

## Oponentní posudek doktorské disertační práce

Jméno doktoranda: **Ing. Petr Hadraba**

Téma práce: **Vliv nelineární tuhosti na stabilitu řezného procesu u strojů s vodorovnou osou soustružení**

Školitel: doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

Pracoviště: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky, FSI VUT v Brně

### Úvod

Předložená disertační práce se zabývá vlivem nelinearit ve stavbě obráběcích strojů ovlivňujících přesnost predikce vzniku samobuzených kmitů při obrábění. Autor prezentuje vlastní řešení na příkladu stability operace zapichovacího soustružení na víceřetenovém automatu. Práce má celkem 90 stran. Autor věnoval 13 stran přehledu současného stavu poznání a 55 stran popisu vlastního řešení. Obě tyto hlavní části práce doplňují seznamy použité literatury, zkratk a symbolů a autorových publikací relevantních práci.

### Aktuálnost tématu disertační práce

Samobuzené kmitání (chatter) omezuje produktivitu obrábění. Strukturální chování obráběcího stroje je jedním z klíčových faktorů, který ovlivňuje odolnost stroje proti vzniku chatteru. Rozšíření verifikovaných modelovacích technik v této oblasti je důležitou součástí posunu poznatků vedoucích ke zvýšení produktivity obrábění. Témata disertační práce je tedy aktuální.

### Splnění stanoveného cíle disertační práce

Autor v kapitole 2 definuje tři hlavní cíle práce: 1) Analýza vlivu nelinearity konstrukčních spojů na stabilitu řezného procesu; 2) Metodika návrhu obráběcích strojů z hlediska zvýšení stability obrábění; 3) Analýza možností nekonstrukčního zvýšení stability obrábění. Jak je následně uvedeno v kap. 6, práce se zaměřuje na oblast vzniku samobuzených kmitů při zapichovacím soustružení na víceřetenových automatech. Tuto problematiku z praxe znám, s firmou TAJMAC ZPS jsem ji v dřívějších letech také diskutoval. S touto mojí osobní zkušeností považuji vytčené cíle za náročné a originální. Nicméně bych preferoval, aby cíle vycházely z popisu současného stavu poznání ve výzkumu i praxi a jejich formulace navazovala na širší předcházející popis problematiky a technických souvislostí, jak je u disertačních prací obvyklé.

Naplnění prvního cíle je možno vidět v kapitolách 8 – 12. V kapitole 8 je popsán zjednodušený 2D model mechanického systému pro zapichovací soustružení. Klíčovou částí modelu je popis tuhosti dvou opěr, které v modelu nahrazují vozíky profilového valivého lineárního vedení. V kap. 8.1 (za rovnicí (8.8)) je uvedena hodnota relativního tlumení 3 % bez vysvětlení zdroje této hodnoty. Pro výpočet jsou použity hodnoty absolutního tlumení (viz tab. 8.1), u kterých není zřejmé, jak je autor stanovil. V kap. 8.2 je popsán nelineární model tuhosti valivého vedení. Matematický postup je správný, pro porozumění souvislostem však chybí informace o reálné velikosti a typu použitého valivého vedení, použité velikosti předepínací síly  $F_p$  a odhadované procesní síle  $F_c$ . Protože obvyklým přístupem u lineárních modelů je linearizace nelineární

tuhostní charakteristiky valivého vedení na hodnotě předepnutí, jsou uvedené velikosti sil důležité pro úvodní posouzení, zda je nutno pracovat s nelineární charakteristikou tuhosti. Protože v rovnicích (8.9) - (8.11) se popisuje vztah mezi silou a deformací vedení, bylo by vhodné modely doprovodit charakteristikou síla-deformace, ze které následně vyplývá graf tuhost-deformace (Fig. 8.3). Navazující simulace dynamické poddajnosti systému na Fig. 8.4 ukazuje vliv velikosti budící síly na poddajnost systému. Tento výsledek by měl být komentován ve vazbě na provedená měření, např. FRF na Fig. 6.2. Dále navržený SLOP algoritmus se ukazuje elegantním řešením pro určení vstupních parametrů pro návaznou lineární analýzu nestability obrábění v širším rozsahu otáček obrobku. Fig. 8.5 ukazuje ovlivnění výsledků predikované meze stability velikostí procesní síly (předpokládám, že se jedná o procesní sílu – v grafu chybí popisky). Z posunu křivek meze stability bych usuzoval na snižování tuhosti systému při vyšším zatížení. Pro detailní posouzení situace by bylo vhodné vykreslit i průběh dynamické poddajnosti systému v závislosti na velikosti procesní síly. Na konci kapitoly 8.5 autor zmiňuje „klasickou analýzu chatteru“, dále zmiňuje možnosti „bifurkací ve struktuře“. Formulace je vágní a není jasné, jakou konkrétní metodu výpočtu má autor na mysli a jaké „bifurkace struktury“ uvažuje. Navazující kapitola porovnává časovou simulaci systému s frekvenční simulací s po částech aktualizovanými strukturálními vlastnosti (SLOP) z pohledu časové náročnosti. Navržené řešení z tohoto pohledu vychází jako velmi efektivní. Navíc umožňuje zohlednit velikost hodnoty posuvu na otáčku, jak je dobře popsáno v kap. 8.7.

V kap. 9 je popsán nelineární model valivého vedení založený na Hertzově kontaktní teorii. Model je vhodně zjednodušen a dobře pokrývá chování systému. Uvedeny jsou vztahy pro tuhost ve směru X. Chybí analogické řešení pro směr Y, které by bylo vhodné použít v návazné kap. 10, kde je analyzováno modální chování struktury, resp. v kap. 12 pro určení orientované poddajnosti systému pro výpočet stability obrábění. V kap. 11 je pomocí vytvořeného modelu simulována změna dynamické poddajnosti systému v závislosti na velikosti řezné síly. U prezentovaných grafů by bylo vhodné jasně označit, co jsou simulované a co měřené charakteristiky. V kap. 12 je s využitím popsáných modelů přehledně zpracován vliv procesních parametrů na podobu diagramu stability při soustružení.

V kapitole 13 jsou simulační modely verifikovány reálním obráběním. Autor pro experiment dobře připravil specifické nezávislé zařízení pro měření řezných sil na bázi tenzometrů. Popis celého experimentu je však vágní a neumožňuje čtenáři si udělat představu o všech okrajových podmínkách. Ve Fig. 13.3 a 13.4 by bylo vhodné ukázat i dynamickou poddajnost ve směru Y. Na Fig. 13.8 nejsou jasné záběrové podmínky. Není uvedena použitá řezná rychlost (vychází z otáček uvedených v kap. 13.3 na str. 70?) a není uvedena hodnota posuvu na otáčku, který bude hlavním faktorem ovlivňujícím. Není zřejmé kritérium použité pro nastavení záběrových podmínek (šířka záběru a velikost posuvu na otáčku). Vyhodnocení experimentu je provedeno ve Fig. 14.2. Není zřejmé, co je ve vyhodnocení považované za stabilní a nestabilní podmínky obrábění a jak lze rozumět šířce třísky (*chip width*) s její kontinuální osou (z popisu experimentu jsem rozuměl, že šířka se měnila v diskretních hodnotách). Za ověření metody lze tedy považovat Fig. 14.3, kde se ukazuje schopnost navrženého algoritmu dobře predikovat frekvenci vznikajícího samobuzeného kmitání. Obrázek by měl být doplněn i porovnáním predikované a reálně dosažené mezní třísky, aby bylo sdělení konzistentní s Fig. 12.2. I s přihlédnutím ke všem výše uvedeným připomínkám lze konstatovat, že doktorand dosáhl prvního výtčeného cíle.

Druhým stanoveným cílem bylo vytvoření metodiky návrhu obráběcích strojů z hlediska zvýšení stability obrábění. To je zpracováno na pouhých dvou stranách v kap. 15. Metodika je velmi primitivní a vágně popsána. Nejsou uvedeny typy uvažovaných simulací a kritéria pro optimalizaci. Pro návrh je doporučována oddělená optimalizace dílčích struktur s přihlédnutím k jejich zatížení. Není komentováno, jak mám být tato klíčová okrajová podmínka definována. Hlavní vadu spatřuji v odděleném návrhu dílčích částí struktury, které nevede na optimální řešení celku. Nosná struktura stroje musí být navrhována a optimalizována vždy jako celek, aby nedošlo k disbalanci vlastností dílčích částí. Přestože metodika má zajistit návrh obráběcích strojů z hlediska zvýšení stability obrábění, není ve schématu na Fig. 15.1 ani v popisu celé kapitoly nikde uvedeno, jak simulace vzniku nestabilního obrábění ovlivňuje jednotlivé konstrukční uzly stroje. Z metodiky není jasné, jak se má uživatel popasovat s řadou dílčích, ale vzájemně propojených úkolů typu definice zátěžných podmínek, dimenzování prvků lineárních vedení a těles struktury, optimalizace dynamické poddajnosti celku a vazby na predikci vzniku chatteru, resp. dosažitelné produktivity. Osobně vytvořené matematické modely predikce nestability obrábění nepovažuji za vhodné pro návrh stroje (tj. situace s velkou variabilitou konstrukčních prvků), ale užitečné pro prediktivní návrh technologie (tj. situace se známou konstrukcí stroje). Navržené metodice chybí konkrétní detaily, které by umožnily podle ní reálně postupovat při práci. S ohledem na tento fakt nepovažuji druhý cíl za dosažený.

Třetím definovaným cílem byla analýza možností nekonstrukčního zvýšení stability obrábění. V práci jsem nenašel žádnou část s originálním přínosem autora, která by se uvedenému úkolu věnovala. Autor nijak nekomentuje dosažení cíle ani ve shrnutí přínosů v kap. 16. Tento cíl tedy považuji za nesplněný.

Doktorand se v kap. 6 a 7 obsáhlým způsobem věnuje analýze strukturálního chování suportu vícevřetenového soustružnického automatu. V obou kapitolách postupně ukazuje, že strukturální chování této skupiny stroje je nelineární. Ačkoliv mám k vlastnímu popisu postupů měření a výsledků připomínky (viz sekce Otázky na doktoranda), považuji tuto část práce za důležitou výchozí analýzu celé situace a doporučil bych doktorandovi formulovat tuto úlohu jako samostatný cíl práce – experimentálně prokázat nelineární strukturální chování tohoto uzlu stroje.

Doktorand definoval celkem tři cíle práce. Jeden z těchto cílů byl naplněn vlastním originálním řešením, jeden byl naplněn nedostatečným, neoriginálním a prakticky nepoužitelným postupem a jeden nebyl zpracován a naplněn vůbec. Stanovené cíle práce jako celek tedy nebyly předloženou disertační prací splněny.

### **Postup řešení problému a výsledky disertace s konkrétním přínosem doktoranda**

Práce začíná definováním cílů v kap. 2 bez srozumitelných myšlenkových východisek. Pokračuje kap. 3 teorií systémů a jejich komplexnosti, jejíž využití jsem v dalším textu neviděl.

V kap. 4 je uveden přehled poznání v oblasti samobuzeného kmitání v obráběcích strojích. Jedná se o velmi širokou problematiku s řadou dostupných informačních zdrojů. Přesto je kapitole věnováno pouhých 7 stran. Není zřejmé, zda se jedná o přehled poznání obecně v samobuzeném kmitání nebo v zúžené oblasti chatteru při soustružení. Autor správně konstatuje, že vznik chatteru je důsledek interakce stroje s procesem. V přehledu poznání však neodděluje část strukturálního návrhu stroje od nastavení procesu a jeho interakce se strukturou stroje (odvoláním se na schéma na Fig. 4.4 situaci neřeší, protože některé uvedené metody nejsou vhodné pro soustružení). Není tedy jasné, kdy a jakými postupy může vznik chatteru

ovlivnit uživatele a kdy výrobce stroje jeho konstrukcí připravuje podmínky pro vysokou odolnost stroje proti vzniku samobuzeného kmitání. Do problematiky je zmatečně vtažena zmínka o problému chatteru při frézování tenkostěnných obrobků, která není v tomto případě relevantní (pokud analyzujeme chování stroje, nesmí být obrobek slabým místem systému) a naopak chybí informace o vlivu naladění pohonů příslušné osy na dynamickou poddajnost nástroje.

V kap. 5 je popsán základní matematický aparát pro redukci strukturálních modelů. V kap. 6 a 7 je provedena úvodní experimentální analýza skupiny suportu víceřetenového soustružnického automatu. Výsledky měření nejsou jasně popsány (např. chybí popis souřadného systému měření, není uvedeno umístění a orientace snímačů), což ztěžuje porozumění prezentovaným grafům. Aplikace pasivního hltiče popsaná v kap. 6.2 ukazuje efektivní ztlumení první vlastní frekvence, aniž by autor diskutoval, že vznikající chatter může mít vazbu na druhý vlastní tvar uzlu. V popise Fig. 6.9 je chyba (nejedná se o SLD, ale o FRF). V kap. 7 je nevhodná terminologie ve schématu 7.2. Chybí zde zavedení šířky obrábění. *Force calculator* měl být asi *specific cutting force* a *Deflection memory* je prvek typu časové zpoždění? Měření prezentovaná ve Fig. 7.3 nejsou vůbec popsána – není tedy jasné, jaké části stroje to je tuhostní charakteristika. Není jasné, jak byl systém zatěžován a kde byla měřena deformace. Z kolika opakování vznikly *Measured value* a jaký je rozptyl jejich hodnoty. Není jasné, jak spolu souvisí měření statických a dynamických vlastní v kap. 7.2 a 7.3. Není uvedeno, pro jaké technologické podmínky jsou vypočteny diagramy stability na Fig. 7.7.

Vlastní řešení problému je popsáno v kap. 8 – 12. Ty považuji za stěžejní část práce. Řadu komentářů k této pasáži uvádím v předchozí kapitole. Celkově je prezentovaný postup řešení logický a správný. Textu by prospělo, kdyby byly hlavní poznatky jednotlivých kapitol stručně shrnuty a vytvořily tak myšlenkový základ pro navazující text. Simulační metoda je verifikována experimentem popsáním v kap. 13 s diskusí výsledků v kap. 14. Experiment prokázal funkčnost navržené metody. Dílčí komentáře k popisu experimentu uvádím v předchozí kapitole, celkově však navržený model považuji za správný a ověřený.

Kap. 15 popisuje návrh metodiky konstrukce obráběcího stroje s ohledem na odolnost vůči chatteru. Kapitola je napsaná povrchně. Uvedené schéma na Fig. 15.1 lze považovat za výchozí myšlenkovou konstrukci k diskusi, nikoliv metodiku prakticky využitelnou v praxi. Za významný nedostatek považuji, že ve schématu chybí definice požadavků na stroj a proces, vůči kterým by bylo možno definovat optimalizační kritéria nebo následně provádět virtuální či reálné testování chování navrženého stroje. Blok *Test* na Fig. 15.1 tak může pouze potvrdit správnost simulací vůči realizovanému fyzickému prototypu, ale nijak nesouvisí s vyhodnocením dosažení požadavků na návrh stroje.

V kap. 16 jsou shrnuty hlavní přínosy práce. Hlavní přínosy jsou autorem vypíchnuty dobře, nekryjí se však se všemi definovanými cíli. Uvedené přínosy jsou užitečné pro rozšíření znalostí simulačních metod v oblasti virtuálního testování obráběcích strojů i využitelné v praxi. Navržená simulační metoda byla ověřena experimentem (připomínky k experimentu viz předchozí kapitola). Bylo by dobrým zakončením vlastní práce, kdyby autor s využitím vytvořeného nástroje navrhl virtuální změnu konstrukce stroje, aby zlepšil jeho chování.

## Význam pro praxi a rozvoj vědního oboru

Celá disertace je hodnotná pro praxi i rozvoj poznání v oblasti stavby a simulací obráběcích strojů. Z pohledu rozvoje poznání v oboru považují za přínosné zejména identifikování významnosti nelineárního strukturálního chování stroje s ohledem na predikci samobuzeného kmitání, tj. omezenost platnosti lineárních modelů, které jsou obvykle v této oblasti využívány. Za přínos pro praxi považují vytvoření metodiky kosimulace stability obrábění v časové oblasti s nelineárním modelem strukturálního chování stroje pro zpřesněnou predikci mezi stability při zapichovacím soustružení.

## Formální úprava disertační práce a její jazykové úroveň

Práce vykazuje celou řadu různých druhů formálních nedostatků:

1. Cíle práce jsou definovány bez jasné vazby na stávající stav poznání v řešené oblasti. Přehled literárních zdrojů by měl obsahovat i přehledové publikace v oblasti chatteru a jeho potlačování (např. z CIRP Annals). Přehled poznání není nesrozumitelně strukturovaný (není jasné zaměření přehledu) a nevyplývají z něho žádné závěry identifikující neřešená témata v této oblasti.
2. Autor používá špatnou nebo nesmyslnou odbornou terminologii. Namátkou vybírám: knife wear (str. 9), increasing stability of self-excited vibrations (str. 10), cutting stability of machine tools (str. 10), cutting force  $K_S$  (str. 15), estimation of vibration stability (79). Jak je vidět, ve shrnujících textech (úvod, závěrečné shrnutí) autor zaměňuje *vibration* a *machining*, přičemž mj. též uvádí (str. 9), že cílem je obrábění bez vibrací (vynucené kmitání je při obrábění přirozeným projevem procesu).
3. V seznamu použitých veličin není řada veličin a zkratk uvedena, např.  $u$  (str. 15),  $f_s$  (str. 15), SSV/CSS (str. 20),  $k_1$  a  $k_2$  (str. 34) a další.
4. Formální chyby v použitých obrázcích. U převzatých obrázků Fig. 4.5, 4.7. nejsou citované zdroje. Úhel  $\beta$  je zaveden jednou jako úhel mezi aktivní silou a radiální silou v směru  $x$  (Fig. 7.1) a podruhé jako úhel mezi aktivní silou a tangenciální silou v radiálním směru  $y$  (Fig. 8.1).
5. Autor není konzistentní v používaných jednotkách. Šířku obrábění *chip width* uvádí někdy v [mm] a jindy v [m], viz např. Fig. 12.2 a Fig. 12.3.
6. Autor není konzistentní v grafické prezentaci svých argumentů. Např. ve většině práce uvádí výsledky měření si simulací v diagramu stability (diagram šířka třísky – otáčky), ale při klíčové verifikaci experimentem porovnává frekvence vynuceného kmitání (Fig. 14.3). U převážné většiny diagramů stability (vypočítaných a naměřených) nejsou uvedeny technologické podmínky, pro které diagram platí.

Práce má nevhodnou strukturu kapitol – cíle by měly být formulovány až po přehledu poznání, srozumitelnosti by pomohlo i sdružení některých kapitol formou podkapitoly do jednoho většího celku. Srozumitelnosti textu by výrazně pomohly dílčí závěry kapitol. Kromě výše uvedených terminologických poznámek je text většinou formulován jasně. Text je doprovázen potřebným objemem vysvětlujících obrázků a grafů. Na některých obrázcích chybí vysvětlení – orientace souřadných systémů (např. Fig. 6.1) nebo vysvětlení veličin v legendě (např. Fig. 12.2). Celkově je formální úprava disertační práce na průměrné úrovni.

## Hodnocení předložených tezí disertační práce

Předložené teze dobře shrnují obsah disertační práce. Jedná se o reprezentativní výťah.

## Závěrečné zhodnocení

Doktorand správně identifikoval náročný problém vyskytující se v praxi, kdy nelineární strukturální vlastnosti stroje neumožňují spolehlivou predikci limitů stabilního obrábění s využitím lineárních modelů. Jím navržený simulační postup vede ke zpřesnění predikce stability obrábění. Tento postup byl ověřen zkouškami obrábění. Celá práce má však nevhodnou strukturu, tok myšlenek a návaznosti kapitol je nutno rekonstruovat ze znalosti problematiky v praxi, experimenty jsou nedostatečně popsány. Vytvořená metodika obsahuje řadu závažných chyb a s ní související úkol tedy nebyl splněn. Autor vůbec nezpracoval třetí definovaný cíl práce (*Analysis of the possibilities of nonstructural increase of cutting stability of machine*). Ačkoliv jsou prezentované modely a jejich využití přínosné pro průmyslovou praxi i pro rozvoj poznání v oboru obráběcích strojů, **disertační práci v této podobě nedoporučuji k obhajobě**. Uvádím zde hlavní připomínky, po jejichž zpracování by práce mohla být k obhajobě doporučena:

1. Cíle práce musí navazovat na předcházející popis aktuálního stavu poznání. Stavem poznání je myšlena jak znalost uvedená v dostupných publikacích, tak i praktická pozorování a zkušenosti z praxe a provozu strojů, tyto jsou doktorandovi dostupné.
2. Práce musí používat správnou odbornou terminologii. U simulací je nutno úplně popsat použité matematické modely a okrajové podmínky, za kterých byly simulace provedeny. U měření je nutno popsat měřený systém, použité souřadné systémy, umístění měřidel a jejich a orientaci a další zásadní podmínky testu (např. použité řezné nástroje, řezné podmínky, tj. řezná rychlost, posuvová rychlost nástroje a záběrové podmínky a materiál obrobku).
3. Práce musí naplnit všechny definované cíle.
4. Jednotlivé kapitoly by měly končit dílčími závěry, které uvozují odborný text navazující kapitoly, takže je možno dobře sledovat tok a rozvoj myšlenek celé práce.
5. Práce musí správně citovat všechny použité zdroje. Seznam použitých značek a zkratk musí být úplný.

## Otázky na doktoranda k zodpovězení při obhajobě

1. Jaký typ a velikost lineárního vedení je na testovaném stroji použit v ose Z (vyšetřovaná osa)? Jaká je hodnota předepínací síly pro toto vedení a jak velké reakční síly na vozících vedení mohou vzniknout pro realistické zatěžování řezným procesem?
2. Prosím uveďte diagram síla-deformace, ze kterého následně vyplývá graf tuhost-deformace na Fig. 8.3.
3. Fig. 8.5 ukazuje ovlivnění výsledků predikované meze stability velikostí procesní síly (předpokládám, že se jedná o procesní sílu – v grafu chybí popisky). Mohl byste komentovat změnu tuhosti systému při rostoucím procesním zatížení, ev. to doprovodit přímo ukázkou změny dynamické poddajnosti?
4. Na konci kapitoly 8.5 zmiňujete „klasickou analýzu chatteru“ a dále zmiňujete možnosti „bifurkací ve struktuře“. Prosím vysvětlíte, jakou konkrétní metodu výpočtu máte na mysli a jakou „bifurkací struktury“ uvažujete.
5. Popište postup a okrajové podmínky měření prezentovaného ve Fig. 7.3. Jaké části stroje je uvedena tuhostní charakteristika?

6. Vysvětlíte, jak spolu souvisí měřené statické vlastnosti systému (kap. 7.2) a simulované dynamické vlastnosti (kap. 7.3). Čím je dán velký rozdíl v predikované šířce třísky (Fig. 7.6), když minimum reálné části dynamické poddajnosti (Fig. 7.5) vykazuje téměř shodnou hodnotu?
7. Popište, čím jsou způsobené skokové změny trendů vlastních frekvencí ve Fig. 10.3 na frekvenci okolo 400 Hz. Jedná se již o odlehnutí kontaktního páru?
8. Jaký je vztah mezi reznými silami v práci označovanými jako  $F_s$  a  $F_c$ ? Byly tyto síly použité v simulacích nějak verifikovány pomocnými technologickými experimenty? Z jakých zdrojů jste získali hodnotu úhlu  $\beta$ ?
9. Popište postup a zátěžové a technologické podmínky experimentu v kap. 13.3. Je možno do výsledků měření na Fig. 14.2 zakreslit výsledky simulací?
10. Jak souvisí dynamická poddajnost na Fig. 7.5 a Fig. 6.2? Z textu mám pocit, že se jedná o ten samý přenos ve stejném systému, ale křivky mají různý charakter.
11. Pro jaké technologické podmínky jsou vypočteny diagramy stability na Fig. 7.7? Existuje k této simulaci nějaká verifikace měřením z úvodních testů popsaných v kap. 6?

Posudek zpracoval:

V Praze, 6.6.2023

.....  
doc. Ing. Petr Kolář, Ph.D.

Ústav výrobních strojů a zařízení

Fakulta strojní ČVUT v Praze

