

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**TEZE  
DISERTAČNÍ  
PRÁCE**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ A ZAŘÍZENÍ

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

Samobuzené kmitání v obráběcích strojích

Ing. Jiří Drobílek

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Konstrukční a procesní inženýrství

Školitel: Doc. Ing. Pavel Bach, CSc.

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

## Název anglicky: Self-excited vibration in machine tools

Disertační práce byla vypracována v prezenční formě doktorského studia na Ústavu výrobních strojů a zařízení Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Disertant: Ing. Jiří Drobílek

Ústav Výrobních strojů a zařízení, Fakulta strojní ČVUT v Praze  
j.drobilek@rcmt.cvut.cz

Školitel: Doc. Ing. Pavel Bach, CSc.

Ústav výrobních strojů a zařízení, Fakulta strojní ČVUT v Praze  
p.bach@rcmt.cvut.cz

Školitel-specialista: Ing. Miroslav Janota, Ph.D.

Ústav výrobních strojů a zařízení, Fakulta strojní ČVUT v Praze  
m.janota@rcmt.cvut.cz

Oponenti:

Prof. Ing. Jan Skalla, CSc., TU Liberec,

Doc. Ing. Pavel Souček, DrSc., FS ČVUT Praha

Ing. Josef Vaněk, CSc.

Teze byly rozeslány dne: .....

Obhajoba disertace se koná dne ..... v ..... hod.

v zasedací místnosti č. 17 (v přízemí) Fakulty strojní ČVUT v Praze,  
Technická 4, Praha 6

před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Konstrukční a  
procesní inženýrství.

S disertací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojní  
ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6.

Prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.

předseda oborové rady oboru Konstrukční a procesní inženýrství  
Fakulta strojní ČVUT v Praze

## 1. ÚVOD

V závislosti na parametrech mechanické struktury obráběcího stroje a parametrech řezného procesu může během obrábění vzniknout chvění a to i bez zásahu vnější budící síly. Tento jev je známý jako samobuzené kmitání.

V oblasti nestabilního obrábění může dojít k velmi intenzivnímu rozkmitání, kde hrozí nejen nekvalitní obrobek, ale i poškození nástroje nebo dokonce samotného stroje. Přechod mezi stabilním a nestabilním řezem určuje mez stability. Graficky si lze představit mez stability jako čáru, která rozdělí technologické podmínky, jako je řezná rychlost, posuv na otáčku nebo šířka odřezávané vrstvy, na dvě oblasti. Jedna oblast představuje podmínky, kdy bude obrábění vždy stabilní, druhá naopak určuje podmínky pro nestabilní řez. Za prakticky významný parametr určující mez stability se považuje šířka třísky. V praxi se často zobrazuje v závislosti na vybraných technologických parametrech. Toto zobrazení se označuje jako diagram stability obrábění.

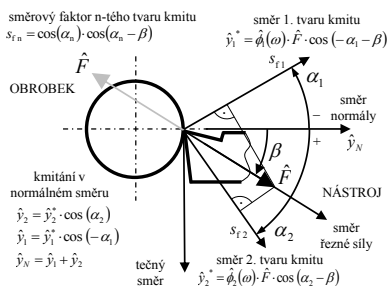
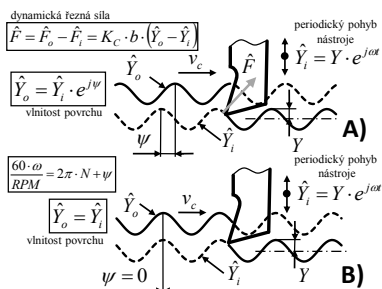
I přes to, že výzkum samobuzeného kmitání probíhá již 60 let, nedaří se pomocí dosavadních znalostí určit mez stability natolik přesně, aby bylo možné výsledky spolehlivě použít pro zvýšení produktivity obrábění jak pro kusovou výrobu velkých dílců, tak i pro velkosériovou autonomní výrobu.

Nepřesnost predikce je v popředí zájmu výzkumu samobuzeného kmitání. Při obrábění se však objevují i další jevy, které dosavadní teorie prozatím nedokáže vysvětlit. Jmenovitě jde např. o výrazný propad meze stability v určitém pásmu řezných rychlostí nebo o vznik nestability při dokončování, kdy je paradoxně tříška velmi malá.

Vznik samobuzeného kmitání závisí nejen na odolnosti kmitavého systému stroj-nástroj-obrobek, ale velmi významně také na závislosti výsledné síly působící mezi nástrojem a obrobkem na kmitání systému a na technologických parametrech obrábění. Jak se v posledních letech ukazuje, pro zpřesnění predikce meze stability obrábění je zapotřebí nalézt vhodnější model dynamické řezné síly než ten, který se pro výpočet v současnosti používá. Pro nalezení správného modelu je však nutné nejprve lépe poznat vlastnosti dynamického řezného procesu, resp. vlastnosti dílčích dynamických sil, protože dosavadní představy o dění v tomto dynamickém jevu nejsou zcela jasné.

## 2. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Do 50. let byl výzkum samobuzeného kmitání zaměřen na hledání příčin vzniku z hlediska technologie. V 50. letech přijala odborná veřejnost dva principy, jimiž lze nestabilitu řezného procesu vysvětlit a popsat. Jedná se o princip polohové vazby a regenerativní princip [19]. Příčiny vzniku samobuzeného kmitání byly nalezeny právě v principu polohové vazby, protože polohová vazba ukázala, že stejně jako působící řezná síla, má svůj význam i kmitavý systém. V současnosti se pro určování meze stability využívá hlavně regenerativní princip, protože zavedený model dynamické síly extrémně zjednodušil popis dynamického řezného procesu. Dle regenerativního principu působí v řezu kromě síly od kmitání nástroje (označovaná  $F_i$ ) i síla od seřezávání vln (označovaná  $F_o$ ). Kmitající nástroj seřezává vlny, které sám vytvořil při předchozí otáčce nebo v případě frézování průchodem předchozího břitů. Vlny mají amplitudu a vlnovou délku určenou kmitavým pohybem a řeznou rychlostí. Seřezávané vlny jsou vůči kmitání nástroje fázově posunuty z důvodu poměru mezi frekvencí kmitání a otáčkovou frekvencí (resp. řeznou rychlostí), Obr. 1 A).



Obr. 1 Síla regenerativního kmitání Obr. 2 Směrová orientace řezné síly

Při samobuzeném kmitání obecně platí, že mechanická struktura a dynamický řezný proces tvoří uzavřený systém. Aby mohl vzniknout nestabilní řez, musí mít systém schopnost nastavit nenulový fázový posuv mezi kmitáním nástroje a výslednou dynamickou řeznou silou. U regenerativního kmitání je to právě fázový posuv určený poměrem frekvence kmitání a frekvence otáček. Každé frekvenci odpovídá jiný fázový posuv, ale pro daný systém se nastaví taková frekvence, při které vznikne kmitání s nejmenší šířkou třísky. Na základě regenerativního principu je možné ukázat, jaký vliv má kmitavý systém na mez stability a to i pro případy systému s jedním tvarem kmitu. Kvůli výrazným nepřesnostem mezi predikcí a skutečnou mezní šířkou třísky proběhl na konci 60. let pod záštitou Mezinárodní akademie pro výrobní techniku (CIRP) kooperativní výzkum několika světových výzkumných laboratoří, který měl za cíl zpřesnit do té doby používané vztahy pro určování meze stability a stanovit metodiku

měření dynamické řezné síly analogicky k měření dynamického chování mechanické struktury. Pomocí specifické metodiky měření a vyhodnocení byly stanoveny dynamické koeficienty řezné síly pro tečný a normální směr, Obr. 2. Tyto koeficienty byly komplexní, tj. obsahovaly v sobě informaci o vzájemném amplitudovém poměru a fázovém posunutí mezi příslušnou složkou síly a kmitáním nástroje ve směru normály, podobně jako tomu je např. u hodnot komplexní přenosové funkce mechanické struktury. I přes to, že byla snaha všech laboratoří o zachování stejných podmínek měření, vykazovaly výsledky jednotlivých laboratoří výrazné rozptyly [12]. O výzkum v této oblasti se poté pokoušela i řada dalších autorů jako např. [10], [11], [13], [20]. Nicméně autoři se snažili vzhledem k hardwarové a časové náročnosti samotného experimentu metodu získávání dat vhodně zjednodušit a zrychlit, avšak zavedená zjednodušení vedla pouze k větším či menším nevysvětlitelným odchylkám vůči závěrům měření kooperativního výzkumu. Většina autorů se navíc zaměřila převážně na identifikaci samotných komplexních koeficientů a vůbec se nezabývali jejich využitím při výpočtu meze stability. Pravděpodobně z důvodů nedostatečného vysvětlení samotného významu komplexních koeficientů původními autory se postupem doby výzkum komplexních koeficientů zcela utlumil a pozornost byla zaměřena na identifikaci jevu označovaného jako „procesní tlumení“. Procesní tlumení označuje sílu, jejíž fyzikální představa je stlačování materiálu pod hřbetem nástroje [18] a této síle se přisuzuje nárůst meze stability s klesající řeznou rychlostí [14]. V literatuře lze nalézt práce, které pro identifikaci tohoto jevu využívají různé typy převážně dynamických zkoušek. Jako zajímavé z pozdějších prací lze uvést [15], [16] a [17].

Článek [15] popisuje identifikaci síly procesního tlumení s využitím řízeného rozkmitávání nástroje. Během řezu byl soustružnický nůž rozkmitáván konstantní frekvencí pomocí piezoaktuátoru. Frekvence kmitání byla zvolena vůči otáčkám obrobku tak, aby fáze vln vůči kmitání byla rovna nule. V řezu by tedy měla působit jen síla od procesního tlumení. Ve skutečnosti však přetrvává jak síla od kmitání nástroje tak i síla od seřezávání vln. Obě síly by se měly navzájem vyrušit, protože jsou stejné a v protifázi, ale není možné s jistotou potvrdit, že tomu tak skutečně je. Pokud síly nebudou stejné, bude jejich zbytkový rozdíl ovlivňovat velikost měřeného procesního tlumení.

V [16] bylo k identifikaci procesního tlumení využito samobuzeného kmitání. Na letmo upnutém obrobku specifického tvaru byly vyvolány během soustružení samobuzené kmity. Za těchto podmínek byla změřena vznikající dynamická řezná. V tomto případě se tedy jedná o nejvěrnější simulaci podmínek samobuzených kmitů. Pro vyhodnocení naměřených sil bylo využito zobrazení v komplexní rovině. Způsob vyhodnocení se velmi podobá metodě VÚOSO [12]. Článek [16] využívá předpokladu, že se frekvence

samobuzeného kmitání plynule mění s rostoucí tuhostí kmitavého systému. Změna této frekvence při konstantní řezné rychlosti mění fázi mezi silou a výchylkou kmitání, která je potřebná pro vnesení dat do komplexní roviny, Je však nutné také uvážit, že plynulou změnou frekvence během řezu se nedá docílit regenerace tak, jak je uvažována v teorii samobuzených kmitů. Výsledky prezentované v tomto článku jednoznačně ukazují, že síly od kmitání nástroje a od seřezávání vln nejsou stejné. Autor tuto skutečnost však nijak nekomentuje, protože cílem článku bylo identifikovat procesní tlumení.

Článek [17] popisuje identifikaci procesního tlumení za pomoci impulsu z modálního kladiva, podobně jako dřívější metoda [13]. Technologické podmínky obrábění byly zvoleny těsně pod mezi stability, tedy co nejbližše skutečným podmínkám samobuzeného kmitání. Budící impuls kladiva vyvolá v řezu dynamické síly spojené s kmitáním nástroje. Množství dat pro vyhodnocení ale určuje krátká doba dokmitu, což má významný vliv na přesnost této metody. Pokud se naměřený signál síly vyhodnotí pouze v rámci doby jedné otáčky, změřená dynamická síla neobsahuje sílu od seřezávání vln, protože nástroj nestihl z povrchu obrobku vytvořené vlny seříznout a je tak možné identifikovat přímo působící sílu procesního tlumení.

Někteří autoři, jako např. [22], se pokoušeli určit procesní tlumení na základě experimentálně zjištěné mezní šířky třísky. Tento postup není zcela vhodný, protože hodnota mezní šířky je určena jak dynamickou řeznou silou, tak i kmitavým systémem, a získané závěry tak nelze spolehlivě všeobecně aplikovat na jiné kmitavé systémy.

Rozšíření modelu dynamické řezné síly o účinek procesního tlumení umožnilo vysvětlit jev rostoucí meze stability s klesající řeznou rychlostí. Uspokojivého zvýšení přesnosti určení meze stability však zatím dosaženo nebylo, jak ukazují např. výsledky [15]. Převážně při soustružení se v některých případech objevuje v určitém pásmu řezných rychlostí i významný propad [23], který prozatím vysvětlen nebyl. Někteří autoři se domnívají ([15] [21]), že propad meze stability způsobuje ulpívající materiál na břitů nože. Vytvořením nárůstku se změní geometrie nástroje a tím i podmínky pro vznik nestabilního řezu.

Na základě přehledu současného stavu problematiky lze stanovit závěr, že nepřesnost predikce stabilních řezných podmínek pravděpodobně pochází z nedostatečného poznání dynamického řezného procesu. Dosavadní výzkum ukazuje, že při zpřesňování výpočtu meze stability pro reálné případy je potřeba vyjádřit s větší přesností nejen kmitavý systém, ale i působící řezné síly. Zatímco metody pro zkoumání dynamického chování struktur strojů jsou již v dnešní době na velmi vysoké úrovni a není pochyb o jejich spolehlivosti a přesnosti při určování meze stability, u metod pro identifikaci dynamické řezné síly tomu tak není.



### 3. **CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE**

Tato práce má hlavní cíl zpřesnit určování meze stability obrábění. Z přehledu dosavadního stavu problematiky se ukazuje, že současná představa o dění v dynamickém řezném procesu je stále velmi omezená. Výzkum podpořený CIRPEm měl za cíl určit metodiku pro identifikaci dynamické řezné síly s využitím řízeného rozkmitávání nože. V této práci bude základ této metodiky využit a díky současným teoretickým poznatkům a technickému vybavení bude možné tuto metodiku ještě rozšířit. I přes technickou náročnost experimentu je řízené rozkmitávání nože nejvhodnější způsob, jak dynamický řezný proces řízeně simulovat a získat tak potřebné informace pro stanovení spolehlivých závěrů o dění v dynamickém řezném procesu.

Z názorů uvedených v literatuře lze usoudit, že teorie komplexních dynamických koeficientů nebyla původními autory dostatečně vysvětlena natolik, aby ji mohla odborná veřejnost dále rozvíjet. Výzkum komplexních dynamických koeficientů se postupně utlumil a pozornost byla zaměřena převážně na identifikaci procesního tlumení. V této práci bude znovu teorie komplexních koeficientů využita pro popis chování dynamického řezného procesu.

Dílčí cíle této práce jsou následující:

#### **1. *Rozšíření metody řízeného rozkmitávání nože pro úplnou identifikaci řezných sil v dynamickém řezném procesu***

I přes to, že využití řízeného rozkmitávání nože pro identifikaci dynamických řezných sil je z technického, časového a finančního hlediska velmi náročnou úlohou a má svá omezení, jedná se o nejvhodnější a nejspolehlivější způsob, jak řízeně simulovat podmínky na mezi stability. Jako základ pro vyhodnocování získaných dat bude využita metodika VÚOSO s komplexním zobrazemím. Dynamický řezný proces musí být sledován jako celek, tj. musí být sledována výsledná vzájemná interakce všech zúčastněných sil (vnější modulace, vnitřní modulace, procesní tlumení, event. dalších sil). Navržená rozšířená metoda pomůže dále prokázat, že dynamická řezná síla je proces, který má vůči kmitání, kterým je generována, nejen amplitudu, ale i fázi, tj. má komplexní charakter, podobně jako komplexní přenosová funkce mechanické struktury.

## ***2. Nalezení nových fenoménů v dynamickém řezném procesu pomocí rozšířené metody řízeného rozkmitávání nože***

Rozšířená metoda bude použita ke sledování dynamického řezného procesu při nízkých řezných rychlostech. Zjištěné chování bude porovnáno s chováním modelu dynamické řezné síly, který se v současnosti pro určování meze stability používá. V případě, že se experimentem prokážou výrazné odlišnosti, bude nutné stanovit jiný vhodný vztah, který bude schopen dynamické chování řezného procesu popsat spolehlivěji. Kromě literatury [11], která byla zaměřena pouze na sílu od kmitání nástroje, se zatím nikdo nepokusil takový vztah vyjádřit.

## ***3. Zpřesnění modelu pro popis dynamické řezné síly***

Současný model dynamické řezné síly je tím nejjednodušším popisem toho, co se v dynamickém řezu skutečně děje. Historicky tento vztah pro potřeby praxe vyhovoval, protože díky němu bylo možné ukázat, jakou roli hraje při určování meze stability i kmitavý systém. Pro zpřesnění výpočtu meze stability je však nutné vyjádřit z větší přesností nejen dynamické chování mechanické struktury, ale i chování dynamické řezné síly. Cílem této práce bude provést korekci současného modelu nebo navrhnout nový vztah použitelný nejen pro popis chování dynamické řezné síly, ale i k výpočtu meze stability.

## ***4. Experimentální ověření nového modelu při určování meze stability***

Výsledkem výzkumného úkolu CIRPu byl popis dynamického řezného procesu pomocí komplexních koeficientů. Komplexní koeficient v sobě zahrnuje současně informaci o amplitudě a fázi dynamické řezné síly vůči kmitání nástroje. V článku [12] byl prezentován jen velmi zjednodušený výpočet meze stability. Kromě zmíněné publikace se nepodařilo najít jiný zdroj, kde by byl podobný výpočet také uveden. Postup výpočtu se přitom příliš neodlišuje od toho s reálným koeficientem.

Dílčím cílem této práce je ověřit, že navržená rozšířená metoda řízeného rozkmitávání nože je použitelná pro úplnou identifikaci dynamické řezné síly a pomůže ke zpřesnění určování podmínek stabilního obrábění. Nový model síly bude použit pro výpočet mezní šířky a výsledky výpočtu budou porovnány se standardním modelem a experimentálně zjištěnou mezní šířkou třísky.

#### 4. VLASTNÍ ŘEŠENÍ

Kvůli nedostatku informací o dění v dynamickém řezném procesu je cílem této disertační práce nalezení vhodné a spolehlivé metody pro identifikaci řezných sil způsobených relativním kmitáním mezi nástrojem a obrobkem. Princip metody byl podrobně uveden ve vlastní publikaci [1] a [4]. Pro sílu při regenerativním kmitání, se používá všeobecně uznávaný vztah ve tvaru

$$F = F_o - F_i = K_C \cdot b \cdot Y_o - K_C \cdot b \cdot Y_i \quad (1)$$

kde  $K_C$  představuje řezný odpor [N/m],  $b$  šířku řezu [m],  $Y_o$  vlnitost na povrchu obrobku [m] a  $Y_i$  kmitání nástroje [m]. V současnosti se při určování mezních podmínek obrábění předpokládá, že pro sílu od kmitání nástroje  $F_i$  a sílu od seřezávání vln  $F_o$  platí stejný řezný odpor. Z rovnice (1) lze tento součinitel vyjádřit ve tvaru

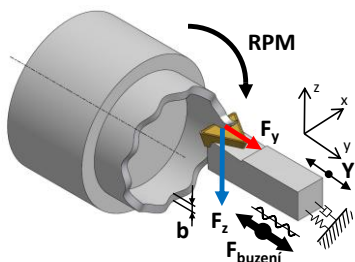
$$\frac{F}{b \cdot Y_i} = K_C \cdot (e^{-j\psi} - 1) \quad (2)$$

kde  $\psi$  představuje fázové posunutí vln vůči kmitání. Za předpokladu ustáleného periodického kmitání bude mít pravá strana rovnice (2) v komplexní rovině tvar kružnice ležící středem na reálné ose a procházející počátkem, Obr. 4 A). Při nestabilním řezu vznikají v důsledku zanořování nástroje do materiálu síly na jeho čele a hřbetu. Při odřezávání vln však vzniká síla z jiných důvodů a proto lze oprávněně předpokládat, že koeficient  $K_C$  nemusí být pro obě síly stejný. Pro případ síly popsané dvěma reálnými koeficienty navzájem různými bude součinitel řezné síly v komplexní rovině vyjádřen opět kružnicí, ale nebude již procházet počátkem, Obr. 4 B). Pokud budou tyto dva koeficienty komplexní, viz CIRP, může kružnice ležet kdekoliv v komplexní rovině a navíc bude kvůli fázi komplexního koeficientu kružnice i pootočená, Obr. 4 C). Významem polohy kružnic se podrobně zabývala výzkumná zpráva [9] a vlastní publikace [2] a [3].

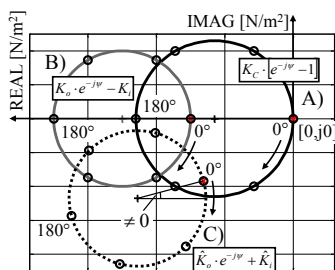
Bude-li vzata do úvahy i frekvenční závislost řezného odporu, je nutné body reprezentovat jako šroubovici, viz Fig. 5 A). Kružnice je pouze jedním z průmětů této šroubovice do příslušné roviny. Plynulou změnou frekvence kmitání se totiž mění spojitě počet vln na povrchu obrobku z jedné hodnoty na druhou. Tato vlastnost nebyla v dosavadní teorii využívající kružnice vzata do úvahy. Zbývající průměty šroubovice do příslušných rovin tvoří průběh reálné a imaginární složky v závislosti na frekvenci kmitání. Střední čáry jednotlivých závitů šroubovice v tomto případě leží na jedné přímce, která prochází souřadnicí  $[-K_C, j0]$ , tj. zápornou reálnou osou. Počáteční a koncový bod závitů leží také na společné přímce a její průmět tvoří právě bod

v počátku komplexní roviny. Pokud zahrneme do úvah i sílu procesního tlumení, která např. dle [15] závisí na poměru frekvence kmitání a řezné rychlosti, její příspěvek ovlivní pouze imaginární složku řezného odporu. Je tomu z toho důvodu, že vznik síly závisí na sklonu stlačované vlny a ten se řídí rychlostí kmitání. V případě, že se výchylka kmitání periodicky mění, je rychlost kmitání díky derivaci fázově posunutá o 90°. Proto příspěvek procesního tlumení ovlivňuje pouze imaginární část řezného odporu. Šroubovice tedy bude klesat nebo stoupat ve směru imaginární osy právě podle hodnoty součinitele procesního tlumení, Obr. 5 B). Střední čára této šroubovice vyjadřuje přímo závislost procesního tlumení na frekvenci kmitání pro konkrétní řeznou rychlost. V obecném případě, kdy součinitele budou závislé na frekvenci kmitání a navíc i komplexní, může mít šroubovice jakýkoliv tvar, viz Obr. 6.

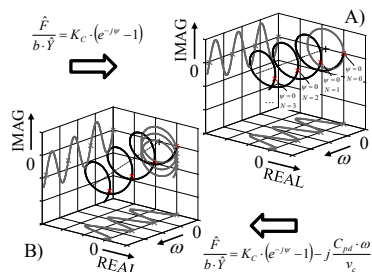
Nová rozšířená metoda umožní sledovat úplné chování dynamického řezného procesu. Zjištěné závislosti řezných sil nejen na řezné rychlosti, ale především také na frekvenci kmitání, dovolí přesněji stanovit součinitele řezného procesu pro správné určení meze stability obrábění.



Obr. 3 Princip testu

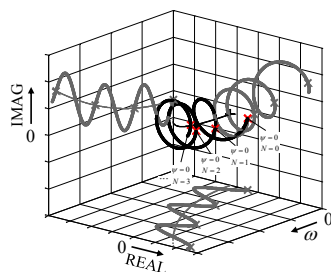


Obr. 4 Zobrazení součinitele v komplexní rovině



Obr. 5 Průběh frekvenční závislosti současného modelu

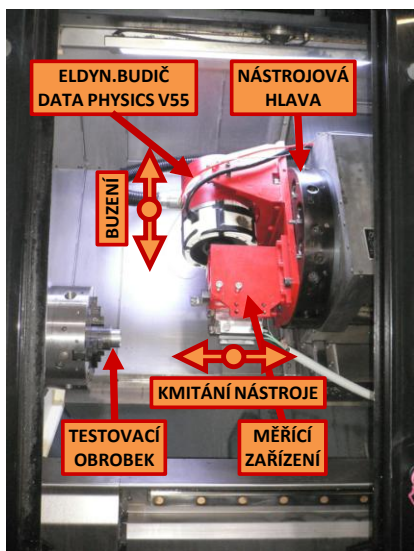
A) bez procesního tlumení,  
B) s procesním tlumením



Obr. 6 Průběh frekvenční závislost obecného modelu

## 5. VÝSLEDKY

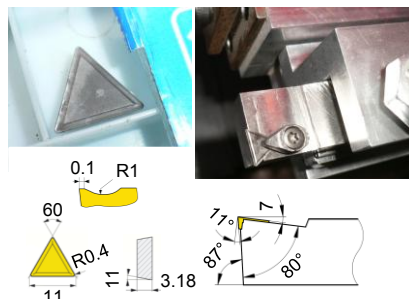
Pro experimenty bylo sestrojeno testovací zařízení, které umožní řízený kmitavý pohyb nástroje. Zařízení se skládá z tuhého nosného rámu, pružného členu, elektrodyn. budiče a držáku nástroje osazeného snímači pro sledování vznikajících sil a výchylky kmitání. Zařízení se upevňuje na nástrojovou hlavu do pracovního prostoru zkušebního stroje, viz Obr. 7 až Obr. 9. Pružný člen musí mít specifické dynamické vlastnosti. O procesu optimalizace referují vlastní publikace [5] a [7].



Obr. 8 Testovací zařízení umístěné ve stroji DMG NEF600



Obr. 7 Držák nástroje se senzorikou



Obr. 9 Testovací nástroj

Měření probíhalo za konstantní řezné rychlosti, kdy byl nástroj během řezu rozkmitáván v pásmu frekvencí stanovených pro konkrétní počet vln na čele testovacího vzorku. Experimentem byly v řezném procesu nalezeny nové fenomény. Ukázka změřeného frekvenčního chování je na Obr. 10 až Obr. 13. U normální složky řezné síly se prokázala výrazná závislost na frekvenci kmitání a to v celém rozsahu testovaných řezných rychlostí. Normální složka síly je oproti kmitání i fázově posunutá, tj. řezný odpor má komplexní charakter. Tečná složka řezné síly byla však frekvencí ovlivněna jen velmi málo.

Z identifikovaných frekvenčních závislostí ve směru normály lze usoudit, že v řezu existuje alespoň jedna další složka síla, která byla pro nás do této chvíle neznámá. Soudě podle poklesu amplitudy periodického průběhu vzniká nově objevená síla při odřezávání vln. Síla má směr normály k obráběnému povrchu a působí proti síle  $F_0$ . Vzhledem k tomu, jak se tato síla projevuje, je představa, že tato síla závisí na sklonu odřezávané vlny. To by znamenalo, že vlny na povrchu obrobku nejsou kopií kmitavého pohybu, ale mají jiný tvar.

Pro zvolený rozsah testovaných podmínek však není možné tuto sílu určit přímo. Aby bylo možné tuto sílu určit, musí se provádět měření pro určité technologické podmínky, které budou účinek příslušné síly ovlivňovat. Např. účinek sil procesního tlumení lze ovlivnit úhlem hřbetu nebo sklonem vlny, účinek sil vzniklých v důsledku opotřebení nástroje zesílit nebo vyloučit použitím nástroje s definovaným opotřebením, apod. Nalezení podmínek pro tuto novou sílu by mělo být cílem dalšího výzkumu.

Naměřená data je nutné pro účely výpočtu meze stability aproximovat vhodným empirickým modelem. Pro použití při výpočtech potřebujeme nahradit lokální změřené body spojitým průběhem. Ve změřených průmětech lze identifikovat dvě funkce. Funkci periodickou a funkci, která má rostoucí a klesající trend. Z několika pokusů se ukázalo, že následující empirické vztahy pro reálnou a imaginární část řezného odporu nejlépe vyhovují.

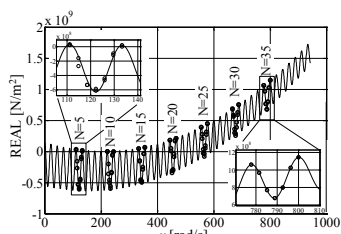
$$\begin{aligned} \operatorname{re}(\hat{K}_{y,z}) = D_0 + \left[ D_1 - \frac{60}{2\pi \cdot v_c} \cdot D_2 \cdot \omega \right] \cdot [\cos(-\psi) - 1] + \\ \frac{60}{2\pi \cdot v_c} \cdot D_3 \cdot \omega + \left( \frac{60}{2\pi \cdot v_c} \right)^2 \cdot D_4 \cdot \omega^2 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{im}(\hat{K}_{y,z}) = D_5 + \left[ D_6 - \frac{60}{2\pi \cdot v_c} \cdot D_7 \cdot \omega \right] \cdot \sin(-\psi) + \\ \frac{60}{2\pi \cdot v_c} \cdot D_8 \cdot \omega + \left( \frac{60}{2\pi \cdot v_c} \right)^2 \cdot D_9 \cdot \omega^2 \end{aligned} \quad (4)$$

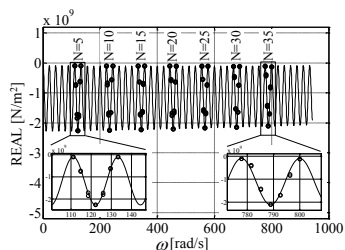
Tyto vztahy velmi přesně postihují měření v závislosti na frekvenci a navíc je z nich vidět, že v řezu existuje i další síla, která má určitý směr a chování. Z uvedených vztahů lze identifikovat i chování procesního tlumení. Procesní tlumení vyjadřuje průběh střední hodnoty uvedených vztahů v závislosti na frekvenci kmitání pro konkrétní řeznou rychlost. Průběh identifikovaného procesního tlumení v závislosti na frekvenci je na Obr. 14 a Obr. 15. Hodnoty součinitelů ve vztazích (3) a (4) jsou uvedeny v následující Tab. 1. Výsledky byly uveřejněny již ve vlastní publikaci [6].

Tab. 1 Parametry modelu

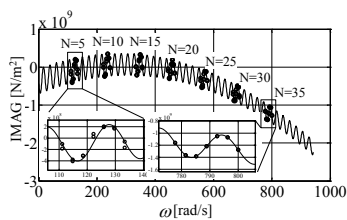
$V_c$ [m/min]	direction	REAL				
		$D_0$ [N/m <sup>2</sup> ]	$D_1$ [N/m <sup>2</sup> ]	$D_2$ [N/m]	$D_3$ [N/m]	$D_4$ [N]
20	Y	3.855E+08	1.085E+06	-4.558E+05	6.815E+03	1.263E+07
	Z	1.251E+09	-9.418E+04	7.081E+04	-5.104E+02	-7.798E+07
30	Y	3.495E+08	5.452E+05	-4.305E+06	3.231E+04	1.464E+08
	Z	1.102E+09	3.599E+05	-2.807E+05	9.886E+02	-8.625E+07
40	Y	5.102E+08	1.175E+06	5.357E+07	-2.462E+05	-2.099E+09
	Z	1.307E+09	7.473E+05	4.683E+06	-1.959E+04	-3.181E+08
$V_c$ [m/min]	direction	IMAG				
		$D_5$ [N/m <sup>2</sup> ]	$D_6$ [N/m <sup>2</sup> ]	$D_7$ [N/m]	$D_8$ [N/m]	$D_9$ [N]
20	Y	3.933E+08	1.151E+06	2.431E+06	-1.519E+04	-7.046E+07
	Z	1.363E+09	5.890E+05	1.266E+06	-4.528E+03	-6.941E+06
30	Y	3.295E+08	4.543E+05	9.654E+06	-5.172E+04	-3.800E+08
	Z	1.120E+09	4.430E+05	8.052E+04	-2.590E+03	6.093E+07
40	Y	4.177E+08	4.065E+05	1.673E+07	-1.083E+05	-5.200E+08
	Z	1.261E+09	5.396E+05	-3.314E+05	-3.229E+03	8.084E+07



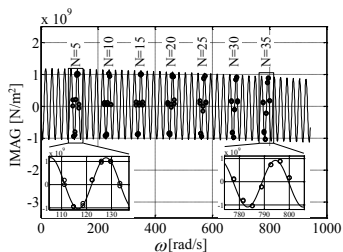
Obr. 10 Reálná část řezného odporu  $F_y$  pro  $V_c$  30 m/min



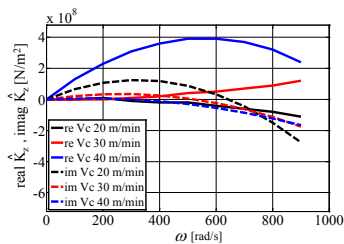
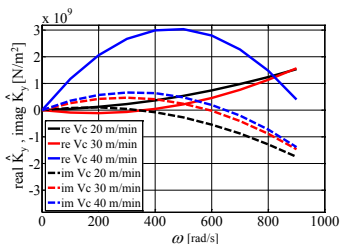
Obr. 11 Reálná část řezného odporu  $F_z$  pro  $V_c$  30 m/min



Obr. 12 Imaginární část řezného odporu  $F_y$  pro  $V_c$  30 m/min

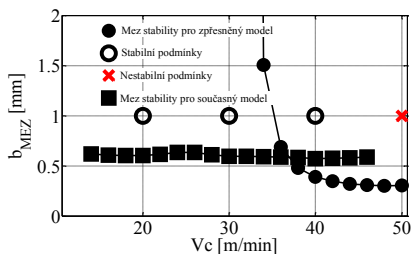


Obr. 13 Imaginární část řezného odporu  $F_z$  pro  $V_c$  30 m/min



Obr. 14 Procesního tlumení směr Y Obr. 15 Procesního tlumení směr Z

Ověření nového modelu při určování meze stability bylo provedeno pro kmitavý systém měřicího zařízení, který obsahoval dva tvary kmitu. Metody pro výpočet meze stability pro takové modely hodnotila výzkumná zpráva [8]. Vlastní frekvence náležely pružnému členu měřicího zařízení. Směr kmitání pružného systému byl orientován ve směru normály k obráběnému povrchu. Parametry pro současný model dynamické řezné síly byly stanoveny konvenčním postupem ze statických zkoušek obrábění pro testovanou geometrii nástroje, tvar obrobku a druh obráběného materiálu. Přesnost predikce obou modelů byla porovnána s experimentálně zjištěnými podmínkami obrábění pro šířku řezu 1 mm a rozsah řezných rychlostí 20 – 50 m/min. Zpřesněný model řezné síly indikuje s klesající řeznou rychlostí výrazný nelineární nárůst meze stability oproti standardnímu modelu s procesním tlumením. Toto chování je v souladu s všeobecně pozorovanými vlastnostmi řezného procesu. Standardní model pro testovaný rozsah řezných rychlostí naopak vykazuje pouze rovnoměrný průběh. Jak ukazuje experimentální ověření, zpřesněný model respektuje chování dynamického řezného procesu, avšak oproti skutečným hodnotám stabilních podmínek se stále ještě liší. Určení skutečné hranice mezi stabilními a nestabilními podmínkami je však samo o sobě velmi problematické. Přesnost určení je ovlivněna celou řadou faktorů, jejichž nahodilá změna ovlivní aktuální podmínky experimentu. Zjištěné odchylky budou cílem dalšího výzkumu.



Obr. 16 Porovnání experimentu a predikce



## 6. ZÁVĚR

Přínosem této práce je nová rozšířená metoda pro měření, zpracování a vyhodnocení dynamické řezné síly. Pomocí této metody bylo dokázáno, že dynamický řezný proces vykazuje vůči kmitání nejenom amplitudu, ale také fázové posunutí. Dále se podařilo dokázat, že dynamická řezná síla je závislá nejen na řezné rychlosti, ale také výrazně na frekvenci kmitání. V řezu byla nalezena proti již známým silám od kmitání nože, seřezávání vln a procesního tlumení i další doposud neznámá složka síly, která je pravděpodobně závislá na odřezávání vln. Nová metodika zpracování naměřených výsledků využívá pro popis chování síly v závislosti na frekvenci šroubovici namísto uvažované kružnice. Na základě získaných výsledků lze prohlásit, že dynamická řezná síla v tečném směru je pro všechny rychlosti zhruba stejná a velmi málo závislá na frekvenci kmitání a na řezné rychlosti. Řezná rychlost a frekvence nejvíce ovlivňují sílu v normálním směru. Pomocí rozšířené metody řízeného rozkmitávání nože lze získat i chování síly procesního tlumení v závislosti na frekvenci kmitání. Výsledky provedených experimentů jasně dokazují, že není možné identifikovat chování dynamických sil ze statických zkoušek a používat při výpočtu meze stability statický součinitel  $K_C$ . S ohledem na změřenou frekvenční závislost řezných sil je možné také potvrdit, že identifikaci sil nelze provést ani na mezi stability, kdy systém kmitá zhruba jednou frekvencí, která je dána vlastnostmi kmitavého systému. Na naměřených výsledcích se jasně ukazuje význam použití komplexních koeficientů, kterými lze popsat velmi jednoduše vzájemné fázové vztahy kmitání nástroje a dynamických řezných sil. Budoucí práce by se měla zaměřit na identifikaci podmínek vzniku a existence nově objevené složky síly, vč. formulace jejího matematického popisu a měla by prozkoumat také dynamické řezné síly pro větší rozsah technologických podmínek, materiálů a řezných nástrojů.

Nový empirický model řezné síly predikuje při určité frekvenci nulovou hodnotu síly od seřezávání vln, zatímco síla od kmitání nástroje stále přetrvává. Lze jednoznačně vyloučit, že je tento jev způsoben dynamikou měřícího zařízení, protože všechna měření byla provedena pod první rezonancí měřícího přípravku. Dále lze jednoznačně vyloučit, že je útlum způsoben chybějícími vlnami na povrchu obrobku, protože výsledky měření pro stejné frekvence v tečném směru jednoznačně přítomnost vln potvrzují. Toto chování lze přisoudit nově objevené složce síly, která má při určité frekvenci stejnou velikost jako síla od seřezávání vln ale opačný směr.

Nepřesnosti při porovnání reálné a vypočtené mezní šířky řezu mohou být zapříčiněny různými vlivy. Jedním z významných vlivů bude omezený rozsah testovacích podmínek. V další práci bude nutné tento rozsah rozšířit. Dalším vlivem je zanedbání vlivu tečné složky řezné síly. Navržené

experimentální zařízení bylo koncipováno tak, aby hlavní směr rozkmitávání byl ve směru normály k obráběnému povrchu. Stejně experimenty by bylo vhodné provést i v tečném směru a ověřit, zdali i tento směr nemůže mít vliv na přesnost určování meze stability obrábění.

Získání potřebných dat k analýze dynamiky řezného procesu je však podmíněno složitým a nákladným měřicím zařízením. Před samotným měřením je nutné co nejlépe naladit a prověřit jeho dynamické vlastnosti. Tato skutečnost prozatím silně stěžuje použití navržené metody ve strojírenské praxi. Řešením je realizace účelového testovacího zařízení, na kterém by mohli výrobci nástrojů testovat dynamické chování řezného procesu pro zvolenou geometrii nástroje, obráběný materiál a technologické podmínky. Přenos zjištěných výsledků do praxe by byl realizován pomocí technologických listů s empirickými vzorci nebo tabelovanými hodnotami dynamických řezných koeficientů pro příslušný nástroj a materiál.

I přes uvedené nevýhody je však metoda řízeného rozkmitávání nože nejvhodnějším způsobem, jak spolehlivě identifikovat a sledovat dynamické síly, které v řezu působí.

## Publikace autora související s tématem disertace

- [1] BACH, P., DROBÍLEK, J., et. al. *A method of identification of complex cutting forces acting in unstable cutting process*. J.E. Purkyne University, Faculty of Production Technology and Management, Journal of Manufacturing Technology, March 2014, vol. 14, no. 1, s. 3-8. ISSN 1213-2489.
- [2] BACH, P., DROBÍLEK, J., et. al. *Dynamické síly působící v nestabilním řezu při soustružení*. In Sborník příspěvků Strojírenská technologie 2015, Plzeň: ZČU Plzeň, 2015, s. 10-16.
- [3] BACH, P., DROBÍLEK, J., et. al. *A comparative analysis of lower speed chatter behaviour*. MM Science Journal, December 2013, s. 434-439.
- [4] DROBÍLEK, J. *Dynamic forces in unstable cut in turning*. In Proceedings of the Student's Conference STC 2014, Praha: CVUT Praha, 2014. ISBN 978-80-01-05484-0.
- [5] CHVOJKA, P., DROBÍLEK, J., et. al. *Tuning of an experimental device for measurement of dynamic complex forces when turning*. In Proceedings 21st IMEKO World Congress 2015, Measurement in Research and Industry, September 2015, vol. 1, s. 214-220. ISBN 978-1-5108-1292-5.
- [6] DROBÍLEK, J., POLÁČEK, M., et. al. *Dynamic Cutting Forces*. Springer, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018. Přijato k uveřejnění.
- [7] JANOTA, M., DROBÍLEK, J., et. al. *Ladění dynamických vlastností standu pro identifikaci komplexních řezných koeficientů*. Sborník příspěvků: ... setkání uživatelů PULSE ... . Praha: Spectris, 2018. ISBN 978-80-906855-1-2.
- [8] DROBÍLEK, J. *Nové metody řešení stability obrábění*. Praha: ČVUT v Praze Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení, 2012. [Výzkumná zpráva V-12-003].
- [9] BACH, P., POLÁČEK, M., DROBÍLEK, J. *Výzkum komplexních řezných sil při ortogonálním soustružení*. Praha: ČVUT v Praze Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení, 2015. [Výzkumná zpráva V-15-079].

## Seznam použité literatury v tezích

- [10] GOEL, B., S. *Measurement of dynamic cutting force coefficients*. Ontario: McMaster University, 1976. xii, 103 s. [online]. URL <<https://macsphere.mcmaster.ca/handle/11375/8095>>. [akt. 2014-06-18].
- [11] RAO, S., B. *Analysis of the dynamic cutting force coefficient*. Ontario: McMaster University, 1977. ix, 48 s. [online]. URL <<https://macsphere.mcmaster.ca/handle/11375/8826>>. [akt. 2014-06-18].
- [12] TLUSTÝ, J. *Analysis of the State of Research in Cutting Dynamics*. Annals of the CIRP, 1978, vol. 27, s. 583-589.
- [13] HECZKO, O. *New Method for testing the dynamic cutting force coefficients*. Ontario: McMaster University, 1980. xii, 101 s. [online]. URL <<https://macsphere.mcmaster.ca/handle/11375/17929>>. [akt. 2015-08-19].
- [14] EYNIAN, M. ONOZUKA, H., ALTINTAS, Y. *Chatter in turning with process damping*. Dallas (Texas): ASPE Proceedings, October 2007. 4s. [online]. URL <[http://www.aspe.net/publications/Annual\\_2007/POSTERS/5PROCES/S2MACHN/2267.PDF](http://www.aspe.net/publications/Annual_2007/POSTERS/5PROCES/S2MACHN/2267.PDF)>. [akt. 2010-06-15].
- [15] ALTINTAS, Y., EYNIAN, M., ONOZUKA, H. *Identification of dynamic cutting force coefficients and chatter stability with process damping*. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2008, vol. 57, no. 1, s. 371-374.
- [16] XIAO, W., et. al. *A method of using turning process excitation to determine dynamic cutting coefficients*. Elsevier, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, vol. 87, s. 49 - 60.
- [17] SNIEGULSKA-GRADZKA, D., NEJMAN, M., JEMIELNIAK, K. *Cutting force coefficients determination using vibratory cutting*. In Procedia CIRP, 2017, Volume 62, s. 205-208. ISSN 2212-8271
- [18] WU, D., W., LIU, C., R. *An analytical model of cutting dynamics. Part I: Model building*. ASME, Journal of Engineering for Industry, May 1985, vol. 107, no. 2, s. 107-111.
- [19] TLUSTÝ, J., POLÁČEK, M. *The stability of the machine tool against self-excited vibration in machining*. ASME, International research in production engineering, September 1963, s. 465-474.
- [20] NIGM, M., SADEK, M., M. *Experimental investigation of the characteristic of dynamic cutting process*. ASME, Journal of Engineering for Industry, May 1977, vol. 99, no. 2, s. 410-418.

- [21] NIGM, M., M., SADEK, M., M., TOBIAS, S., A. *Dimensional analysis of the steady state orthogonal cutting process*. Elsevier, International Journal of Machine Tool Design and Research, 1977, vol. 17, no. 1, s. 1-18.
- [22] BUDAK, E., TUNC, L., T. *A New Method for Identification and Modeling of Process Damping in Machining*. ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, October 2009, vol. 131, no. 5, s. 1-10.
- [23] BACH, P. POLÁČEK, M., CHVOJKA, P., DROBÍLEK, J., SVOBODA, O. *A comparative analysis of lower speed chatter behaviour*. MM Science Journal, December, 2013.

## **Shrnutí**

Tato disertační práce se zabývá problematikou predikce meze stability samobuzeného kmitání v obráběcích strojích. Práce se zaměřuje na dynamickou sílu řezného procesu, protože znalost jejích vlastností a chování je velmi důležitá pro správné určení meze stability. K identifikaci dynamické síly je využita nová rozšířená metoda řízeného rozkmitávání nože.

V úvodní části práce je prezentován přehled současného stavu znalostí o dynamickém řezném procesu. V následující části je proveden návrh rozšířené metody, která umožňuje měřit a analyzovat chování dynamického řezného procesu. V experimentální části práce je prezentováno využití navržené metody pro identifikaci dynamických sil při nízkých řezných rychlostech. Získané poznatky jsou aplikovány při návrhu přesnějšího modelu dynamické řezné síly. Nový model je použit pro výpočet meze stability a výsledky jsou porovnány s experimentálně zjištěnou mezí stability. V závěru práce je diskutován a vyhodnocen přínos nové metody pro zlepšení predikce meze stability obrábění.

## **Summary**

This thesis deals with problematic of stability limit prediction of self-excited vibration in machine tools. This work is aimed on dynamic force of cutting process, because knowledge of its properties and behaviour is crucial for correct determination of stability limit. For identification of dynamic cutting force is used new extended method using controlled exciting of cutting tool.

The introduction part of thesis presents overview of current state of knowledges about dynamic cutting process. The following part includes proposal of extended method, which will allow to measure and analyse behaviour of this dynamic process. In the experimental part of thesis is presented use of proposed method for identification dynamic forces in lower cutting speeds. Obtained knowledge are then applicated in design more accurate model of dynamic cutting force. New model is used for computation of stability limit and results are compared with real stability limit. Benefits of applying new method for improving of stability limit prediction are discussed and evaluated in the conclusion.