici simulovaný průběh žádané veličiny, odezvu na jednotkový skok a hodnotu *fit*, která nám určuje kvalitu aproximace



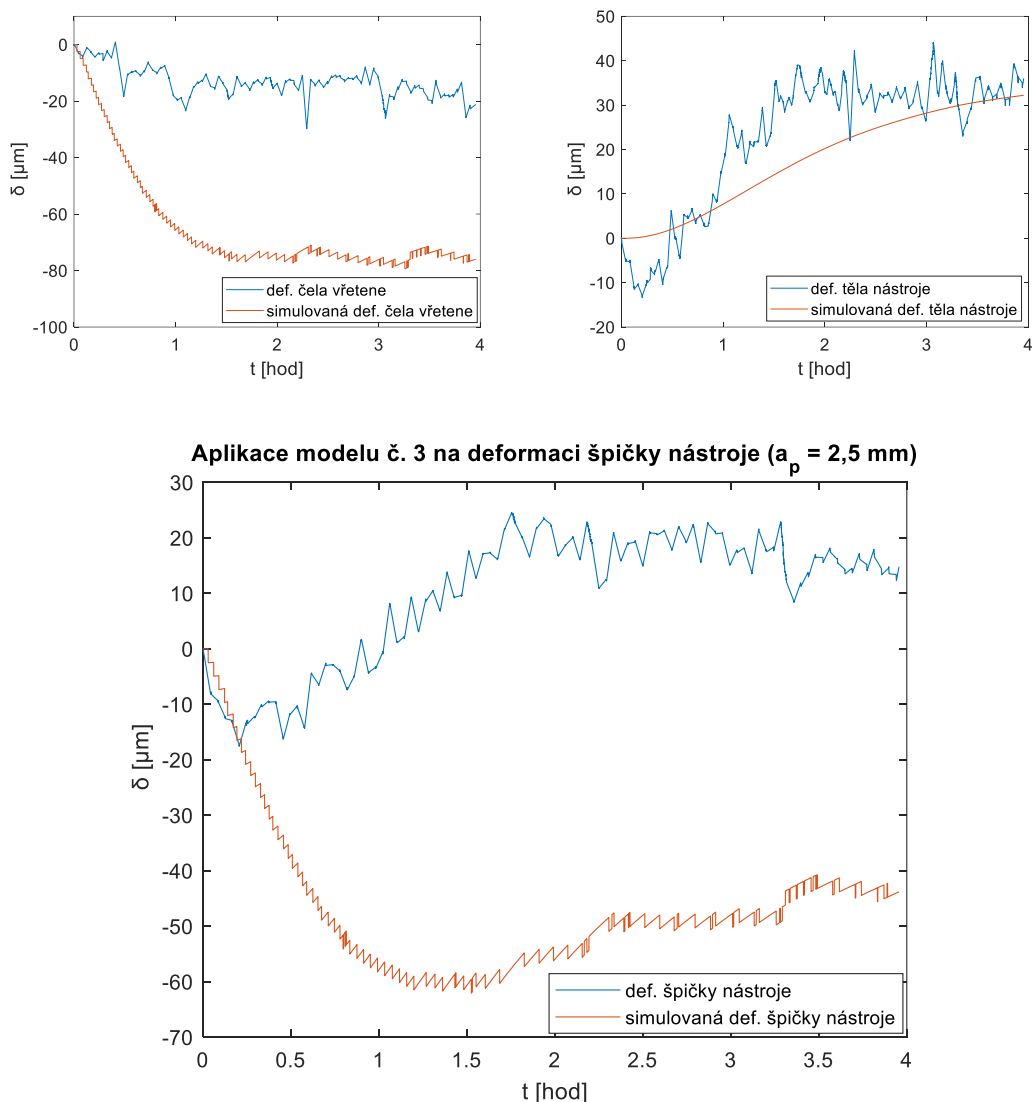
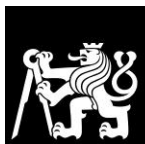
(viz kap. 3.4.4). Podle odezvy na jednotkový skok a hodnoty *fit* hodnotíme jednotlivé modely. Ideální je volba co nejnižšího řádu čitatele a jmenovatele PF. V Tab. 8 je přehled hodnot *fit* pro jednotlivé kombinace řádů čitatele (*n*) a jmenovatele (*m*) pro PF vycházející z experimentu bez obrábění (experiment č. 4 - Air Cutting).

Tab. 8 - Porovnání *fit* modelů

n	m	fit	
		arx	oe
1	1	0	0
1	2	45	0
1	3	45	0
1	4	45	0
2	1	0	0
2	2	0	0
2	3	0	46
2	4	0	0
3	1	0	0
3	2	0	46
3	3	0	46
3	4	0	46
4	1	0	0
4	2	38	0
4	3	37	0
4	4	37	0

Jako nejvhodnější byla vybrána PF s 1. řádem čitatele a 2. řádem jmenovatele. I když nemá nejvyšší hodnotu *fit*, je vhodnější volit model s nižšími řády. Rozdíl mezi hodnotami *fit* je totiž v řádech procent.

Vytvořenou PF dále aplikujeme na ostatní experimenty. Stejný postup provedeme i při hledání vhodné PF kalibrované na 2. experimentu. Poté simulované průběhy oběma PF pro jednotlivé experimenty sečteme a získáme simulovaný průběh deformace špičky nástroje ve směru osy Z. Ukázka simulovaných deformací je uvedena na Obr. 41.



Obr. 41 - Aplikace modelu č. 3 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 2,5$  mm) (nahore vlevo - def. čela vřetene; nahore vlevo - def. těla nástroje)

Při použití modelu č. 3 dosahujeme lepších výsledků než u předchozích modelů. Kvalita aproximace teplotních deformací ve směru osy Z tohoto modelu je však stále nedostatečná. Z porovnání deformací můžeme vidět, že značná nepřesnost je vnášena PF mezi teplotou ložisek vřetene a deformací čela vřetene.

Výsledkem aplikace je velký rozdíl mezi průběhy naměřené a simulované deformace špičky nástroje. *Reziduum* pro příklad s hloubkou třísky  $a_p = 2,5$  mm



dosahuje maximální hodnoty **82  $\mu\text{m}$** . V Tab. 9 jsou uvedena *reziduum* pro všechny experimenty.

Tab. 9 - Maximální reziduum jednotlivých experimentů

Č. experimentu	1	2	3	4	5	6
Max. reziduum	37	51	82	20	114	92

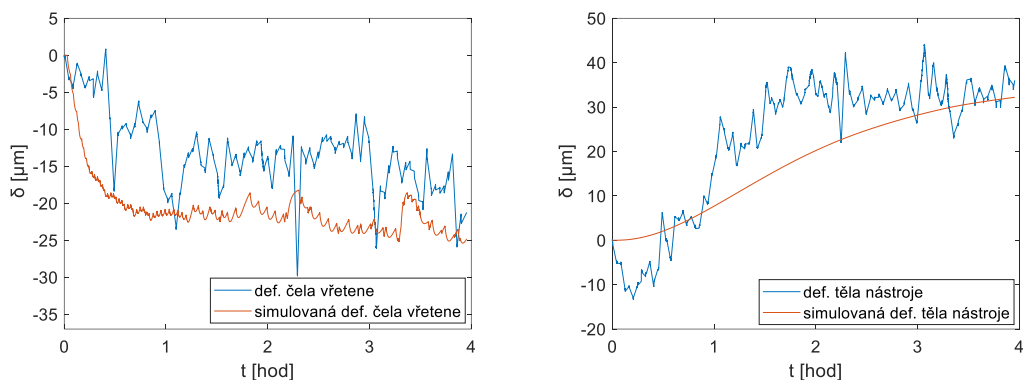
### 7.2.2 Model č. 4

Z modelu č. 3 vyplývá, že hlavní nepřesnost je do modelu vnášena PF mezi teplotou ložisek vřetene a deformací čela vřetene. Proto je v dalším modelu tato PF kalibrována na experimentu, kdy docházelo k obrábění slitiny hliníku, konkrétně na 2. experimentu. Vstupy a výstupy tohoto modelu jsou uvedeny v Tab. 10.

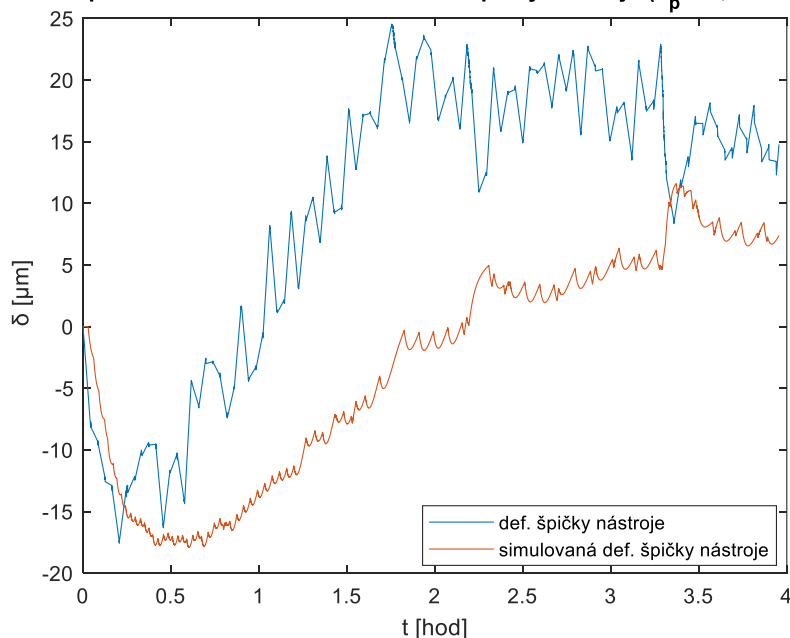
Tab. 10 - Vstupy a výstupy modelu č. 4

Č. experimentu	Vstupy	Výstupy
2 $a_p = 1 \text{ mm}$	Teplota ložisek vřetene	Deformace čela vřetene
2 $a_p = 1 \text{ mm}$	Teplota nástroje	Deformace těla nástroje
<b>Součet</b>		<b>Deformace špičky nástroje</b>

Postup tvorby PF je totožný s postupem uvedeným v kapitole 7.2.1. Pro PF mezi teplotou ložisek vřetene a deformací čela vřetene byla zvolena funkce typu OE s 2. řádem čitatele a 3. řádem jmenovatele. PF mezi teplotou nástroje a deformací těla nástroje je typu ARX s 3. řádem čitatele a 1. řádem jmenovatele. Vytvořené PF aplikujeme na data ze všech naměřených experimentů. Tím získáme simulované průběhy deformace čela vřetene a těla nástroje. Jejich součtem je simulovaný průběh deformace špičky nástroje. Ukázka simulovaných deformací je uvedena na Obr. 42.



**Aplikace modelu č. 4 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 2,5$  mm)**



Obr. 42 - Aplikace modelu č. 4 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 2,5$  mm) (nahore vlevo - def. čela vřetene; nahore vlevo - def. těla nástroje)

Při použití modelu č. 4 dosahujeme lepších výsledků oproti předchozím modelům. Kvalita modelu je však stále nedostatečná, hlavně u experimentů s větší třískou. *Reziduum* pro příklad s hloubkou třísky  $a_p = 2,5$  mm dosahuje maximální hodnoty **28  $\mu\text{m}$** . V Tab. 11 jsou uvedena *reziduum* pro všechny experimenty.



Tab. 11 - Maximální reziduum jednotlivých experimentů

Č. experimentu	1	2	3	4	5	6
Max. reziduum	14	10	28	45	53	35

### 7.2.3 Model č. 5

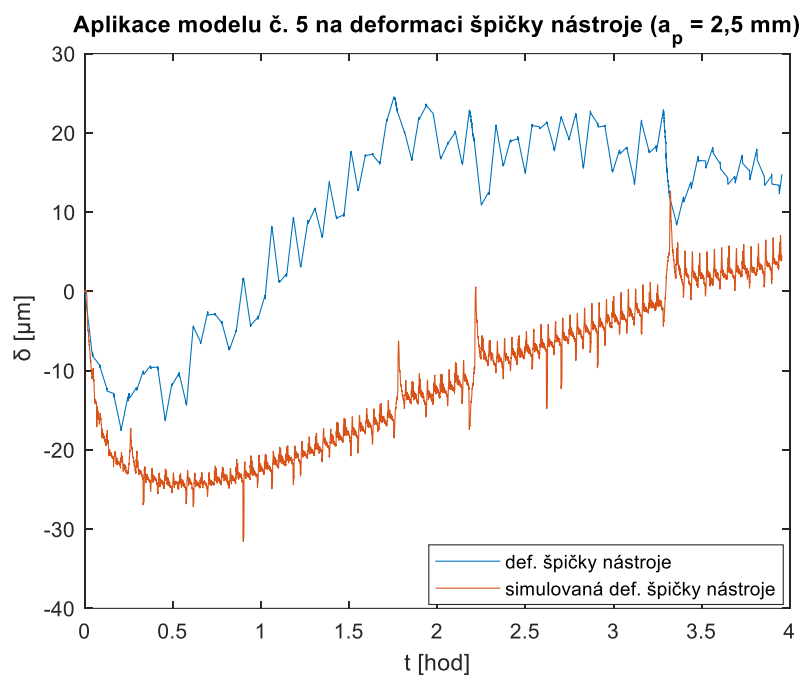
V předchozích modelech byly vytvořeny dvě PF a výsledná deformace špičky nástroje byla získána po sečtení simulovaných deformací z PF. Model č. 5 je založen na kompenzování PF přímo deformace špičky nástroje. Funkce je kalibrována na experimentu s obráběním, konkrétně s hloubkou třísky  $a_p = 1$  mm (2. experiment). Vstupy a výstupy tohoto modelu jsou uvedeny v Tab. 12.

Tab. 12 - Vstupy a výstupy modelu č. 5

Č. experimentu	Vstupy	Výstupy
2 $a_p = 1$ mm	Teplota nástroje	Deformace špičky nástroje

Postup tvorby PF je totožný s postupem uvedeným v kapitole 7.2.1. Zvolena byla funkce typu ARX s 1. řádem čitatele a 4. řádem jmenovatele. Vytvořenou PF aplikujeme na data ze všech naměřených experimentů a získáme simulovaný průběhy deformace špičky nástroje. Ukázka simulovaných deformací je uvedena na Obr. 43.





Obr. 43 - Aplikace modelu č. 5 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 2,5$  mm)

Při použití modelu č. 5 získáme u obrábění s větší hloubkou třísky horší výsledky než u modelu č. 4. U těchto měření je kvalita modelu nedostatečná. *Reziduum* pro příklad s hloubkou třísky  $a_p = 2,5$  mm dosahuje maximální hodnoty **43  $\mu\text{m}$** . V Tab. 13 jsou uvedena *reziduum* pro všechny experimenty.

Tab. 13 - Maximální reziduum jednotlivých experimentů

Č. experimentu	1	2	3	4	5	6
Max. reziduum	14	13	43	51	68	60



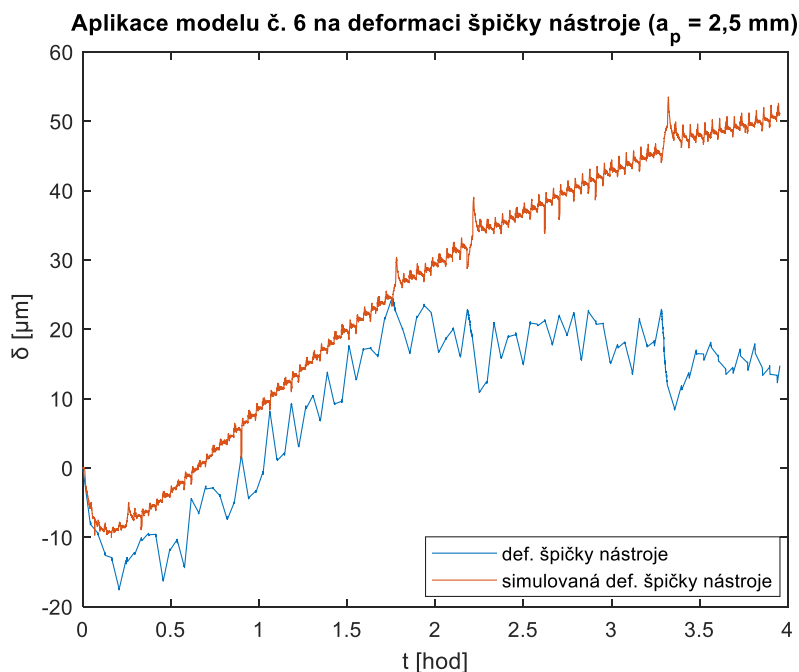
#### 7.2.4 Model č. 6

V modelu č. 5 se vyskytuje problém s kvalitou aproximace u experimentů s větší hloubkou třísky. Proto model č. 6 budeme kalibrovat na experimentu č. 6, kde se nám hloubka třísky v průběhu měření dokonce zvětšuje. PF bude stejně jako u modelu č. 5 kompenzovat přímo deformaci špičky nástroje. Vstupy a výstupy tohoto modelu jsou uvedeny v Tab. 14.

Tab. 14 - Vstupy a výstupy modelu č. 6

Č. experimentu	Vstupy	Výstupy
6 $a_p = 4 \text{ mm}$ a $a_p = 5 \text{ mm}$	Teplota nástroje	Deformace špičky nástroje

Postup tvorby PF je totožný s postupem uvedeným v kapitole 7.3. Zvolena byla funkce typu ARX s 1. řádem čitatele a 2. řádem jmenovatele. Vytvořenou PF aplikujeme na data ze všech naměřených experimentů a získáme simulovaný průběhy deformace špičky nástroje. Ukázka simulovaných deformací je uvedena na Obr. 44.



Obr. 44 - Aplikace modelu č. 6 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 2,5 \text{ mm}$ )



Při použití modelu č. 6 získáme lepší výsledky než u předchozího modelu. U měření s větší hloubkou třísky simulované průběhy deformace špičky nástroje téměř kopírují naměřený průběh deformace. *Reziduum* pro příklad s hloubkou třísky  $a_p = 2,5$  mm dosahuje maximální hodnoty **42  $\mu\text{m}$** . V Tab. 15 jsou uvedena *reziduum* pro všechny experimenty.

Tab. 15 - Maximální reziduum jednotlivých experimentů

Č. experimentu	1	2	3	4	5	6
Max. reziduum	36	39	42	57	13	35

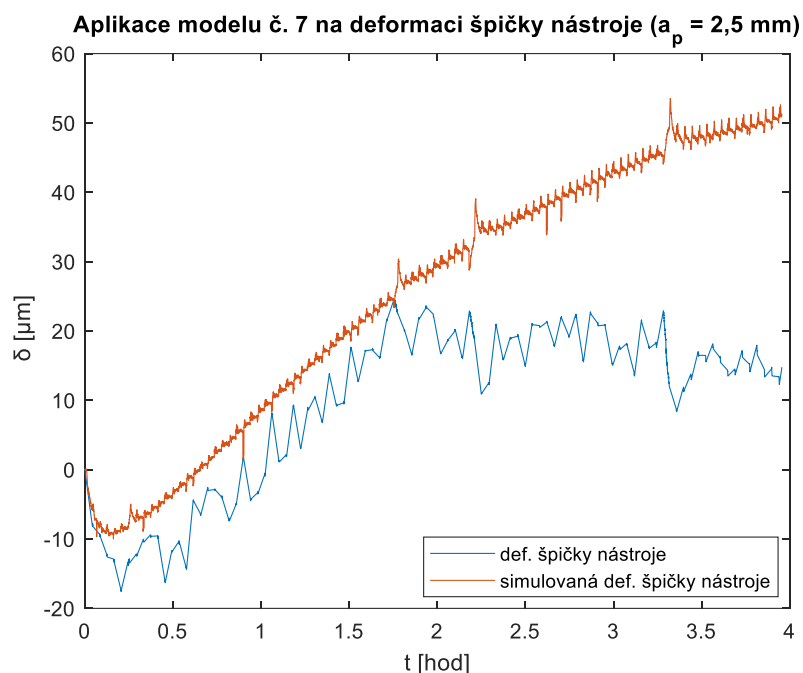
### 7.2.5 Model č. 7

Model č. 5 má nejvyšší kvalitu pro obrábění s menší hloubkou třísky. Model č. 6 má nejvyšší kvalitu pro obrábění s větší hloubkou třísky. Proto by bylo vhodné vytvořit model č. 7, který by se skládal z těchto dvou PF. Hranicí mezi funkcemi bylo zvoleno obrábění s hloubkou třísky  $a_p = 2,5$  mm, kdy je *reziduum* téměř totožné. Pro toto obrábění by bylo vhodné použít funkci kalibrovanou na experimentu č. 6, která lépe kopíruje průběh deformace špičky nástroje. Vstupy a výstupy tohoto modelu jsou uvedeny v Tab. 16.

Tab. 16 - Vstupy a výstupy modelu č. 7

Č. experimentu	Vstupy	Výstupy
2 $a_p = 1$ mm	Teplota nástroje	Deformace špičky nástroje
6 $a_p = 4$ mm a $a_p = 5$ mm	Teplota nástroje	Deformace špičky nástroje

Model č. 7 tedy kombinuje 2 PF vytvořené pro model č. 5 a 6. Ukázka aplikace modelu č. 7 pro obrábění hliníku s axiální hloubkou třísky  $a_p = 2,5$  mm je na Obr. 45.

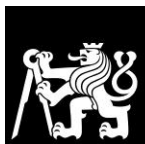


Obr. 45 - Aplikace modelu č. 7 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 2,5$  mm)

Při použití modelu č. 7 získáme lepší výsledky než u předchozích modelů. U většiny měření simulované průběhy deformace špičky nástroje téměř kopírují naměřený průběh deformace. *Reziduum* pro příklad s hloubkou třísky  $a_p = 2,5$  mm dosahuje maximální hodnoty **42 μm**. V Tab. 17 jsou uvedena *reziduum* pro všechny experimenty. Žlutě zbarvená políčka jsou experimenty, pro které byla ke kompenzaci použita 1. přenosová funkce (1. PF – kalibrovaná na experimentu s  $a_p = 1$  mm, viz model č. 5), zeleně jsou experimenty kompenzované 2. přenosovou funkcí (2. PF – kalibrovaná na experimentu s  $a_p = 4$  mm a  $a_p = 5$  mm, viz model č. 6).

Tab. 17 - Maximální rezidua jednotlivých experimentů

Č. experimentu	1	2	3	4	5	6
Max. reziduum	14	13	42	51	13	35



### 7.3 Regresní analýza MLRA

Poslední metodou, která bude v této práci použita, je regresní analýza. Motivací pro její použití je možnost, že by ke kompenzaci stačil pouze jediný model, který by neměl hranice aplikovatelnosti vzhledem k hloubce třísky.

Před samotnou tvorbou jednotlivých kompenzačních modelů bylo nutné provést korelační analýzu. Analýza byla provedena několika způsoby. Prvním způsobem byla analýza všech naměřených teplot a zjištění, zda reagují na probíhající obrábění.

Při druhém způsobu byl použit skript v softwaru Matlab. Do něj se pouze vloží veškeré naměřené teploty a deformace, na kterých zkoumáme vzájemnou závislost. Výzkum byl proveden na 2 experimentech (č. 2. a č. 6.). Motivací pro tento výběr bylo to, že získáme popis v celém rozsahu hloubky třísky.

V posledním případě byl pro korelační analýzu opět použit software Matlab. Tentokrát však byl proveden na všech realizovaných experimentech. Korelační koeficienty u jednotlivých teplot byly zprůměrovány a vybrány jen s hodnotou větší než 50. Porovnání jednotlivých metod je zobrazeno v Tab. 18.

Tab. 18 - Porovnání metod výběru vstupů

Teplota	1. způsob	2. způsob	3. způsob
T1_stul	✓	✓	
T2_prac_prost		✓	
T_Motor_A			
T_tool	✓	✓	✓
WG_TEP_PRICNIK			
WG_TEP_S_C		✓	✓
WG_TEP_STOJAN			
WG_TEP_TABLE_AKT	✓		
WG_TEP_VRETENIK_C	✓	✓	✓
WG_TEP_X_C			
WG_TEP_Y_C			
WG_TEP_Z_C	✓		



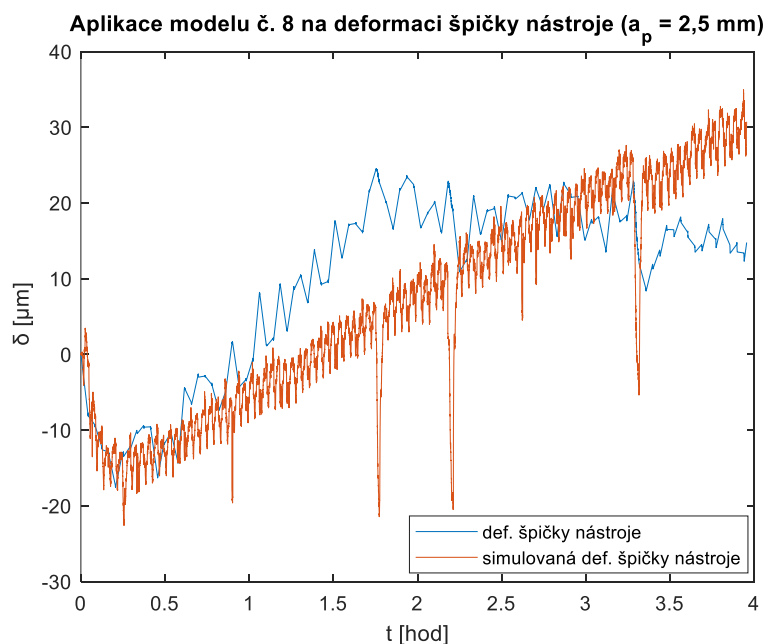
### 7.3.1 Model č. 8

Model č. 8 je tvořen na základě 2. měření (hloubka třísky  $a_p = 1$  mm). Vstupy a výstupy tohoto modelu jsou uvedeny v Tab. 19.

Tab. 19 - Vstupy a výstupy modelu č. 8

Č. experimentu	Vstupy	Výstupy
2 $a_p = 1$ mm	Teplota stolu	Deformace špičky nástroje
	Teplota v prac. prostoru	
	Teplota nástroje	
	Teplota motoru vřeteně	
	Teplota vřeteníku	

MLRA model je vytvořen pomocí skriptu v softwaru MATLAB. Po vložení výše uvedených vstupů a výstupů získáme váhové koeficienty pro jednotlivé vstupy (viz kap. 3.4.3, str. 25). Těmito koeficienty vynásobíme teplotní vstupy u všech naměřených experimentů a získáme simulovaný průběh deformace špičky nástroje. Ukázka aplikace modelu č. 8 je na Obr. 46.



Obr. 46 - Aplikace modelu č. 8 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 2,5$  mm)



Při použití modelu č. 8 získáme horší výsledky než u předchozích modelů. Se zvětšující hloubkou třísky se *reziduum* také zvětšuje a průběhy deformace jsou odlišné od naměřených. *Reziduum* pro příklad s hloubka třísky  $a_p = 2,5$  mm dosahuje maximální hodnoty **44  $\mu\text{m}$** . V Tab. 20 jsou uvedena *reziduum* pro všechny experimenty.

Tab. 20 - Maximální reziduum jednotlivých experimentů

Č. experimentu	1	2	3	4	5	6
Max. reziduum	29	11	44	58	58	215

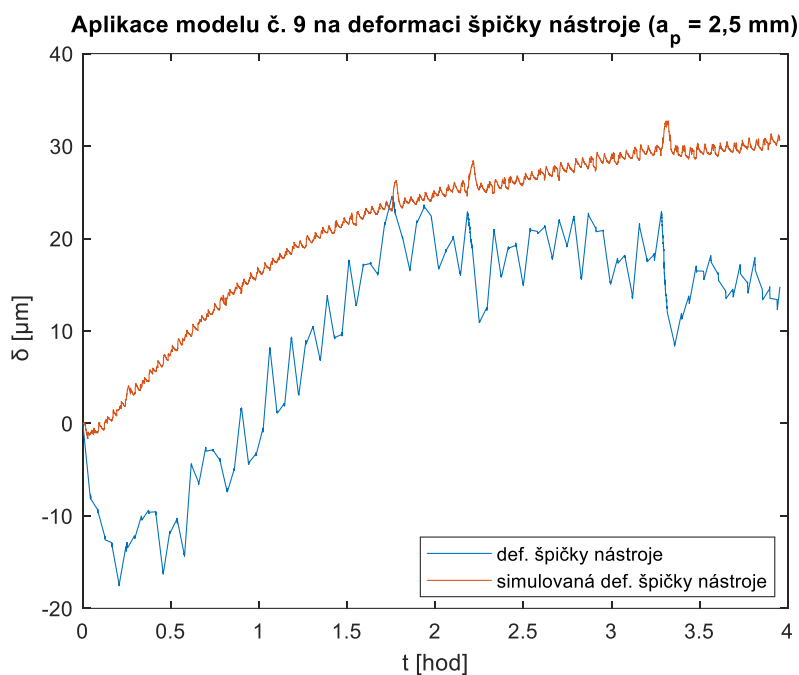
### 7.3.2 Model č. 9

Model č. 9 také využívá metodu MLRA je vytvořen na základě 6. měření (hloubka třísky  $a_p = 4$  mm a  $a_p = 5$  mm). Vstupy a výstupy tohoto modelu jsou uvedeny v Tab. 21.

Tab. 21 - Vstupy a výstupy modelu č. 9

Č. experimentu	Vstupy	Výstupy
6 $a_p = 4$ mm a $a_p = 5$ mm	Teplota stolu	Deformace špičky nástroje
	Teplota v prac. prostoru	
	Teplota nástroje	
	Teplota motoru vřetene	
	Teplota vřeteníku	

Postup tvorby model č. 9 založeného na MLRA je vytvořen analogicky jako v případě modelu č. 8, viz předchozí kap. 7.3.1. Ukázka aplikace modelu č. 9 je na Obr. 47.



Obr. 47 - Aplikace modelu č. 9 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 2,5$  mm)

Při použití modelu č. 9 získáme lepší výsledky než u předchozího modelu. *Reziduum* se u většiny modelů pohybuje v podobných hodnotách. Výjimkou je opět test bez obrábění (experiment č. 4 - Air Cutting a kalibrační experiment (č. 6.)). *Reziduum* pro příklad s hloubkou třísky  $a_p = 2,5$  mm dosahuje maximální hodnoty **23  $\mu\text{m}$** . V Tab. 22 jsou uvedena *reziduum* pro všechny experimenty.

Tab. 22 - Maximální reziduum jednotlivých experimentů

Č. experimentu	1	2	3	4	5	6
Max. reziduum	32	35	23	72	30	12





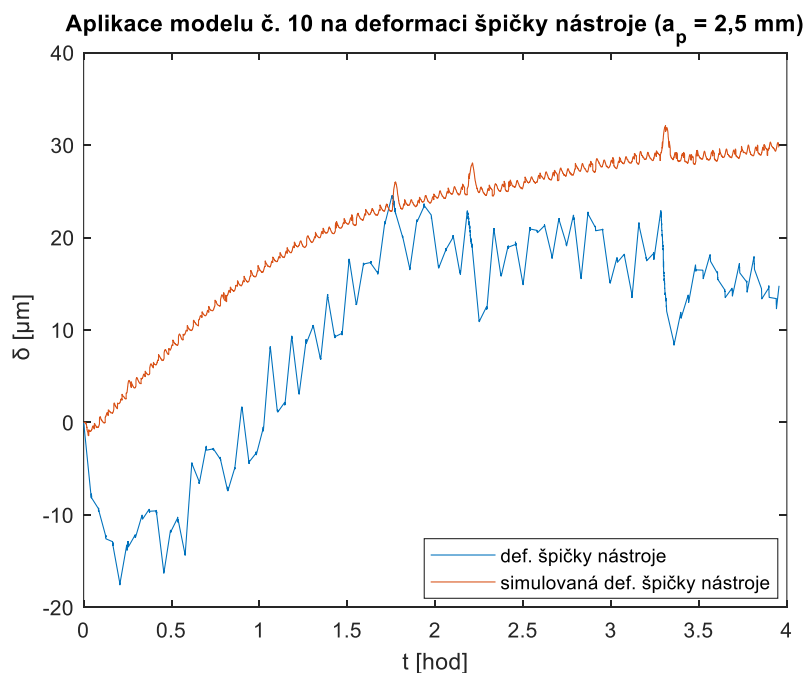
### 7.3.3 Model č. 10

Model č. 10 je tvořen na základě 2. měření (hloubka třísky  $a_p = 1$  mm). Vstupy do modelu jsou totožné s modelem č. 9, ale chybí zde teplota nástroje. Tento vstup byl vypuštěn. Existuje totiž předpoklad, že by mohl právě tento vstup vnášet do modelů nepřesnosti. Vstupy a výstupy tohoto modelu jsou uvedeny v Tab. 23.

Tab. 23 - Vstupy a výstupy modelu č. 10

Č. experimentu	Vstupy	Výstupy
6 $a_p = 4$ mm a $a_p = 5$ mm	Teplota stolu	Deformace špičky nástroje
	Teplota v prac. prostoru	
	Teplota motoru vřetene	
	Teplota vřeteníku	

Postup tvorby model č. 10 založeného na MLRA je vytvořen analogicky jako v případě modelu č. 8, viz předchozí kap. 7.3.1. Ukázka aplikace modelu č. 10 je na Obr. 48.



Obr. 48 - Aplikace modelu č. 10 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 2,5$  mm)



Při použití modelu č. 10 získáme velmi podobné výsledky jako u předchozího modelů. Hypotéza ohledně ovlivnění teplotou nástroje se nepotvrdila. *Reziduum* se u většiny modelů pohybuje v podobných hodnotách. Výjimkou je opět experiment bez obrábění (experiment č. 4 - Air Cutting) a kalibrační experiment (č. 6.). *Reziduum* pro příklad s hloubkou třísky  $a_p = 2,5$  mm dosahuje maximální hodnoty **24  $\mu\text{m}$** . V Tab. 24 jsou uvedena *reziduum* pro všechny experimenty.

Tab. 24 - Maximální reziduum jednotlivých experimentů

Č. experimentu	1	2	3	4	5	6
Max. reziduum	31	36	24	70	30	12

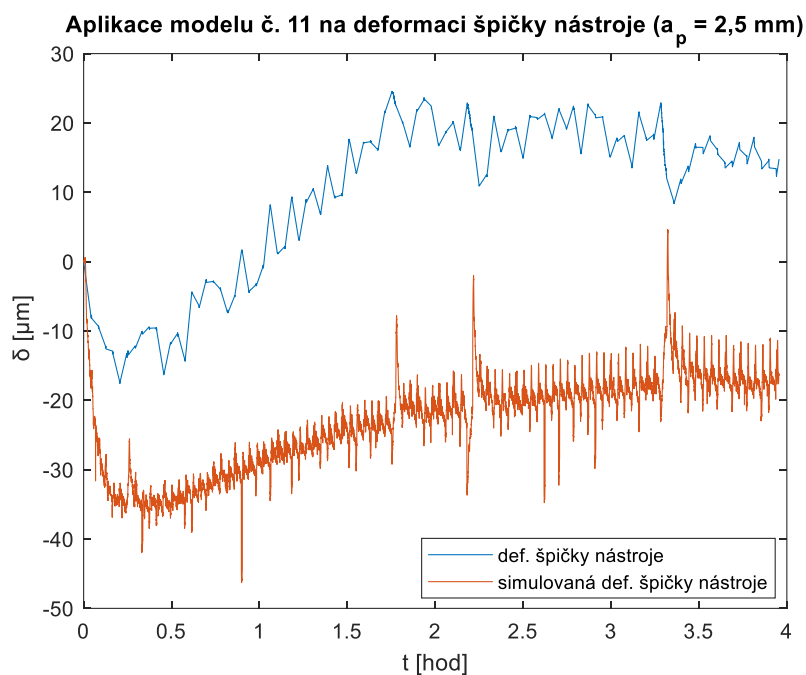
#### 7.3.4 Model č. 11

Model č. 11 je sestaven na základě 2. měření (hloubka třísky  $a_p = 1$  mm). Vstupy do modelu byly určeny 3. způsobem, který byl popsán v úvodu kapitoly 7.3. Vstupy a výstupy tohoto modelu jsou uvedeny v Tab. 25.

Tab. 25 - Vstupy a výstupy modelu č. 11

Č. experimentu	Vstupy	Výstupy
2 $a_p = 1$ mm	Teplota nástroje	Deformace špičky nástroje
	Teplota motoru vřetene	
	Teplota vřeteníku	

Postup tvorby model č. 11 založeného na MLRA je vytvořen analogicky jako v případě modelu č. 8, viz předchozí kap. 7.3.1. Ukázka aplikace modelu č. 11 je na Obr. 49.



Obr. 49 - Aplikace modelu č. 11 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 2,5$  mm)

Při použití modelu č. 11 získáme horší výsledky než u předchozího modelu. Redukce teplotních vstupů je tedy v našem případě nevhodný krok. *Reziduum* pro příklad s hloubkou třísky  $a_p = 2,5$  mm dosahuje maximální hodnoty **56  $\mu\text{m}$** . V Tab. 26 jsou uvedena *reziduum* pro všechny experimenty.

Tab. 26 - Maximální reziduum jednotlivých experimentů

Č. experimentu	1	2	3	4	5	6
Max. reziduum	15	16	56	76	97	108



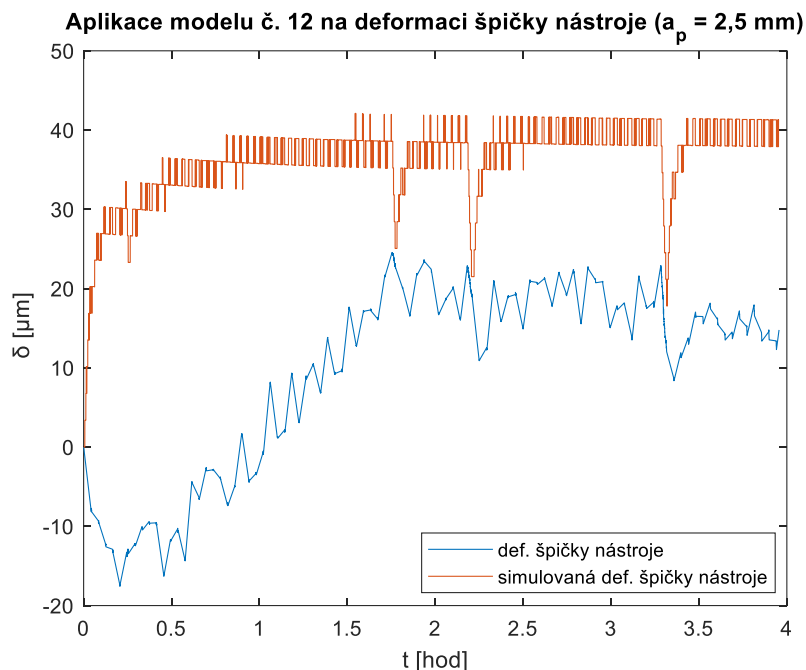
### 7.3.5 Model č. 12

Model č. 12 je sestaven na základě 2. měření (hloubka třísky  $a_p = 1$  mm). Vstupy do modelu byly určeny 3. způsobem, který byl popsán v úvodu kapitoly 7.3. Jsou totožné s modelem č. 11, ale chybí zde teplota nástroje. Tento vstup byl vypuštěn, protože si znovu ověříme, zda nám vnáší do modelů nepřesnosti. Vstupy a výstupy tohoto modelu jsou uvedeny v Tab. 27.

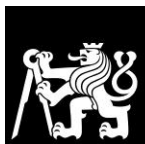
Tab. 27 - Vstupy a výstupy modelu č. 12

Č. experimentu	Vstupy	Výstupy
2	Teplota motoru vřetene	Deformace špičky nástroje
$a_p = 1$ mm	Teplota vřeteníku	

Postup tvorby model č. 12 založeného na MLRA je vytvořen analogicky jako v případě modelu č. 8, viz předchozí kap. 7.3.1. Ukázka aplikace modelu č. 12 je na Obr. 50.



Obr. 50 - Aplikace modelu č. 12 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 2,5$  mm)



Při použití modelu č. 12 získáme horší výsledky oproti předchozímu modelu. Hypotéza ohledně ovlivnění teplotou nástroje se nepotvrdila. *Reziduum* pro příklad s hloubkou třísky  $a_p = 2,5$  mm dosahuje maximální hodnoty **52  $\mu\text{m}$** . V Tab. 28 jsou uvedena *reziduum* pro všechny experimenty.

Tab. 28 - Maximální reziduum jednotlivých experimentů

Č. experimentu	1	2	3	4	5	6
Max. reziduum	57	27	52	81	58	56

#### 7.4 Shrnutí výsledků modelů

V předchozích kapitolách byly detailně popsány tvořené modely. Celkem bylo pomocí 2 matematických metod (model z obrábění oceli je na bázi PF) vytvořeno 12 modelů. V Tab. 29 jsou uvedena *reziduum* pro všechny modely.

První dva modely byly vytvořeny úpravou již kalibrovaného modelu při obrábění oceli. Aplikací se ukázalo, že ocel se chová při obrábění jinak než hliník, a proto je tento model nepřenositelný. V prvním modelu bylo zanedbáno použití odlišného vřetene, jelikož tento model je kalibrován na testech s obráběním oceli na stroj jiného výrobního čísla (s jiným vřetenem). Cílem druhého modelu bylo odstranit nepřesnost způsobenou rozdílnými vřeteny použitých pro obrábění oceli a hliníku pomocí zesílení  $g$ , viz kap. 7.1.2. Tento koeficient byl určen v rámci předchozího výzkumu v RCMT. Tento koeficient nám kvalitu modelu ještě zhoršil.

Následujících pět modelů bylo vytvořeno pomocí metody PF. Nejdříve byly modely tvořeny jako dvě PF, které simulovaly různou složku deformace. Tyto složky se následně sečetly a výsledkem byla deformace špičky nástroje. Tyto PF byly tvořeny na různých experimentech. Pouze v případě modelu č. 4 je získána dostatečná kvalita. Vyskytla se však hypotéza kalibrace PF přímo mezi teplotou nástroje a deformací špičky nástroje. Touto úpravou získáváme značné zjednodušení při tvorbě



kompenzací. Vzniklé modely dosahují obdobné kvality jako předchozí. Vzhledem k úspoře času můžeme vytvořit model č. 7, který se skládá ze dvou PF, které mají stejné vstupy i výstupy ale každá je kalibrována na jiném experimentu. Tato PF má zatím nejlepší kvalitu.

Dalším použitým způsobem vytvoření kompenzačního modelu je regresní analýza MLRA. Modely mají několik teplotních vstupů a jeden výstup – deformace. Pomocí 3 metod byly určovány vhodné teplotní vstupy. Tyto vstupy byly následně používány v jednotlivých modelech. Vyskytla se také hypotéza, zda teplota nástroje negativně neovlivňuje kvalitu modelu. Ve dvou modelech byl tento vstup vynechán, ale hypotéza se nepotvrdila.

Nyní tedy můžeme konstatovat, že nejlepším modelem je model č. 7.



Tab. 29 - Shrnutí dosažených hodnot reziduum jednotlivých kompenzačních modelů

Typ modelu	Max. reziduum [ $\mu\text{m}$ ]							Průměr
	Model	Č. experimentu						
	1	2	3	4	5	6		
Aplikace modelu - ocel	1	57	81	116	29	170	151	101
	2	66	94	132	27	188	168	113
PF	3	37	51	82	20	114	92	66
	4	14	10	28	45	53	35	31
	5	14	13	43	51	68	60	42
	6	36	39	42	57	13	35	37
	7	14	13	42	51	13	35	28
MLRA	8	29	11	44	58	58	215	69
	9	32	35	23	72	30	12	34
	10	31	36	24	70	30	12	34
	11	15	16	56	76	97	108	61
	12	57	27	52	81	58	56	55



### 7.5 Popis výsledného modelu

Model s nejlepší aproximací teplotních deformací, viz Tab. 29, je model č. 7. Tento model je složen ze dvou PF. Obě funkce mají totožné teplotní vstupy, avšak odlišné kalibrační experimenty. První PF je kalibrována na experimentu č. 2 ( $a_p = 1$  mm), druhá na experimentu č. 6 ( $a_p = 4$  mm a  $a_p = 5$  mm). Pro predikci deformace špičky nástroje je pro obě PF vstupem teplota nástroje, viz Tab. 12 na str. 64 a Tab. 14 na str. 66.

První přenosová funkce (1.PF) je vhodná ke kompenzaci obrábění s menší hloubkou třísky, druhá (2.PF) pro obrábění s větší hloubkou třísky. Hranicí aplikovatelnosti mezi funkcemi je obrábění s hloubkou třísky  $a_p = 2,5$  mm, kdy je kvalita obou modelů prakticky totožná. Vhodnější je však PF kalibrovaná na experimentu č. 6, jejíž simulovaný průběh lépe kopíruje naměřený průběh deformace špičky nástroje.

*Reziduum* pro jednotlivé experimenty jsou uvedena v Tab. 30. Žlutě jsou znázorněny experimenty, na které byla použita 1. PF (viz model č. 5), zeleně 2. PF (viz model č. 6).

Tab. 30 - Maximální reziduum jednotlivých experimentů

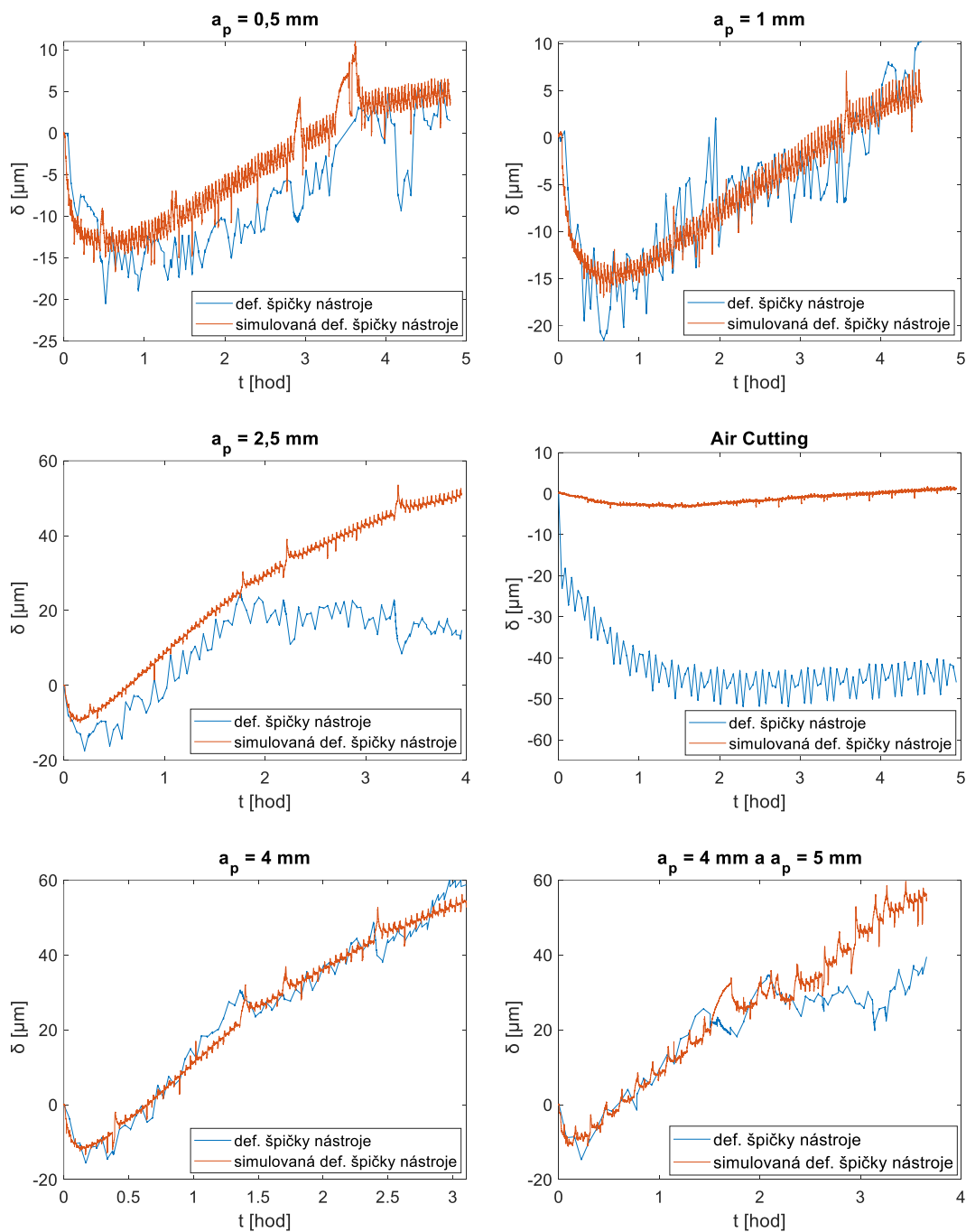
Č. experimentu	1	2	3	4	5	6
Max. reziduum	14	13	42	51	13	35

Na Obr. 51 jsou zobrazena porovnání naměřených a simulovaných průběhů deformace špičky nástroje. U většiny experimentů si tyto průběhy téměř odpovídají. Malá nepřesnost je patrná při obrábění s hloubkou třísky  $a_p = 2,5$  mm, kdy přibližně do poloviny měření si průběhy odpovídají. Poté dochází ke zlomu v naměřeném průběhu deformace a odklonění. Průběh simulované veličiny pokračuje v očekávaném směru.





### Aplikace modelu č. 7 na deformaci špičky nástroje



Obr. 51 - Aplikace modelu č. 7 na všechny experimenty



Velkou nepřesnost můžeme vidět u experimentu bez obrábění (Air Cutting). Simulovaný průběh vychází z minimální teploty nástroje, a proto simuluje minimální deformaci. Během tohoto experimentu se však deformace objevovala v obdobné velikosti jako při běžném obrábění. Experiment bez obrábění (Air Cutting) slouží pouze pro výzkumné účely a pochopení chování stroje, proto ho nikdy nebude nutné kompenzovat.



## 8 Porovnání chování při obrábění slitiny hliníku a oceli

### 8.1 Aplikace modelu č. 7 na obrábění oceli

Vytvořený model složený s dvou PF s určitou kvalitou kompenzuje teplotní deformace v ose Z při obrábění hliníku. V této kapitole bude zjištěna přenositelnost kompenzačního modelu na obrábění oceli.

V rámci předchozího výzkumu byl proveden experiment s velmi podobnými parametry jako u námi používaných měření při obrábění slitiny hliníku. Porovnání parametrů je uvedeno v Tab. 31.

Tab. 31 - Porovnání experimentů s ocelí a slitinou hliníku

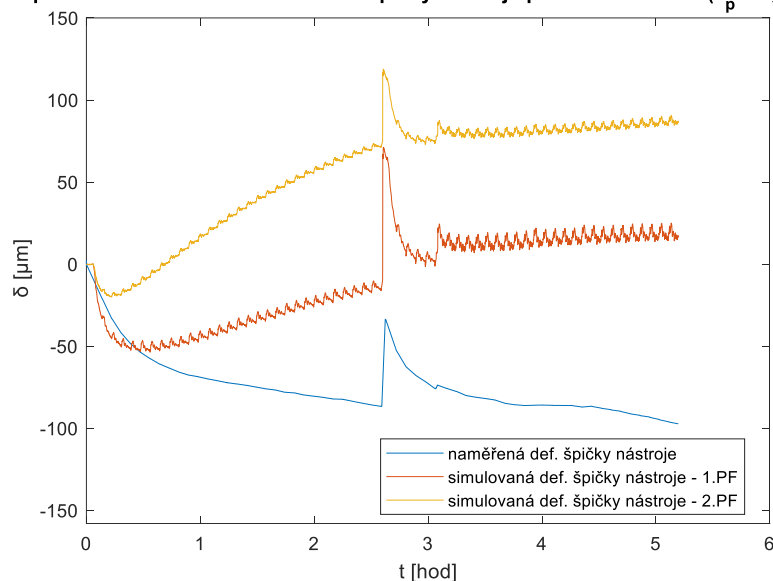
Obráběný material	Průměr nástroje $D$ [mm]	Hloubka třísky $a_p$ [mm]	Vypočtený výkon $P$ [kW]	Otáčky $n$ [ot.min <sup>-1</sup> ]
Slitina hliníku	63	0,5 – 5	0,75 – 6	3119
Ocel	63	1,5	1,52	758

Na naměřená data ze zvoleného experimentu byly aplikovány obě PF z modelu č. 7. Na Obr. 52 je uvedeno grafické porovnání mezi měřeným (modrá křivka) a simulovaným průběhem deformace špičky nástroje.

Z těchto grafů vyplývá, že vytvořený model není přenositelný na obrábění oceli. Tento fakt byl očekáván už po aplikaci modelu č. 1 a 2 na data z obrábění hliníku, viz kap. 7.1.1 a kap. 7.1.2. Tímto byla hypotéza nepřenositelnosti modelů mezi slitinou hliníku a ocelí potvrzena.



Aplikace modelu č. 7 na deformaci špičky nástroje při obrábění oceli ( $a_p = 1,5$  mm)



Obr. 52 - Aplikace modelu č. 7 na deformace špičky nástroje při obrábění oceli

## 8.2 Porovnání teplot a deformací při obrábění

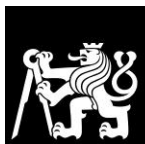
Z důvodu zjištění nepřenositelnosti modelů mezi ocelí a slitinou hliníku v předchozích kapitolách se tato kapitola bude zabývat porovnáním teplotního chování během obrábění jednotlivých materiálů.

### 8.2.1 Porovnání teplot při obrábění

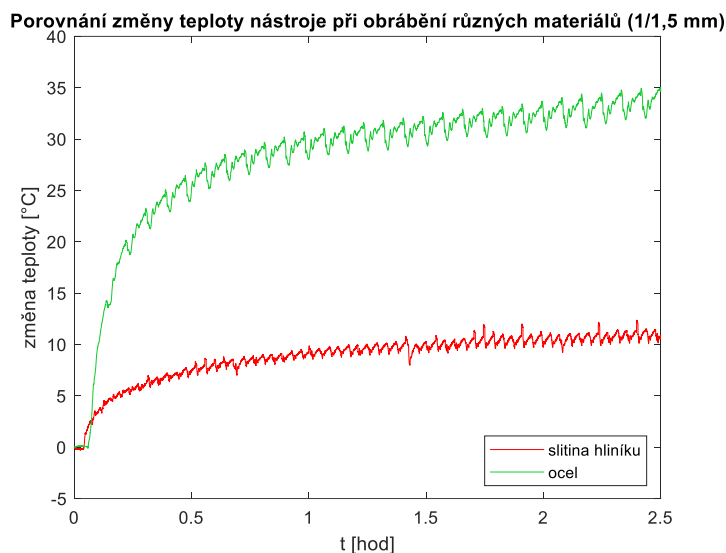
Porovnávány byly vždy experimenty, které měly stejné nebo velmi podobné parametry. Jejich parametry jsou uvedeny v Tab. 32. Zkoumány jsou pouze teploty, které byly používány pro tvorbu kompenzačních modelů.

Tab. 32 - Porovnání parametrů použitých experimentů

Obráběný materiál	Průměr nástroje $D$ [mm]	Hloubka třísky $a_p$ [mm]	Vypočtený výkon $P$ [kW]	Otáčky $n$ [ot.min <sup>-1</sup> ]
Slitina hliníku	63	1	1,5	3119
Ocel	63	1,5	1,52	758

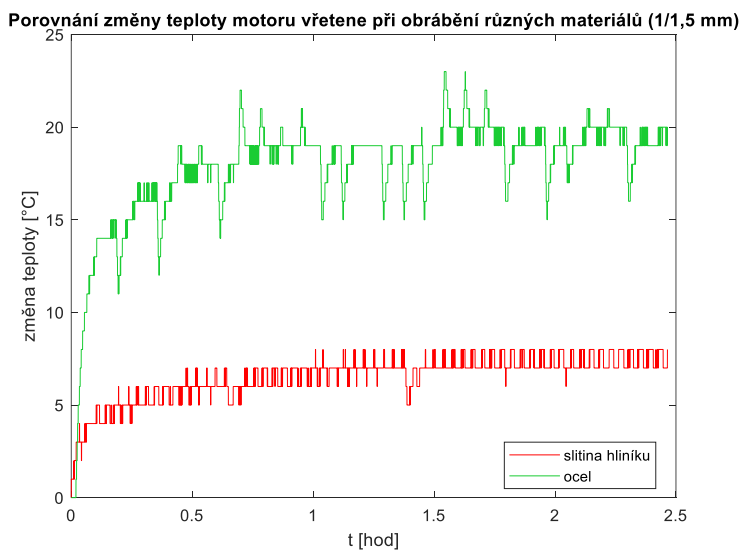


Z následujícího grafu (Obr. 53) vyplývá, že teplota nástroje při obrábění oceli je větší než při obrábění slitiny hliníku (změna na konci experimentu: ocel -  $\Delta T = 35^\circ\text{C}$ ; slitina hliníku -  $\Delta T = 11^\circ\text{C}$ ).



Obr. 53 - Porovnání změn teploty nástroje během obrábění různých materiálů ( $a_p = 1/1,5 \text{ mm}$ )

Na Obr. 54 můžeme vidět, že teplota motoru vřetene je při obrábění oceli opět vyšší než při obrábění slitiny hliníku (změna na konci experimentu: ocel -  $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ ; slitina hliníku -  $\Delta T = 8^\circ\text{C}$ ).

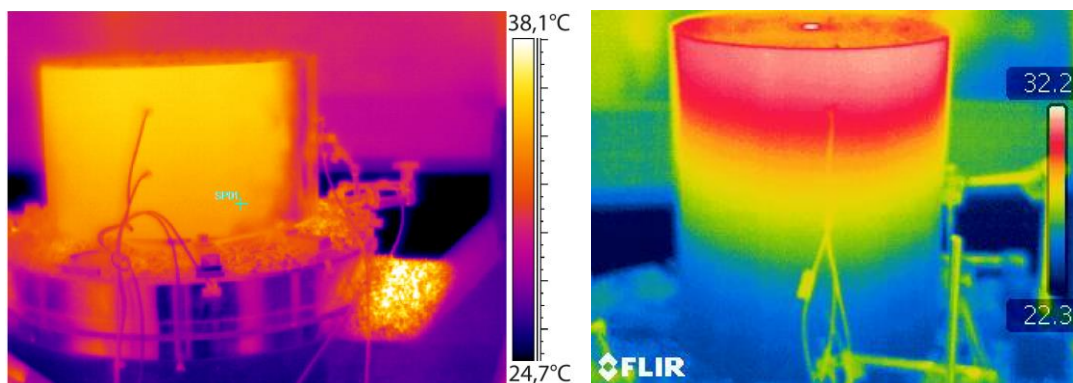


Obr. 54 - Porovnání změn teplot během obrábění různých materiálů ( $a_p = 1/1,5 \text{ mm}$ )



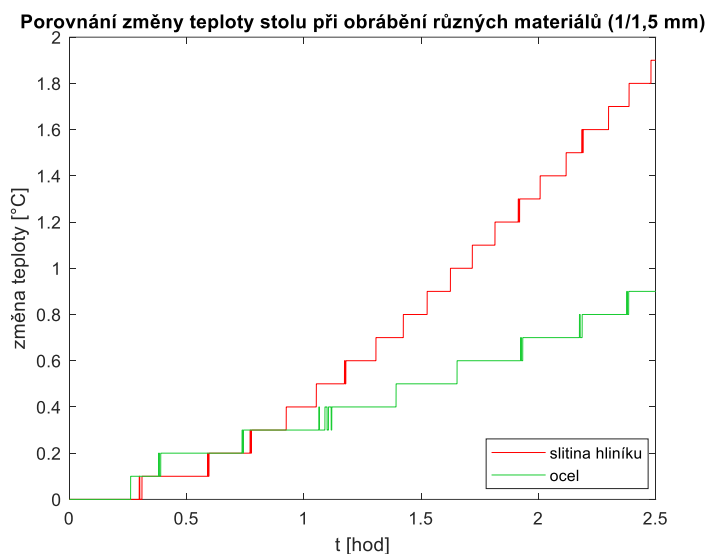
Z Obr. 53 a Obr. 54 vyplývá, že při obrábění oceli jsou teploty nástroje a motoru vřetene téměř trojnásobné oproti teplotě při obrábění slitiny hliníku. Jev je způsoben hlavně odlišnými vlastnostmi těchto materiálů. Ocel je oproti slitině hliníku tvrdší a tím klade větší odpor při obrábění. V důsledku toho se teplota během obrábění výrazně zvýší.

Naproti tomu jsou teploty stolu a ložisek vřeteníku při obrábění slitiny hliníku větší (viz Obr. 56). Teplota stolu je zřejmě vyšší, protože nedocházelo ke dostatečnému odvodu třísky z prostoru obrábění. Důkazem je obrázek z termokamery pořízený během obrábění slitiny hliníku a oceli (viz Obr. 55). Při obrábění slitiny hliníku většina třísek zůstává na stole nebo na ploše kolíbký. Během obrábění oceli má obráběná plocha podobnou teplotu jako při obrábění slitiny hliníku, teplota stolu však odpovídá teplotě okolí.



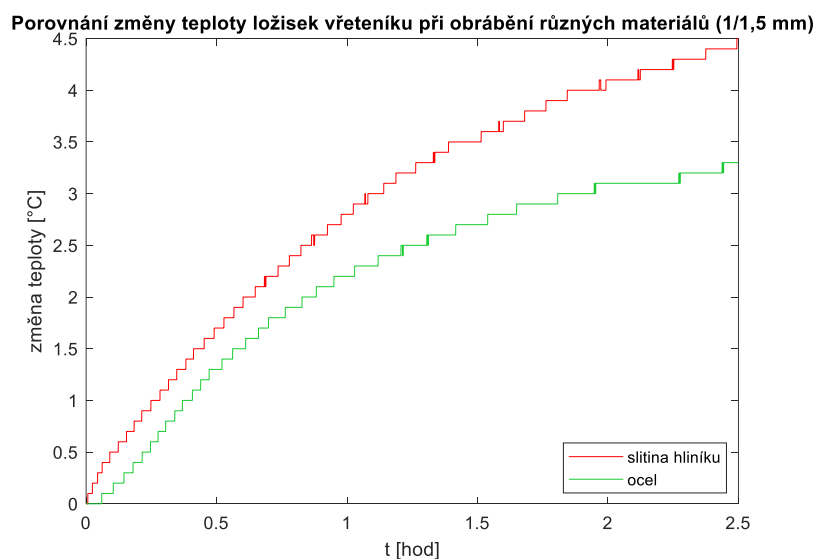
Obr. 55 - Snímek z termokamery pořízený během obrábění slitiny hliníku (vlevo) a oceli (vpravo)

Na Obr. 56 je vidět grafické porovnání teplot stolu při obrábění s hloubkou třísky 1/1,5 mm (změna na konci experimentu: ocel -  $\Delta T = 0,9^{\circ}\text{C}$ ; slitina hliníku -  $\Delta T = 1,9^{\circ}\text{C}$ ).



Obr. 56 - Porovnání změn teploty stolu během obrábění různých materiálů ( $a_p = 1/1,5$  mm)

Teplota ložisek vřeteníku je vyšší zřejmě z důvodu vyšších otáček při obrábění slitiny hliníku. Tyto otáčky jsou více než trojnásobné oproti nastaveným otáčkám při obrábění oceli, viz Tab. 32 a Tab. 33. Vyššími otáčkami dochází k zahřívání ložisek. Rozdíl teplot však není výrazný. Na Obr. 57 je vidět grafické porovnání teplot při obrábění s hloubkou třísky 1/1,5 mm (změna na konci experimentu: ocel -  $\Delta T = 3,3^\circ\text{C}$ ; slitina hliníku -  $\Delta T = 4,5^\circ\text{C}$ ).



Obr. 57 - Porovnání změn teploty ložisek vřeteníku během obrábění různých materiálů ( $a_p = 1/1,5$  mm)



### 8.3 Porovnání deformací při obrábění

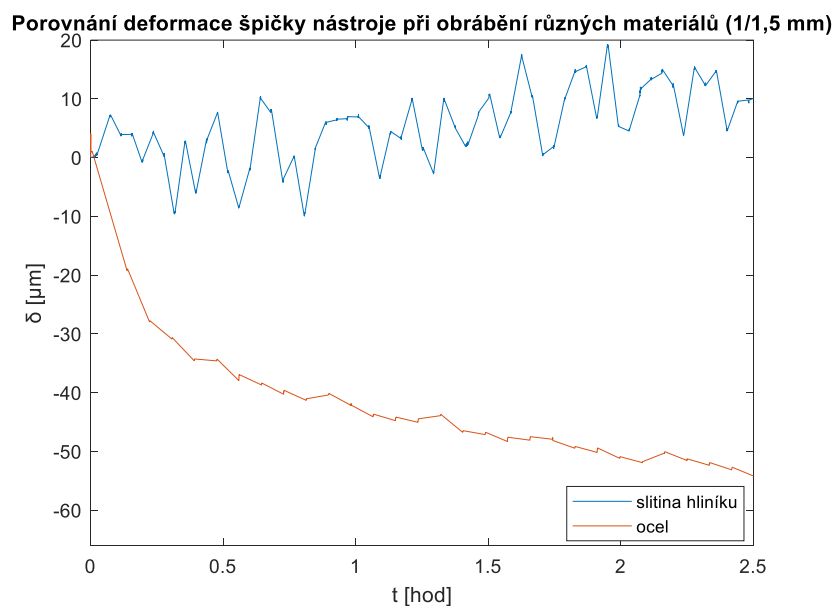
Nyní budou porovnávány deformace naměřené na špičce nástroje. Pro porovnání byly použity dva velmi podobné experimenty s odlišným obráběným materiálem. Jejich parametry jsou uvedeny v Tab. 33.

Tab. 33 - Parametry porovnávaných experimentů

Obráběný material	Průměr nástroje $D$ [mm]	Hloubka třísky $a_p$ [mm]	Vypočtený výkon $P$ [kW]	Otáčky $n$ [ot.min <sup>-1</sup> ]
Slitina hliníku	63 mm	1 mm	1,5 kW	3119
Ocel	63 mm	1,5 mm	1,52 kW	758

Z následujícího grafu (Obr. 58) vyplývá, že deformace naměřená při obrábění oceli je mnohonásobně větší než deformace naměřená při obrábění slitiny hliníku. U průběhu deformace při obrábění slitiny hliníku se opět potýkáme s deformací, která jde do plusových hodnot (zvětšování relativní vzdálenosti mezi špičkou nástroje a deskou stolu ve směru strojní osy Z, viz. Obr. 19). Důvod tohoto chování však nelze přesně odhalit. Lze se ale domnívat, že toto chování je způsobeno odlišným odvodem třísek z pracovního prostoru. Při obrábění oceli třísky okamžitě odcházeli z pracovního prostoru. V případě obrábění slitiny hliníku docházelo k hromadění třísek v okolí stolu. Tím pádem docházelo k ovlivnění celé soustavy stroj – nástroj – obrobek a také magnetických stojáneků s čidly pro měření posunutí. Z naměřených dat není patrný a jiný zdroj výzkumu pro tuto práci neexistuje.





Obr. 58 - Porovnání deformací nástroje během obrábění různých materiálů ( $a_p = 1/1,5$  mm)

Výrazný rozdíl mezi deformacemi pro jednotlivé materiály je zřejmě v důsledku odlišných vlastností těchto materiálů. Ocel klade při obrábění větší odpor oproti slitině hliníku, který se následně projevuje nárůstem deformace. Dalším důvodem tohoto chování může také být nevhodně řešený odvod třísek z místa řezu. Třísky se usazovaly na desce stolu a tím ovlivňovali celou soustavu stroj – nástroj – obrobek.



## 9 Závěr

První část diplomové práce je věnována obecnému úvodu do problematiky teplotního chování obráběcího stroje během obrábění a způsoby jeho eliminace. Nejprve jsou popsány základní fyzikální jevy, které vedou ke vzniku teplotních deformací. Tyto zdroje jsou rozděleny na vnitřní a vnější. Dále jsou stručně popsány principy sdílení tepla. Po krátkém seznámení se šířením tepla během obráběcího procesu následuje rozbor možností minimalizace teplotního působení.

Všechny tři způsoby minimalizace jsou podrobně popsány. Tato práce je zaměřena na metodu teplotních kompenzací, konkrétně nepřímou softwarovou kompenzací.

V druhé části (kap. 4 až kap. 6) je podrobně popsán experiment, ze kterého diplomová práce vychází. Tento experiment byl prováděn v rámci dřívějších výzkumů v RCMT. Úkolem práce bylo naměřená data zpracovat (kap. 5). Po zpracování dat bylo celkem 2 metodami (model z obrábění oceli je na bázi PF) vytvořeno 12 kompenzačních modelů predikující teplotní deformace ve směru osy Z.

Z vytvořených modelů byl vybrán model č. 7 s nejlepší predikcí teplotních chyb v ose Z (viz Tab. 29 na str. 79). Tento model byl vytvořen metodou PF. Skládá se ze dvou PF, kdy každá kompenzuje teplotní chyby ve směru osy Z při obrábění s různou hloubkou třísky. První PF je vhodná pro hloubku třísky v intervalu 0,5 – 2,5 mm a druhá PF pro hloubku třísky 2,5 – 5 mm.

Pro zjištění přenositelnosti byl model aplikován na experiment s podobnými parametry ale odlišným materiálem obrobku (ocel). Z této aplikace vyplývá, že model je nepřenositelný. Nepřenositelnost může být způsobena odlišnými vlastnostmi jednotlivých materiálů a požadavky na jejich obrábění. Dále může být způsobena rozdílným působením třisek na dolní sestavu stroje (stůl, kolébka). V případě hliníku docházelo k usazování třisek právě na stole a tím k ovlivňování celé soustavy stroj – nástroj – obrobek. Těmto odlišnostem se okrajově věnuje kapitola 8.2. této práce.



Cílem práce bylo vytvořit kompenzační model teplotních deformací s ohledem na řezný proces. Tento model byl vytvořen, jeho kvalita je však zaručena pouze za podmínek, za kterých probíhaly experimenty, tj. čelní frézování slitiny hliníku s parametry uvedenými v Tab. 2.

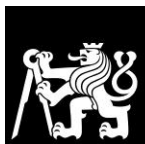
Závěrem lze tedy konstatovat, že máme pro dané parametry robustní kompenzační model. Pro potvrzení kvality modelu na širším spektru parametrů by bylo vhodné realizovat další experimenty s odlišným nastavením.



## Seznamy

### Seznam obrázků

Obr. 1 - Oblasti vzniku tepla při obrábění [7].....	17
Obr. 2 - Odvod tepla z místa řezu při soustružení ([8] a upraveno) .....	18
Obr. 3 - Chlazení kuličkového šroubu - DMG Mori [10].....	21
Obr. 4 - Chlazení kuličkové matice – HIWIN [11] .....	22
Obr. 5 - Chlazení vřetenové jednotky ([6] a upraveno) .....	22
Obr. 6 - Protékaná konstrukce obráběcího centra Yasda YMC 430 Ver. II [12] .....	23
Obr. 7 - Chlazení vřeteníku obráběcího centra Haas [13].....	23
Obr. 8 - Nástrojová sonda BLUM [14] .....	25
Obr. 9 - Lineární složka teplotních chyb.....	25
Obr. 10 - Úhlová složka teplotních chyb .....	26
Obr. 11 - Analogie mezi dynamickou a teplotní analýzou .....	28
Obr. 12 - Uspořádání zkoušky teplotních deformací podle normy ISO 203-3 [16].....	32
Obr. 13 - Schéma 5osého obráběcího stroje typu horní gantry [6] .....	33
Obr. 14 - Celkové nastavení experimentu [17] .....	34
Obr. 15 - Detail IR čidla (vlevo) a box s elektronikou pro IR čidlo (vpravo) [17] .....	34
Obr. 16 - Umístění IR senzoru ve flexibilní hadici [17].....	35
Obr. 17 - Termosnímek obrobku [19] .....	36
Obr. 18 - Umístění odporových teplotních čidel v obrobku ([17] a upraveno) .....	36
Obr. 19 - Celková teplotní chyba stroje .....	37
Obr. 20 - Fréza (vlevo) a břitová destička (vpravo) Sandvik CoroMill® 245 [17] .....	38
Obr. 21 - Zkrácení časového intervalu u deformace čela vřetene .....	42
Obr. 22 - Ukázka nulování na průběhu teploty nástroje při obrábění.....	43



Obr. 23 - Ukázka filtrování na průběhu výkonu vřetene při obrábění.....	44
Obr. 24 - Průběh zatížení - vlevo režim S1, vpravo režim S6 [21] .....	45
Obr. 25 - Porovnání naměřeného a vypočítaného výkonu (pro $a_p = 2,5$ mm) .....	46
Obr. 26 - Průběh deformace čela vřetene a špičky nástroje při obrábění ( $a_p = 0,5$ mm) .....	48
Obr. 27 - Průběh teplot při obrábění ( $a_p = 0,5$ mm).....	48
Obr. 28 - Průběh deformace čela vřetene a špičky nástroje při obrábění ( $a_p = 1$ mm) .....	49
Obr. 29 - Průběh teplot při obrábění ( $a_p = 1$ mm).....	49
Obr. 30 - Průběh deformace čela vřetene a špičky nástroje při obrábění ( $a_p = 2,5$ mm) .....	50
Obr. 31 - Průběh teplot při obrábění ( $a_p = 2,5$ mm).....	50
Obr. 32 - Průběh deformace čela vřetene a špičky nástroje při obrábění (Air Cutting) .....	51
Obr. 33 - Průběh teplot při obrábění (Air Cutting).....	51
Obr. 34 - Průběh deformace čela vřetene a špičky nástroje při obrábění ( $a_p = 4$ mm) .....	52
Obr. 35 - Průběh teplot při obrábění ( $a_p = 4$ mm).....	52
Obr. 36 - Průběh deformace čela vřetene a špičky nástroje při obrábění ( $a_p = 4$ mm a $a_p = 5$ mm) .....	53
Obr. 37 - Průběh teplot při obrábění ( $a_p = 4$ mm a $a_p = 5$ mm).....	54
Obr. 38 – Struktura kompenzačního modelu pro obrábění oceli .....	56
Obr. 39 - Aplikace modelu č. 1 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 2,5$ mm) .....	57
Obr. 40 - Aplikace modelu č. 2 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 2,5$ mm) .....	58
Obr. 41 - Aplikace modelu č. 3 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 2,5$ mm) (nahore vlevo - def. čela vřetene; nahore vlevo - def. těla nástroje) .....	61
Obr. 42 - Aplikace modelu č. 4 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 2,5$ mm) (nahore vlevo - def. čela vřetene; nahore vlevo - def. těla nástroje).....	63
Obr. 43 - Aplikace modelu č. 5 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 2,5$ mm) .....	65
Obr. 44 - Aplikace modelu č. 6 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 2,5$ mm) .....	66
Obr. 45 - Aplikace modelu č. 7 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 2,5$ mm) .....	68



Obr. 46 - Aplikace modelu č. 8 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 2,5$ mm) .....	70
Obr. 47 - Aplikace modelu č. 9 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 2,5$ mm) .....	72
Obr. 48 - Aplikace modelu č. 10 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 2,5$ mm) .....	73
Obr. 49 - Aplikace modelu č. 11 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 2,5$ mm) .....	75
Obr. 50 - Aplikace modelu č. 12 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 2,5$ mm) .....	76
Obr. 51 - Aplikace modelu č. 7 na všechny experimenty .....	81
Obr. 52 - Aplikace modelu č. 7 na deformace špičky nástroje při obrábění oceli .....	84
Obr. 53 - Porovnání změn teploty nástroje během obrábění různých materiálů ( $a_p = 1/1,5$ mm) .....	85
Obr. 54 - Porovnání změn teplot během obrábění různých materiálů ( $a_p = 1/1,5$ mm) .....	85
Obr. 55 - Snímek z termokamery pořízený během obrábění slitiny hliníku (vlevo) a oceli (vpravo) .....	86
Obr. 56 - Porovnání změn teploty stolu během obrábění různých materiálů ( $a_p = 1/1,5$ mm) .....	87
Obr. 57 - Porovnání změn teploty ložisek vřeteníku během obrábění různých materiálů ( $a_p = 1/1,5$ mm) .....	87
Obr. 58 - Porovnání deformací nástroje během obrábění různých materiálů ( $a_p = 1/1,5$ mm) .....	89

### **Seznam tabulek**

Tab. 1 - Parametry nástroje .....	38
Tab. 2 - Parametry experimentu [17] .....	39
Tab. 3 - Porovnání vypočteného a skutečného výkonu [17] .....	46
Tab. 4 - Vstupy a výstupy modelu č. 1 .....	55
Tab. 5 - Maximální reziduum jednotlivých experimentů .....	57
Tab. 6 - Maximální reziduum jednotlivých experimentů .....	59



Tab. 7 - Vstupy a výstupy modelu č. 3 .....	59
Tab. 8 - Porovnání fit modelů .....	60
Tab. 9 - Maximální reziduum jednotlivých experimentů .....	62
Tab. 10 - Vstupy a výstupy modelu č. 4 .....	62
Tab. 11 - Maximální reziduum jednotlivých experimentů .....	64
Tab. 12 - Vstupy a výstupy modelu č. 5 .....	64
Tab. 13 - Maximální reziduum jednotlivých experimentů .....	65
Tab. 14 - Vstupy a výstupy modelu č. 6 .....	66
Tab. 15 - Maximální reziduum jednotlivých experimentů .....	67
Tab. 16 - Vstupy a výstupy modelu č. 7 .....	67
Tab. 17 - Maximální rezidua jednotlivých experimentů .....	68
Tab. 18 - Porovnání metod výběru vstupů.....	69
Tab. 19 - Vstupy a výstupy modelu č. 8 .....	70
Tab. 20 - Maximální reziduum jednotlivých experimentů .....	71
Tab. 21 - Vstupy a výstupy modelu č. 9 .....	71
Tab. 22 - Maximální reziduum jednotlivých experimentů .....	72
Tab. 23 - Vstupy a výstupy modelu č. 10 .....	73
Tab. 24 - Maximální reziduum jednotlivých experimentů .....	74
Tab. 25 - Vstupy a výstupy modelu č. 11 .....	74
Tab. 26 - Maximální reziduum jednotlivých experimentů .....	75
Tab. 27 - Vstupy a výstupy modelu č. 12 .....	76
Tab. 28 - Maximální reziduum jednotlivých experimentů .....	77
Tab. 29 - Shrnutí dosažených hodnot reziduum jednotlivých kompenzačních modelů .....	79
Tab. 30 - Maximální reziduum jednotlivých experimentů .....	80
Tab. 31 - Porovnání experimentů s ocelí a slitinou hliníku .....	83



Tab. 32 - Porovnání parametrů použitých experimentů.....	84
Tab. 33 - Parametry porovnávaných experimentů .....	88





### Seznam použité literatury

- [1] HORNYCH, Jan. *Tepelné chování a adaptivně řízené chlazení obráběcích strojů* [online]. Praha, 2011 [cit. 2020-11-01]. Disertace. ČVUT v Praze, Fakulta strojní.
- [2] HANZAL, Jiří. *Metody kompenzace teplotní chyby obráběcího stroje* [online]. Brno, 2017 [cit. 2020-11-01]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Petr Minář.
- [3] BRYAN, James B. *International Status of Thermal Error Research*. CIRP Annals [online]. 1990, 1990(Volume 39, 2), 645-656 [cit. 2020-11-01].
- [4] NOŽIČKA, Jiří. *Sdílení tepla*. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-010-1599-8.
- [5] NOŽIČKA, Jiří. *Základy termomechaniky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-010-2409-1.
- [6] HOREJŠ, O. *Minimalizace teplotních chyb obráběcích strojů pomocí softwarových kompenzačních algoritmů*. Praha: Habilitační práce, ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení, 2020, 166 s.
- [7] HORT, Martin. *Technologické, ekonomické a ekologické aspekty obrábění s vysoce výkonným chlazením* [online]. Brno, 2009 [cit. 2020-11-01]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/14261>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Miroslav Píška.
- [8] *Odvod tepla z místa řezu při soustružení*. In: MM Průmyslové spektrum [online]. Praha: MM Průmyslové spektrum, 2011 [cit. 2020-01-11]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kapaliny-pro-obrabeni.html>
- [9] SMOLÍK, Jan. *Učební materiály k předmětu Obráběcí stroje*
- [10] *DMG MORI - NT Series* [online]. In: . s. 12 [cit. 2020-11-01]. Dostupné z: [https://media.dmgmori.com/media/epaper/nt\\_de/epaper/nt\\_series\\_de.pdf](https://media.dmgmori.com/media/epaper/nt_de/epaper/nt_series_de.pdf)
- [11] DOČEKAL, Václav. *Chlazení a mazání rotujících kuličkových matic* [online]. Brno, 2018 [cit. 2020-11-01]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/83074>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Jiří Marek.



- [12] Yasda YMC 430 – Ver. II [online]. In: . s. 4 [cit. 2020-11-12]. Dostupné z: <http://www.verticalmachiningcenter.co.uk/wp-content/uploads/2017/08/yasda-ymc-430-v2-brochure.pdf>
- [13] Hass Vertical machining centers [online]. In: . s. 23 [cit. 2020-11-12]. Dostupné z: <https://docplayer.net/42596433-Vertical-machining-centers.html>
- [14] BLUM [online]. [cit. 2020-11-18]. Dostupné z: <https://www.blum-novotest.com/cz/vyrobky/merici-komponenty/lasercontrol/lc52-digilog.html>
- [15] BORO VAN, P. Cesty ke zvýšení produktivity při obrábění složitých obrobků [online]. 2018 [2020-11-24]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/ze-zivota-vyzkumnehocentra/cesty-ke-zvyseni-produktivity-pri-obrabeni-slozitych-obrobku3\\_30334.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/ze-zivota-vyzkumnehocentra/cesty-ke-zvyseni-produktivity-pri-obrabeni-slozitych-obrobku3_30334.html).
- [16] Norma ČSN ISO 230-3. Zásady zkoušek obráběcích strojů: Část 3: Určení tepelných vlivů. Praha, 2010.
- [17] HOREJŠ, O., M. MAREŠ, Š. FIALA, L. HAVLÍK a P. PETRÁČEK. Funkční vzorek - WP#6-01-KOVOSVIT MAS-2019 – pětiosé obráběcí centrum s implementovaným kompenzačním algoritmem teplotních chyb zahrnující řezný proces. Praha, 2019.
- [18] Forejt., M., Humár, A., Píška, M., Janíček, L.: Experimentální metody, VUT v Brně, 2003, 83 s.
- [19] HORNYCH, Jan. Učební materiály k předmětu Měření a diagnostika výrobních strojů I.
- [20] HOREJŠ, O., M. MAREŠ a L. HAVLÍK. Compensation of Thermally Induced Errors on 5-axis CNC Milling Centers Considering Different Spindles [online].[cit. 2021-6-17].
- [21] VRÁNA, Václav. ELEKTRICKÉ STROJE - rozdělení, druhy provedení, vlastnosti, dimenzování [online]. Ostrava, 2006 [cit. 2021-6-17]. Dostupné z: [http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/hgf/rozvody\\_lomy/04\\_el\\_stroje.pdf](http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/hgf/rozvody_lomy/04_el_stroje.pdf)
- [22] MAYR, Josef et al. Thermal issues in machine tools. CIRP Annals. 2012, 61 (2). ISSN 0007-8506.
- [23] HOREJŠ, O., M. MAREŠ a J. HORNYCH. Thermally induced displacements of machine tool structure, tool and workpiece due to cutting



processes. In: *Proceedings of the Conference on Thermal Issues in Machine Tools*. Dresden, 2018, , 269 - 278. ISSN 978-3-95735-085-5.

### **Seznam použitého softwaru**

Microsoft Word 2016

MATLAB R2020a

Adobe ILLUSTRATOR 2021

### **Seznam příloh**

#### **Textové přílohy**

Příloha 1 – Aplikace modelů jednotlivé experimenty

#### **Elektronické přílohy**

Diplomova\_prace\_Divisek\_Daniel.pdf

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



# Diplomová práce

**Model teplotních deformací stroje a frézovacího nástroje zohledňující  
vliv řezného procesu**

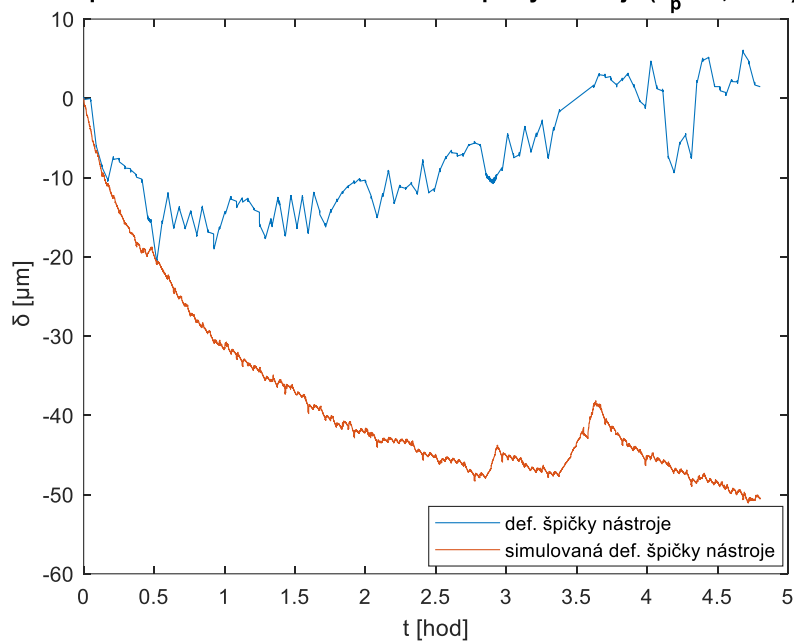
## **Textové přílohy**



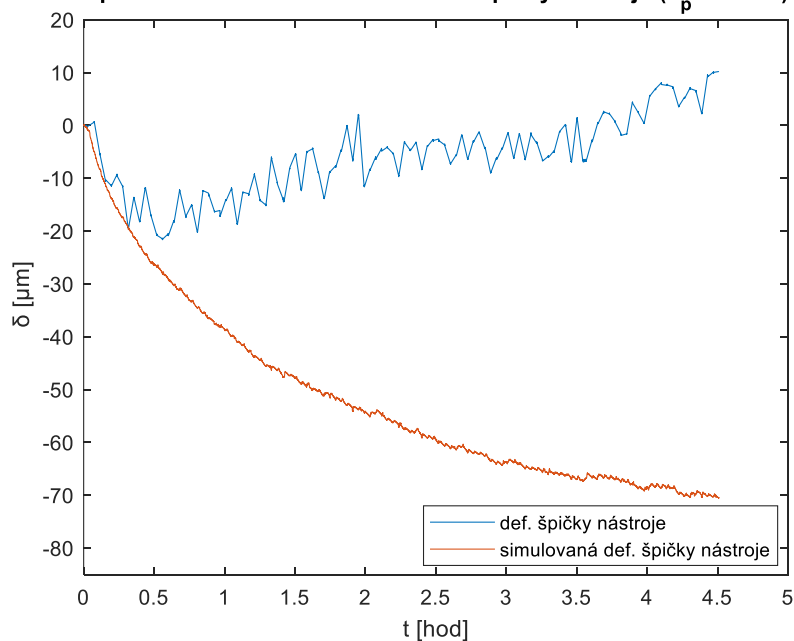
## Příloha 1 – Aplikace modelů jednotlivé experimenty

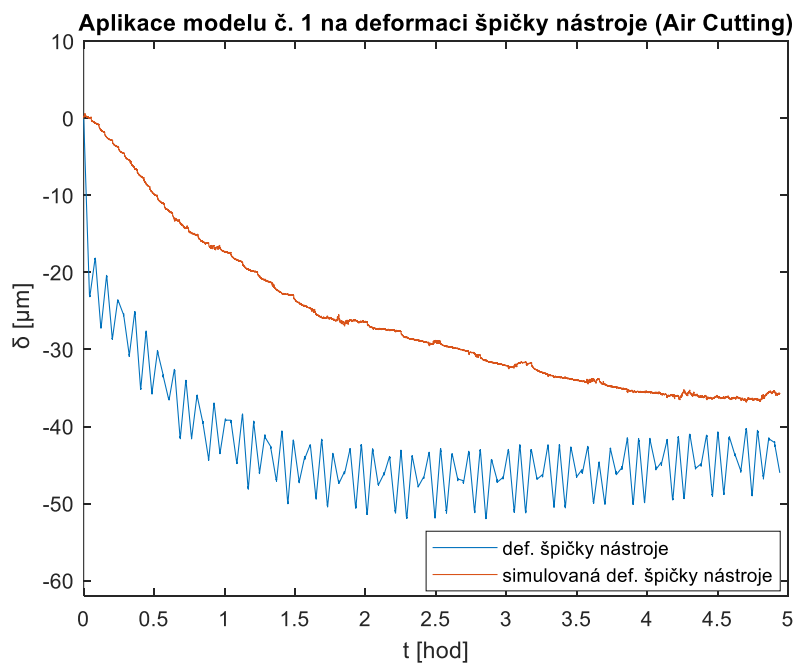
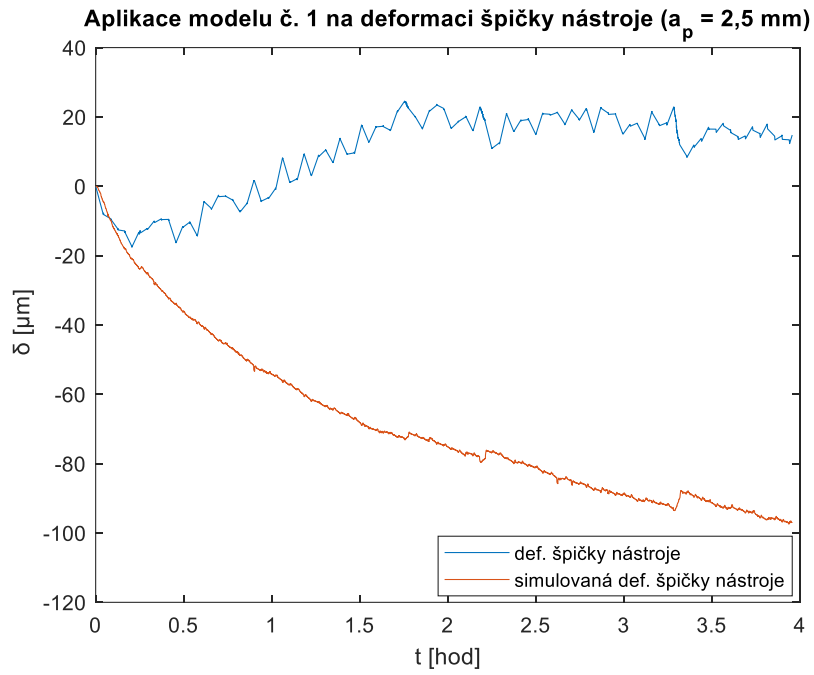
### Model č. 1

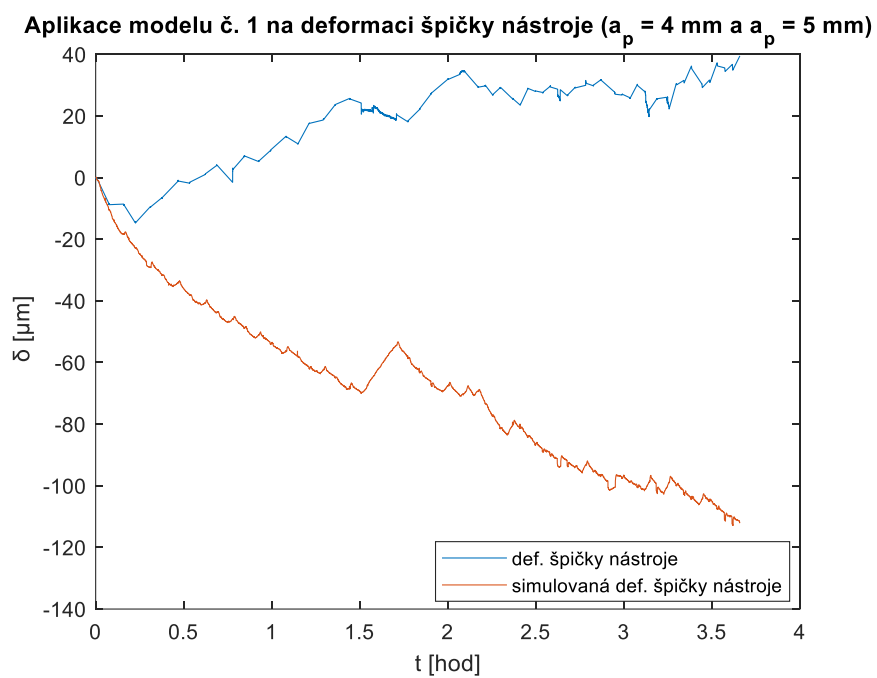
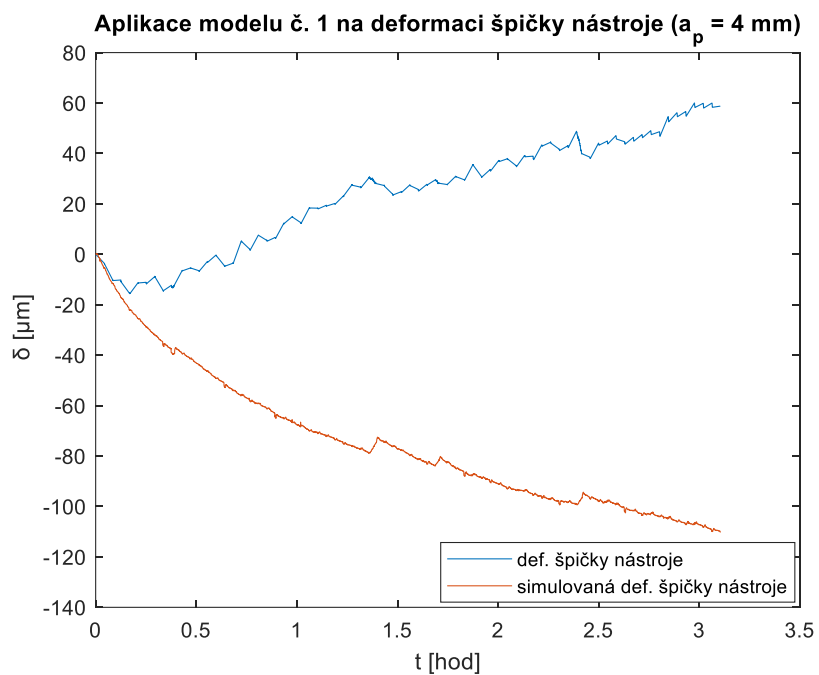
Aplikace modelu č. 1 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 0,5 \text{ mm}$ )



Aplikace modelu č. 1 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 1 \text{ mm}$ )



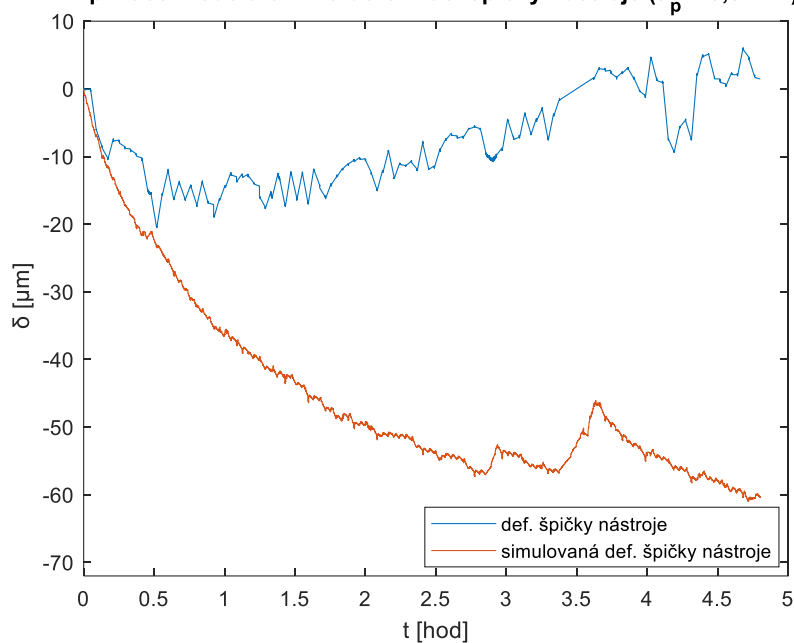




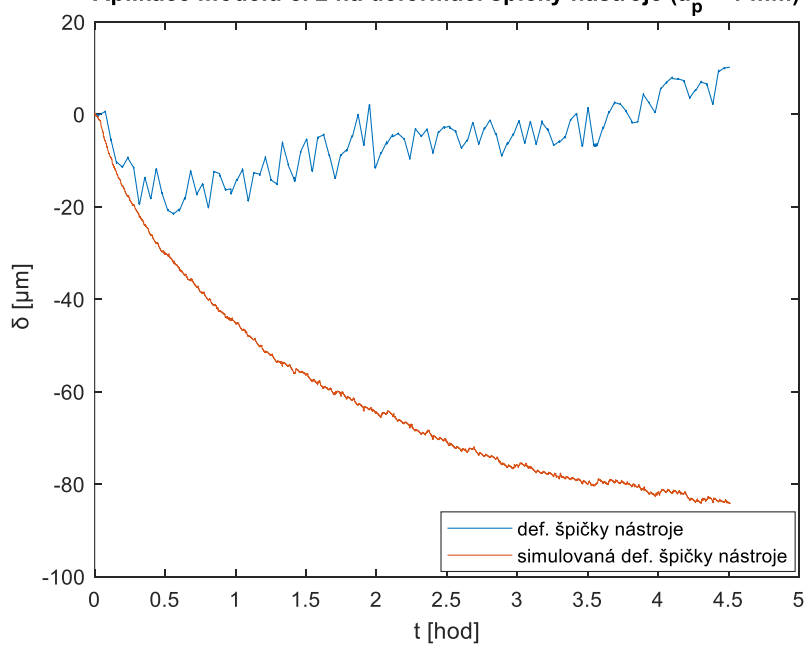


## Model č. 2

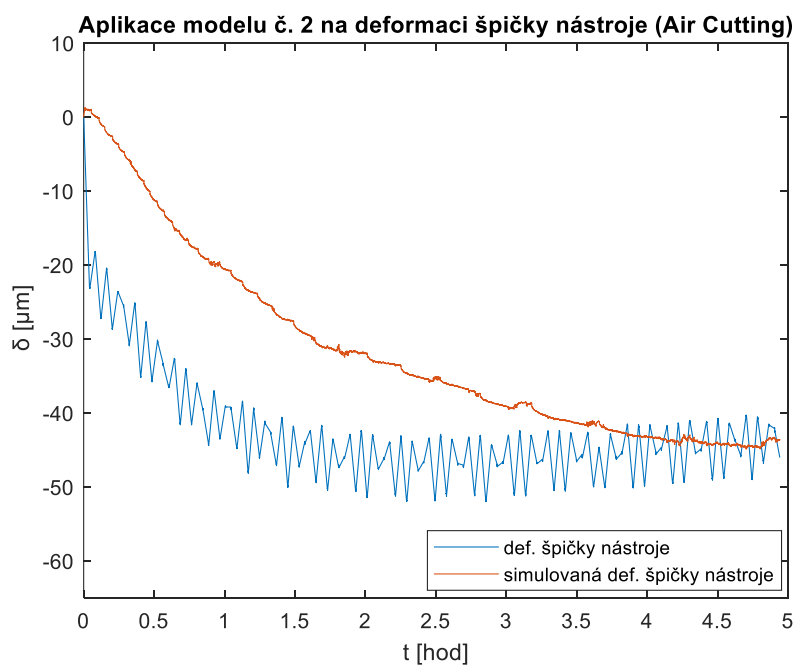
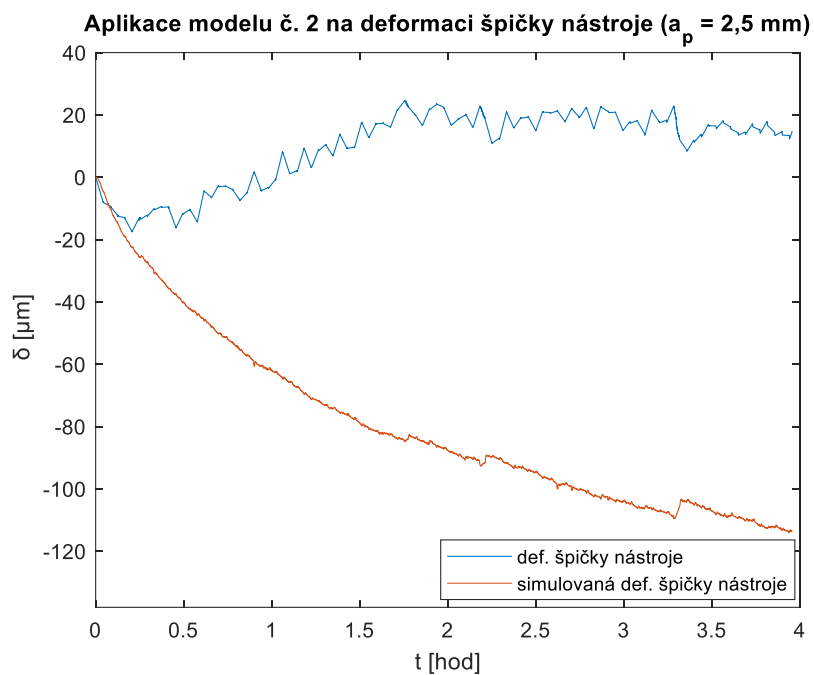
Aplikace modelu č. 2 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 0,5 \text{ mm}$ )

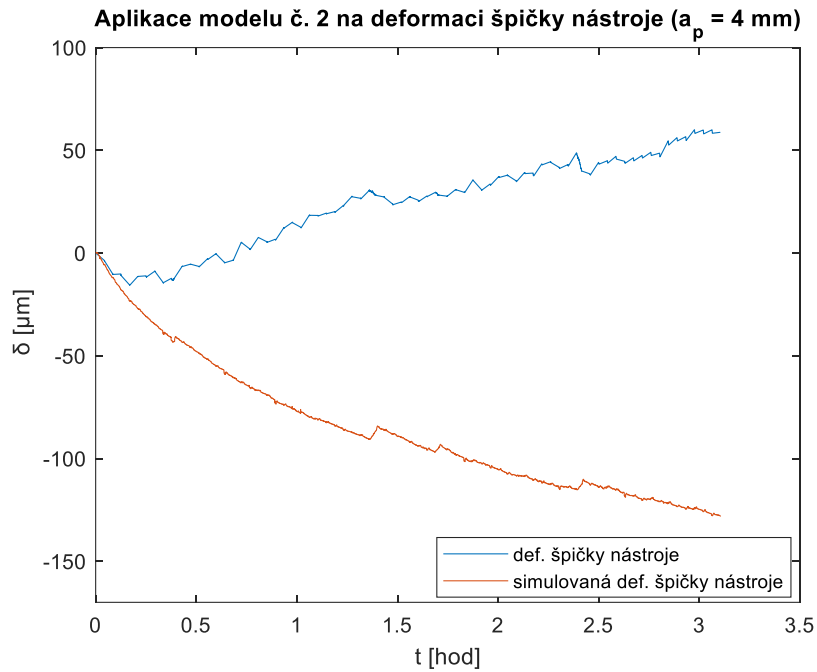


Aplikace modelu č. 2 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 1 \text{ mm}$ )

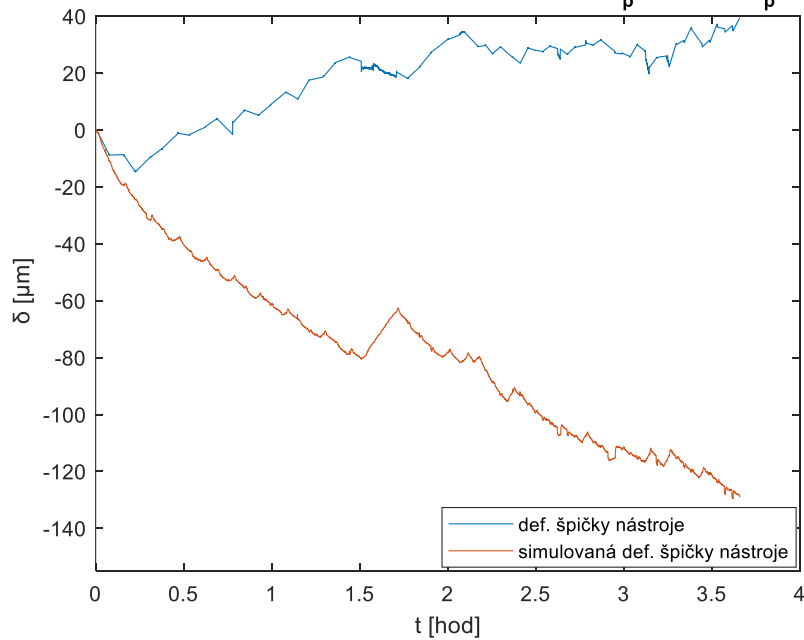






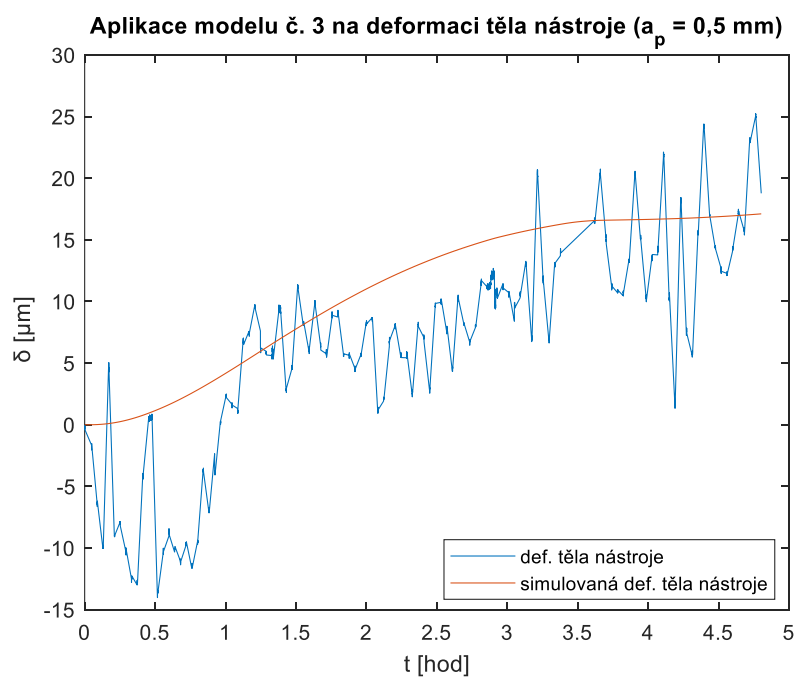
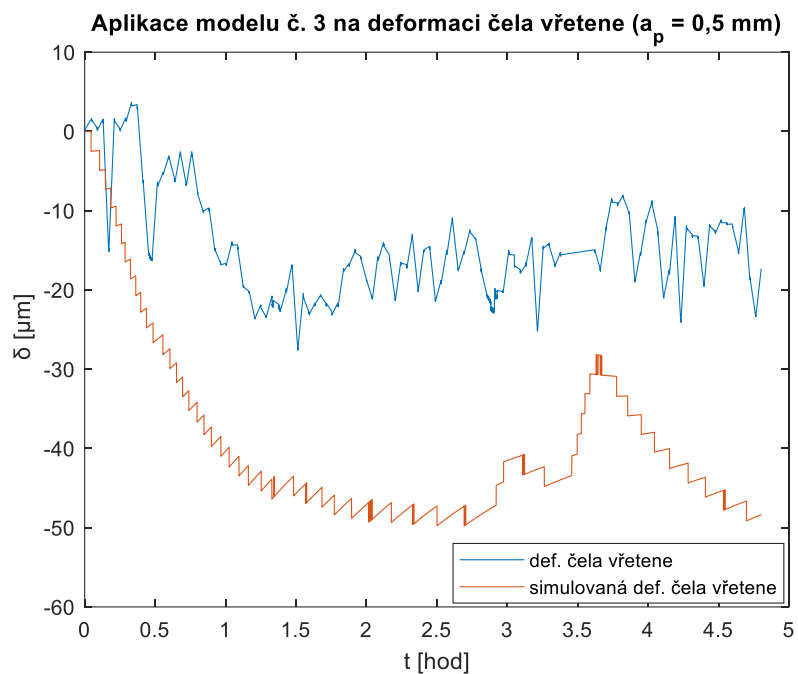


**Aplikace modelu č. 2 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 4 \text{ mm}$  a  $a_p = 5 \text{ mm}$ )**



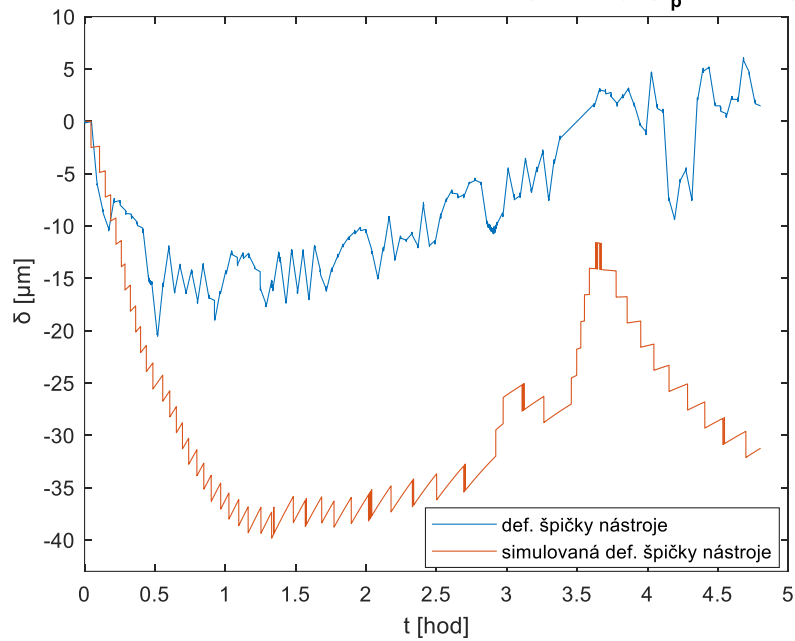


### Model č. 3

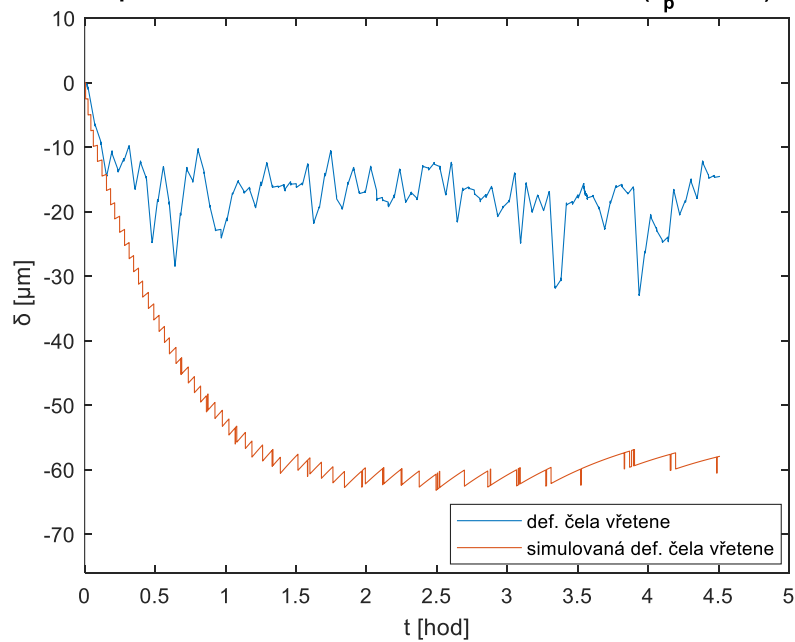


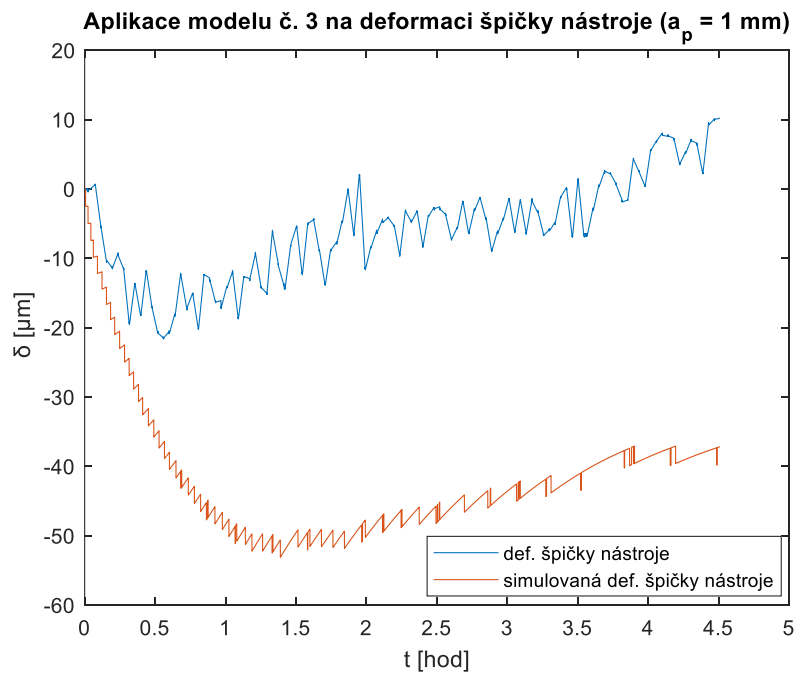
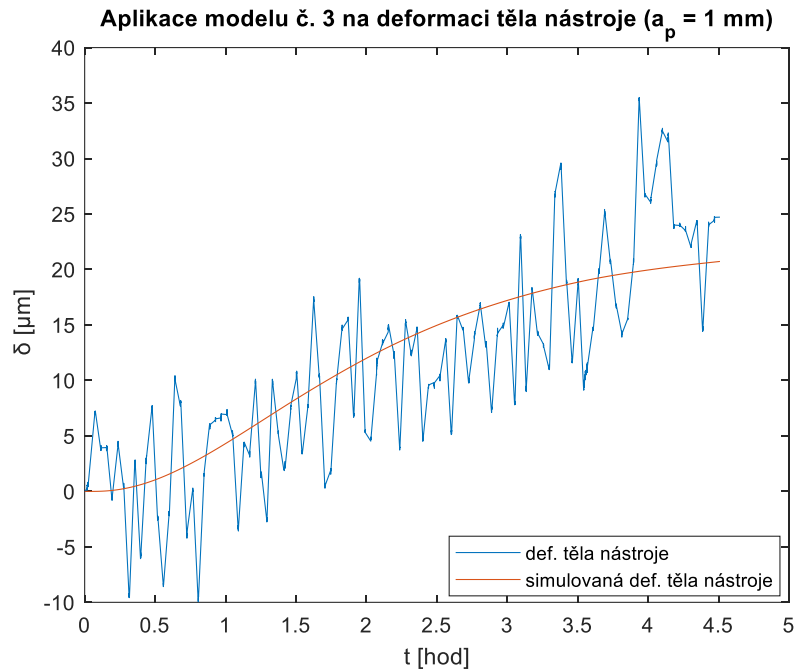


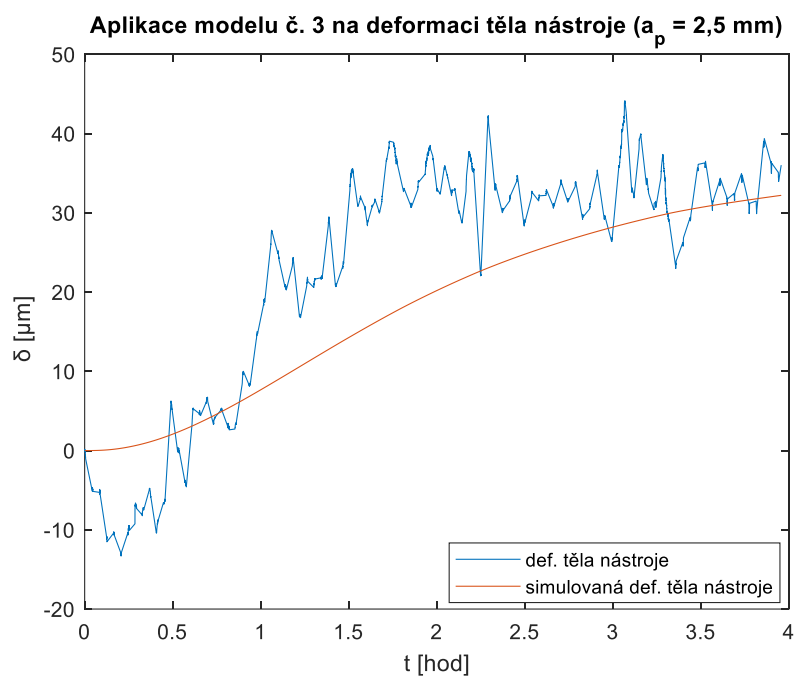
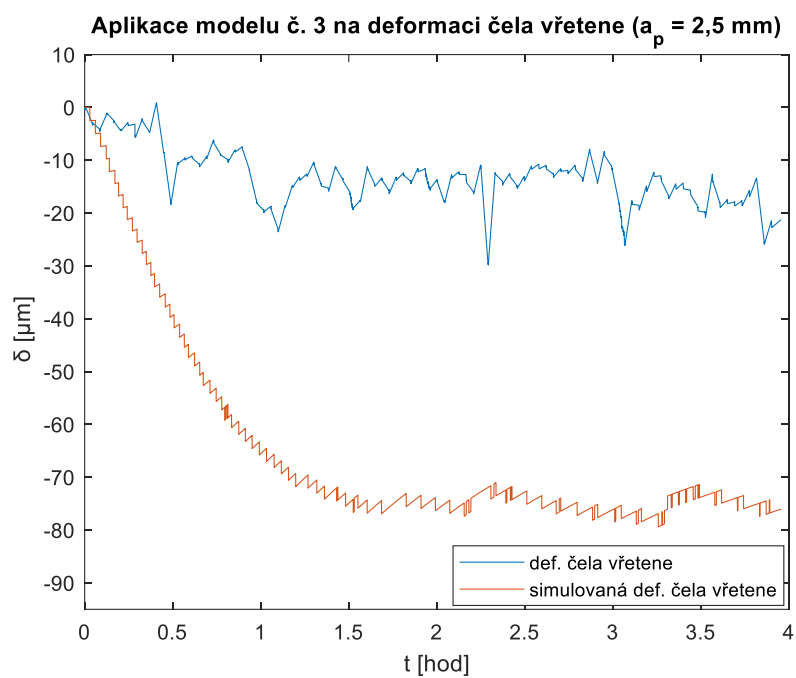
Aplikace modelu č. 3 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 0,5 \text{ mm}$ )



Aplikace modelu č. 3 na deformaci čela vřetene ( $a_p = 1 \text{ mm}$ )

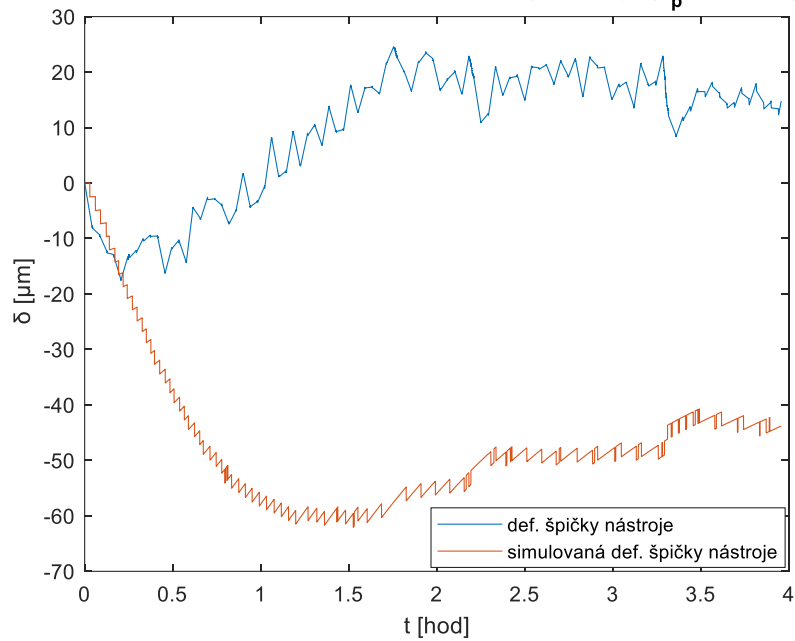




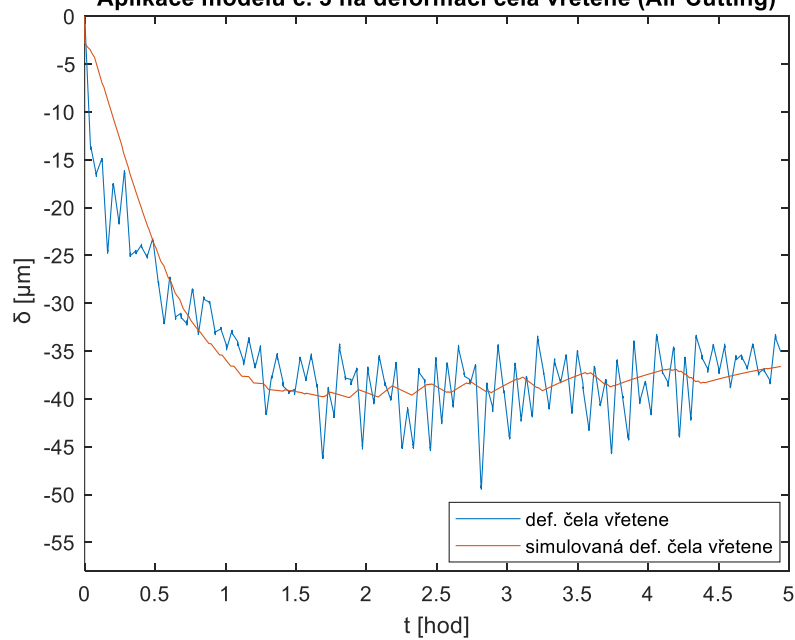


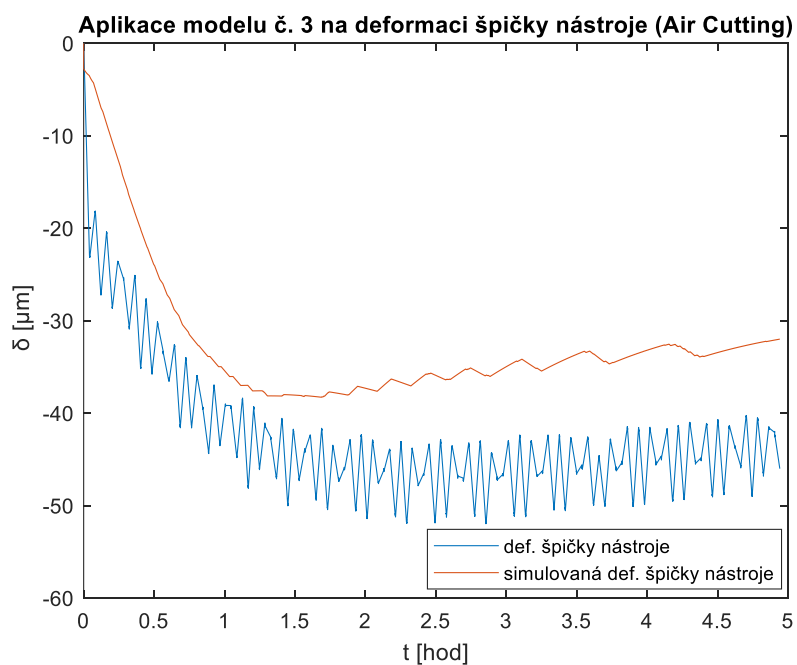
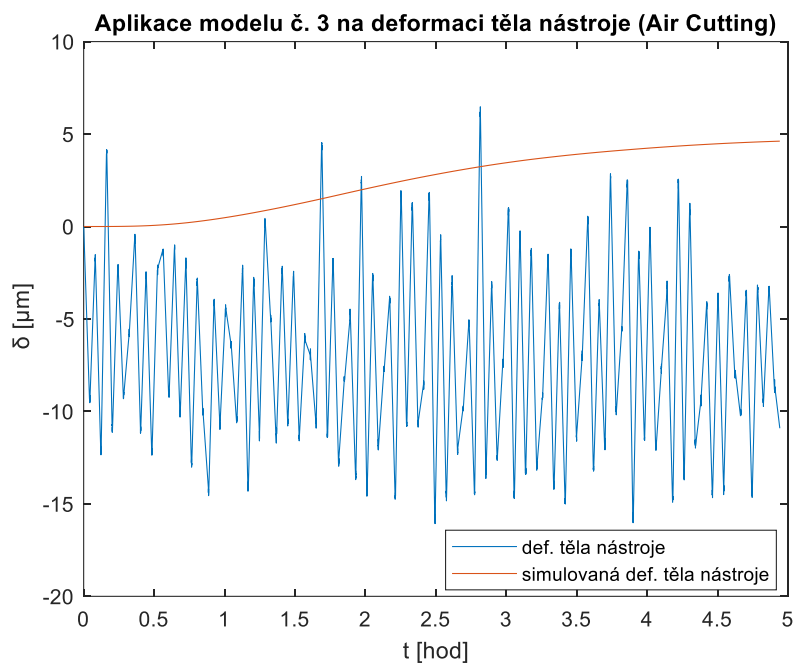


Aplikace modelu č. 3 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 2,5 \text{ mm}$ )

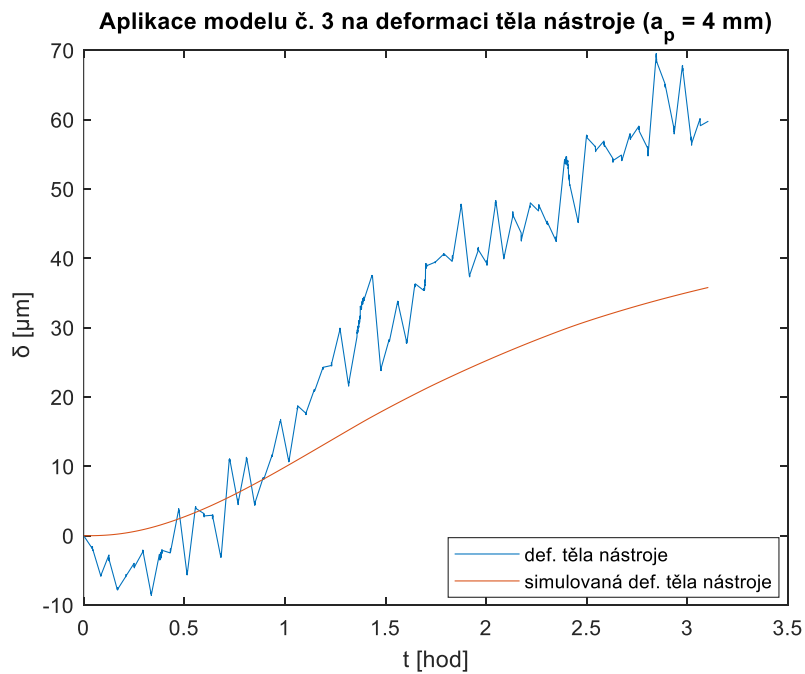
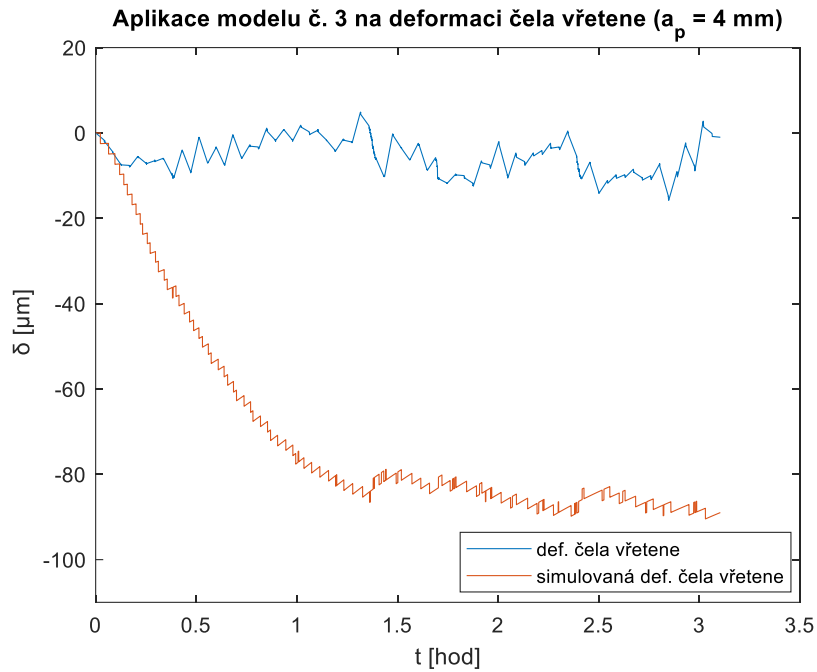


Aplikace modelu č. 3 na deformaci čela vřetene (Air Cutting)



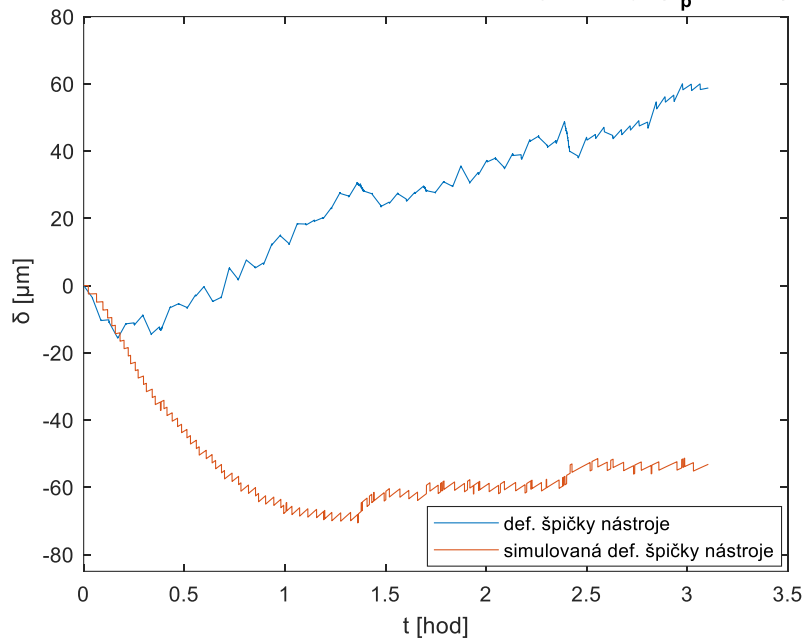




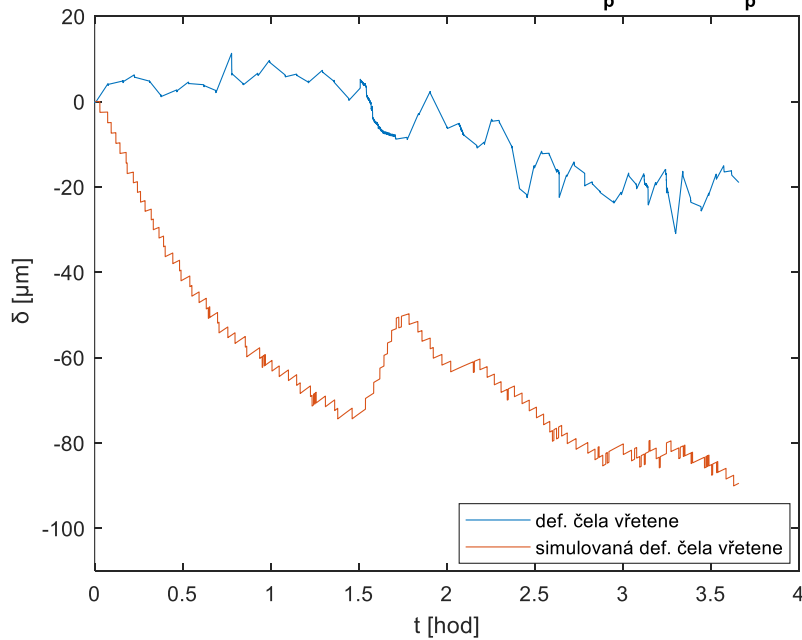




Aplikace modelu č. 3 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 4 \text{ mm}$ )

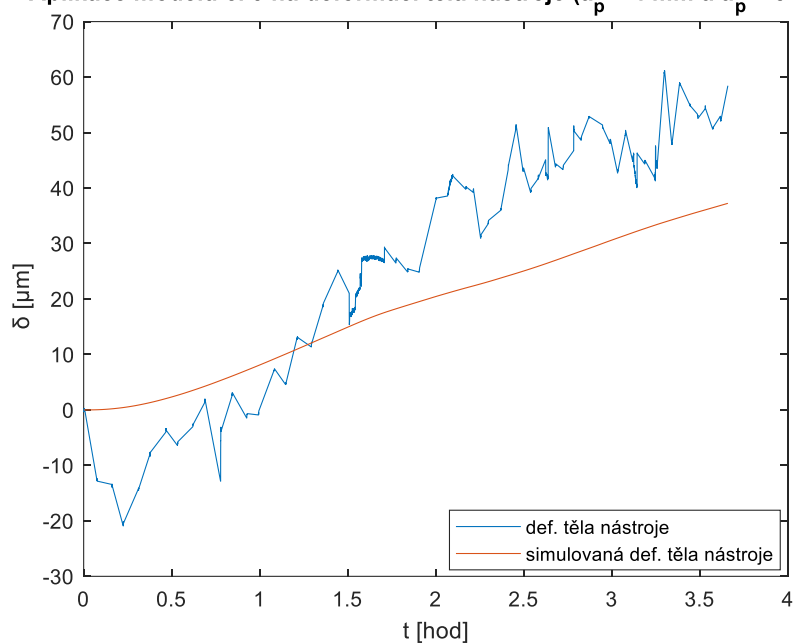


Aplikace modelu č. 3 na deformaci čela vřetene ( $a_p = 4 \text{ mm}$  a  $a_p = 5 \text{ mm}$ )

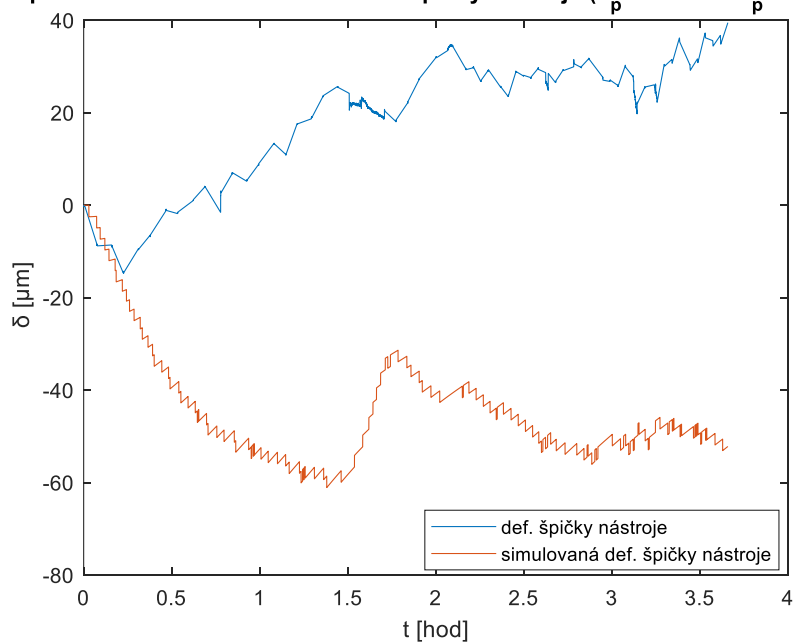




Aplikace modelu č. 3 na deformaci těla nástroje ( $a_p = 4 \text{ mm}$  a  $a_p = 5 \text{ mm}$ )

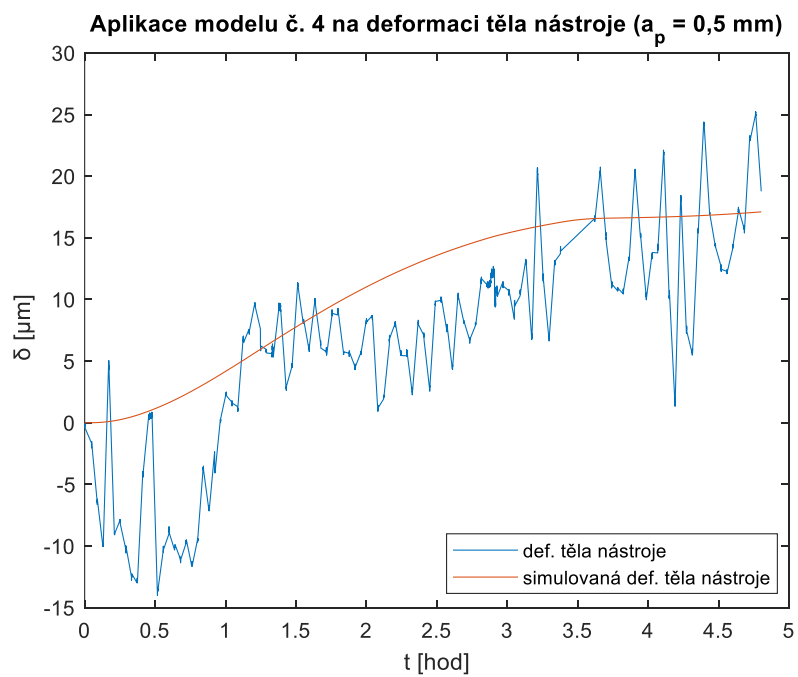
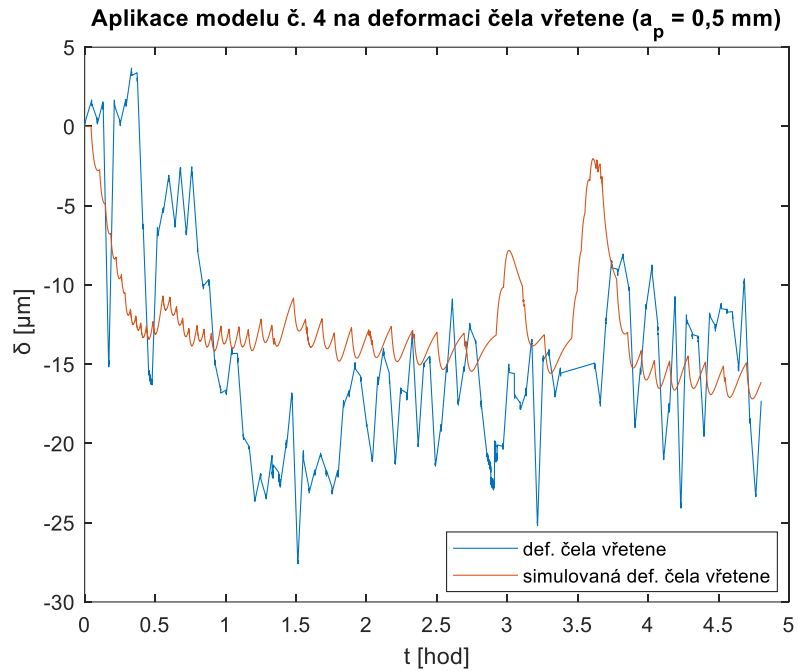


Aplikace modelu č. 3 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 4 \text{ mm}$  a  $a_p = 5 \text{ mm}$ )



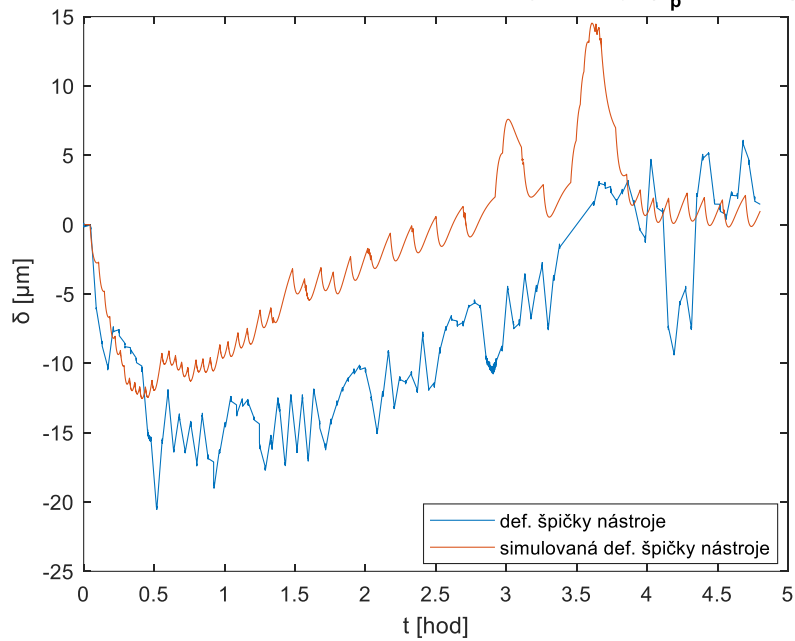


### Model č. 4

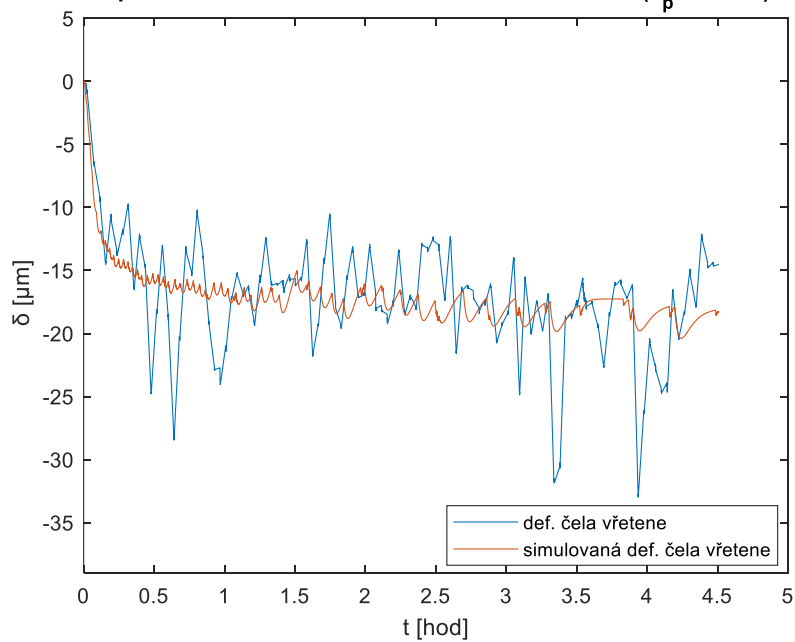




Aplikace modelu č. 4 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 0,5 \text{ mm}$ )

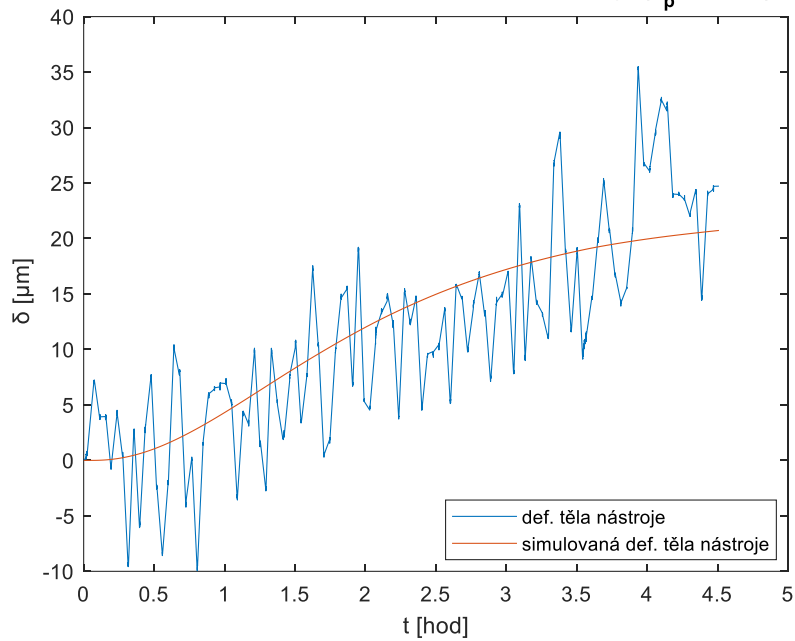


Aplikace modelu č. 4 na deformaci čela vřetene ( $a_p = 1 \text{ mm}$ )

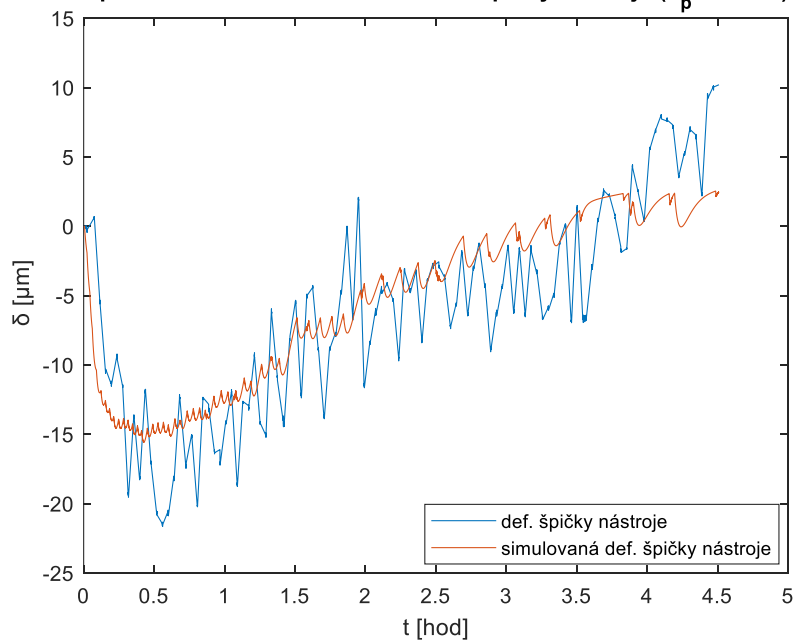




Aplikace modelu č. 4 na deformaci těla nástroje ( $a_p = 1 \text{ mm}$ )

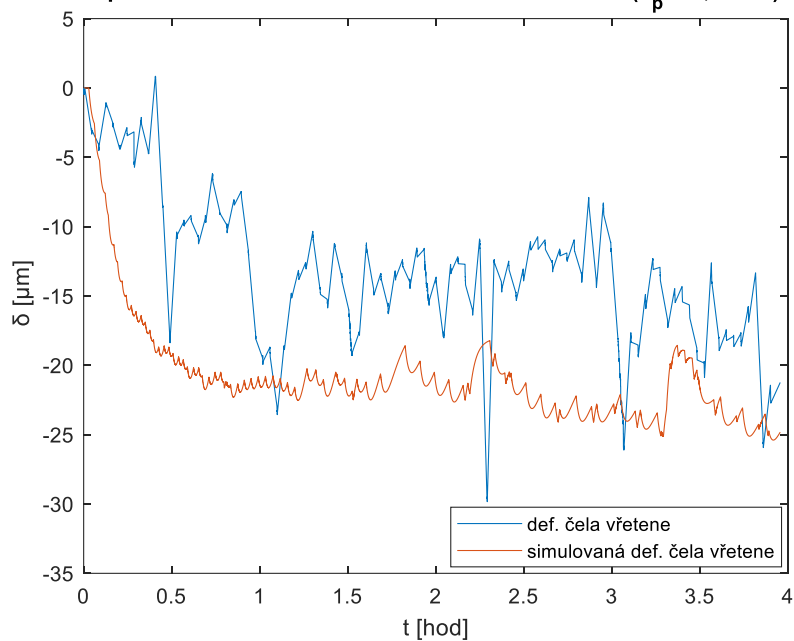


Aplikace modelu č. 4 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 1 \text{ mm}$ )

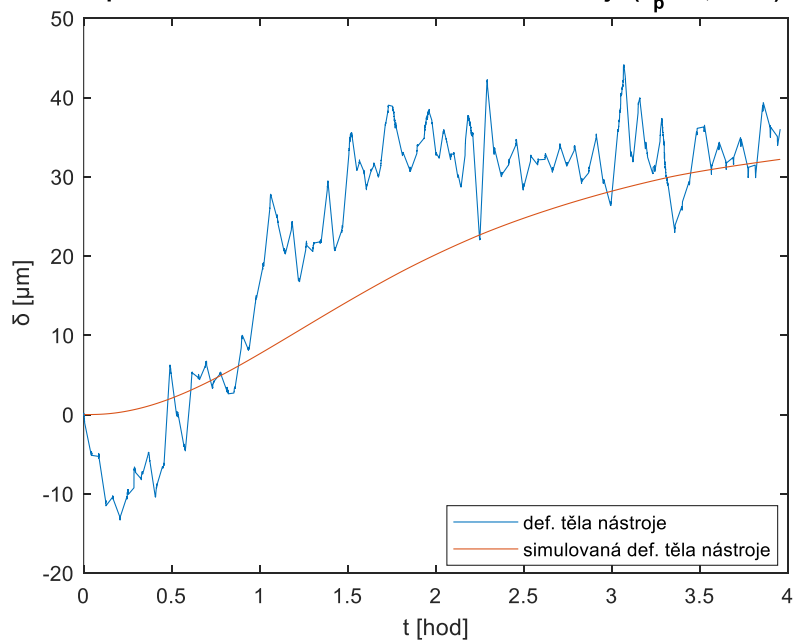




Aplikace modelu č. 4 na deformaci čela vřetene ( $a_p = 2,5$  mm)

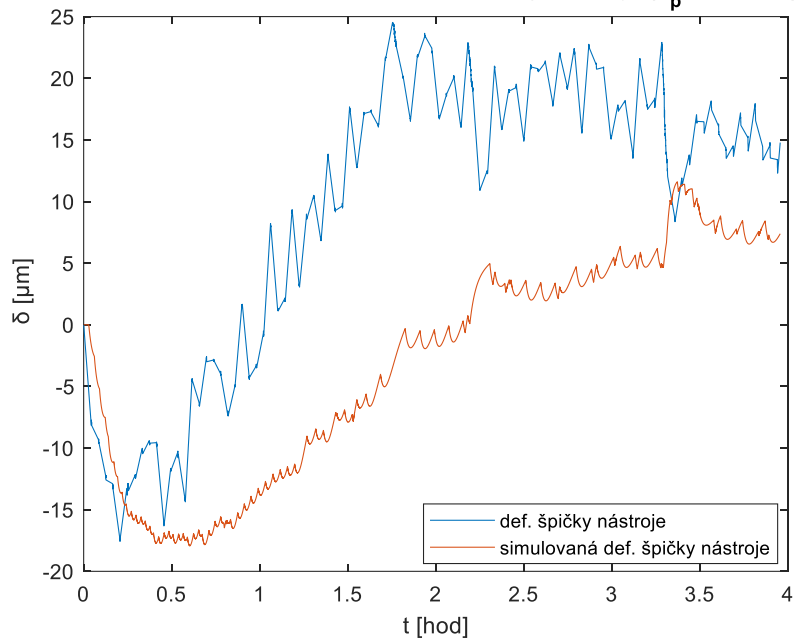


Aplikace modelu č. 4 na deformaci těla nástroje ( $a_p = 2,5$  mm)

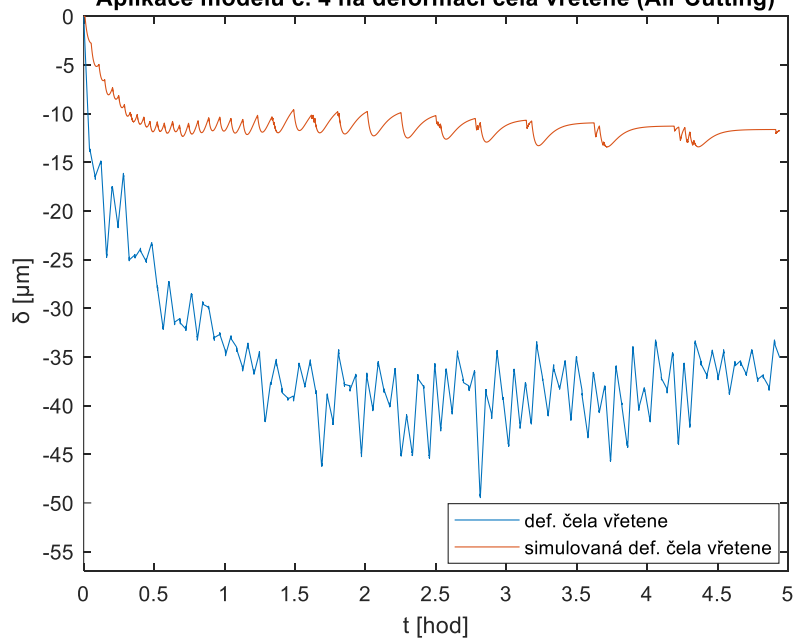




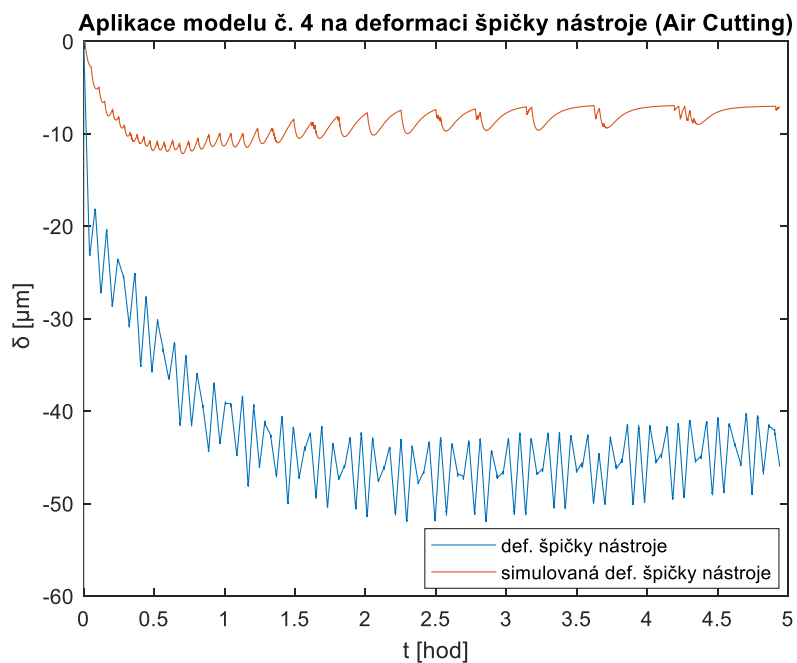
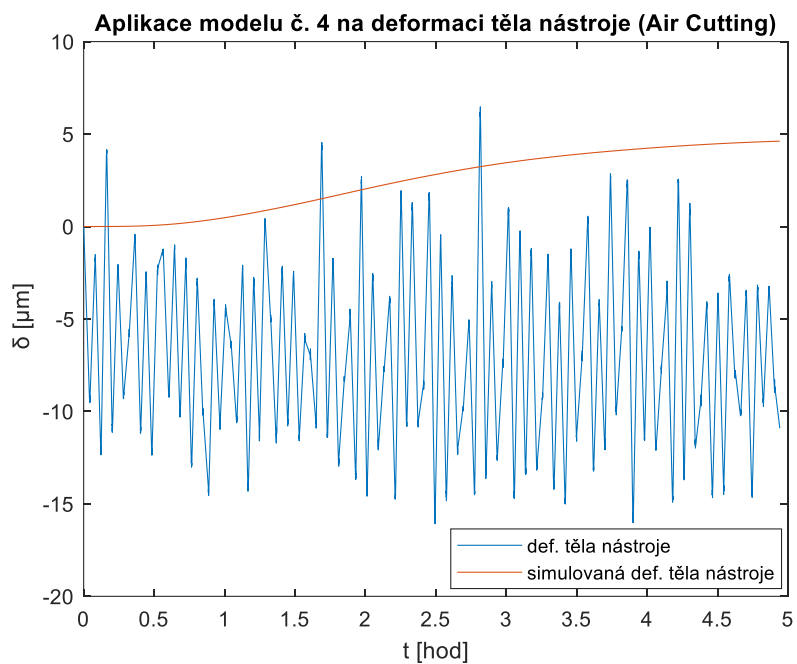
Aplikace modelu č. 4 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 2,5 \text{ mm}$ )

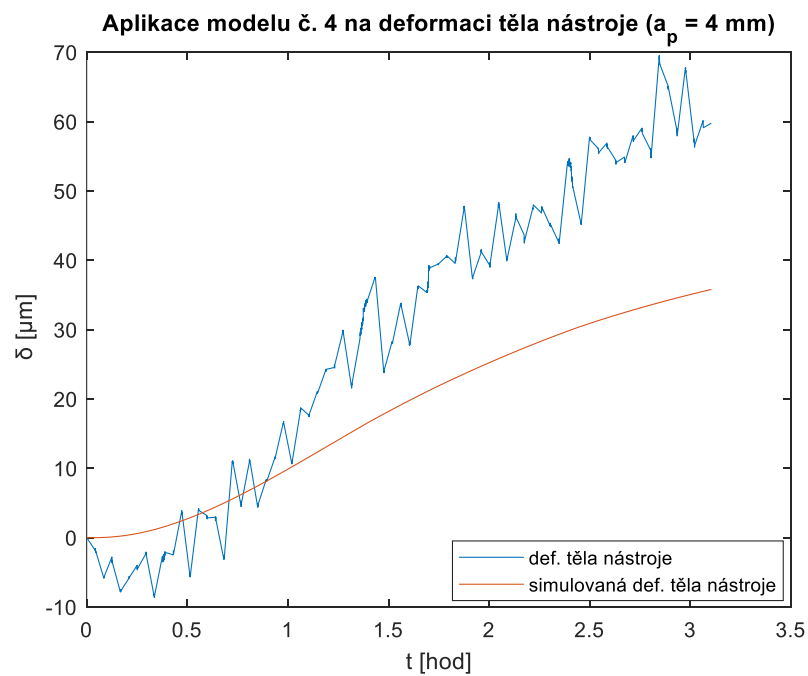
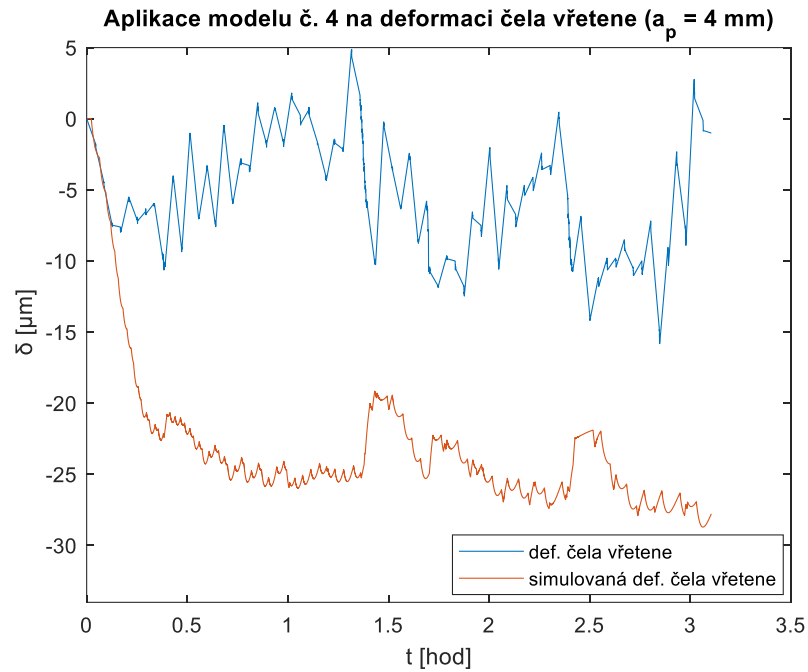


Aplikace modelu č. 4 na deformaci čela vřetene (Air Cutting)



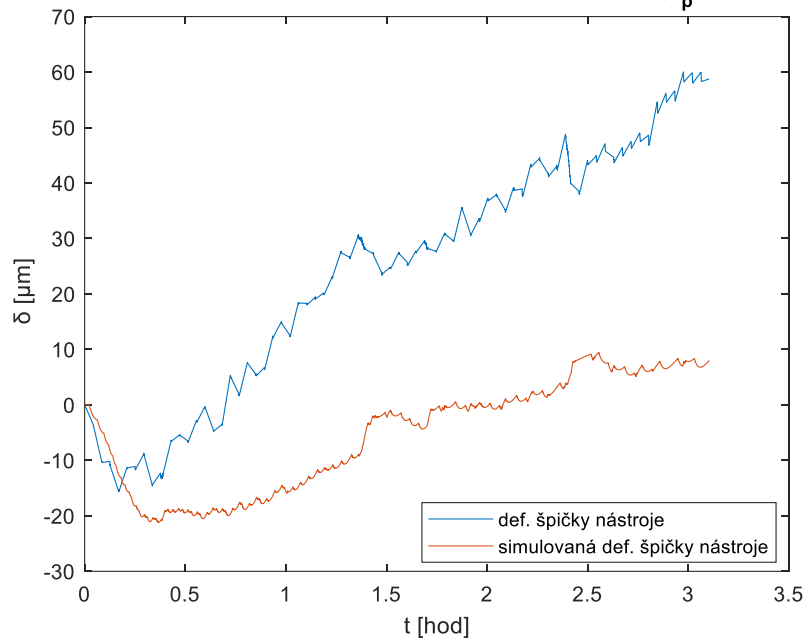




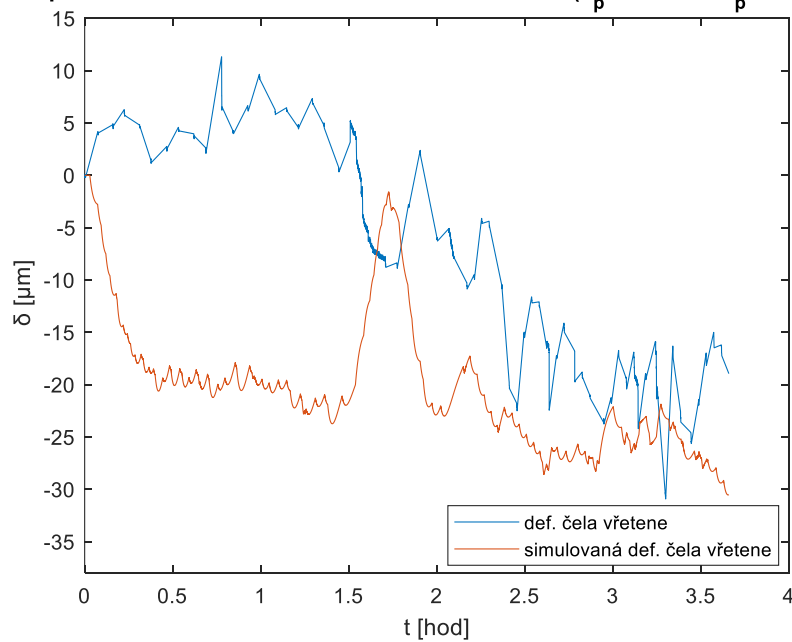




Aplikace modelu č. 4 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 4 \text{ mm}$ )

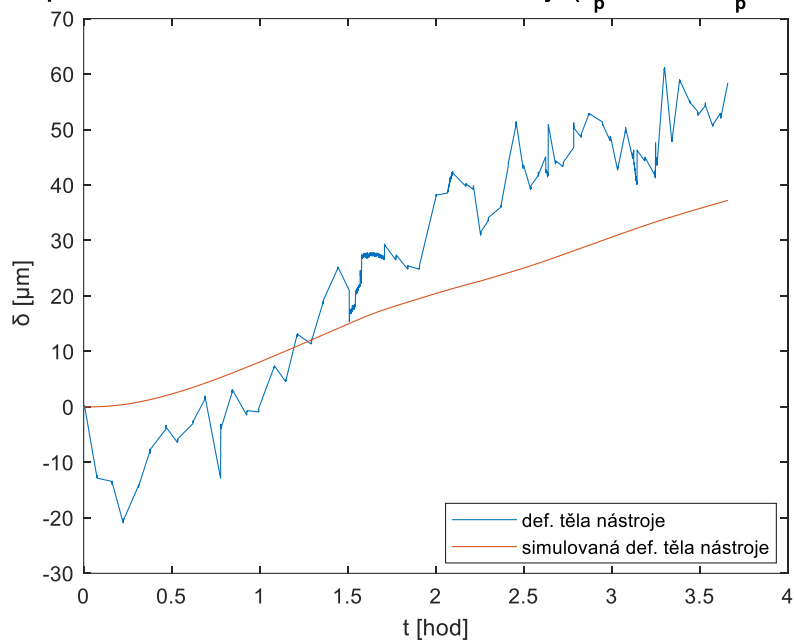


Aplikace modelu č. 4 na deformaci čela vřetene ( $a_p = 4 \text{ mm}$  a  $a_p = 5 \text{ mm}$ )

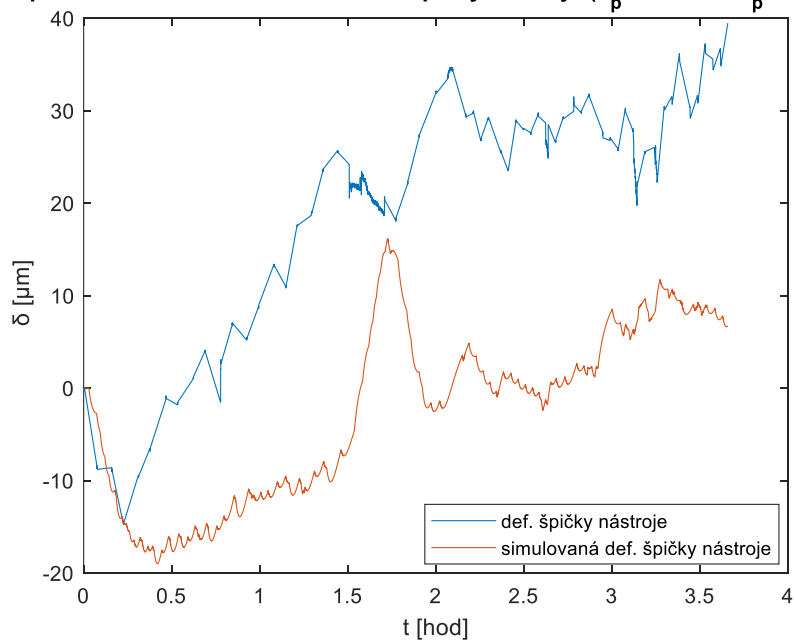




Aplikace modelu č. 4 na deformaci těla nástroje ( $a_p = 4 \text{ mm}$  a  $a_p = 5 \text{ mm}$ )



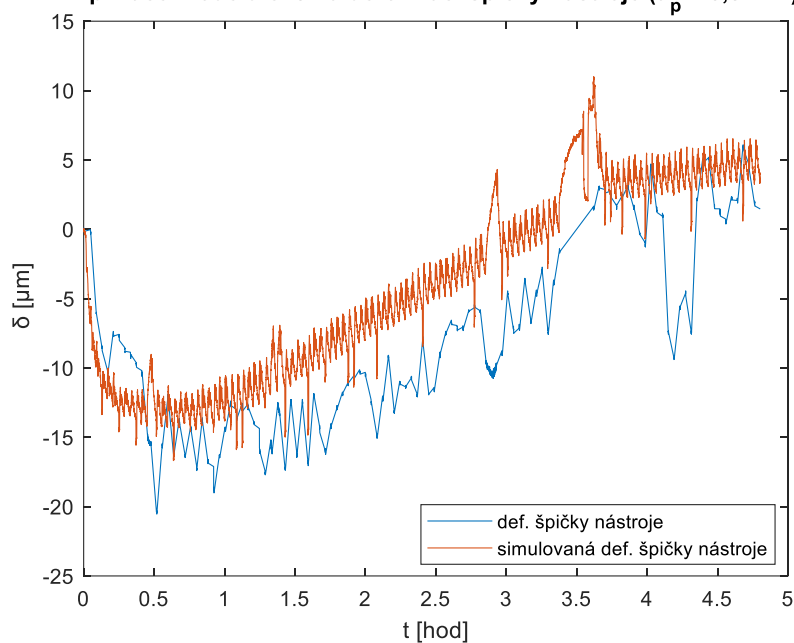
Aplikace modelu č. 4 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 4 \text{ mm}$  a  $a_p = 5 \text{ mm}$ )



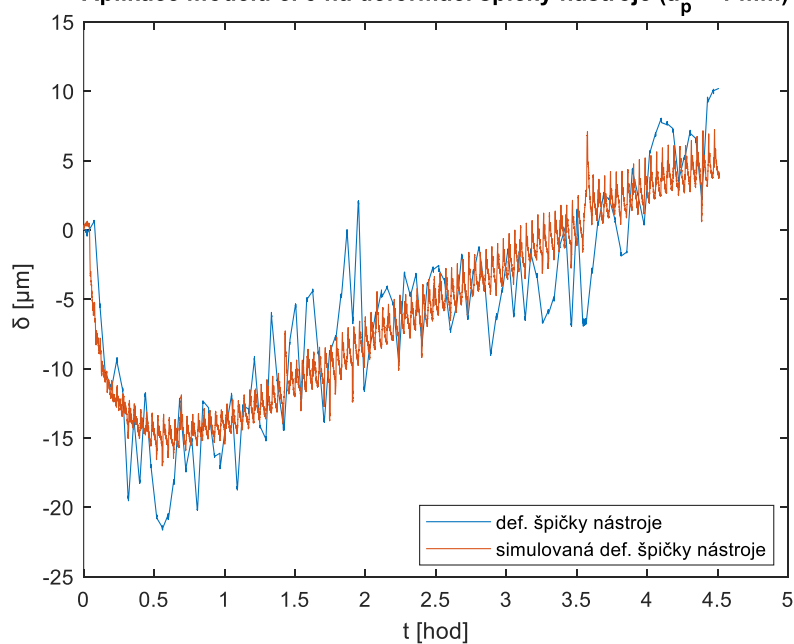


### Model č. 5

Aplikace modelu č. 5 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 0,5 \text{ mm}$ )

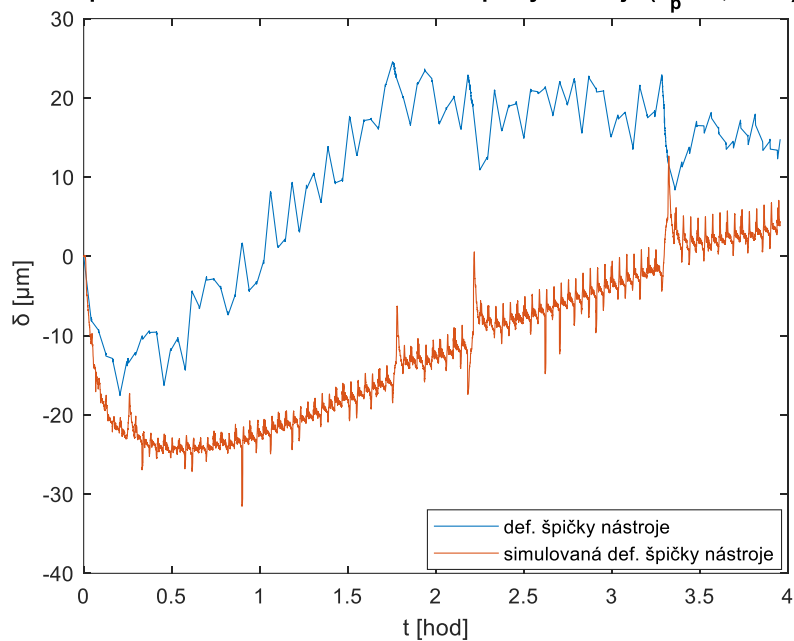


Aplikace modelu č. 5 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 1 \text{ mm}$ )

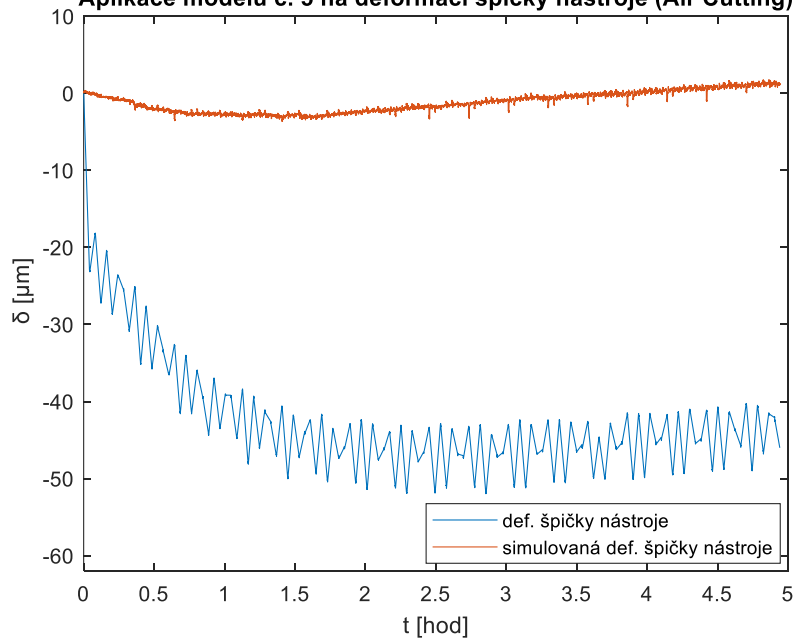




Aplikace modelu č. 5 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 2,5$  mm)

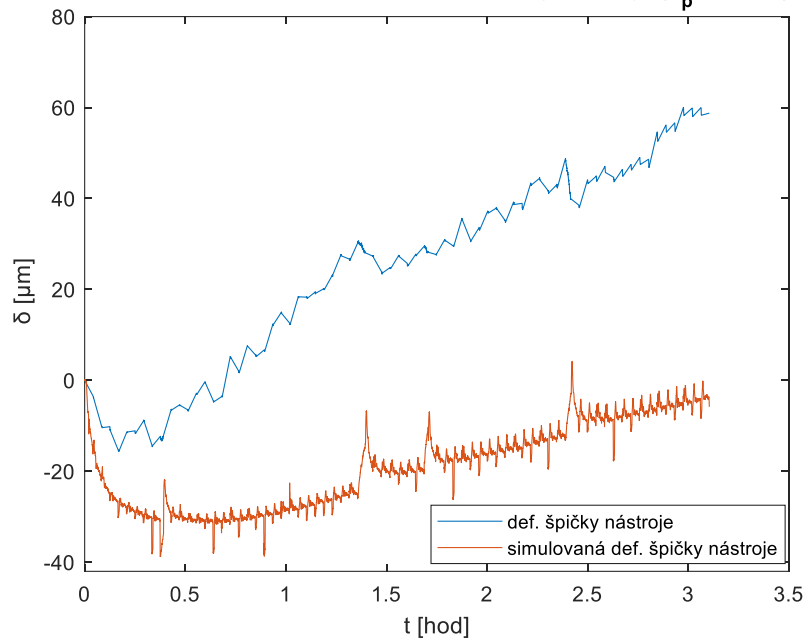


Aplikace modelu č. 5 na deformaci špičky nástroje (Air Cutting)

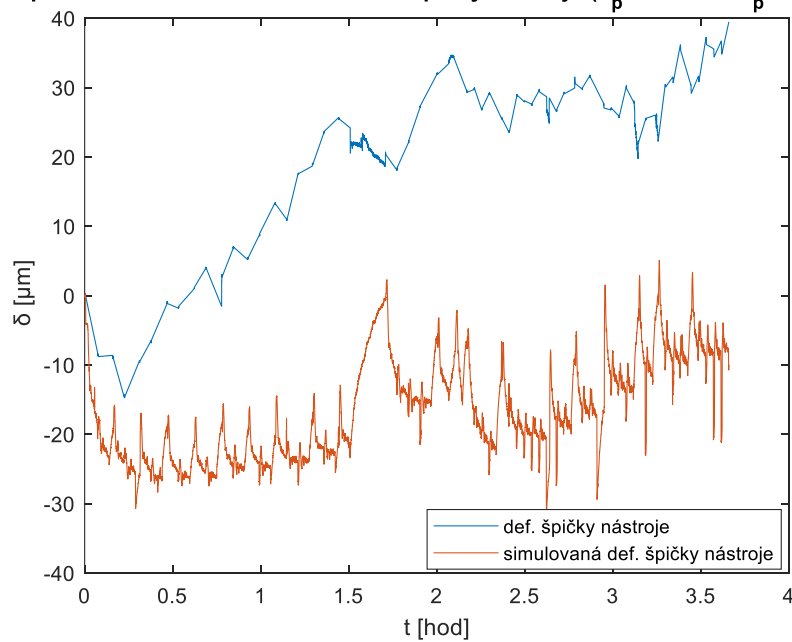




Aplikace modelu č. 5 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 4 \text{ mm}$ )



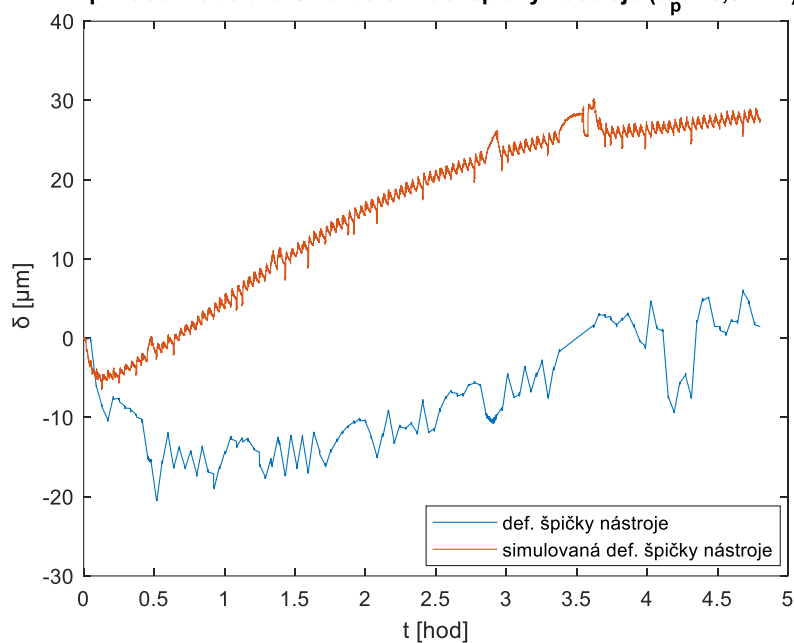
Aplikace modelu č. 5 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 4 \text{ mm}$  a  $a_p = 5 \text{ mm}$ )



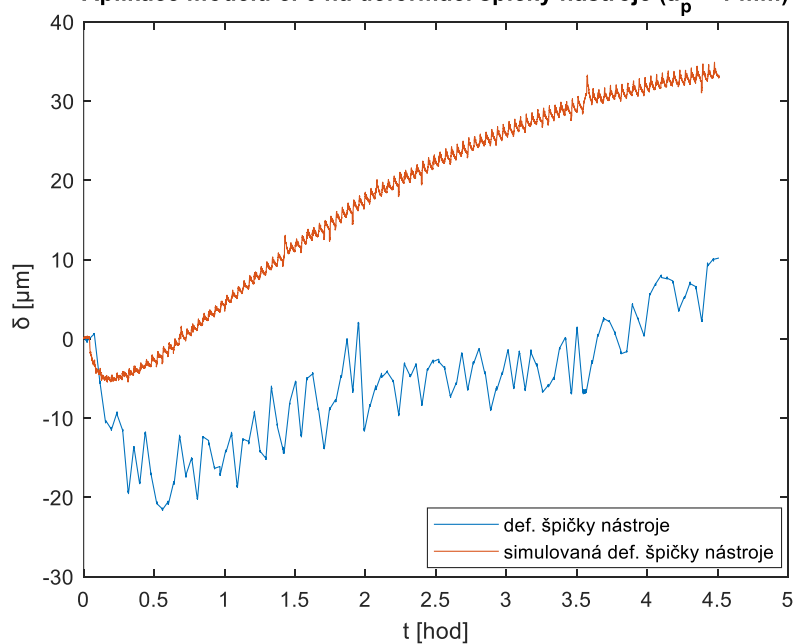


### Model č. 6

Aplikace modelu č. 6 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 0,5 \text{ mm}$ )



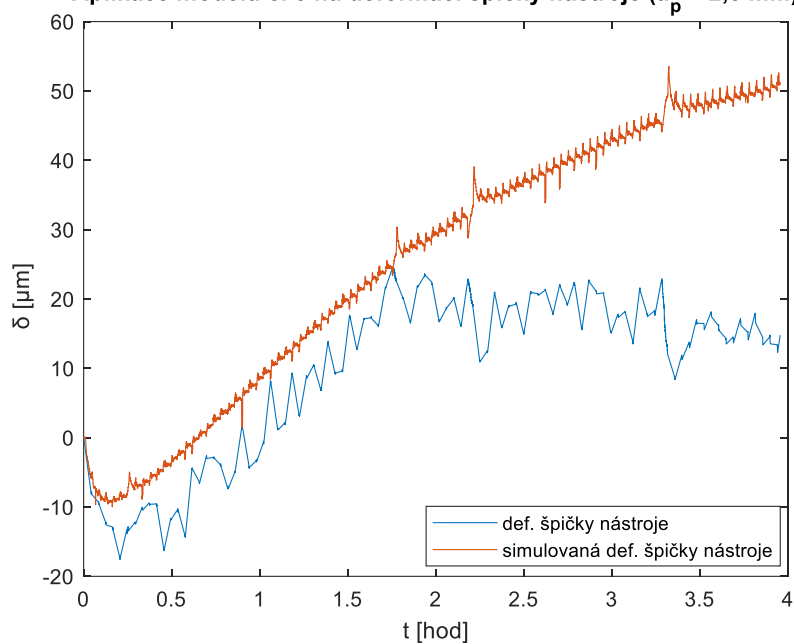
Aplikace modelu č. 6 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 1 \text{ mm}$ )



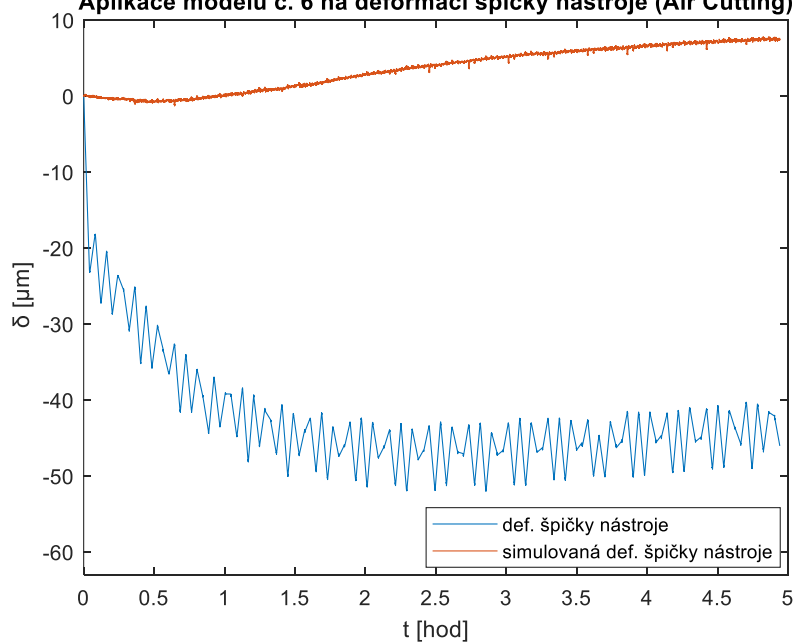


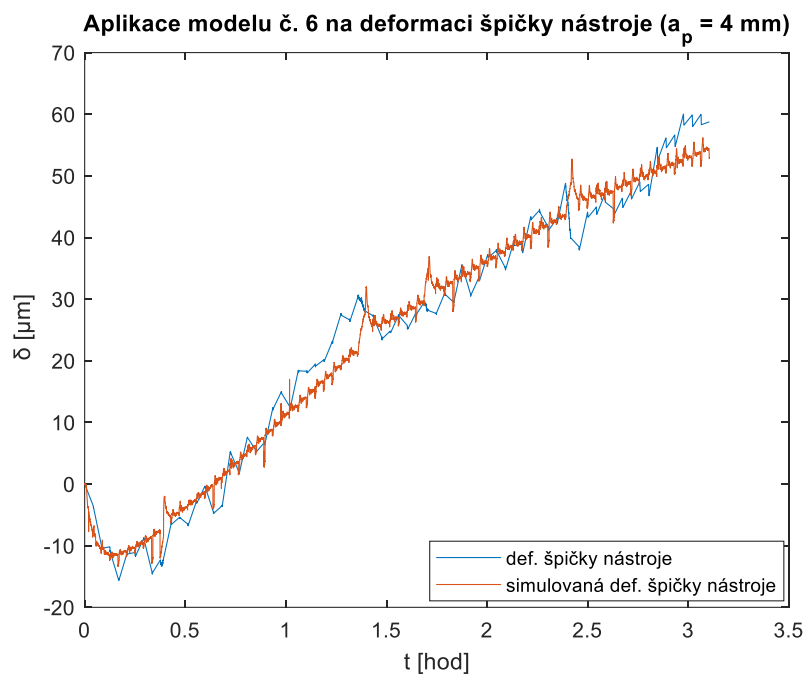


Aplikace modelu č. 6 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 2,5$  mm)

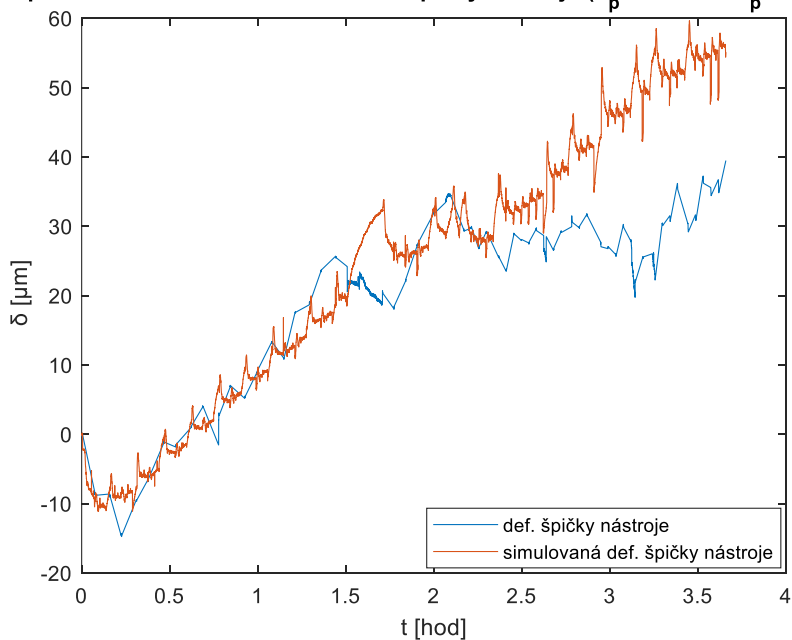


Aplikace modelu č. 6 na deformaci špičky nástroje (Air Cutting)





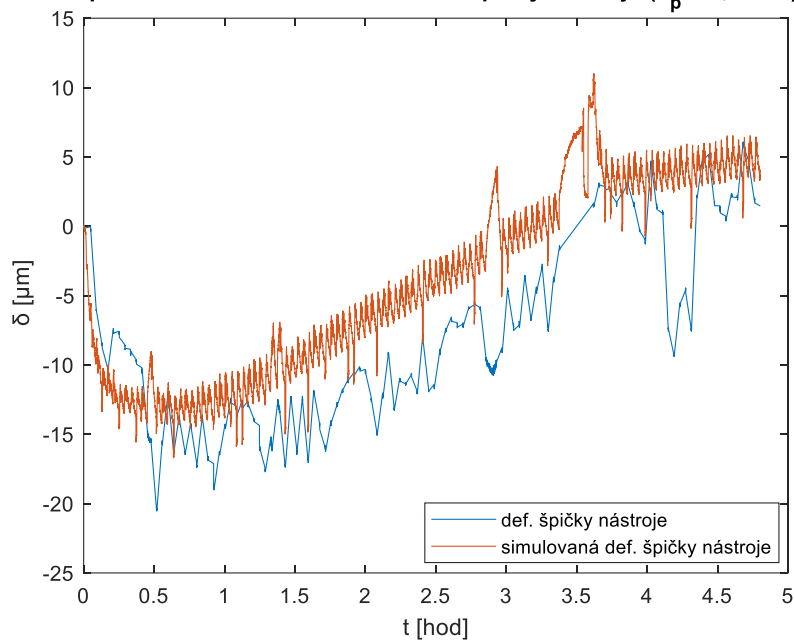
**Aplikace modelu č. 6 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 4 \text{ mm}$  a  $a_p = 5 \text{ mm}$ )**



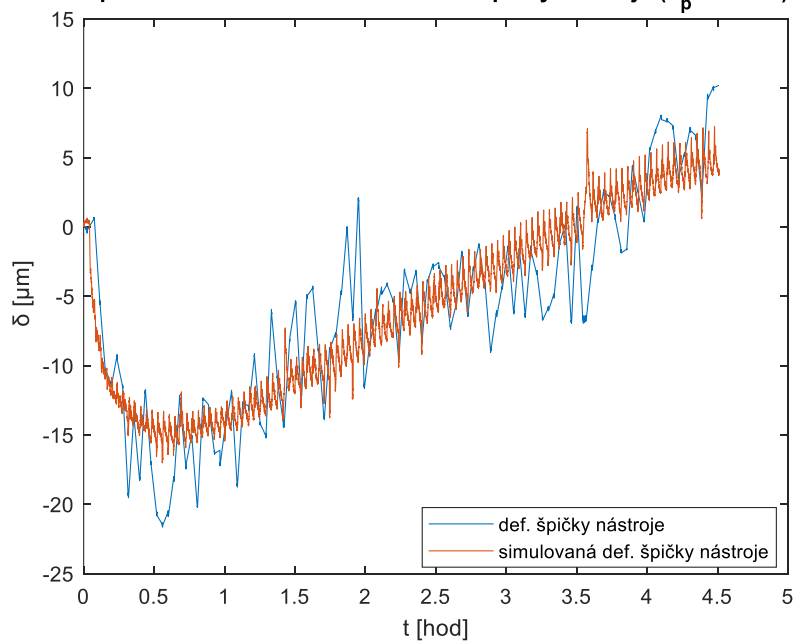


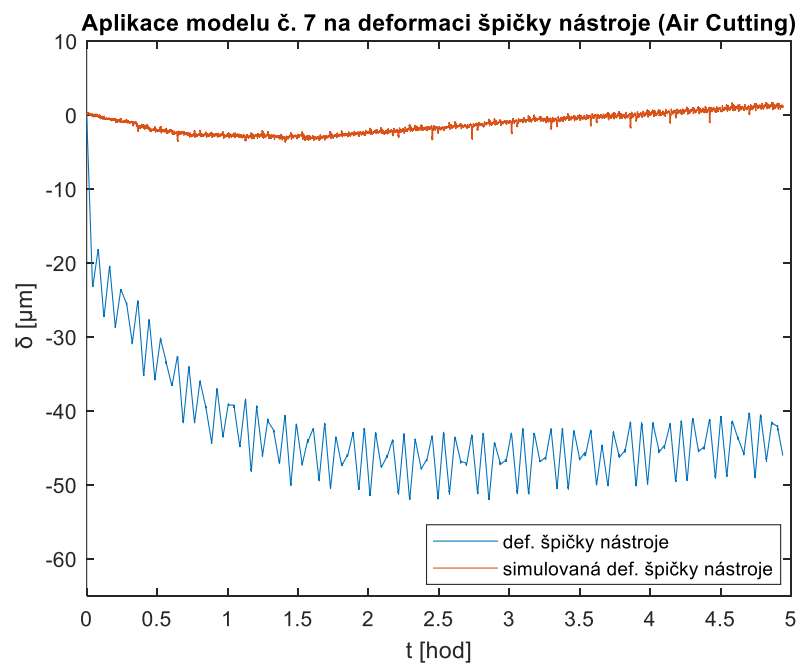
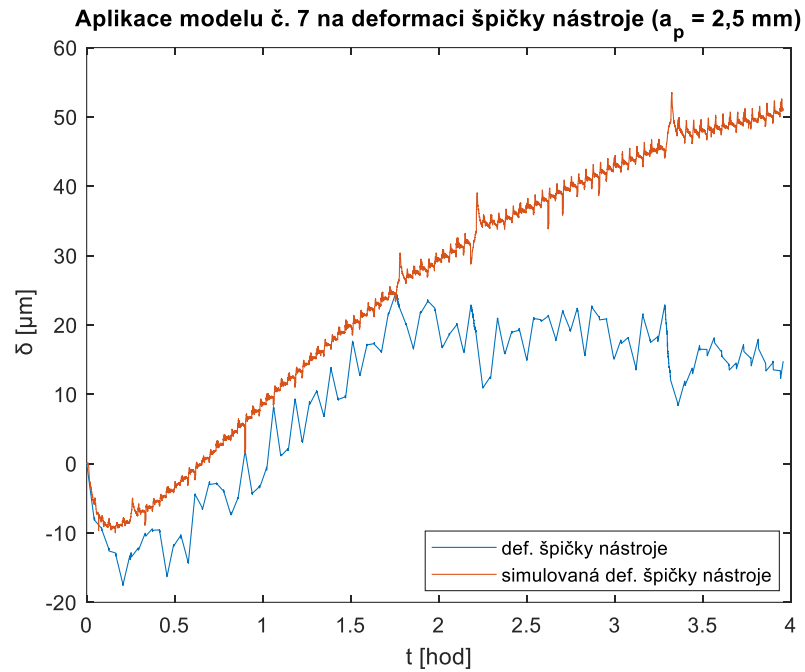
### Model č. 7

Aplikace modelu č. 7 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 0,5 \text{ mm}$ )



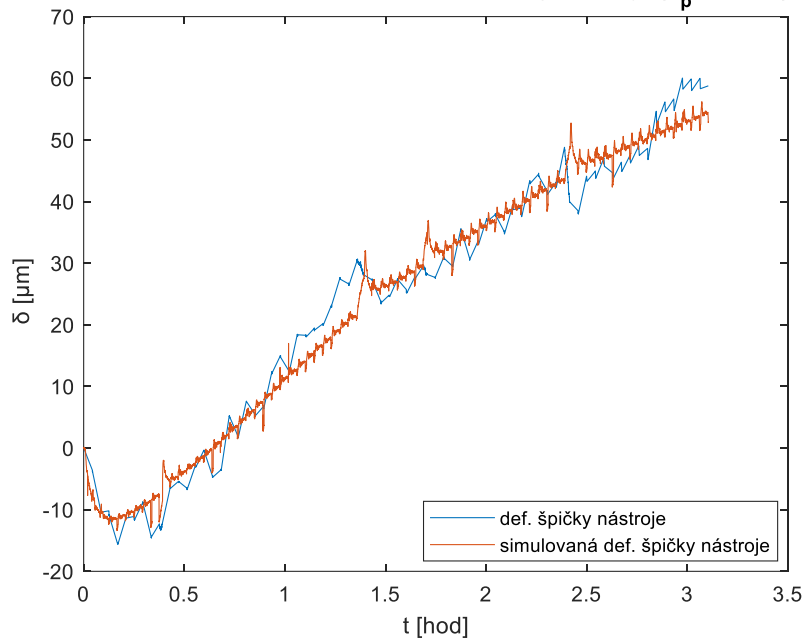
Aplikace modelu č. 7 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 1 \text{ mm}$ )



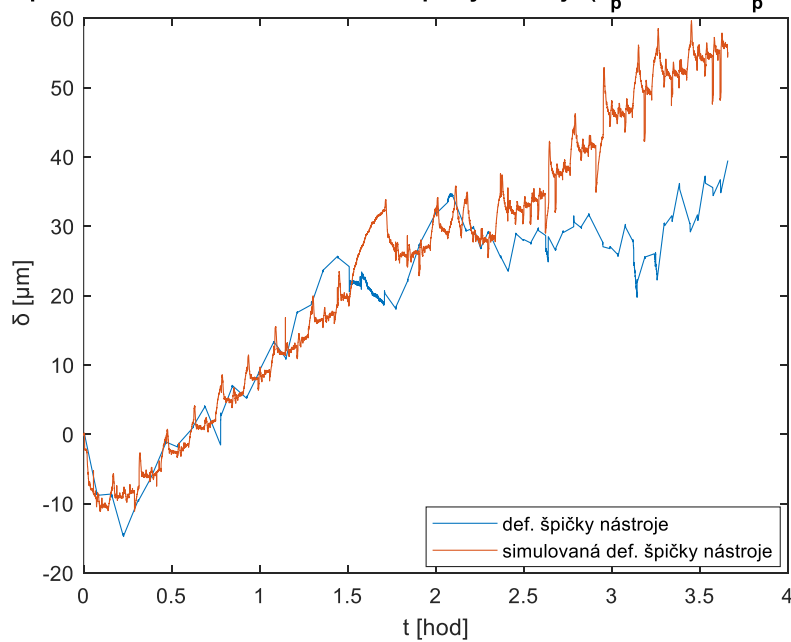




Aplikace modelu č. 7 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 4 \text{ mm}$ )



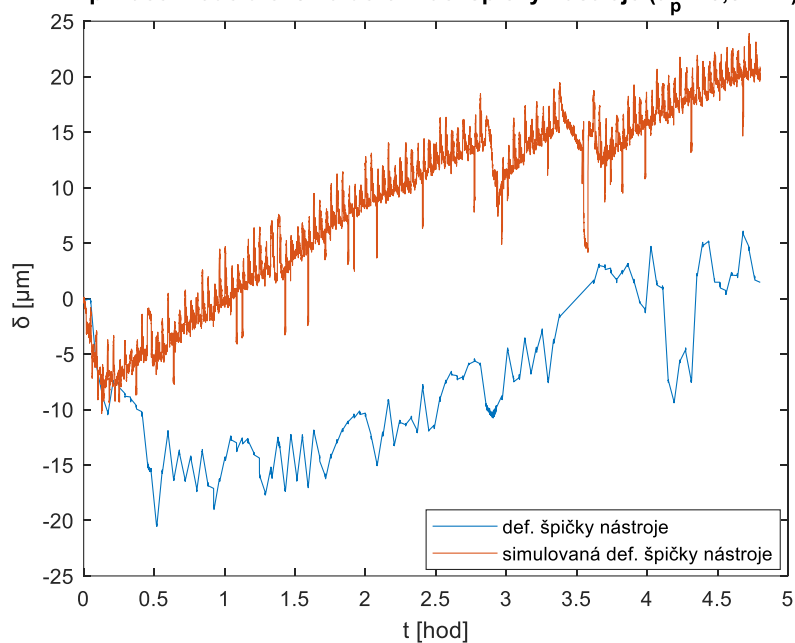
Aplikace modelu č. 7 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 4 \text{ mm}$  a  $a_p = 5 \text{ mm}$ )



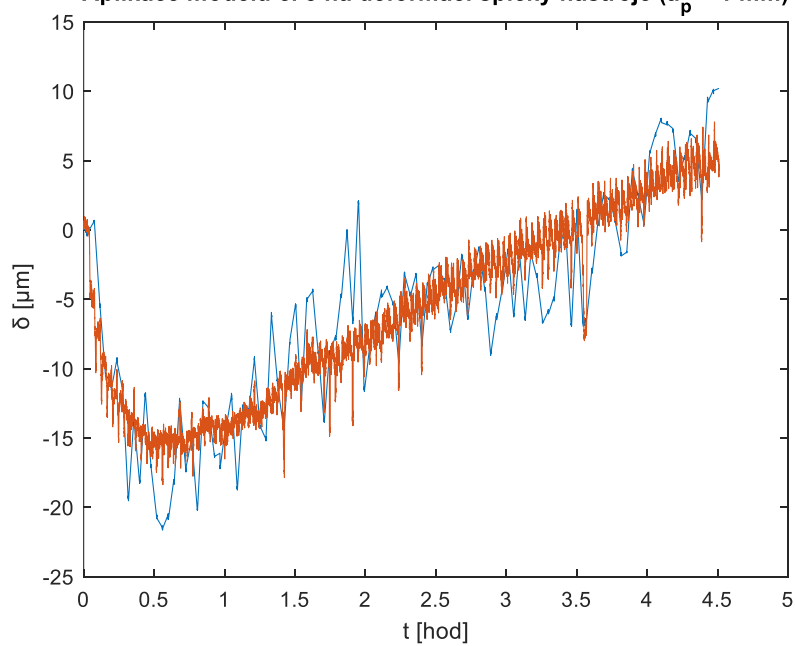


### Model č. 8

Aplikace modelu č. 8 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 0,5 \text{ mm}$ )

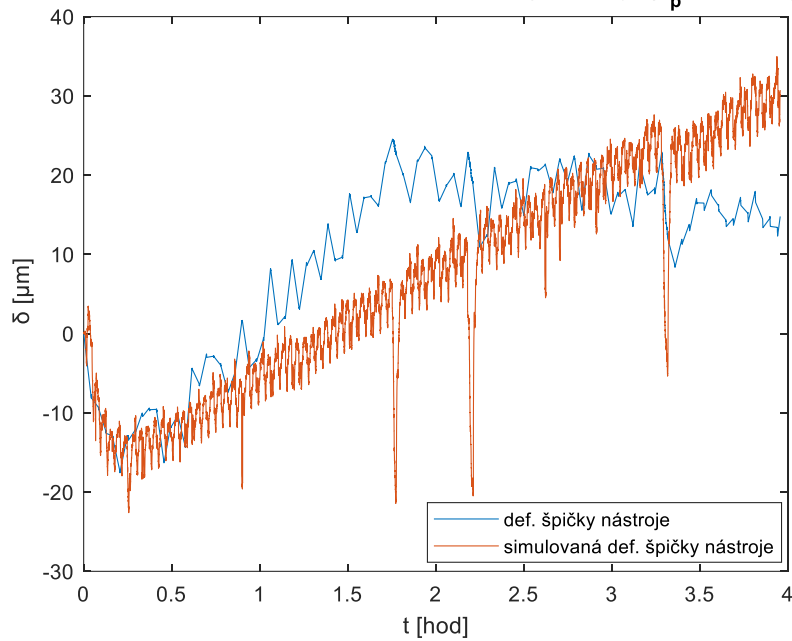


Aplikace modelu č. 8 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 1 \text{ mm}$ )

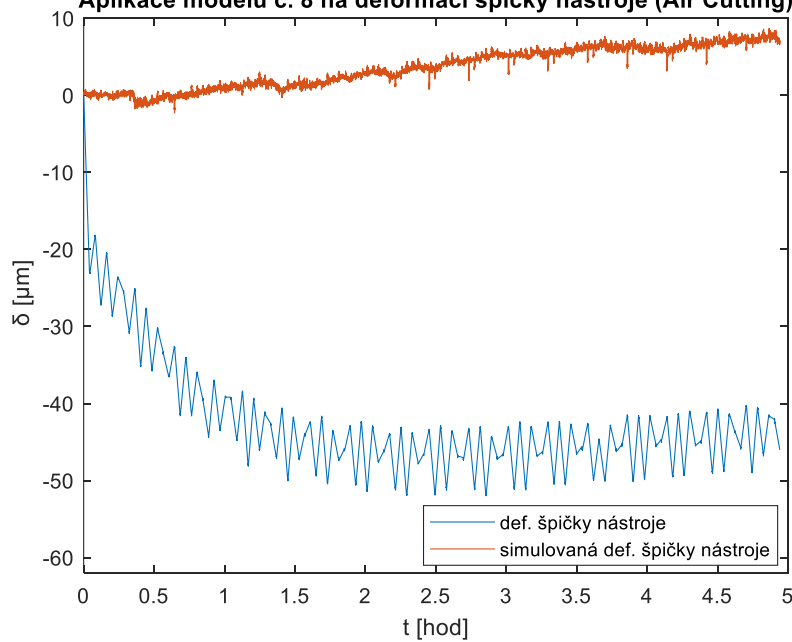




Aplikace modelu č. 8 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 2,5 \text{ mm}$ )

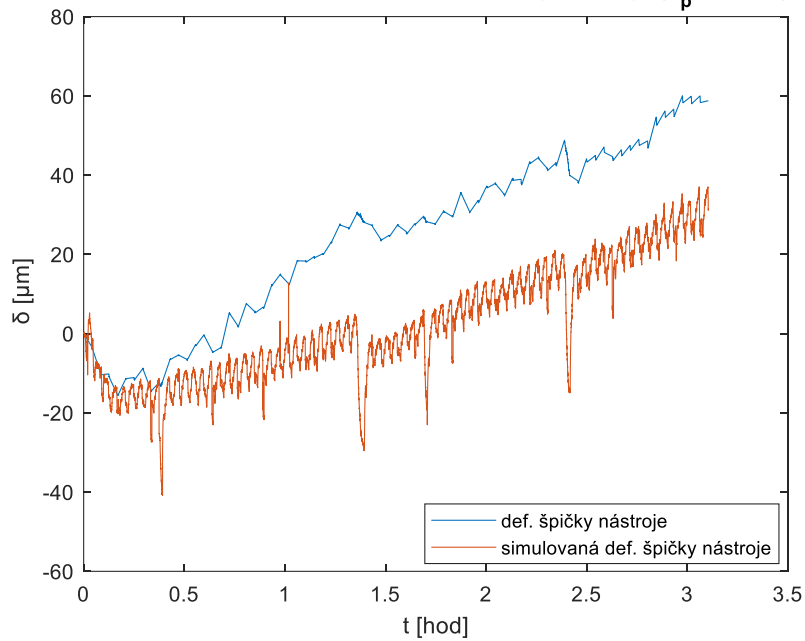


Aplikace modelu č. 8 na deformaci špičky nástroje (Air Cutting)

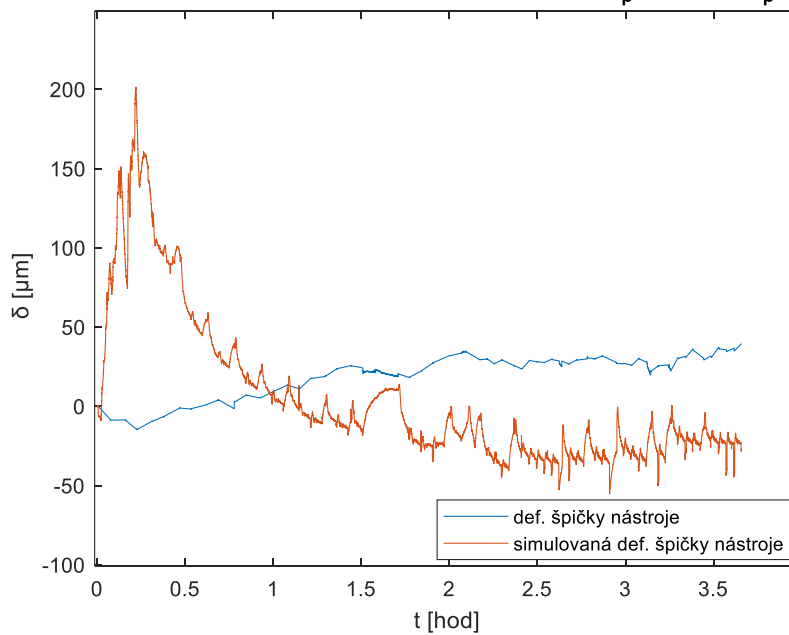




Aplikace modelu č. 8 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 4 \text{ mm}$ )



Aplikace modelu č. 8 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 4 \text{ mm}$  a  $a_p = 5 \text{ mm}$ )

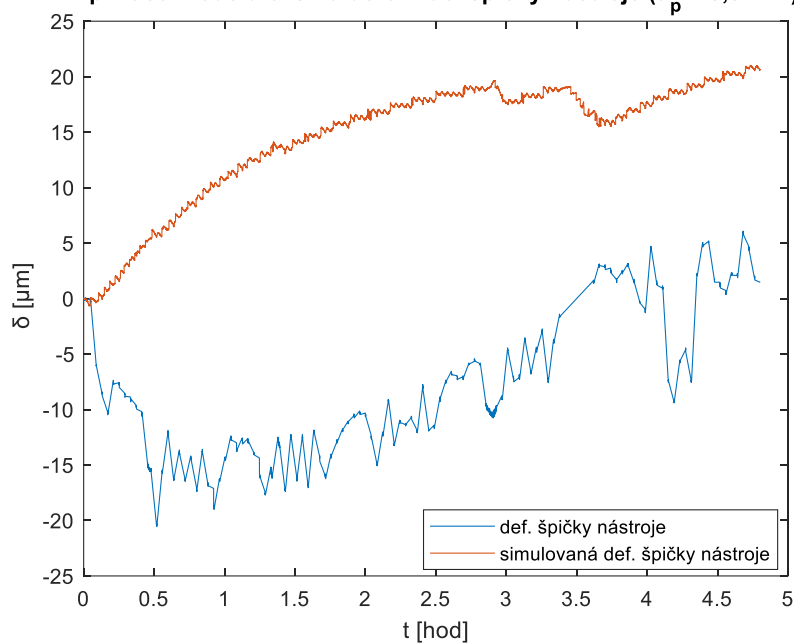




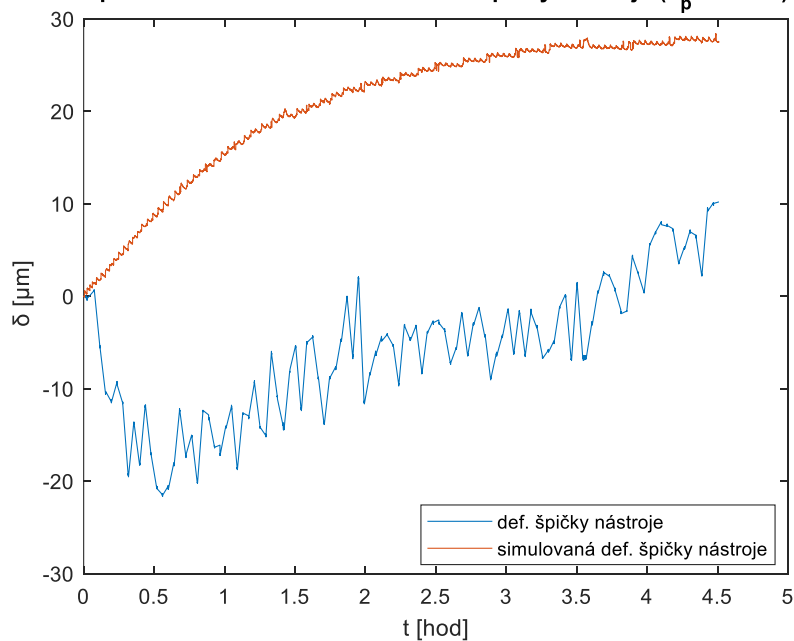


### Model č. 9

Aplikace modelu č. 9 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 0,5 \text{ mm}$ )

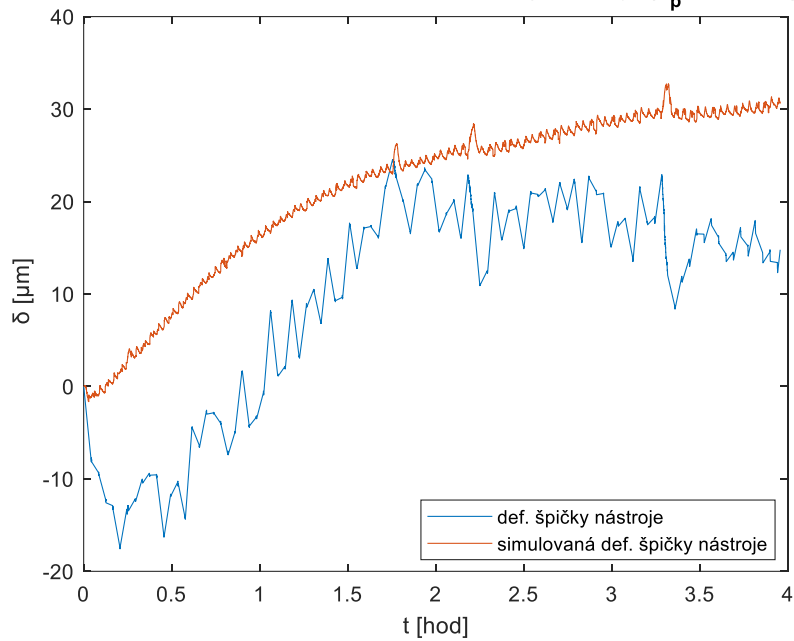


Aplikace modelu č. 9 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 1 \text{ mm}$ )

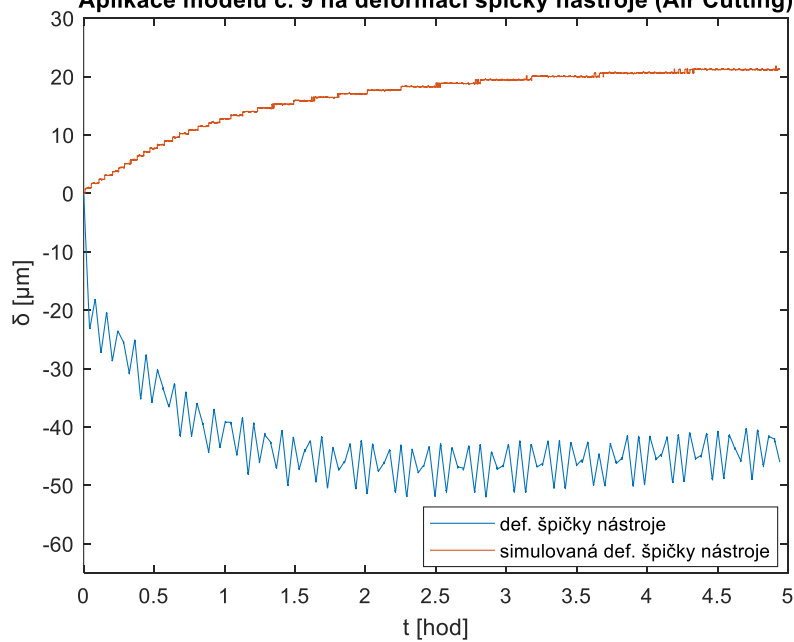




Aplikace modelu č. 9 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 2,5$  mm)

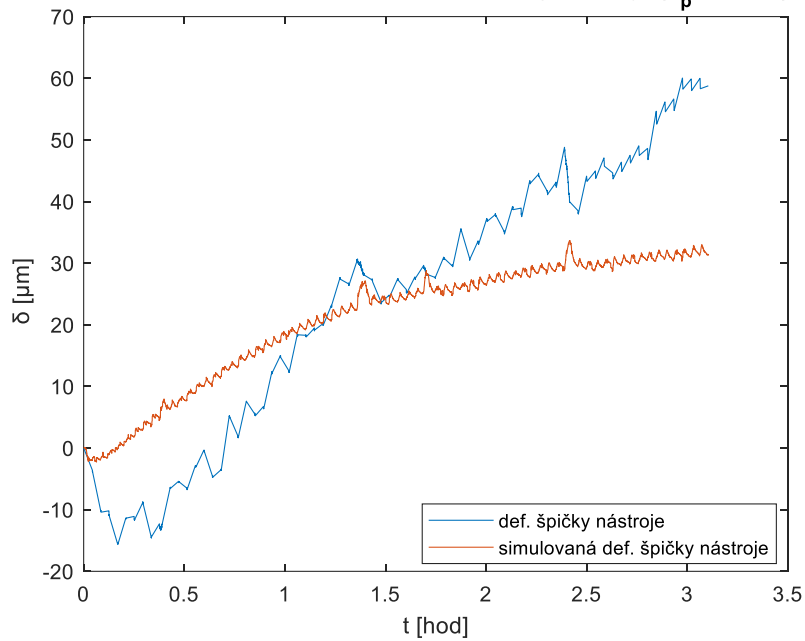


Aplikace modelu č. 9 na deformaci špičky nástroje (Air Cutting)

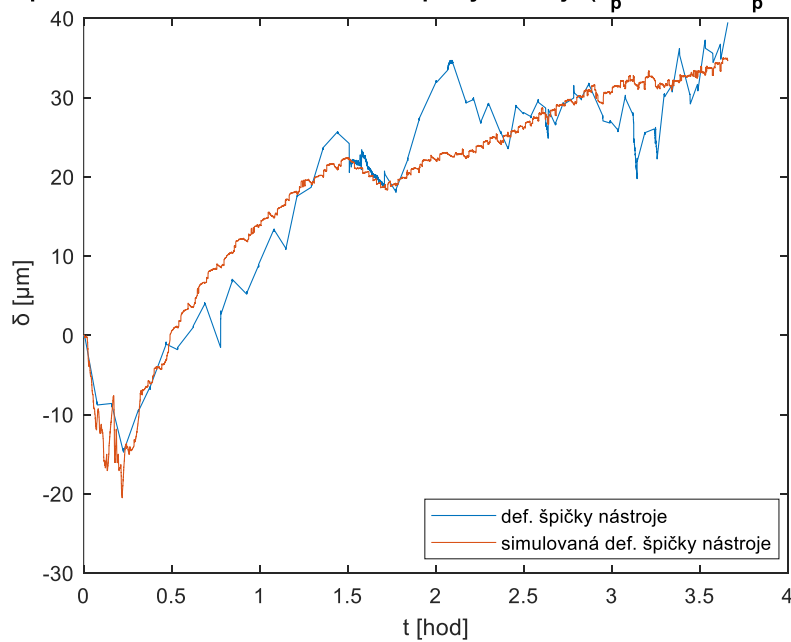




Aplikace modelu č. 9 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 4 \text{ mm}$ )



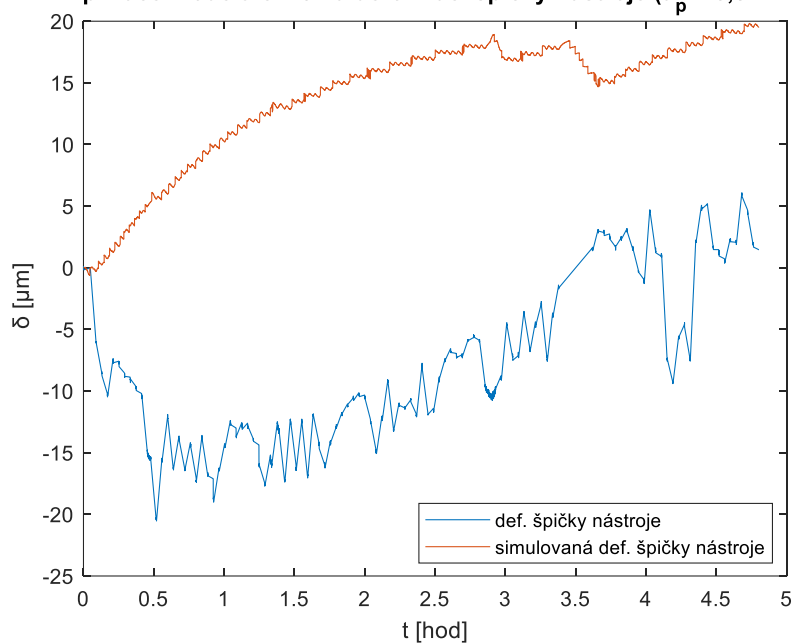
Aplikace modelu č. 9 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 4 \text{ mm}$  a  $a_p = 5 \text{ mm}$ )



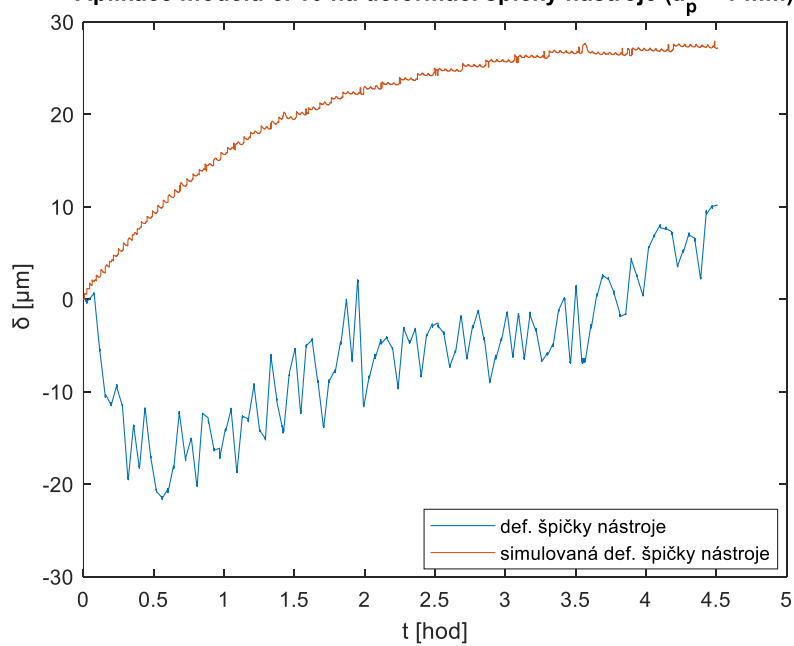


### Model č. 10

Aplikace modelu č. 10 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 0,5 \text{ mm}$ )

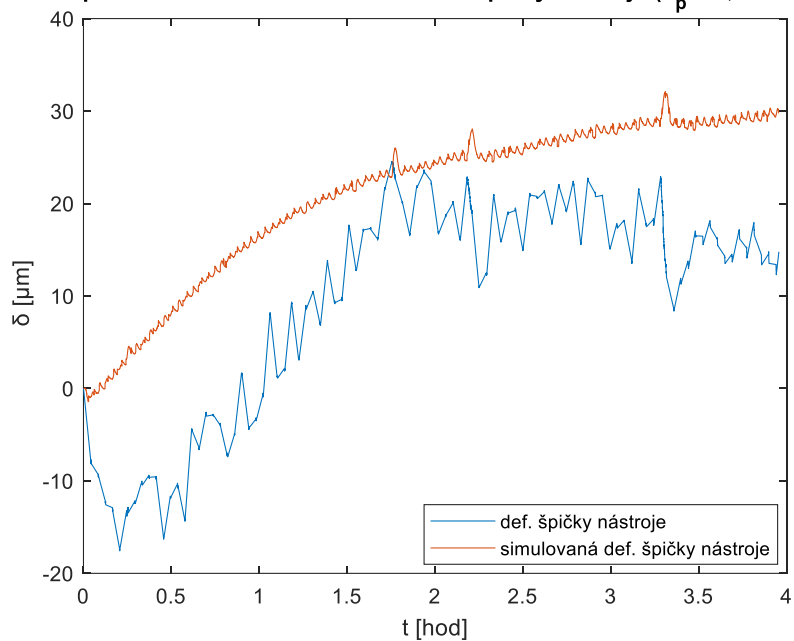


Aplikace modelu č. 10 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 1 \text{ mm}$ )

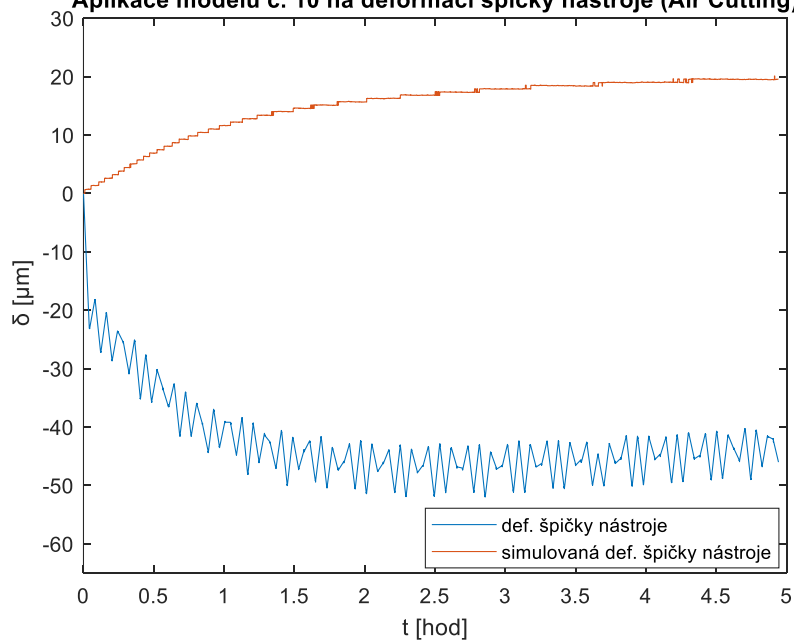


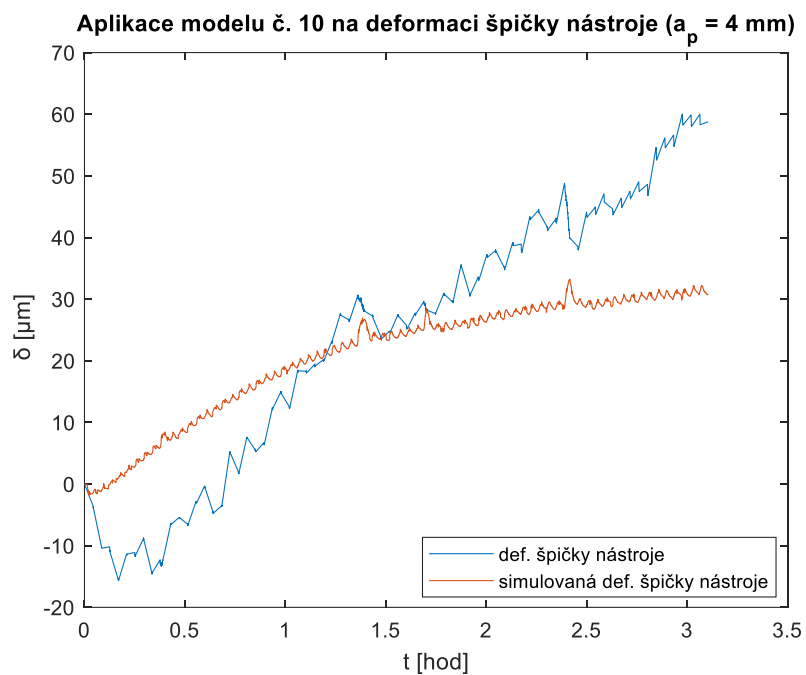


Aplikace modelu č. 10 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 2,5 \text{ mm}$ )

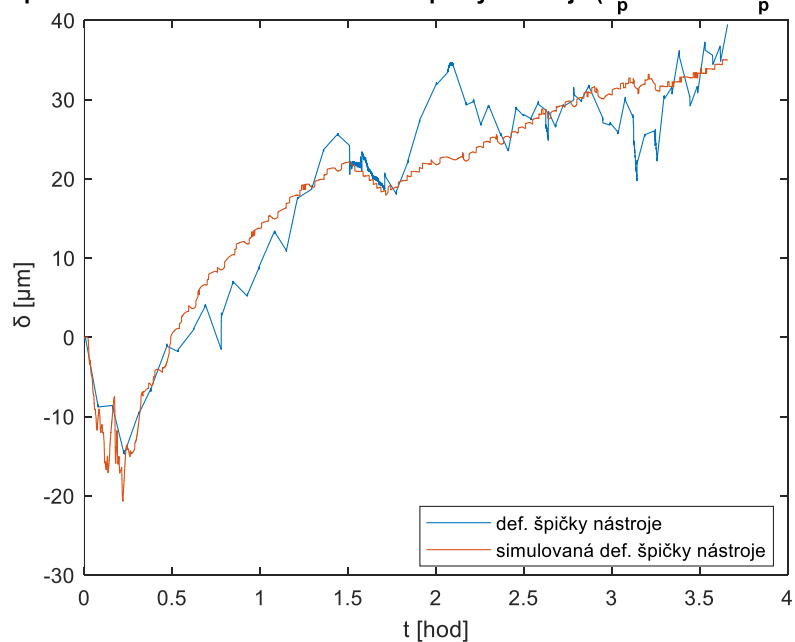


Aplikace modelu č. 10 na deformaci špičky nástroje (Air Cutting)





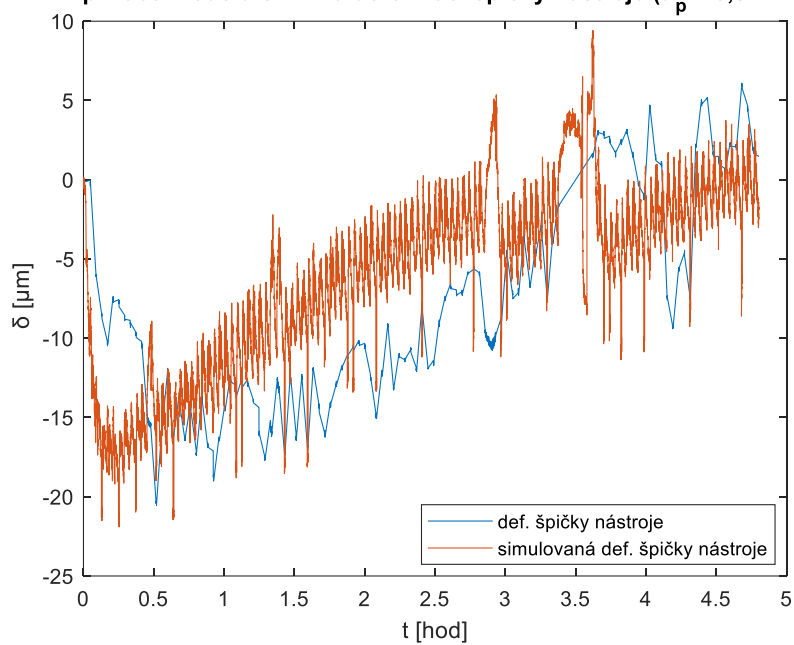
**Aplikace modelu č. 10 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 4$  mm a  $a_p = 5$  mm)**



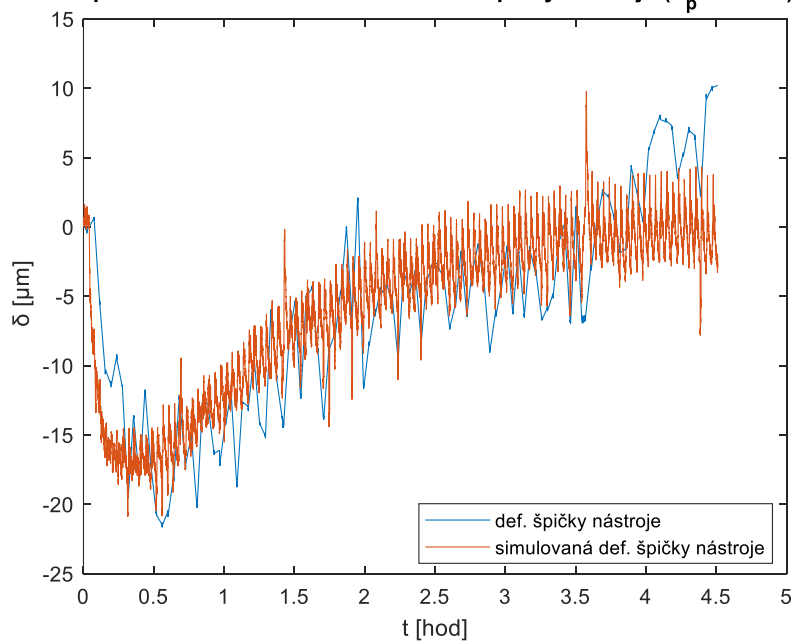


### Model č. 11

Aplikace modelu č. 11 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 0,5 \text{ mm}$ )

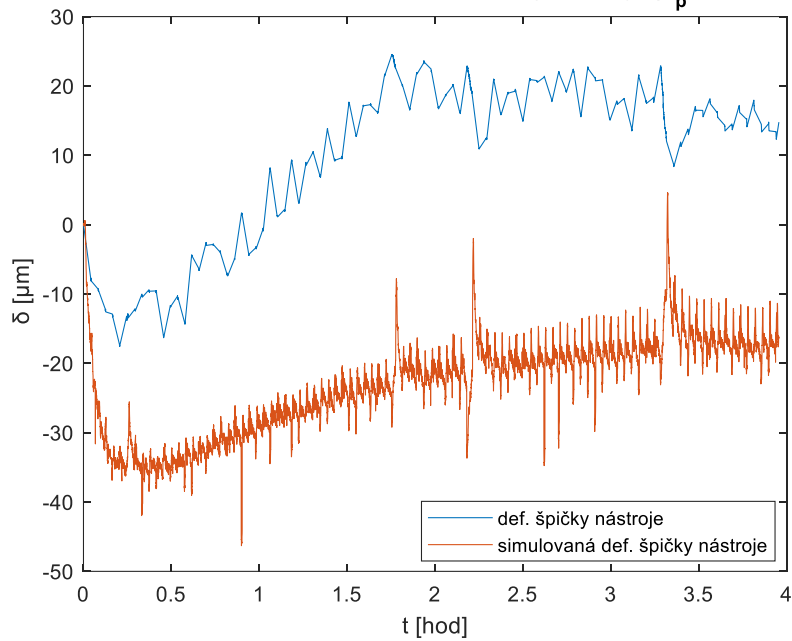


Aplikace modelu č. 11 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 1 \text{ mm}$ )

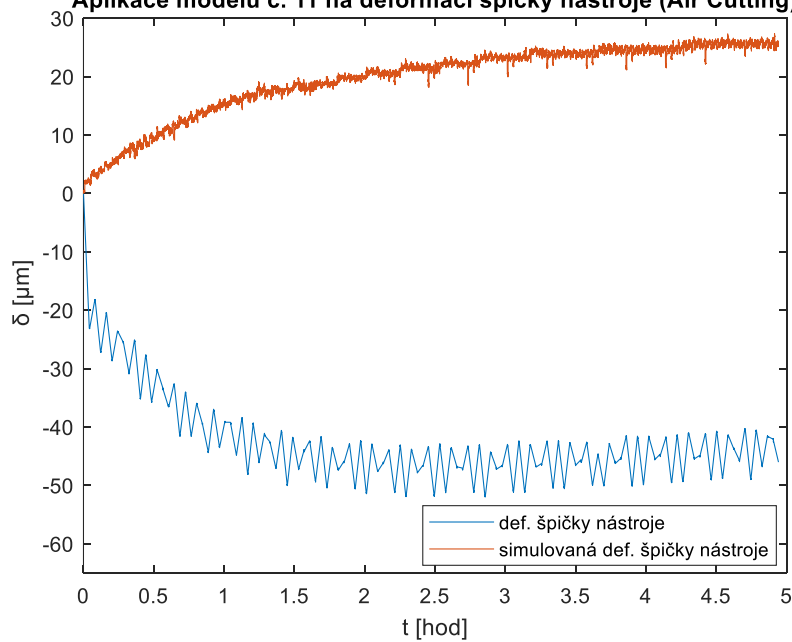




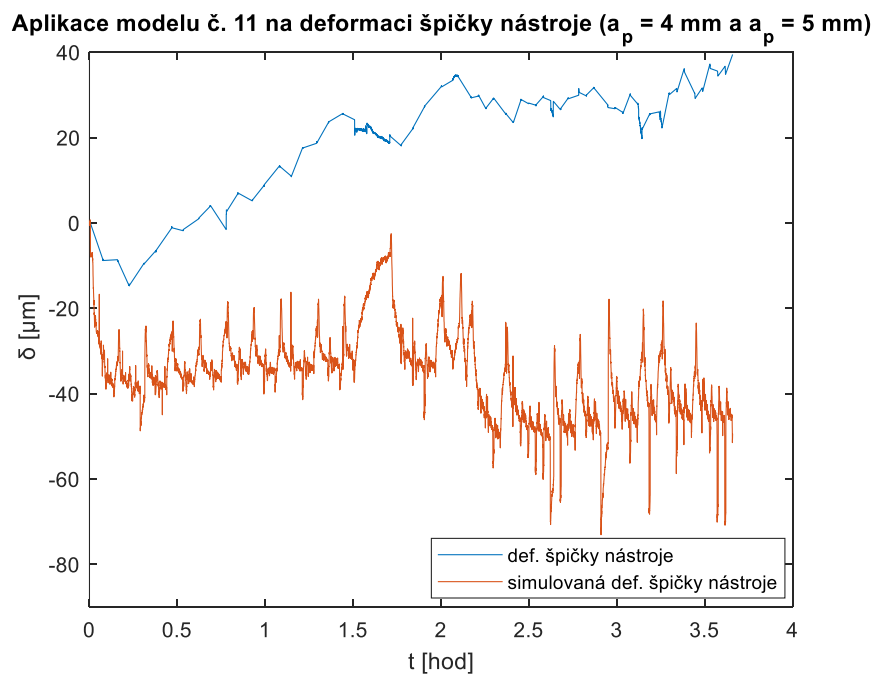
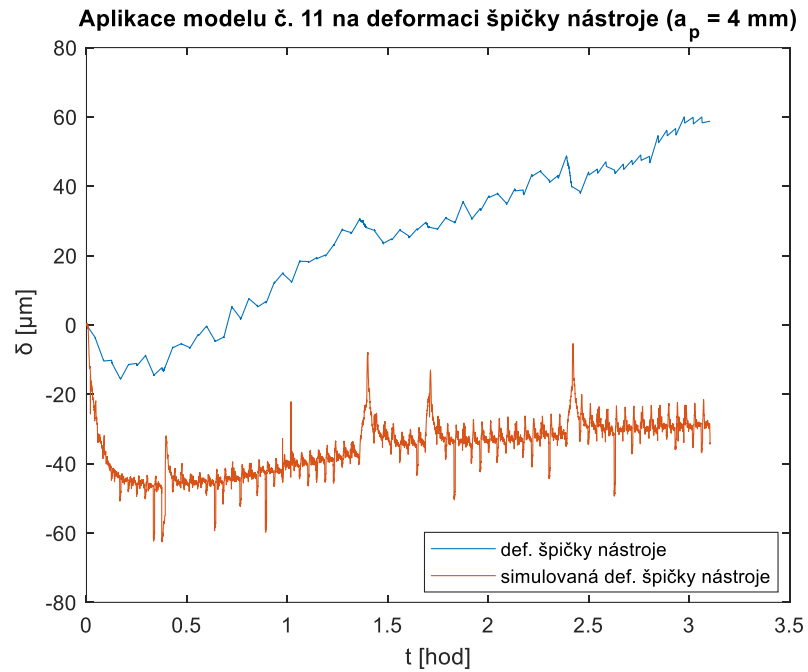
Aplikace modelu č. 11 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 2,5$  mm)



Aplikace modelu č. 11 na deformaci špičky nástroje (Air Cutting)



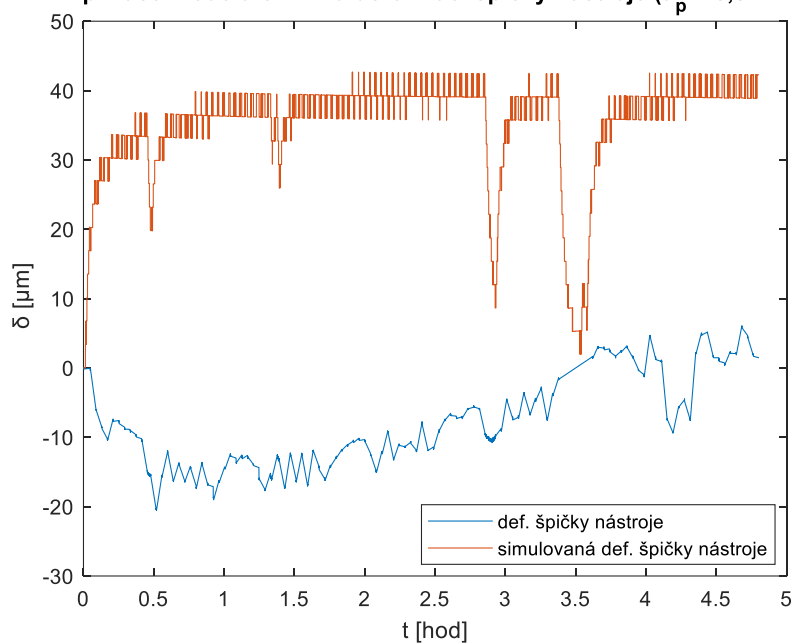




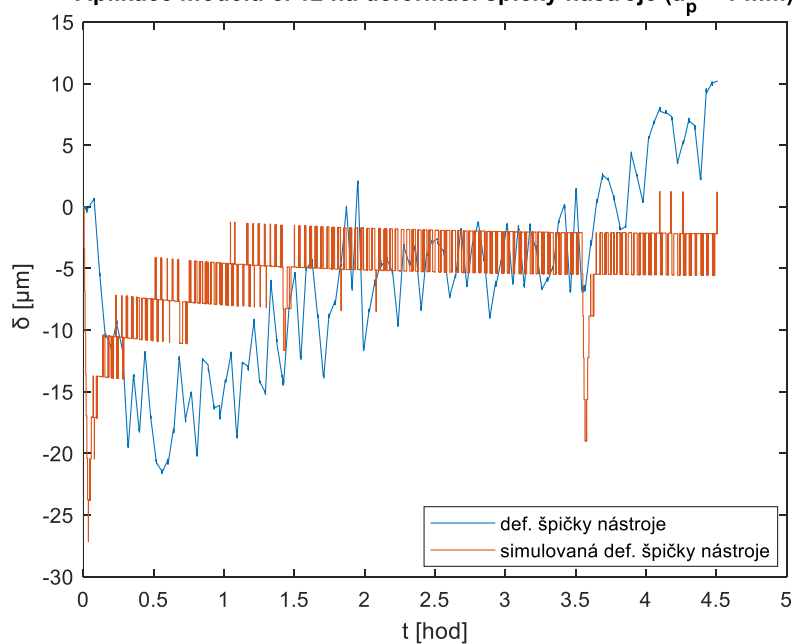


### Model č. 12

Aplikace modelu č. 12 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 0,5$  mm)

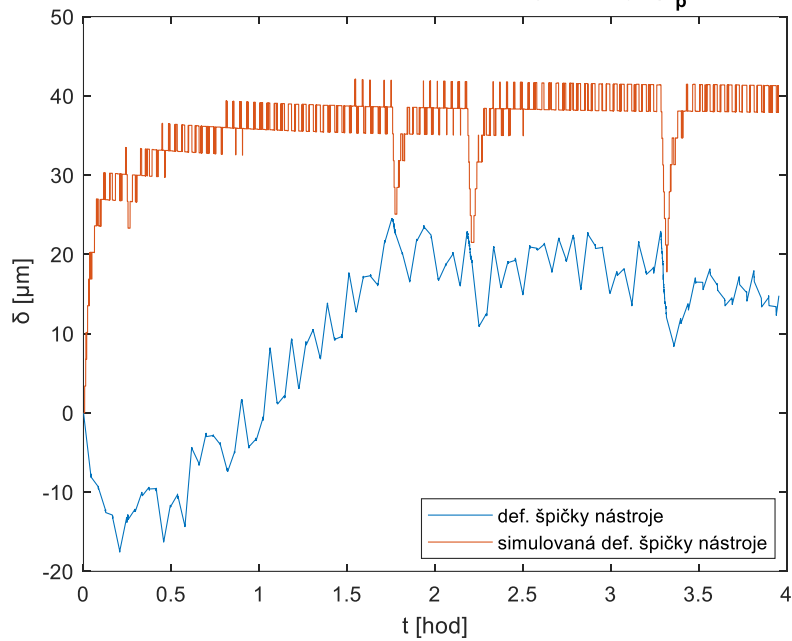


Aplikace modelu č. 12 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 1$  mm)

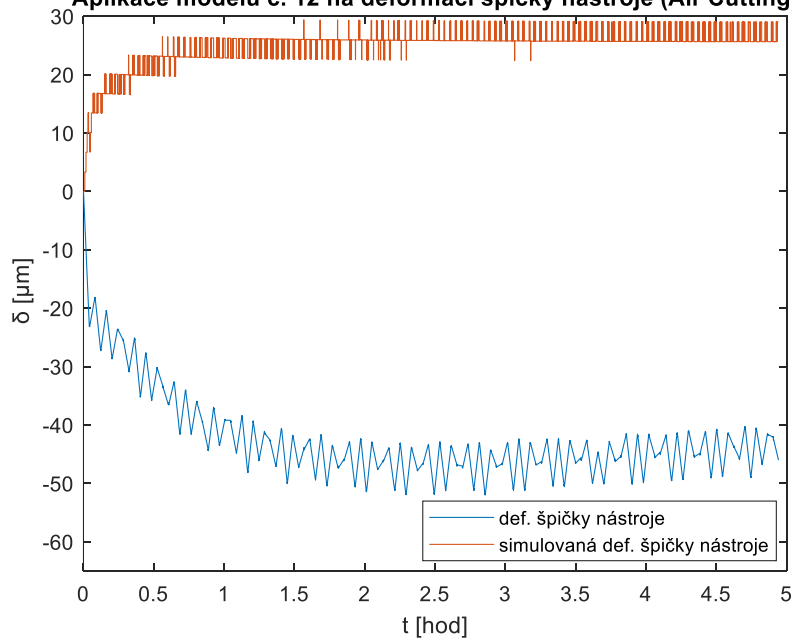




Aplikace modelu č. 12 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 2,5 \text{ mm}$ )

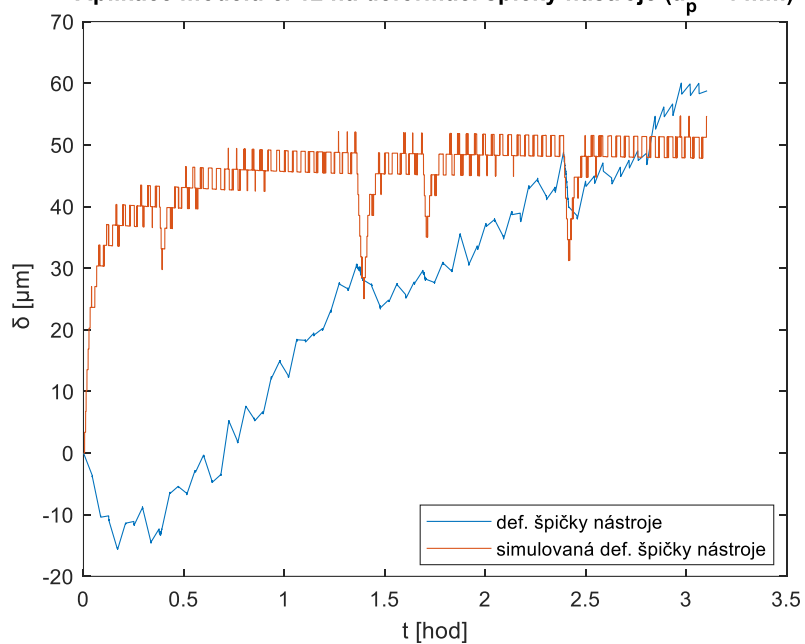


Aplikace modelu č. 12 na deformaci špičky nástroje (Air Cutting)





Aplikace modelu č. 12 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 4 \text{ mm}$ )



Aplikace modelu č. 12 na deformaci špičky nástroje ( $a_p = 4 \text{ mm}$  a  $a_p = 5 \text{ mm}$ )

