Kompenzace teplotních úhlových deformací pinoly pomocí řízených vnitřních zdrojů tepla

Ing. Martin Mareš

Vedoucí práce: Prof. Ing. Jiří Nožička, CSc.

Abstrakt

Teplotní chyby vzniklé působením vnějších a vnitřních zdrojů tepla na strukturu obráběcího stroje mohou zapříčinit více než 50% jeho celkové nepřesnosti. Požadavek na přesnost obráběcích strojů v poslední době neustále roste, a proto výzkum v oblasti teplotního chování konstrukce obráběcích strojů je nutností pro úspěšnou výrobu. Tento článek přináší nový přístup k teplotnímu modelování, které využívá teplotní přenosové funkce ke kompenzaci délkových a úhlových deformací na špičce nástroje prostřednictvím identifikace a řízení dodatečných vnitřních zdrojů tepla. Dalším cílem je i pokrytí jiných nelinearit, vyskytujících se obecně v teplotním chování. Přístup je demonstrován na uzavřené pinole, která je jednoduchou symetrickou částí obráběcího stroje. K modelování, identifikaci a řízení je využito toolboxů Matlabu a Matlab Simulink.

Klíčová slova

Obráběcí stroj, pinola, úhlová teplotní deformace, teplotní přenosová funkce, kompenzace.

1. Úvod

Požadavky na přesnost obrábění v posledních letech výrazně vzrostly, a proto výzkum v oblasti teplotního chování struktury obráběcích strojů (OS) je nezbytností k dosažení úspěšné výroby.

Generované teplo se šíří z komponent do struktury OS. Konstrukce OS teplotně dilatuje a deformuje se. Tato deformace následně ovlivňuje přesnost obrábění negativním způsobem. Celý proces je způsoben různými zdroji tepla, které jsou obecně rozděleny do dvou skupin [1]:

- **Vnitřní zdroje tepla** motory, pohony pohybových os, kuličkové šrouby a jejich matice, ložiska, převodovky atd.
- Vnější zdroje tepla vliv okolního prostředí.

Existují různé přístupy ke kompenzaci takto vzniklých teplotních chyb:

- **Přímá kompenzace** měření mezi nástrojem a obrobkem.
- Nepřímá kompenzace používá matematický model.

Přenosové funkce (PF) popisují spojení mezi výstupem (odezvou) a vstupem (buzením) dynamického systému ve frekvenční oblasti [2]. Použité teplotní PF (TPF) vyjadřují spojení mezi zdrojem tepla a deformací v jednom bodě zapříčiněné teplotní expanzí.

Modelování termomechanických systémů s využitím TPF [3] je rychlé a dosahuje srovnatelné kvality modelů v porovnání s ostatními metodami jako např. MKP [4], umělé nervové sítě (artificial neural networks) [2], [5], teplotní modální analýza [1] atd. Proto je

toto modelování vhodné pro aplikace v reálném čase. Navíc tento kompenzační přístup nevyžaduje žádné modifikace ve struktuře OS a minimum přídavných měřících zařízení.

Modelování pomocí TPF přímých deformačních odezev na teplotní chování pinoly (jednoduchý, symetrický prvek OS) a jeho ověření bylo provedeno v [6]. Modelování a kompenzace úhlových deformací na špičce nástroje od teplotních zdrojů (vyskytujících se mimo osy symetrie pinoly) jsou hlavním předmětem článku.

Model teplotního chování postihuje různé nelinearity vyskytující se u termomechanických systémů a využívá vlastnosti PF:

- Postižení úhlových deformací. •
- Uvažování rozdílu křivek teplot a deformací ve fázi ohřevu a chladnutí. •
- Ověření platnosti superpozice PF. •
- Autokompenzace přímých deformací použitím kompenzační topné manžety (heateru).

x 10

Na obr. 1 je zaznamenáno kalibrační měření deformací na špičce nástroje reálného OS a vyjádření úhlové deformace v ose x je na obr. 2. Tyto obrázky demonstrují výskyt úhlových deformací na OS a potřebu je kompenzovat pro výrazné zpřesnění výroby.







Obr. 2. Úhlové deformace osy x reálného OS.

2. Popis experimentu

Experiment byl proveden na prázdné uzavřené pinole. Jako výkonových vstupů (Q), které byly hlavní příčinou tepelných deformací, bylo použito topných manžet. Cílem experimentu bylo změřit teplotně deformační odezvy (obr. 3) na zdroje tepla a následně vystavět TPF model (tzn. model založený na termomechanických přenosových funkcích), který by byl v dobrém souladu, jak s teplotními deformacemi na špičce nástroje pinoly do jednotlivých směrů, tak s jejich úhlovými složkami.

Na obr. 4 je znázorněna sestava experimentu. Na pinolu byly nalepeny dvě topné manžety. Jedna jako kauzální zdroj tepla Q_k (mající na svědomí úhlové deformace osy x) a druhá jako zdroj stabilizační Q_s (kompenzující vzniklé úhlové deformace).



Obr. 3. Měřené deformace na TCP.

V průběhu všech měření byly deformace (osy x a z) získávány kontaktními kapacitními senzory *Mesing*. Přičemž z důvodu předpokladu výskytu úhlových deformací, podél osy x byly měřeny dvě deformace (X1 a X2 viz uspořádání čidel na obr. 3) ve vzdálenosti 100 mm od sebe. Výkon topných manžet byl nastavován ručním transformátorem napětí. Experiment lze rozdělit do následujících částí [7]:

- Kalibrační měření buzení a odezev.
- Identifikace potřebných TPF.
- Sestavení termomechanického modelu pinoly.
- Implementace modelu.

Přehled uskutečněných měření k zajištění a ověření kompenzačního modelu (jeho základní myšlenka je vyobrazena na obr. 5):

- Kalibrační měření kauzální topné manžety (90 W).
- Kalibrační měření stabilizační manžety (90 W).
- Kompenzační měření spektra výkonů kauzální topné manžety (60, 90, 40 W).



horní pohled

Obr. 4. Schéma pinoly.



Obr. 5. Schéma základního kompenzačního modelu.

Teplotní PF jsou pojmenované shodně s jejich fyzikálními interpretacemi [3]. Zde byly použity pouze *deformační přenosové funkce* (*DPF*) Δ a *inverzní deformační přenosová funkce* (*IDPF*) Δ^{-1} k popsání celého teplotního chování (plyne z výhody známých zdrojů tepla, což nemusí být obecně zaručeno). Významy jednotlivý DPF jsou uvedeny v tab. 1.

Kompenzační model (obr. 5) nevystačí pouze s postižením hlavního zájmu (úhlové deformace osy x), ale bude nutné pokrýt i zbytkové deformace do směru x a hlavně deformace do směru osy z, které budou superpozicí složek od obou topných manžet.

Z kalibračních měření obdržené TPF namodelují kompenzační výkon, na který se nastaví stabilizační topná manžeta. Výstupem bude porovnání úhlových deformací osy x s měřením bez použití stabilizační topné manžety (porovnání s hodnotami z kalibračních měření). Základní předpoklad modelu je následující:

$$\varphi_{kauzálni} = \varphi_{kompenzačni} \tag{1}$$

Vliv teploty okolí (TO) [1], [7] je v tomto případě zanedbán z hlediska přehlednosti a potřeby pouze ověřit funkčnost navrženého řešení. Vliv TO bude předmětem dalších aplikací. Rozdíl mezi křivkami ohřevu a chladnutí [8], jejichž rozdíl u symetrické a geometricky jednoduché pinoly nemusí být natolik výrazný, bylo nutno postihnout pouze u deformací ve

směru osy *x* (DPF3 a DPF4 na obr. 5). Následující schéma znázorňuje, o které prvky se rozšíří základní kompenzační model pro pokrytí rozdílů mezi fázemi ohřevu (DPF_a na obr. 6) a chladnutí (DPF_b), a jeho realizace pomocí přepnutí mezi těmito aproximačními popisy.



Obr. 6. Rozšiřující schéma základního kompenzačního modelu.

Tabulka 1. – Přehled identifikovaných PF pro model kompenzace úhlových deformací pinoly.

Zkratka	Popis	Označení
DPF ₁	PF pro odhad úhlové deformace osy x od kauzálního zdroje tepla.	$\Delta_{\mathrm{K}\Phi\mathrm{x}}$
IDPF ₂	inverzní PF pro odhad úhlové deformace osy <i>x</i> od stabilizačního zdroje tepla získaná <i>inverzním přístupem</i> .	$\Delta_{S\Phi x}^{-1}$
DPF _{3a}	PF pro odhad deformace při ohřevu na TCP ve směru osy <i>x</i> od kauzálního zdroje tepla.	$\Delta_{K\delta x}{}^{oh}$
DPF _{3b}	PF pro odhad deformace při chladnutí na TCP ve směru osy <i>x</i> od kauzálního zdroje tepla.	${\Delta_{K\delta x}}^{ch}$
DPF _{4a}	PF pro odhad deformace při ohřevu na TCP ve směru osy <i>x</i> od stabilizačního zdroje tepla.	$\Delta_{S\delta x}{}^{oh}$
DPF _{4b}	PF pro odhad deformace při chladnutí na TCP ve směru osy <i>x</i> od stabilizačního zdroje tepla.	${\Delta_{S\delta x}}^{ch}$
DPF ₅	PF pro odhad deformace na TCP ve směru osy z od kauzálního zdroje tepla.	$\Delta_{K\delta z}$
DPF ₆	PF pro odhad deformace na TCP ve směru osy z od stabilizačního zdroje tepla.	$\Delta_{S\delta z}$

3. Kalibrace

Kalibrační měření zaručují potřebné informace k sestavení modelu termomechanického systému, který využívá osm DPF (jednu ve své inverzní podobě). Buzení nastavené na kauzální, kompenzační nebo obou topných manžetách je znázorněno na obr. 7. Provedená a potřebná kalibrační měření:

- Kalibrační měření kauzální topné manžety (90 W).
- Kalibrační měření stabilizační manžety (90 W).



Obr. 7. Kalibrační výkonové buzení.

3.1 Kalibrační měření kauzální topné manžety

Kalibrační měření kauzální topné manžety o výkonu 90 W a jeho následné zpracování (naměřené hodnoty přímých a úhlových deformací jsou zobrazeny na obr. 8 a obr. 9) umožní nalézt následující PF:

- DPF₁ pro odhad úhlové deformace osy *x* od kauzálního zdroje tepla.
- DPF_{3a,b} pro odhad deformace na TCP ve směru osy x od kauzálního zdroje tepla.
- DPF₅ pro odhad deformace na TCP ve směru osy z od kauzálního zdroje tepla.



3.2 Kalibrační měření stabilizační topné manžety

Kalibrační měření stabilizační topné manžety o výkonu 90 W a jeho následné zpracování (naměřené hodnoty přímých a úhlových deformací jsou zobrazeny na obr. 10 a obr. 11) umožní nalézt následující PF:

- IDPF₂ pro odhad úhlové deformace osy *x* od stabilizačního zdroje tepla.
- DPF_{4a,b} pro odhad deformace na TCP ve směru osy x od stabilizačního zdroje tepla.
- DPF₆ pro odhad deformace na TCP ve směru osy z od stabilizačního zdroje tepla.



Obr. 10. Deformace podél os x a z. Stabilizační topná manžeta 90 W.



Obr. 11. Úhlové deformace osy x. Stabilizační topná manžeta 90 W.

4. Identifikace

Pomocí výsledků kalibračního měření a nástrojů Matlabu (*System Identification Toolbox*) [9] byly identifikovány PF (obecná rovnice v časové oblasti (2)) potřebné k sestavení termomechanického modelu pinoly. Aproximační kvalita každé z uvedených PF je procentuálně ohodnocena číslem FIT (3) a její stabilita testována jednotkovým skokem budící veličiny. Navíc k rozdělení na identifikaci PF do fází ohřevu a chladnutí (deformace ve směru osy *x*) byla provedena identifikace IDPF₂ i *inverzním přístupem* [6]. Přehled všech identifikovaných PF je uveden v tab. 1.

$$\Delta = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{K_1 + K_2 s + K_3 s^2 + K_4 s^3}{T_1 + T_2 s + T_3 s^2 + T_4 s^3}$$
(2)

$$FIT = \left(1 - \frac{\left\|Y - \hat{Y}\right\|}{\left\|Y - \bar{Y}\right\|}\right). 100$$
(3)

Následující graf zobrazuje naměřený vstup (z kalibračního měření) a simulovaný výstup jedné identifikované PF. Grafy na obr. 12 a obr. 13 demonstrují identifikaci **DPF**₁ a ověření stability PF jednotkovým buzením vstupní veličiny.

Vstupem v časové oblasti do *Matlab Identification Toolbox* (dále jen *Ident* [9]) je průběh výkonu dodávané kauzální manžetou (skok 90 W – obr. 7) a odezvou pro návrh PF je průběh úhlové deformace z obr. 9. Hodnota kvality aproximace FIT (3) je zobrazena v legendě obr. 12. Hodnoty konstant pro všechny nalezené PF (2) jsou uvedeny v tab. 2.

Ostatní DPF (viz tab. 1) byly nalezeny podobnými postupy jako v tomto případě. Vstupem do identifikačního procesu je vždy budící veličina, na kterou PF model bude hledat adekvátní kompenzační odezvu. Aproximační kvalita ostatních nalezených DPF vyjádřena hodnotou FIT (3) zaznamenala rozmezí od 90 % do 98 %.



Obr. 12. *Změřené a simulované úhlové deformace osy x od kauzálního zdroje tepla.*



Obr. 13. Odezva DPF₁ na jednotkový skok výkonu.

	čitatel				jmenovatel			
DPF	$\begin{array}{c} K_1 \\ [W.rad^{-1}] \\ [rad.W^{-1}] \\ [m.W^{-1}] \end{array}$	$\begin{array}{c} K_2 \\ [W.s.rad^{-1}] \\ [rad.s.W^{-1}] \\ [m.s.W^{-1}] \end{array}$	$\begin{array}{c} K_{3} \\ [W.s^{2}.rad^{-1}] \\ [rad.s^{2}.W^{-1}] \\ [m.s^{2}.W^{-1}] \end{array}$	$\begin{array}{c} K_4 \\ [W.s^3.rad^{-1}] \\ [rad.s^3.W^{-1}] \\ [m.s^3.W^{-1}] \end{array}$	T ₁ [-]	T ₂ [s]	T_3 [s ²]	T_4 $[s^3]$
$\Delta_{K\Phi x}$	4.8e-8	2.14e-5	3.65e-3	-1.88e-3	5.33e-7	2.42e-3	2	1
$\Delta_{S\Phi x}^{-1}$	-7.88e-8	-2.05e-3	-2.42	1.21	1.86e-8	4.1e-4	0.14	1
$\Delta_{K\delta x}^{oh}$	4.05e-9	1.21e-3	1.2e-3	3e-4	6.9e-6	1.11e-2	5.29	1
$\Delta_{K\delta x}^{ch}$	7.48e-8	3.83e-4	1.95e-4	0	1.46e-7	8.25e-4	1	0
$\Delta_{S\delta x}^{oh}$	-5.22e-7	-3.38e-4	1.65e-4	0	5.03e-7	1.26e-3	1	0
$\Delta_{S\delta x}^{ch}$	-4.78e-7	-3.14e-4	1.86e-4	0	4.69e-7	1.39e-3	1	0
$\Delta_{K\delta z}$	1.27e-6	8.89e-4	-3.17e-7	-2.22e-4	3.17e-6	1.37e-2	7.15	1
$\Delta_{S\delta z}$	2.9e-5	0.109	-7.25e-6	-2.72e-2	4.48e-5	0.355	603.7	1

Tabulka 2. – Parametry nalezených PF.

5. Sestavení termomechanického modelu pinoly a jeho ověření

Termomechanický model pinoly je sestaven v programu *Matlab Simulink*. Víceméně odpovídá schématům na obr. 5 a obr. 6. Termomechanický model je v reálném čase potřeba rozdělit na dvě části.

Model 1 (obr. 14) je predikcí výkonu pro stabilizační topnou manžetu na základě známého výkonu kauzální manžety.

Model 2 (obr. 15) pokrývá deformace do směru os x a z součtem složek od obou manžet (kauzální a stabilizační). Ve směru osy x se



Obr. 14. Model 1 – stanovení stabilizačního výkonu.

projevily rozdíly mezi křivkou ohřevu a chladnutí (odezvy na buzení nejsou v obou případech - ohřev, chladnutí - stejné) a bylo nutné je postihnout. *Model 1* a *model 2* společně tvoří kompletní termomechanický model pinoly, který byl ověřen měřením spektra výkonů na kauzální topné manžetě (60, 90, 40 W).



Obr. 15. Model 2 – kompenzace deformací do směru x a z s respektováním rozdílu mezi křivkami ohřevu a chladnutí.

5.1 Kauzální topná manžeta – spektrum výkonů

Výkon kauzální topné manžety byl postupně nastaven na 60, 90 a 40 W (zhruba po 3 hodinách) - obr. 16. Po aplikaci *modelu 1* (obr. 14) a úpravě (bylo vhodné výkon rozdělit do skokových změn z důvodu manuálního řízení transformátoru) vyšel výkon na stabilizační topné manžetě 28, 38 a 14 W (obr. 17).





Obr. 16. Výkon kauzální topné manžety při spektru výkonů.

Obr. 17. Odhadnutý a upravený výkon stabilizační topné manžety z modelu 1.

Výsledné kompenzace deformací do směru os x a z po aplikaci *modelu* 2 (obr. 15) jsou patrné na obr. 18 (vlevo). Aproximační kvalita je opět vyjádřena hodnotou FIT, která je uvedena v legendě obrázku.

Na obr. 18 (vpravo) je znázorněna úhlová deformace po kompenzaci stabilizační topnou manžetou. Výsledná úhlová deformace v porovnání s hodnotami z kalibračních měření (obr. 9) vykazuje zlepšení až o jeden řád.



Obr. 18. Výsledné deformace a jejich kompenzace při spektru výkonů ve směru os x a z. Přímé deformace (vlevo), úhlové deformace z kalibrace a po kompenzaci (vpravo).

6. Závěr

Prázdná izolovaná pinola je jednoduchý symetrický prvek obráběcího stroje, který je vhodný pro demonstraci a modelování pomocí PF a jejich zobecněné použití na obráběcí stroje jako kompenzační nástroj teplotních deformací [10]. Tento článek v podstatě navazuje na práci [6] a rozšiřuje ji o postižení různých nelinearit vyskytujících se u termomechanických systémů, jako jsou úhlové deformace, postižení rozdílu křivek ohřevu a chladnutí a ověření platnosti principu superpozice PF. Využívá také poznatků k modelování termomechanických systémů v přístupu k identifikování inverzních PF. Vliv teploty okolí byl pro přehlednost zanedbán.

Ze srovnání úhlových deformací kalibračního měření kauzální topné manžety nastavené na 90 W a kompenzačního měření spektra výkonů (obr. 18 vpravo) vyplývá, že

redukce úhlových deformací se pohybuje od 75% do prakticky 100% (v teplotně a deformačně ustálené části měření. Rozptyl je způsoben především nutnou úpravou průběhu kompenzačního výkonu na obr. 17).

U kompenzace úhlových deformací je výrazná i redukce podélných deformací v příslušném směru (v tomto případě směr osy x). Tato redukce činí až 80% a to bez uvažování kompenzace zbytkový deformací pomocí DPF₃ a DPF₄ (resp. jejich superpozice).

Naopak přidáním kompenzačního zdroje se prohlubují deformace v rovině působení těchto zdrojů (osa z). Superpozicí obou složek aproximací deformace ve směru osy z (od kauzální a stabilizační manžety) pokrylo 88% vzniklých deformací (hodnota FIT na obr. 18).

Další důraz ve výzkumu teplotně-mechanického modelování pomocí PF bude kladen na postižení vlivů od teploty okolí, implementaci vlivu změny součinitele přestupu tepla, identifikaci začátku fáze chladnutí (s klesáním teploty vlivem změny výkonu zdroje, či jeho skutečného vypnutí), aplikaci na reálné stroje (pro ilustraci obr. 19) apod.



Obr. 19. Aplikace na reálnou strukturu OS.

Poděkování

Tento výzkum byl podporován grantem MŠMT číslo 1M0507.

Seznam symbolů

Φ_{x}, φ_{x}	úhlová deformace ve směru osy x	[rad]
$arphi_{kauzální}$	úhlová deformace způsobená kauzálním zdrojem tepla	[rad]
$arphi_{kompenzační}$	úhlová deformace způsobená kompenzačním zdrojem tepla	[rad]
$\delta_{x,y,z}$	přímá deformace ve směrech os <i>x</i> , <i>y</i> , <i>z</i>	[µm]
Xl	přímá deformace ve směru osy x měřená blíže k čelu pinoly	[µm]
X2	přímá def. ve směru osy x měřená dále od čela pinoly	[µm]
Ζ	přímá deformace ve směru osy z	[µm]
δ_{xa}	přímá deformace osy x pro fázi ohřevu	[µm]
δ_{xb}	přímá deformace osy x pro fázi chladnutí	[µm]
Q_k	výkon kauzální topné manžety	[W]
Q_s	výkon stabilizační topné manžety	[W]
Δ	označení deformační přenosové funkce	$[rad.W^{-1}], [m.W^{-1}]$

\varDelta^{-1}	označení inverzní deformační přenosové funkce	$[W.rad^{-1}]$
A(s)	buzení dynamického systému v časové oblasti	[W]
B(s)	odezva dynamického systému v časové oblasti	[µm]
K _i , T _i	parametry přenosové funkce	viz tab.2
FIT	kvalita aproximace přenosové funkce	[%]
Y	vektor naměřených hodnot	[rad], [µm]
Ŷ	vektor simulovaných hodnot	[rad], [µm]
\overline{Y}	aritmetický průměr naměřených hodnot	[rad], [µm]

Seznam použité literatury

[1] M. Weck, P. McKeown, R. Bonse, U. Herbst, Reduction and compensation of thermal errors in machine tools. Annals of the CIRP, Vol 44/2/1995, 589 – 598.

[2] Bárta, P., Horejš, O., Hornych J., Vyroubal, J., 2007, Thermal transfer function based control of machine tool cooling system, Proceedings of the Topical Meeting: Thermal Effects in Precision Systems, Maastricht.

[3] Bárta, P., Frekvenční přenosové funkce v termomechanice, disertační práce, ČVUT, Praha, 2008, 83 s.

[4] S. Hao, J. Liu, B. Song, M. Hao, W. Zheng, Z. Tang, Research on the thermal error of the 3D-coordinate measure machine based on the finite element method. ICIRA 2008, Part II, LNAI 5315, 2008, 440 - 448.

[5] S. Yang, J. Yuan, J. Ni, The improvement of thermal error modeling and compensation on machine tools by CMAC neural network, Int. J. Mach. Tool Manufact., Vol. 36, No. 4., 1996, 527 – 537.

[6] M. Mareš, P. Barta, Mechatronic Approach in Modelling, identification and control of thermal deformation of quill. MM Science Journal, 10, 2008, 25 - 29.

[7] Horejš, O., Modelování tepelných procesů v pohonech s kuličkovými šrouby, disertační práce, ČVUT, Praha, 2008, 94 s.

[8] M. Mareš, O. Horejš, P. Kohút, J. Hornych, P. Bárta, Application of mechatronic approach to modeling, identification and control of machine tool thermal errors. Proceedings of the 29th IASTED International Conference: Modeling, Identification and Control (MIC 2010), Innsbruck, Austria, 2010. s. 284-290.

[9] L. Ljung, System identification toolbox 7 User's guide (The Mathworks).

[10] Horejš, O., Mareš, M., Hornych, J., Kohút, P. Modelování teplotních deformací stroje H50 v místě nástroje pomocí tepelných přenosových funkcí. [Výzkumná zpráva]. Praha: Výzkumné centrum pro strojírenskou výrobní techniku a technologii, 2008, V-08-095. 75 s.