

## Oponentský posudek na písemnou disertační práci

**Autor práce:** Ing. Drahomír Rychetský

**Název práce:** Modelování poddajných rotujících těles s kontaktními vazbami

**Oponent:** Ing. Luděk Pešek, CSc., Ústav termomechaniky AV ČR, v.v.i., Dolejškova 5, 182 00 Praha 8

Předložená disertační práce je věnována velmi důležité oblasti strojírenství a mechaniky těles, a to numerickému modelování rotujících těles, jako např. oběžných kol turbín a proudových strojů, s uvažováním vlivu rotace a kontaktními vazbami se suchým třením. Práce se zabývá výzkumem nových metod a přístupů k tvorbě redukováných modelů pro dostatečně přesné a přitom časově efektivní výpočty dynamického chování těchto mechanických systémů a jejich dalšímu ladění z hlediska maximálního potlačení nežádoucích vibrací.

Disertační práce je zpracována přehledně do kapitol. V první kapitole je uvedení do dané problematiky s podrobnou rešerší. V druhé kapitole je popsána teorie navržených a odvozených redukováných MKP modelů s vazbami a se zahrnutím vlivu rotace do modelů lopatek, což autor považuje za klíčovou pasáž textu. Pro redukcí modelu 3D lopatek byla použita buď nosníková teorie a pro složitější geometrie lopatek metoda modální redukce.

V třetí kapitole je propojení komerčního programu ANSYS s vlastními vytvořenými programy v jazyku Matlab jak pro konzervativní, tak nekonzervativní modely lopatek a s uvažováním vlivu rotace.

Prokázáním funkčnosti a přesnosti navržených modelů lopatek a kontaktu na numerických simulacích je hlavním obsahem kapitoly 4. Nejprve je řešena dvojice prizmatických lopatek s vazbou v bandáži, kde je kontakt nahrazen maticí kontaktních tuhostí s odhadem kontaktní tuhosti podle Rivina. Pro dvojici těchto lopatek s kontaktním předpětím a torzní statickou deformací nosníků je kontakt modelován silovou metodou.

V páté kapitole jsou prezentovány výsledky výpočtu reálného oběžného kola se sto lopatkami svázanými rhombickou bandáží s citlivostní analýzou pro různá předpětí v kontaktech, třecí součinitel a úhlovou rychlost otáčení. Pro vybuzení vibrací bylo použito buď skokové nebo dýzové buzení.

Výsledky numerických simulací jsou průběžně porovnávány s výpočtem v programu ANSYS. Z výsledků plyne dobrá shoda.

### Otázky a komentáře do diskuze:

- Je konstatováno, že kontaktní model je vhodný jen pro malé relativní posuvy. Co to v praxi představuje? Jedná se pouze o mikroprokluzu? U výchylek dvojice lopatek či celého kola s rhombickou bandáží však vychází velice malé výchylky v řádech setin milimetru. Proč nebyly také provedeny numerické zkoušky pro větší amplitudy kmitání, kde se více projeví prokluzu v třecích vazbách?
- U kola s rhombickou bandáží se konstatuje, že vzhledem k tuhým lopatkám není velká citlivost odezvy na suché tření? Proč byla volena velká tuhost lopatek? Proč nebyla vyhodnocena závislost na amplitudě buzení?
- U skokového buzení dochází k víceharmornické transienční odezvě? Proč nebylo použito např. doznívání z rezonančního kmitání?
- Pro ověření přesnosti navržených metod byl použit komerční program ANSYS. U úloh s třením však není popsáno, jak byl třecí kontakt v ANSYSU nastaven?
- U lopatek s rhombickou bandáží a předpětím v kontaktech dochází vlivem rotace k uvolňování kontaktních vazeb. Byly tento jev pozorován u analyzovaného případu oběžného kola?
- Proč nebyl vyhodnocen poměrný útlum či logaritmický dekrement vlivu suchého tření? Jaký je jeho poměr u testovaných případů vzhledem k materiálovému a ostatnímu strukturálnímu tlumení? Jak vycházel poměrný útlum u experimentu u kola s rhombickou bandáží?
- Model lopatek zahrnuje vliv rotace včetně gyroskopických účinků. Jak byl tento vliv testován? Byl jeho účinek důležitý nebo zanedbatelný na výslednou dynamiku zkoumaných lopatkových systémů.


### Drobné textové chyby:

- 18. Řádek na str. 4 ...stic-slip... namísto ...stick-slip...
- 3. Řádek na str. 48 ..gysorkopický... namísto ...gyroskopický...

### Závěrem

Předložená práce shrnuje na vysoké úrovni metodiku redukce modelů rotujících těles s uvažováním vlivu rotace a kontaktními vazbami se suchým třením. Autor prokázal, že ovládá vědecké metody, má velmi dobré odborné znalosti a je schopen samostatné tvůrčí práce. Jeho práce splnila stanovené cíle a má původní přínos v metodice modelování redukovaných rotujících systémů aplikovatelné v dynamice oběžných lopatkových kol. Výsledky byly autorem průběžně publikovány na domácích i zahraničních konferencích. Po formální stránce je zpráva zpracována přehledně a na velmi pěkné grafické úrovni. Doporučuji přijmout práci k obhajobě.

V Praze dne 16.8.2018



Ing. Luděk Pešek, CSc.



## Oponentský posudek disertační práce

Drahomír Rychetský

### Modelování poddajných rotujících těles s kontaktními vazbami

#### 1. Úvod

Téma doktorské práce je zaměřeno na aktuální problematiku spojenou s modální analýzou rozsáhlých dynamických soustav. Rozsah práce je 121 stran a je rozdělena do 6 kapitol, přičemž stěžejní jsou tři. Jsou to kapitoly 2, 3, 4 a 5. Ty jsou zaměřeny na výpočtové modelování.

#### 2. Dosažení stanoveného cíle

Cíle, kterých má disertant dosáhnout jsou uvedeny v kapitole 1. První cíl je zaměřen na analýzu dynamiky lopatek s kontaktními vazbami, dále v kapitole 3 je popsán postup dat z programového prostředí ANSYS a v kapitole 5 je popsán model lopatek s diskem. Lze konstatovat, že cíle byly splněny.

#### 3. Úroveň rozboru současného stavu řešené problematiky

Nástin technických aplikací i teoretické analýzy je uveden v kapitole 1. Je však nutno konstatovat, že této problematice mohla být v práci věnována větší pozornost. Zejména v návaznosti na aplikaci nových přístupů v dynamice konkrétních rotorových soustav.

#### 4. Teoretický přínos práce pro obor

Teoretický přínos práce spatřuji zejména v aplikaci nových přístupů v oblasti výpočtového modelování. Je proveden rozbor řešení, sestavení matematického a výpočtového modelu.

#### 5. Praktický přínos disertační práce

Byly zpracovány matematické a výpočtové modely jak stávajících, tak i nových metod, které jsou zaměřeny na snížení řádu úlohy, čímž se šetří výpočtový čas. To, že se podařilo aplikovat algoritmy na vybrané úlohy, jenom podporuje to, že práce má velký praktický přínos. Velký praktický přínos rovněž spatřuji v zahrnutí procedur do jednoho z nejužívanějších výpočtových systémů, jakým je ANSYS. Poněkud postrádám uvedení na konkrétní technickou aplikaci.

#### 6. Vhodnost použitých metod řešení a postupu při řešení problematiky

Jak již bylo řečeno, všechny použité algoritmy, byly zpracovány ve formě výpočtových modelů. Metody tvorby matematických i výpočtových modelů považuji za vhodné a správné. Možná mohly být detailněji uvedeny některé algoritmy pro zpracování výsledků z více výpočtových systémů.

## 7. Způsob, jakým byly použité metody aplikovány

Výpočtové metody byly zpracovány ve formě, která je vhodná pro numerickou analýzu a aplikovány na vybraném okruhu úloh. I když se jedná o úlohy s relativně nevelkým počtem stupňů volnosti (prizmatická lopatka), způsob aplikace je správný. Přesto se domnívám, že této oblasti mohlo být věnováno více pozornosti. V současné době lze využít např. ANSYS pro sestavení matic hmotnosti a tuhosti, se kterými lze dále pracovat, mimo toto prostředí, jak je v práci uvedeno.

## 8. Prokázané znalosti v oboru

To, že se disertantovi podařilo sestavit matematický a výpočtový model, včetně praktických aplikací ukazuje na skutečnost, že disertant se velmi dobře orientuje v daném oboru mechaniky.

## 9. Formální úroveň práce

Práce je psána velmi pečlivě s vhodným členěním kapitol. Na druhou stranu je nutno konstatovat, že větší čtivosti práce by v řadě případů prospělo komentování výsledků výpočtového modelování, včetně návazné analýze ve spektrální oblasti. Některé připomínky uvádím dole.

## 10 Připomínky k práci

### Obecné připomínky

- Doporučuji zavést jednotný systém pro označení jednotek úhlových rychlostí.
- Drobné překlepy neuvádím, ale na druhou stranu je nutno konstatovat, že jejich relativně hodně.
- Rovněž neuvádím nepřesnosti ve formulaci, např. „Dynamické určování tuhosti“ na str. 36.
- Všechny vztahy by bylo vhodné číslovat a detailněji komentovat význam členů.
- Bylo by vhodné u všech číselných hodnot uvádět i jednotky.
- Bylo by vhodné u všech výpočtů uvádět veškerá vstupní data.
- Řada obrázků mohla být v práci detailněji komentována (viz např. str. 82)

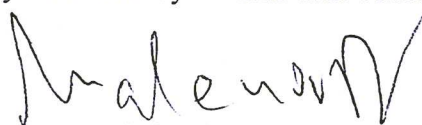
### Otázky k obhajobě

- Vysvětlíte pojem „rhombická lopatka“.
- Vysvětlíte přístup k modální analýze se zahrnutím třecích sil ve vazbě.
- Vysvětlíte export dat z ANSYS, a obecně i z experimentu do výpočtového modelu v jiném programovém prostředí.
- Popište přístup k zahrnutí dat získaných z experimentu.

## 11. Závěr

Disertační práce je zaměřena velmi aktuální problematiku jakou je výpočtové modelování zaměřené na stanovení dynamických vlastností části rotorové soustavy, jakou je olopatkovaný disk. Disertant prokázal schopnost a připravenost k samostatné činnosti v oblasti výzkumu a vývoje a tím splnil podmínky pro udělení titulu doktor. Po úspěšném obhájení práce tedy doporučuji, aby Drahomíru Rycheckému byl udělen titul doktor.

v Brně 26.8.2018



Eduard Malenovský