

ANALYSIS AND COMPENSATION THERMAL ERRORS OF MACHINE TOOLS

J. Soldát*

Summary: *This paper deals with problem solving of the thermal errors of machine tools by using of the indirect compensation methods. A detailed analysis of machine tool thermal behaviour is necessary for successful thermal errors compensation. The compensation algorithms of thermo-elastic deformations use linear or polynomial equations. The main objective is on-line parameter determination of the compensation equations directly on machine tool. Criteria of evaluation and causes of the compensation models failure are also briefly mentioned. Methods of the compensation relation determination are verified for machine tools. By means of application of the compensation algorithms, inaccuracy of parts machining caused by thermal errors will be reduced by more than 2/3.*

1. Úvod

Neustále narůstají požadavky na opakovanou a trvalou přesnost výroby obrobků na obráběcích strojích. Jednou z příčin výrobních odchylek jsou termoelastické deformace obráběcích strojů. Účinné snížení těchto deformací vůči obrobku je možno provést jak ve fázi návrhu koncepce stroje, tak na hotovém stroji. Ve fázi návrhu se jedná především o vhodné rozmístění tepelných zdrojů a výběr komponentů stroje s vyšší účinností a nízkým ztrátovým tepelným výkonem. Na hotovém stroji lze docílit snížení termoelastických deformací aplikací spolehlivého kompenzačního postupu, který je prováděn za podpory řídicího systému stroje.

2. Analýza termoelastických deformací MKP

Ve fázi návrhu obráběcího stroje se jedná o podrobnou analýzu přenosových mechanismů a zdrojů tepelné energie v rámci nosné soustavy stroje včetně vlivů technologického procesu a okolí stroje tzn. prostředí ve kterém stroj pracuje.

Ve výpočtovém modelu tepelného chování obráběcího stroje metodou konečných prvků (MKP) je nutno respektovat všechny významné zdroje tepelné energie nacházející se v jeho nosném systému. Mezi hlavní zdroje tepelné energie patří především pohony včetně, pohony pracovních os, ložiska, převody, vedení a vlastní technologický proces obrábění včetně chlazení nástroje.

* Ing. Jaroslav Soldát: KOVOSVIT MAS a.s.; Nám. T. Bati 419; CZ - 391 02 Sezimovo Ústí; tel. +420. 381 742 427, fax. +420. 381 744 420; e-mail: soldat@kovosvit.cz

Termoelastické deformace jsou determinovány fyzikálními vlastnostmi použitých materiálů a geometrickými rozměry nosného systému obráběcího stroje. Teplotní součinitel délkové roztažnosti α_l [K^{-1}] je jednou z nejdůležitější fyzikální vlastností, která určuje termoelastické prodloužení těles. Teplotní součinitel délkové roztažnosti dále ovlivňuje i teplotní ohybovou deformaci těles, která vzniká při nerovnoměrném rozdělení teploty. Termoelastická simulace nosného systému obráběcího stroje MKP probíhá zpravidla v několika zde uvedených krocích:

1. Zpracování technických podkladů pro výpočet nosné konstrukce obráběcího stroje. Technické podklady jsou tvořeny údaji o geometrických rozměrech a tvarech hlavních částí konstrukce, o rozmístění zdrojů tepelné energie a jejich výkonu, o kvalitě povrchů a povrchových úpravách součástí konstrukce, o způsobu spojení součástí, o krytování, o případném možném kontaktu nosné konstrukce s třískami a chladícími médii a o okolních vlivech prostředí nebo technologií.

2. Vytvoření nebo převzetí 3D geometrického modelu konstrukce stroje dle druhu výpočtu MKP.

3. Definování fyzikálních vlastností materiálů použitých k výrobě jednotlivých dílů analyzované konstrukce. Vedle údajů potřebných pro běžnou statickou analýzu jako je modul pružnosti v tahu a smyku, Poissonovo číslo, měrná hmotnost je nutno pro termoelastickou simulaci doplnit další údaje o konstrukčních materiálech a to teplotní součinitel délkové roztažnosti, měrnou tepelnou kapacitu při konstantním tlaku, součinitel tepelné vodivosti a základní vztažnou teplotu konstrukce.

4. Vytvoření tepelných zatěžujících stavů konstrukce, které v sobě zahrnují informace o zdrojích tepla či chladu v konstrukci. Zadávány jsou údaje o poloze, energetické vydatnosti zdroje a mechanismech přenosu tepla. Údaje, o zdrojích tepla, mohou být stacionární nebo nestacionární. Konstrukce může být zatížena např. i časovým průběhem teploty, který byl naměřen v určitém režimu komponentu, který je součástí stroje.

5. Na tělesech vstupujících do simulačního výpočtu se vytvoří síť prvků, které mají určené vlastnosti.

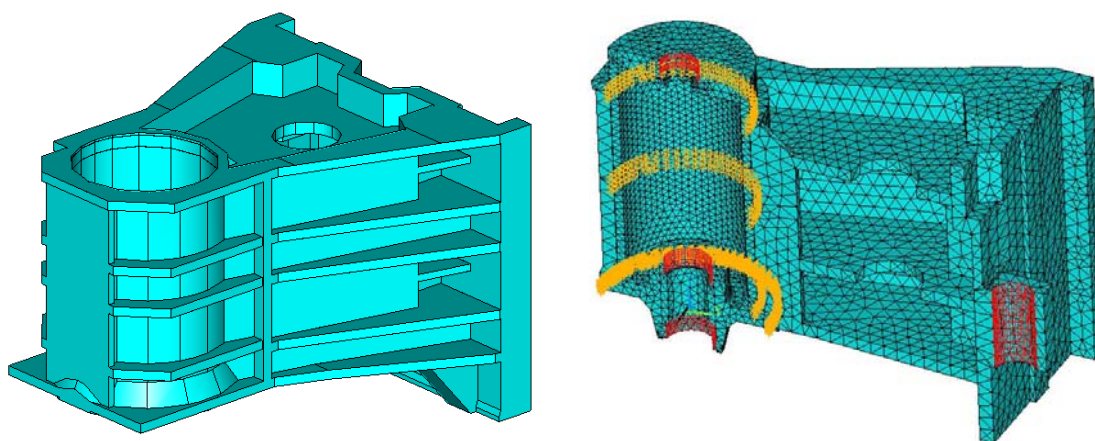
6. Proveďte se výpočet rozložení nebo průběhu teplot v konstrukci vlivem jejího tepelného zatížení resp. časově závislého tepelného zatížení. Vypočtené teplotní pole nebo průběh teplot je následně uplatněno jako zatěžující stav při statickém výpočtu deformačního chování konstrukce MKP. Výsledkem takto provedeného výpočtu MKP jsou termoelastické deformace řešené konstrukce obráběcího stroje, které vznikají během působení zadaného tepelného zatížení.

K výhodám počítačových simulací MKP patří skutečnost, že nám umožňuje provést analýzu celé řady různých uspořádání konstrukcí bez nutnosti stavby reálného stroje nebo zařízení. K nesporným výhodám metody rovněž patří možnost opakovaného provedení simulací mezních zkoušek bez poškození reálného obráběcího stroje.

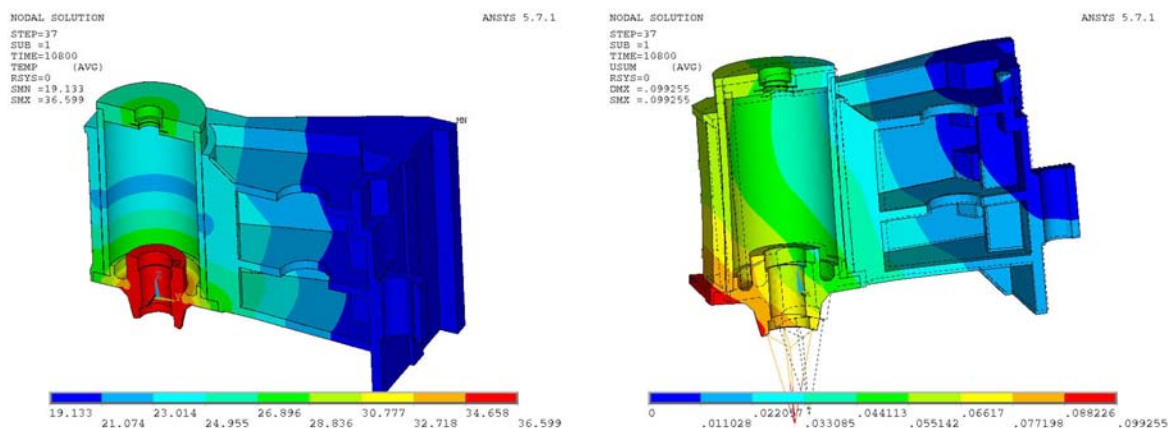
Při výpočtu termoelasticity je vhodné vytvořit nový výpočtový model nebo zpracovat do existujícího výpočtového modelu, pro výpočet statického a dynamického chování stroje, tělesa nebo nové okrajové podmínky, které nemají při statické a dynamické analýze velký význam, ale v případě řešení teplotních polí jsou důležitá. Jedná se především o kryty, které zabraňují přestupu tepla mezi tělesy nosné struktury obráběcího stroje navzájem a mezi tělesy konstrukce stroje a okolním prostředím. Kryty zabraňují přenosu tepla prouděním a působí jako izolační prvek v konstrukci stroje a to především v případech kdy dojde k zabránění

proudění vzduchu jeho uzavřením v určitém prostoru. Je vhodné se také zabývat a ve výpočtovém modelu nosného systému stroje respektovat i vlivy povrchových úprav. Jedná se především o kytování odlitků a vnější nátěry těles. Tyto vlivy je možno řešit vytvořením skořepinových prvků na povrchu těles a přiřazením těmto prvkům specifických fyzikálních vlastností, které odpovídají uvažovaným vlivům.

Na obr.1 a 2 je příklad nestacionárního výpočtu termoelastických deformací vřeteníku obráběcího centra MKP, který řeší vliv různých tepelných zdrojů (ložiska, matice kuličkového šroubu) a teplotních okrajových podmínek, které respektují vliv hlavního vřetene stroje.



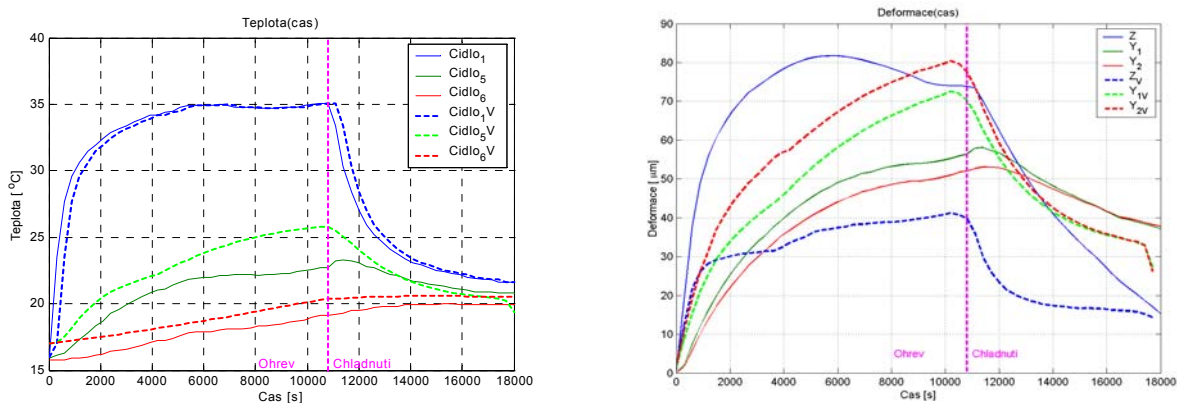
Obr.1 Geometrický 3D model a výpočtový model MKP včetně okrajových podmínek



Obr.2 Teplotní pole a termoelastické deformace vřeteníku v čase 10800s

Vypočtené hodnoty tepelných polí a termoelastických deformací je vždy vhodné prověřit experimentálním změřením na reálném obráběcím stroji. Na obr.3 je dokumentována shoda vypočtených a naměřených hodnot teplot, pro trojici čidel teploty označených 1, 5 a 6 a hodnot deformací ve směru Y a Z. Čidlo teploty 1 je umístěno na objímce vřetene a čidla 5 a 6 se nachází na spodní ploše vřeteníku. Velmi dobrá shoda mezi vypočtenou a naměřenou hodnotou teploty je v případě čidla 1, ale i v případě čidel 5 a 6 je shoda dobrá. V obou případech čidel 5 i 6 jsou hodnoty vypočtené teploty vyšší. Srovnání je provedeno i pro

průběh hodnot deformací. Srovnávány jsou hodnoty deformací naměřené na měřícím trnu ve směru osy Y dva průběhy a ve směru osy Z jeden průběh s hodnotami vypočtenými pro samostatný vřeteník. Vypočtené hodnoty posunutí a natočení jsou vyšší než hodnoty naměřené na reálném stroji. Snížení skutečných hodnot je způsobeno především tepelným ohybem stojanu stroje. Značný rozdíl mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami deformace ve směru osy Z, který převyšuje i 50% dává jednoznačnou odpověď na otázku jaký je podíl vřeteníku na celkovou deformaci ve směru osy Z. Dalších cca. 50% termoelastické deformace v ose Z se dělí mezi stojan a vřetení obráběcího stroje. Tento fakt byl potvrzen i termoelastickým výpočtem celého stroje.



Obr.3. Shoda experimentálně naměřených teplot a deformací s výpočtem MKP

3. Stanovení kompenzace termoelastických deformací

Při řešení termoelastických deformací na hotovém stroji se uplatňuje buď aktivní nebo pasivní resp. přímá nebo nepřímá kompenzační metoda (Tab.1). Při aplikaci nepřímé kompenzační metody, která vede k odstranění resp. snížení vlivu termoelastických deformací v místě nástroje, využíváme měření veličin přímo nebo nepřímo souvisejících s procesy vzniku deformací. Nejčastěji jsou to teploty, deformace části konstrukce, příkon motorů, otáčky vřeten nebo motorů, kuličkových šroubů nebo matic a poloha nebo rychlost pohyblivých částí nosné soustavy stroje. Základním úkolem je nalezení určité, trvalé a spolehlivé závislosti mezi měřitelnou veličinou a termoelastickým přetvořením nosné konstrukce stroje. Zpracování kompenzace termoelastických deformací pro každou pohybovou osu je tvořeno následujícími kroky:

- snímáním deformací v místě nástroje a hodnot veličin, ze kterých bude zpracovávána hodnota požadovaného kompenzačního posunutí v příslušné pohybové ose pro vzorový pracovní režim stroje,
- zpracování kompenzačního modelu tj. závislosti mezi snímanými veličinami a deformací v místě břitu nástroje,
- zapracování kompenzační strategie do PLC programu obráběcího stroje a zadání relevantních parametrů kompenzačních rovnic,

- při aktivaci kompenzačního modelu v řídicím systému obráběcího stroje nejdříve probíhá ověření správnosti snímaných veličin, které jsou obsaženy v kompenzační rovnici a kontrola jejich korektního rozsahu,
- výpočet nutného pohybu v pohybové ose k odstranění rozdílu mezi skutečnou a žádanou polohou břitu nástroje z příslušné kompenzační rovnice, tento výpočet probíhá neustále v řídicím systému obráběcího stroje při zapnuté kompenzaci,
- odjetí, vypočtené hodnoty termoelastického posunutí, které je vypočteno z kompenzační rovnice, příslušnou pohybovou osou stroje.

V procesu hledání kompenzačního modelu musíme vyřešit následující úkol a to:

- stanovit si cílový stav přesnosti náhrady deformací a tomuto podřídít, jak výběr matematického modelu tzn. funkce co nejlépe popisující termoelastické procesy probíhající v obráběcím stroji při jeho provozu v závislosti na vstupních veličinách, tak počet vstupních údajů resp. počet míst ve kterých se měří teploty a zjišťují další vstupní veličiny používané v kompenzačních rovnicích.

Tento výběrový proces lze provádět v interakci s počítačem ve kterém si můžeme jednotlivé průběhy naměřených tepelných deformací a teplot vykreslit, porovnat a provést množství korelačních výpočtů, které nám napomohou vybrat signifikantní vstupní údaje pro tvorbu kompenzační závislosti. Hlavní pozornost je zaměřena na aplikace pasivní nepřímé kompenzace.

Tab.1 Rozdělení nepřímých kompenzačních modelů z hlediska použité matematické závislosti a řešení

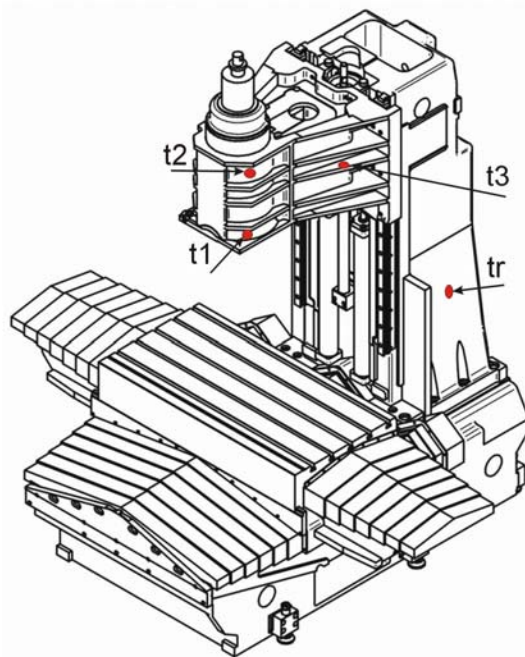
Nepřímé kompenzační modely	
Lineární	Nelineární
- vztah mezi hodnotou tepelné deformace a vstupními údaji je lineární	- vztah mezi hodnotou tepelné deformace a vstupními údaji je nelineární
- konstantní koeficienty rovnic	- koeficienty rovnic mohou být i funkcemi
- pro určení koeficientů lze použít metody pro řešení přeuročené soustavy lineárních rovnic: $\mathbf{X}=(\mathbf{A}^T*\mathbf{A})^{-1}*\mathbf{A}^T*\mathbf{B}$	- pro určení koeficientů lze použít metodu nejmenších čtverců

Metoda stanovení kompenzační závislosti je demonstrována pro obráběcí centrum na kterém je provedena optimalizace počtu a polohy měřících míst na základě termoelastické analýzy MKP (Soldát, 2001; Soldát, 2002; Soldát, 2003a).

Výsledné lineární kompenzační modely pro osu Y a Z jsou vytvořeny ze snímaných hodnot teploty ve třech snímačích na vřeteníku a čtvrtý snímač teploty stojanu slouží jako referenční viz obr.4. Do těchto míst jsou namontována stabilní snímací čidla teploty. Lineární kompenzační rovnice pro osu Y a Z mají následující podobu:

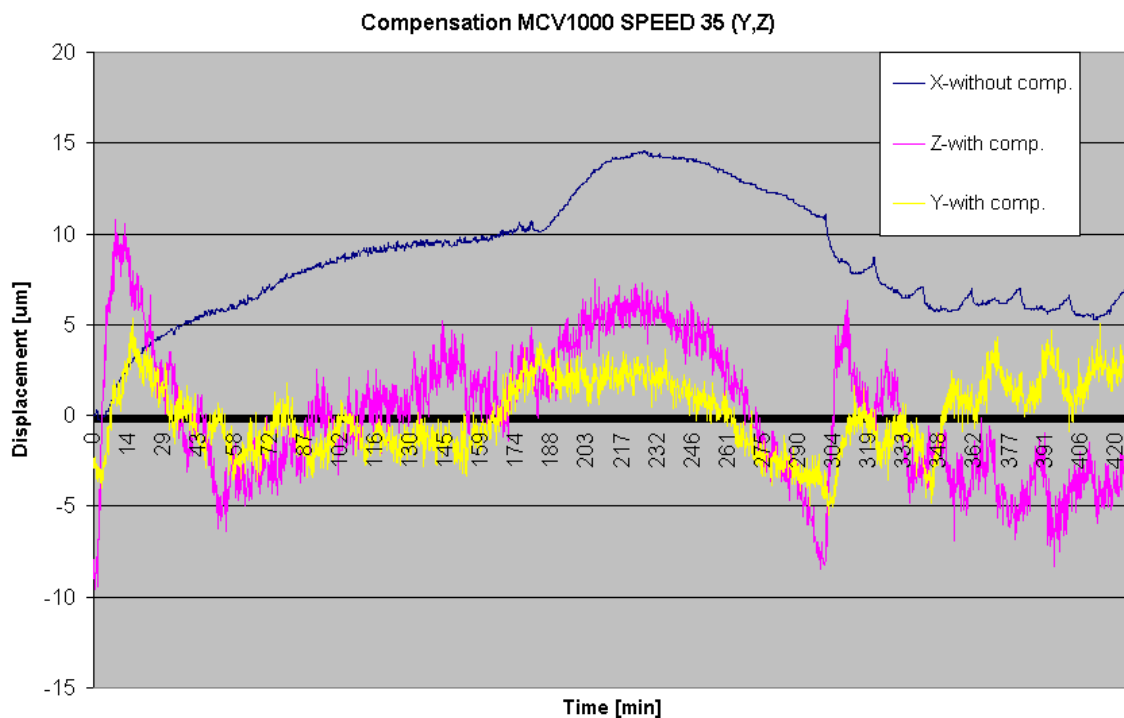
$$Y=-0.4378*(t1-tr)+1.2762*(t2-tr)+23.3865*(t3-tr)$$

$$Z=-4.281*(t1-tr)+10.437*(t2-tr)+12.3149*(t3-tr)$$



Obr.4. Rozmístnění snímacích čidel teploty v nosném systému stroje MCV 1000 SPEED

Po provedení měření v testovacím režimu stroje z chladného stavu byly naměřeny výsledné hodnoty termoelastických deformací, které jsou uvedeny na obr.5. Nepřesnost v prvních minutách měření je dána okolností, že tepelné zdroje již nosný systém stroje ovlivňují, ale teplota se v místech zabudovaných snímačů ještě nemění. Výsledná přesnost polohy na kontrolním trnu ve vzdálenosti 180mm od čela vřeten činí v ose Y $\pm 5 \mu\text{m}$ oproti $57 \mu\text{m}$ a v ose Z $\pm 10 \mu\text{m}$ oproti $82 \mu\text{m}$. Osa X obráběcího centra MCV 1000 SPEED není kompenzována neboť úchytky dosahují maximálně $15 \mu\text{m}$.



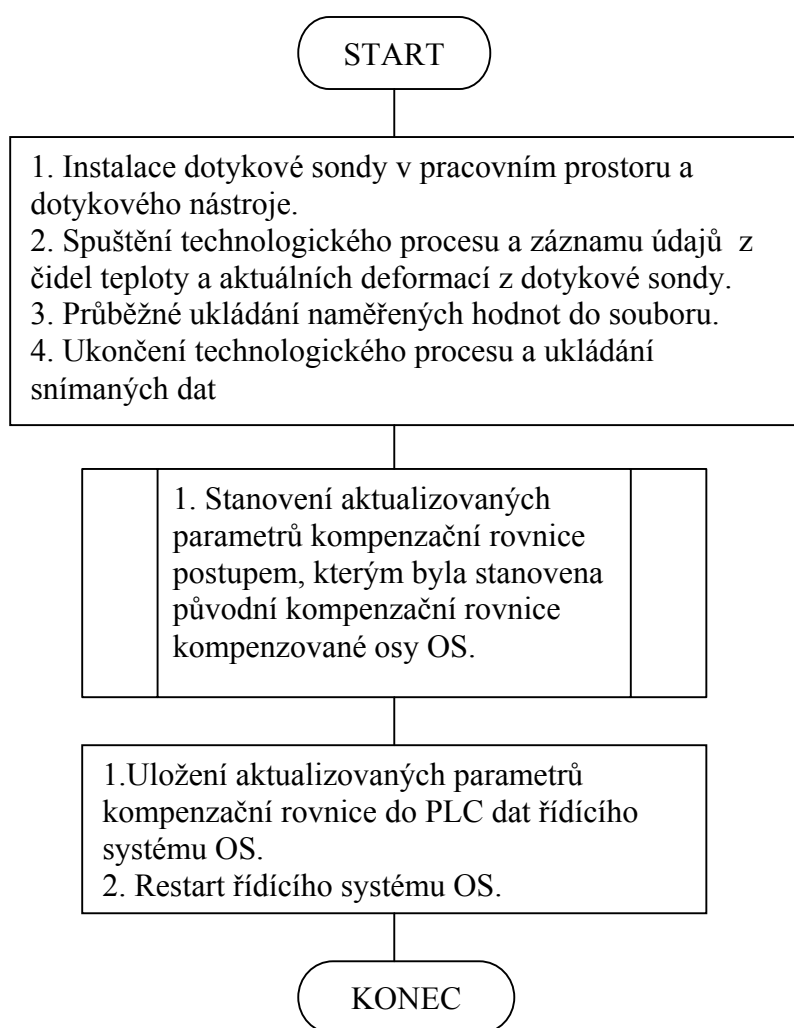
Obr.5 Výsledné hodnoty tepelných deformací s aktivovanou kompenzací v ose Y a Z

4. On-line stanovení parametrů kompenzačních rovnic

Zpřesnění parametrů kompenzačních rovnic je provedeno jejich on-line stanovením pro příslušný provozní režim stroje (Soldát, 2003b).

Během provozu obráběcího stroje se může vyskytovat značný počet různorodých technologických požadavků při výrobě součástí a provozních režimů během kterých univerzální kompenzační algoritmus tepelných deformací neplní zcela svoji funkci a v některých výjimečných případech může i pracovní výsledky obráběcího stroje zhoršovat.

On-line stanovením parametrů kompenzačních rovnic se nazývá proces, který lze spustit na obráběcí stroji během obrábění nebo během simulace v provozním technologickém režimu. Proces zaznamenává okamžité hodnoty teplot a deformací a tyto ukládá, se zadanou periodou, do tabulky resp. do souboru na pevný disk řídicího systému obráběcího stroje. Z těchto uložených dat se stanoví zpřesněné parametry kompenzačního algoritmu. Naměřená data tvořící tabulku dat, jenž se ukládá v ASCII kódu do souboru, který je možno využít i při dalším zpracování těchto údajů mimo obráběcí stroj. Během procesu snímání údajů může být stávající kompenzace pracovní osy aktivována i deaktivována. Postup stanovení on-line parametrů kompenzační rovnice je zpracován do vývojového diagramu na obr. 6.



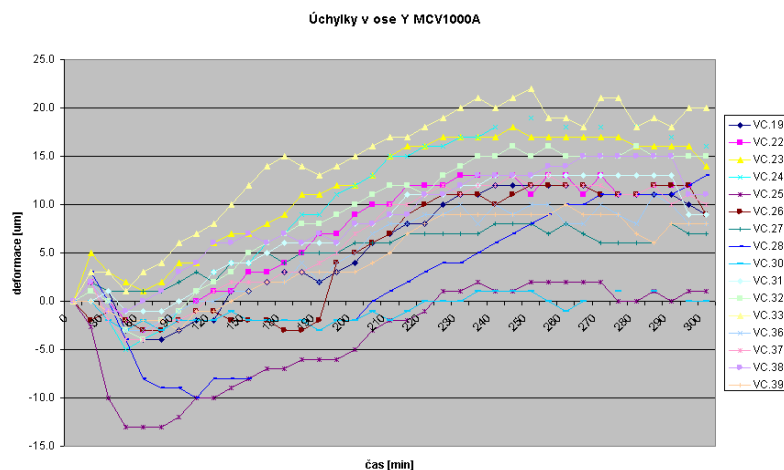
Obr.6 Postup pro on-line stanovení parametrů kompenzační rovnice

Nutnou podmínkou pro aplikaci metody on-line stanovení parametrů kompenzačních rovnic je existence určitého funkčního kompenzačního algoritmu na obráběcím stroji. Při on-line stanovování parametrů se využívá stávající kompenzační model a dochází pouze ke zpracování vstupních údajů z měřicích čidel a výpočtu nových aktualizovaných parametrů tohoto kompenzačního modelu.

Technickou podmínkou je prostor, pro umístění dotykové sondy v blízkosti obrobku, v pracovním prostoru obráběcího stroje.

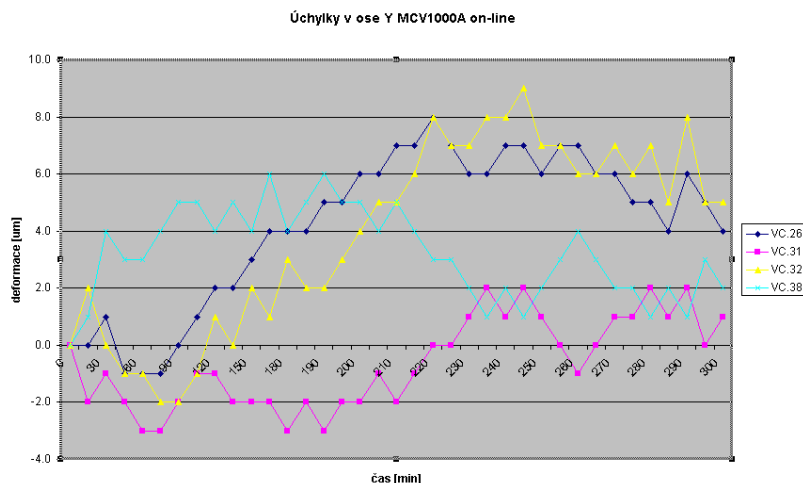
Stanovení parametrů kompenzačních rovnic se provede přímo v počítači, který je součástí řídicího systému stroje, po ukončení měření tepelných deformací a snímání vstupních údajů teploty. Vypočtené parametry kompenzačních rovnic se přepíší do PLC programu a následný výpočet kompenzačních posunutí již probíhá z těchto zpřesněných vztahů.

Naměřená data během testovacího režimu pro osu Y při zapnuté kompenzaci pro různá výrobní čísla strojů jsou uvedena na obr.7.



Obr. 7 Kompenzace osy Y na strojích MCV 1000 SPEED

Po individuálním on-line stanovení parametrů kompenzační rovnice osy Y došlo v případech uvedených výrobních čísel strojů ke zpřesnění činnosti kompenzace na hodnoty uvedené v obr. 8.



Obr. 8 Kompenzace osy Y na strojích MCV 1000 SPEED po aplikaci on-line metody

5. Závěr

Konstrukční úpravy z hlediska snižování tepelných deformací nelze efektivně provádět na existujících obráběcích strojích. Úpravy, které lze na těchto strojích většinou provést, řeší uvedenou problematiku jen do určité míry a jsou zpravidla velmi nákladné. Účinné konstrukční úpravy z hlediska tepelných deformací často vyžadují i zásadní změny v konstrukci nebo i v koncepci stroje. Z tohoto vyplývá, že na problematiku tepelných deformací je nutno pamatovat již od počátku návrhu koncepce nového obráběcího stroje, včetně nových kinematik. Stroj je nutno projektovat nejen pod vlivem požadavků na statickou a dynamickou tuhost, ale též s ohledem na tepelné zdroje a pochody, které budou v obráběcím stroji probíhat a okolní vlivy, kterým bude vystaven a pro tuto oblast zdokonalovat i výpočetní postupy pro simulaci a analýzu termoelastického chování stroje.

I při sebelepší výpočtové simulaci chování obráběcího stroje prostřednictvím metod virtuálního prototypování se vždy najde prostor na realizaci a na zlepšení přesnosti obrábění dílců pomocí kompenzačních metod, které je možno aplikovat až na hotovém reálném stroji. V tomto článku byl podán určitý návod pro tvorbu a užití nepřímé kompenzační metody včetně nového přístupu k on-line stanovení parametrů kompenzačních rovnic. Aplikací kompenzačních algoritmů se trvale podařilo snížit hodnoty nepřesností vyrobených dílců, které byly vyvolané tepelnými deformacemi, o více jak 2/3.

6. Literatura

SOLDÁT, J. (2001) Kompenzace tepelných deformací na obráběcím stroji. In: *Inženýrská mechanika - národní konference s mezinárodní účastí. Svratka 14-17.5. 2001.* AV ČR, Ústav termomechaniky, Praha. s.243-244. ISBN 80-85918-64-1. CD-ROM.

SOLDÁT, J. (2002) Kompenzace tepelných deformací obráběcího centra. In: *Inženýrská mechanika - národní konference s mezinárodní účastí. Svratka 13-16.5. 2002.* Akademie věd ČR, Ústav termomechaniky, Praha, s. 6. ISBN 80-214-2109-6. pouze na CD-ROM.

SOLDÁT, J. (2003a) Compensation thermal errors of machine tools. In: *Applied mechanics 2003 – Conference, Jaworzynka 24-27.3.2003.* Wydawnictwo Katedry Mechaniki Stosowanej, Gliwice, s.195-200. ISBN 83-917224-3-0.

SOLDÁT, J. (2003b) On-line stanovení parametrů rovnic pro kompenzaci tepelných deformací obráběcích strojů. In: *Konference PhD studentů konstrukčních oborů PhD2003. Srní 10-12.11. 2003.* Západočeská univerzita v Plzni, s.50, ISBN 80-7043-246-2. CD-ROM