



Dynamické síly působící v nestabilním řezu při soustružení

Pavel Bach, Miloš Poláček, Petr Chvojka, Jiří Drobílek, Miroslav Janota.

Fakulta strojní, ČVUT v Praze, Ústav 12135, Výzkumné centrum pro strojírenskou výrobní techniku a technologii, Horská 3, 128 00, Praha 2, Česká republika. E-mail: p.bach@rcmt.cvut.cz

Při soustružení i frézování se často technologové setkávají s chvěním existujícím pouze v době obrábění. Jde o samobuzené kmitání nástroje vůči obrobku. Výsledkem je velmi zvlněný povrch obrobku nepřijatelný jak při hrubování tak při dokončování. Tento druh kmitání se objevuje při všech obráběcích operacích. Při soustružení a frézování je nejčastější. Kmity ohrožují lomem řezné břity a působí nepříjemně na obsluhu silným hlukem. Existuje řada metod potlačení samobuzeného kmitání. Známé jsou frézovací nástroje s nepravidelnou roztečí zubů nebo s proměnlivým stoupáním šroubovice. Používají se i tlumené nástroje. Jmenované prostředky potlačují samobuzené kmitání přímo při obrábění. Při programování pomocí CAM systémů je možné použít předpovědi stabilních, či naopak nestabilních řezných podmínek a zajistit tak bezproblémové obrábění. K tomuto účelu se používá diagram stability, zobrazující mezní šířku třísky (soustružení) nebo axiální hloubku řezu (frézování) v závislosti na otáčkách obrobku nebo nástroje. Diagram se vypočítává na základě měření frekvenčního přenosu mezi nástrojem a obrobkem. Přesnost výpočtu závisí na tvaru matematického modelu dynamické složky řezné síly. Tento příspěvek referuje o experimentech s novým tvarem modelu řezné síly. Na základě analýzy předchozích i současných naměřených dat se ukazuje, že v řezu působí několik vzájemně fázově posunutých sil, které ovlivňují přesnost predikce stabilních řezných podmínek.

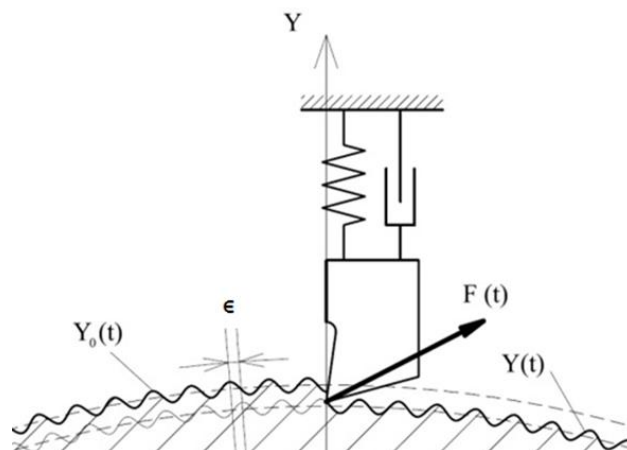
Klíčová slova: Samobuzené chvění, soustružení, řezné síly.

1 Model dynamických kmitavých sil a výchylek při ortogonálním soustružení

V roce 1968 byl ve VÚOSO v Praze iniciován výzkum dynamických koeficientů řezné síly. Práce se prostřednictvím CIRP zúčastnily laboratoře KU v Leuven a RWTH Aachen. Výzkum organizoval Ing. Jiří Tlustý. Ve výzkumné skupině Ing. Poláčka byla vypracována a vyzkoušena metodika zkoušek, která pak byla použita v dalších laboratořích. Metodika i výsledky zkoušek jsou shrnuty ve zprávách VÚOSO [1 až 6]. Použitou modifikaci metodiky popisuje práce [7]. Výsledky RWTH Aachen jsou k dispozici jen zprostředkovaně v publikaci [8]. Jelikož se vyskytly určité odchylky ve výsledcích různých laboratoří, byla měření doplněna při stejných zkouškách dalšími daty naměřenými na univerzitě McMaster pod vedením prof. Tlustého. Zde se navíc pečlivě sledoval vliv tloušťky třísky a vliv opotřebení nástroje na hřbetě. Výsledky jsou dostupné v [9], [10] a v [11]. Všechny výsledky kriticky zhodnotil prof. Tlustý v práci [8].

Pro celý tehdejší výzkum byla přijata teorie polohové vazby a teorie regenerace kmitání, jak byla již dříve formulována v práci [12]. Principiálně tedy byl přijat předpoklad, že v řezu, za obvyklých řezných rychlostí, působí jedna dynamická složka řezné síly, obecně šikmá v rovině dané vektorem řezné rychlosti a normály k soustruženému povrchu (ortogonální soustružení). Velikost této dynamické síly závisí na měrném řezném odporu, šířce třísky (šířce záběru) a na okamžitém rozdílu kmitavé výchylky nástroje a vln zanechaných na obráběném povrchu při předchozí otáčce obrobku. Tento rozdíl je ovlivněn fázovým (neboli časovým) posunem mezi povrchovými vlnami a kmity nástroje. Vektor takto formulované řezné síly můžeme vyjádřit matematicky rovnicí (1) všeobecně tehdy přijatou jako **model dynamické síly pro výpočet meze stability**:

$$F = K \cdot b \cdot (Y_o - Y) = K \cdot b \cdot (Ye^{j\epsilon} - Y) \quad (1)$$



Obr. 1 Schéma fázově posunutých povrchových vln a kmitů nástroje.

Fig. 1 The schema of the phase shifted surface ondulation and tool vibration.

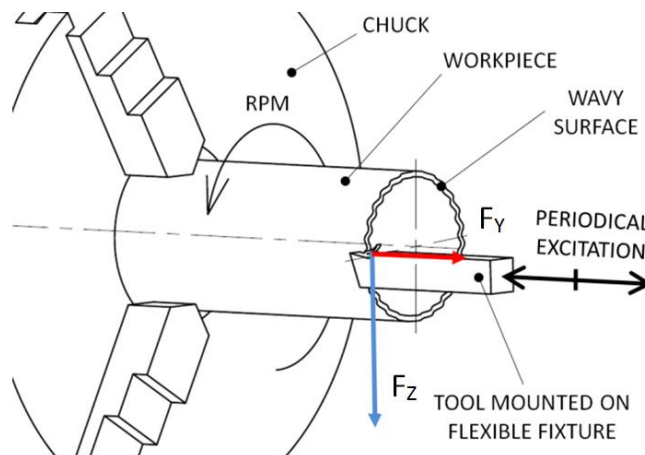
Vlny na obráběném povrchu a kmity nástroje jsou schematicky znázorněny na Obr. 1. Uvažuje se kmitání ve směru naznačené normály k obráběnému povrchu. Z obrázku je zřejmé, že v rovnici (1) písmena Y a Y_o označují periodické funkce $Y(t)$ a $Y_o(t)$ vzájemně fázově posunuté o fázi ϵ . Podobně F označuje $F(t)$, tedy dynamickou, periodickou složku řezné síly. Původní Poláčková teorie předpokládala, že **K je reálná hodnota** rovná měrné řezné síle. Model, který představíme v tomto příspěvku, předpokládá komplexní koeficient řezné síly, což vysvětlíme dále.

Šikmou sílu $F(t)$ budeme měřit ve dvou na sebe kolmých složkách F_y a F_z , neboli ve směru normálním k obráběnému povrchu a ve směru tečném, shodném se směrem vektoru řezné rychlosti podle Obr. 2. Tomu odpovídají rovnice pro normální a tečnou složku dynamické řezné síly rozepsané s použitím modelu (1):

$$F_y = K_y \cdot b(Y_o - Y_i) = K_y \cdot b \cdot Y_o - K_y \cdot b \cdot Y_i = F_o^y - F_i^y \quad (2)$$

$$F_z = K_z \cdot b(Y_o - Y_i) = K_z \cdot b \cdot Y_o - K_z \cdot b \cdot Y_i = F_o^z - F_i^z$$

Každá ze sil F_y a F_z sestává ze dvou dalších složek F_i a F_o . Indexy „i“, „o“ značí inner a outer modulaci sil kmity nástroje a povrchovými vlnami (inner jako řez uvnitř materiálu, outer jako řez povrchových vln). Jde o matematickou formulaci sil vzniklých roznásobením výrazu na pravé straně rovnice (1) nebo na levé straně rovnice (2). Síly F_o , F_i nejsou přímo měřitelné. Přímě měřit lze pouze výsledné síly F_y , resp. F_z . Složky F_o , F_i lze však vypočítat metodou navrženou dále.



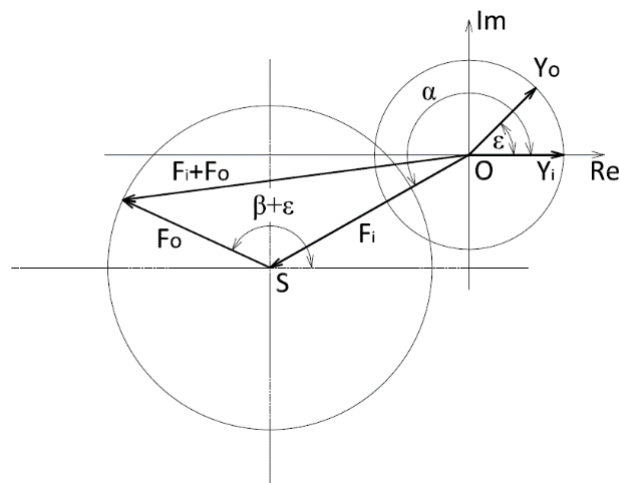
Obr. 2 Složky síly F ve dvou směrech y , z , při ortogonálním soustružení.

Fig. 2 The schema of the workpiece, tool and total force F^y and F^z

Zavedeme-li do (2) komplexní koeficienty K , můžeme síly F_i , F_o napsat ve tvaru:

$$F_i = K_i \cdot e^{j\alpha} \cdot b \cdot Y_i$$

$$F_o = K_o \cdot e^{j\beta} \cdot b \cdot Y_o = K_o \cdot e^{j\beta} \cdot b \cdot Y_i \cdot e^{j\epsilon} = K_o \cdot e^{j(\beta+\epsilon)} \cdot b \cdot Y_i \quad (3)$$



Obr. 1 Vektory F , F_i , F_o v Gaussově rovině společně s vektory vln Y_o a kmity nástroje Y .

Fig. 3 View of the forces F_i , F_o and their summation (F_i+F_o) in the complex plane for a particular phase shift $\beta+\epsilon$ of the force F_o .

V rovnici (3) jsou fáze dynamických koeficientů K_i , K_o označeny α , β . Význam těchto fází i fáze ϵ je lépe vidět na Obr. 3. Jde vlastně o fáze složky F_i a F_o vůči kmitání nástroje. Upozorňujeme, že vektor F_i leží vždy v záporné polorovině, což vyplývá z jeho negativního znaménka v rovnici (1). Lze to též interpretovat jako fázový posun o 180° . Tento „záporný“ vektor se pak počítá s vektorem síly F_o .

Důležité je si uvědomit, že předpokládáme-li dynamické koeficienty K_i , K_o komplexní, zavádíme tím nově fázový posun síly F_i vůči kmitům nástroje a ovlivníme tím i fázi síly F_o vůči těmto kmitům. Výsledkem je fázový posun výsledné řezné síly F_i+F_o vůči kmitání nástroje. Povšimněme si i toho, že složka F_i definuje polohu středu kružnice, kterou vytváří koncový bod vektoru síly F_o při rotaci kolem tohoto středu. Rotace je způsobena změnou fáze mezi vlnami Y_o a kmity Y . Fáze ϵ se totiž může měnit v rozsahu 2π , takže koncový bod vektoru F_o opíše teoreticky úplnou kružnici. Toho je možné využít pro identifikaci těchto sil. Podmínkou je získat identifikační kružnici např. tak, že změříme výslednici F_i+F_o pro několik hodnot ϵ , zaznamenáme polohy koncových bodů vektoru výslednice a metodou nejmenších čtverců proložíme těmito body kružnici, z níž vypočteme F_i , F_o .

Obecně nelze předpokládat, že fáze α , β budou totožné v obou směrech y , z . Proto zavedeme ještě fáze γ , δ a rovnice (3) rozepíšeme do obou směrů y , z . Platí:

$$\begin{aligned} F_i^y &= K_i^y \cdot e^{j\alpha} \cdot b \cdot Y_i \\ F_o^y &= K_o^y \cdot e^{j(\beta+\epsilon)} \cdot b \cdot Y_i \\ F_i^z &= K_i^z \cdot e^{j\gamma} \cdot b \cdot Y_i \\ F_o^z &= K_o^z \cdot e^{j(\delta+\epsilon)} \cdot b \cdot Y_i \end{aligned} \quad (4)$$

V těchto vztazích již figurují celkem dva páry dynamických koeficientů, obecně různé velikosti. Pro normální a tečnou sílu platí pak tyto rovnice:

$$\begin{aligned} F^y &= (K_o^y \cdot e^{j(\beta+\epsilon)} + K_i^y \cdot e^{j\alpha}) \cdot b \cdot Y_i \\ F^z &= (K_o^z \cdot e^{j(\delta+\epsilon)} + K_i^z \cdot e^{j\gamma}) \cdot b \cdot Y_i \end{aligned} \quad (5)$$

V rovnici (5) předpokládáme různé fáze koeficientů řezných sil vůči kmitavé výchylce nástroje Y_i . Důsledkem tohoto předpokladu je, že výsledné síly F_y , F_z budou pro každou hodnotu fáze ϵ vzájemně fázově posunuté. To by znamenalo, že síly F_a , F_b nejsou složkami jedné řezné síly, ale že v nestabilním řezu tyto síly působí samostatně, jinak řečeno, funkční hodnoty těchto sil nenabývají svých amplitud ve stejném časovém okamžiku.

Naskytá se ještě otázka, čím by mohl být způsoben zmíněný fázový posuv? Zřejmě dalšími silami, působícími v nestabilním řezu. Takovými silami mohou být např. často používaná síla procesního tlumení nebo tlumící síla vyvolaná opotřebením hřbetu nástroje. Pokud by se tedy prokázalo fázové posunutí sil F_y , F_z , znamenalo by to, že v nestabilním řezu působí několik sil, obecně různé velikosti, směru a fáze vůči kmitání nástroje. Podle toho tedy formulujeme konečný tvar rovnic nového silového modelu. Modely síly procesního tlumení a tlumící síly od opotřebení budeme zatím předpokládat v obecném, komplexním tvaru. S použitím rovnice (5) dostaneme:

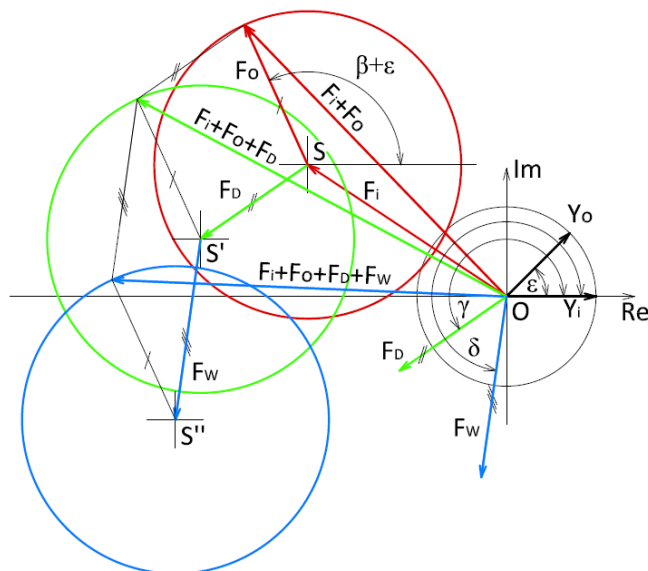
$$\begin{aligned} F^y &= K_i^y \cdot e^{j\alpha} \cdot b \cdot Y_i + K_o^y \cdot e^{j(\beta+\epsilon)} \cdot b \cdot Y_i + K_D^y \cdot e^{jd_y} + K_W^y \cdot e^{jw_y} \\ F^z &= K_i^z \cdot e^{j\gamma} \cdot b \cdot Y + K_o^z \cdot e^{j(\delta+\epsilon)} \cdot b \cdot Y_i + K_D^z \cdot e^{jd_z} + K_W^z \cdot e^{jw_z} \end{aligned} \quad (6)$$

kde d a w označují příslušné fáze tlumících sil F_D (procesní tlumení) a F_W (tlumení opotřebením břitu) vůči kmitům nástroje Y . Tyto rovnice je třeba v současné době chápat jako návrhy možného tvaru dynamických sil působících při nestabilním soustružení na břitu nástroje ve dvou na sebe kolmých směrech. **Rovnice vyjadřují pravděpodobnou skutečnost, že v takovémto řezu působí několik dynamických sil.** Chceme především zdůraznit, že tyto síly mají různé fáze vzájemně i vzhledem ke kmitání nástroje. Výrazy použité pro jednotlivé síly jsou zjednodušeným vyjádřením skutečnosti. Skutečné tvary těchto komplexních funkcí budou zjištěny teprve ze série experimentů pro zvolené rozsahy řezných podmínek. Předpokládáme, že koeficienty budou závislé především na řezné a posuvové rychlosti.

2 Identifikace komplexních dynamických sil

K výpočtu stability je třeba identifikovat jednotlivé síly, neboť každá z nich vyvolá určitou výchylku kmitavého systému stroje. Identifikace je možná jen experimentálně, protože k analytickému výpočtu není dostatek rovnic. K vysvětlení metody identifikace použijeme Obr. 4. Předpokládejme nyní, že platí rovnice (6).

Metoda se zakládá na skutečnosti, že síly typu F_i , F_o lze identifikovat ze změřených grafů, resp. kružnic zobrazených již na Obr. 3. Ten platí za podmínek $F_D=F_W=0$, čili $K_D=K_W=0$. Procesní tlumení lze, jak známo, anulovat zvýšením řezné rychlosti. Sílu F_W anulujeme, nebo alespoň značně omezíme, obráběním s ostrým nástrojem. Za těchto podmínek získáme měřením graf s červenou kružnicí a vektory, ze kterého identifikujeme vektory F_i , F_o . Snížením řezné rychlosti vyvoláme sílu F_D , která způsobí změnu fáze dosavadní výslednice F_i , F_o . Střed identifikační kružnice se posune z bodu S do S' , vektorový rozdíl $S-S'=F_D$. Zavedením opotřebení nástroje získáme podobně kružnici se středem S'' a odpovídající sílu $F_W=S'-S''$. Jsme si vědomi obtíží spojených s touto metodou, avšak v současnosti nevidíme jinou možnost. Předpokládáme identifikaci sil pro určitý rozsah řezných podmínek a materiálů obrobků.



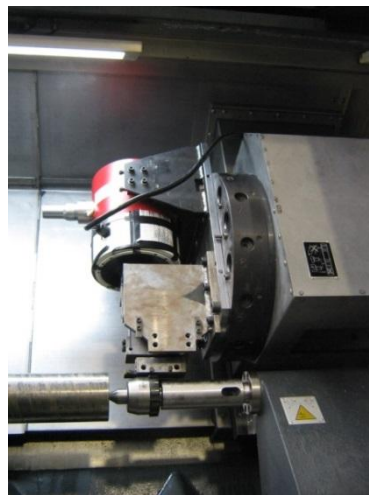
Obr. 4 Metoda identifikace dynamických sil.

Fig. 4 A method of dynamic forces identification.

Graf na Obr. 4 předpokládá konstantní velikost síly F_0 . Ve skutečnosti se při změně řezné rychlosti mění velikost obou vektorů F_i a F_0 , takže identifikační kružnice budou mít různý poloměr. Identifikaci sil shora popsaným postupem to nijak nepřekáží. Pouze je třeba si uvědomit, že k identifikaci všech sil je třeba naměřit data pro všechny tři identifikační kružnice. Znamená to měřit a) při střední/vyšší řezné rychlosti a s ostrým nástrojem, b) při nízké řezné rychlosti a s ostrým nástrojem a c) při nízké rychlosti a s opotřebeným nástrojem.

3 Měření dynamických koeficientů řezných sil

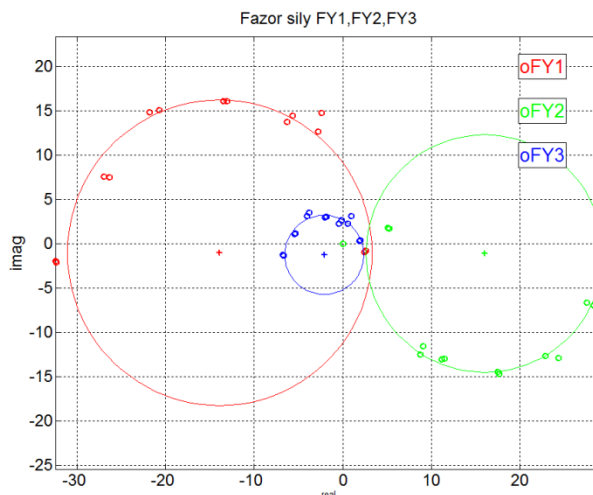
K měření dynamických koeficientů řezných sil je třeba speciální měřicí přípravek viditelný v celkovém pohledu namontovaný na stroji na Obr. 5.



Obr. 5 Měřicí přípravek.

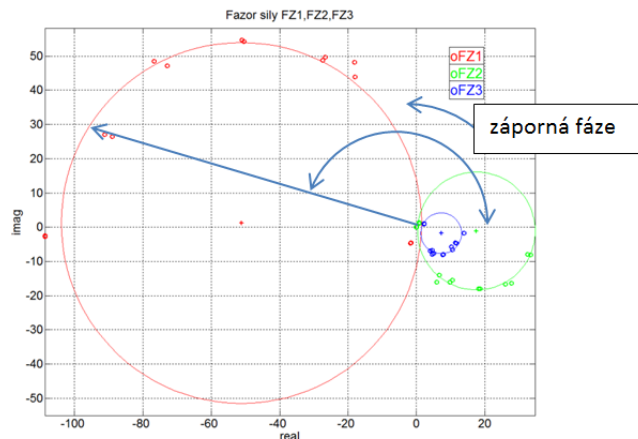
Fig 5 Testing fixture

Přípravek byl konstruován tak, aby zajistil čelní soustružení uměle rozkmitávaným nožem. Při návrhu zařízení jsme předpokládali, že rozkmitávaný nůž bude obrábět tenkostěnnou trubku, vytvářenou dalším nožem. Zkoušky byly provedeny na stroji DMG NEF 600 při použití těchto parametrů: Otáčky: cca 510 1/min ($v_c=72$ m/min), posuv: 0,1 mm/ot, materiál ocel 12 050, typ destičky: TPMR 110304E-46, povlak T9325. Oproti shora uvedené teorii bylo při zkouškách i při vyhodnocení výsledků použito označení normální síly F_Y a tečné síly F_Z . Síly byly měřeny třemi piezoelektrickými dynamometry, takže v grafech jsou vidět tři kružnice F_{Y1} , F_{Y2} , F_{Y3} a obdobně i pro směr Z . Data byla měřena opakovaně za stejných podmínek dvakrát, viz dva body na grafech pro každou frekvenci, **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** 7 a Obr. 8. Jak je vidět z grafů, koncové body vektorů sil F_Y (normální síla) a F_Z (tečná síla) se skutečně pohybují po kružnici. Z časových důvodů nebyly dokončeny celé „identifikační kružnice“, jak je vidět v grafech. Grafy platí pro řeznou rychlost 72 m/min.



Obr. 7 Vyhlazená data sil FY1, FY2, FY3.

Fig. 7 The fitted data of force components FY1, FY2, FY3.



Obr. 8 Vyhlazená data sil FZ1, FZ2, FZ3 a označení fáze F vs. Y.

Fig. 8 The fitted data of force components FZ1, FZ2, FZ3.

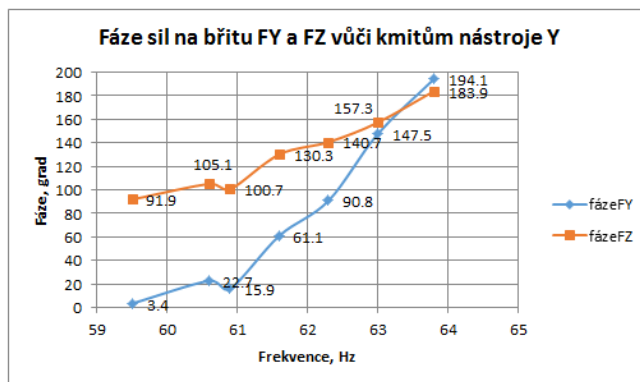
4 Výpočet fáze výsledných sil FY a FZ ze složek sil

Fáze sil FY, FZ byla vypočtena ze všech naměřených sil, resp. z jejich vektorových výslednic za předpokladu, že platí složkové, vektorové rovnice ve směrech Y a Z:

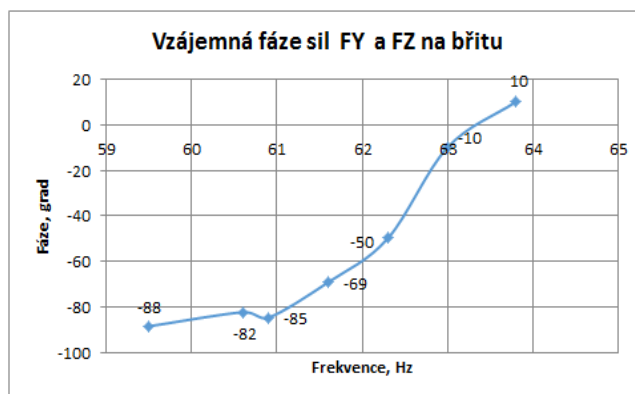
$$FY = FY1 + FY2 + FY3 = \sum_{i=1}^3 \operatorname{Re} FY_i + j \sum_{i=1}^3 \operatorname{Im} FY_i \quad (7)$$

$$FZ = FZ1 + FZ2 + FZ3 = \sum_{i=1}^3 \operatorname{Re} FZ_i + j \sum_{i=1}^3 \operatorname{Im} FZ_i$$

Nejdůležitější jsou pro další výzkum fáze sil FY, FZ a vzájemná fáze těchto sil. Jsou zobrazeny na Obr. 9. Z grafů plyne důležitý závěr: Vzájemná fáze normální a tečné síly existuje. Tento fakt potvrzuje naši hypotézu vzniklou na základě nové analýzy starších dat naměřených při výzkumu dynamických sil v CIRP.



Obr. 9 Fáze sil FY a FZ působících na břitu nástroje vůči kmitům nástroje Y
 Fig 9 Phase of forces FY and FZ acting at the tool tip against tool vibration Y



Obr. 10 Vzájemná fáze sil FY a FZ
 Fig. 10 The mutual phase of the forces FY and FZ

5 Závěr

Analýza dat provedeného měření ukázala, že mezi normální a tečnou řeznou silou existuje, při nestabilním řezu, fázové posunutí. To nás opravňuje k tvrzení, že obě síly jsou nezávislé, čili nejsou složkami jedné, šikmé síly, jak se dosud počítalo. Kromě toho je zřejmé, že jedinou možnou příčinou tohoto fázového posunu jsou další síly, které působí rovněž v nestabilním řezu a ovlivňují fázové poměry mezi silami. Tyto síly nebyly zatím nikdy identifikovány jako fázory, tj. komplexní síly. Jejich identifikaci je třeba provést experimentálně za podmínek napodobujících nestabilní soustružení (při soustružení s vynuceným kmitavým pohybem nože) a při zvoleném rozsahu řezných podmínek. Výsledky dosavadního měření jsou opakovatelné, avšak počet naměřených bodů byl z časových důvodů omezen, takže bude nutné další měření. Pokud i další plánované měření potvrdí, že normální a tečná síla jsou fázově posunutá, znamenalo by to revizi výpočtu stability řezného procesu. Autoři předpokládají, že tato revize přinese přesnější vyjádření meze stability a tudíž i přesnější předpověď stabilních řezných podmínek při soustružení. Rovněž se předpokládá, že bude možné modifikovat uvedené postupy tak, aby se zpřesnil výpočet meze stability pro frézovací operace.

Poděkování

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS13/190/OHK2/3T/12.

Literatura

- [1] POLÁČEK, M., (1968). Zařízení pro měření dynamického koeficientu řezné síly při soustružení, Výzkumná zpráva č. V 2011, VÚOSO v Praze.
- [2] POLÁČEK, M., (1969). Dynamické koeficienty řezné síly pro ocel ČSN 12050). Výzkumná zpráva č. V 2161, VÚOSO v Praze.
- [3] POLÁČEK, M. (1969). Metodika měření dynamického koeficientu řezné síly, Výzkumná zpráva č. V 2142, VÚOSO v Praze.
- [4] POLÁČEK, M. (1970) Dynamické koeficienty řezné síly, Výzkumná zpráva č. V 2316, VÚOSO v Praze.
- [5] POLÁČEK, M. (1971). Dynamický koeficient řezné síly, Výzkumná zpráva č. V 2441, VÚOSO v Praze.

- [6] POLÁČEK, M. (1974). Vliv dynamického koeficientu řezné síly na mez stability, *Výzkumná zpráva č. V 2802*, VÚOSO v Praze.
- [7] PETERS, J., et al. (1972). The Measurement of the Dynamic Cutting Coefficient. *CIRP Annals*, 2, 21.
- [8] TLUSTY, J. (1978). Analysis of the Research in Cutting Dynamics. *Annals of the CIRP*, 2, 27, p. 583-589.
- [9] GOEL, B. S. (1976). Measurement of Dynamic Cutting Force Coefficients. *A Thesis for the Degree of Ph. D.* Hamilton: McMaster University.
- [10] RAO, S. B., (1977). Analysis of Dynamic Cutting Force Coefficient. *A Thesis for the Degree of Ph. D.* Hamilton: McMaster University.
- [11] TLUSTY, J., et al. (1976). The Dynamic Cutting Coefficient for Some Carbon Steels, *Proc. 4th NAMR Conf.*, Battelle's Labs, Columbus.
- [12] POLÁČEK, M. (1955). Výpočet stability rámu obráběcího stroje, *kandidátská disertační práce*, ČVUT v Praze, fakulta strojní.
- [13] TLUSTÝ, J. (1954). Samobuzené kmity v obráběcích strojích, SNTL, Praha.
- [14] BACH, P., POLÁČEK, M., CHVOJKA, P., DROBÍLEK, J. (2013). Comparative Analysis of Lower Speed Chatter Behaviour, *MM Science Journal*, No. 12. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <<http://www.mmscience.eu/201314>>.
- [15] BACH, P., (2012). Vibrace při obrábění, *Machining&Tooling*, 3/12, s. 1-5.
- [16] BACH, P., POLÁČEK, M., CHVOJKA, P., DROBÍLEK, J. (2014). Dynamické síly působící v nestabilním řezu při soustružení, *sborník konference ICTKI, CDROM*, UJEP, FPTM, Ústí n. L., Litoměřice.
- [17] BACH, P., POLÁČEK, M., CHVOJKA, P., DROBÍLEK, J. (2014). Dynamic Forces in Unstable Cutting during Turning Operations, *Manufacturing technology*, Vol. 14, No. 1, UJEP, FPTM, Ústí n. L., s. 3 - 8.

Abstract

Article: **Dynamic Forces Acting in an Unstable Cut in Turning**

Authors: Pavel Bach
Miloš Poláček
Petr Chvojka
Jiří Drobílek
Miroslav Janota

Workplace: CTU in Prague, Faculty of mechanical engineering, Research Centre for Manufacturing Technology.

Keywords: chatter, turning, dynamic forces

To forecast the cutting conditions without self excited vibration in machining, the stability diagram is used, showing the limits of the width of the chip (turning) or the axial depth of cut (milling) depending on the speed of the workpiece or tool. The diagram calculation is based on the measured frequency response function between the tool and the workpiece. The accuracy of the calculation depends on the form of the cutting force model. This paper reports on the experiments with the new model of cutting forces, which should ensure a higher accuracy of the stability prediction.

