



Oponentský posudek na písemnou disertační práci

Autor práce: Ing. Jan Rendl

Název práce: Nelineární dynamika rotujících soustav s kluznými ložisky

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

Předložená disertační práce se zabývá matematickým modelováním rotačních soustav s kluznými ložisky a podrobným zkoumáním jednotlivých typů kluzných ložisek a jejich vlivu na chování rotujících soustav. Je v ní popsán komplexní model radiálního kluzného ložiska pro modelování běžně používaných typů kluzných ložisek. Dále jsou popsány metody modelování vzájemné interakce mezi rotorem a ložiskovými částmi a je formulována metodika posuzování stability.

Disertační práce je zpracována přehledně do deseti kapitol. První kapitola předkládá podrobnou řešerši a uvedení do problematiky kluzných ložisek. Druhá a třetí kapitola jsou věnovány postupnému odvození modelů kluzných ložisek a metodám pro zkoumání stability. Čtvrtá kapitola je zaměřena na výpočtové metody, mj. analytického přístupu a především numerické metody - metody konečných diferencí. Vyvinuté výpočetní programy jsou použity k analýze válcových ložisek v páté kapitole, ložisek s pevným profilem v šesté kapitole a ložisek s naklápěcími podložkami v sedmé kapitole. Tyto kapitoly obsahují i analýzu výsledků a výsledky statických a dynamických simulací a ověření modelů. Experimentální ověření

je obsahem osmé kapitoly, kde je porovnáván průběh nestabilního chování soupravy rotoru Bentley Nevada RK 4 a odpovídajícího výpočtového modelu během rozbíhání a sjždění rotoru z definovaných otáček. Texturovaná kluzná ložiska jsou analyzována v deváté kapitole. V této kapitole jsou rovněž uvedeny výsledky experimentálních měření a porovnání s výsledky výpočetního modelu. Desátá kapitola shrnuje výsledky disertační práce. Pro lepší přehlednost kapitol jsou obsáhlé analytické vzorce a strategie řešení uvedeny v přílohách na konci práce.

V první části je postupně odvozen komplexní model radiálního kluzného ložiska. V případě naklápěcích segmentů ložisek se předpokládá, že pohyb tuhé podložky uložené na viskoelastickém nosiči je rovinný. Řídí se Reynoldsovou rovnicí neznámé tlakové pole v mazivu cirkulujícím v ložiskové mezeře. Tlakové pole se počítá pro každou podložku nebo konkrétní ložiskovou pánve zvlášť. Gümbel podmínka byla použita pro model kavitace. Definované souřadnicové systémy pevně připojené k podložkám umožňují popis ložiskové mezery pomocí vzorců pro válcová kluzná ložiska. Pokud chybí olejový film přenášející zatížení mezi rotorem a podložkou, jsou hydrodynamické síly nahrazeny silami pružnými, které vznikají v důsledku kontaktu pevných těles. Posouzení stability systému se provádí pomocí tuhosti a koeficientů tlumení, které jsou výsledkem linearizace hydrodynamických sil.

Základní metodou pro řešení Reynoldsovy rovnice v práci je metoda konečných diferencí metoda použitelná pro všechny typy ložisek, tj. válcová, eliptická, přesazená a s naklápěcími segmenty. Vlastnosti této metody jsou zkoumány pro válcové kluzné ložisko. Metoda konečných diferencí je vhodná i pro výpočet přírodních otvorů a drážek a změn profilu ložiska způsobených texturováním pláště ložiska.

Pro limitní případy Reynoldsovy rovnice, tj. aproximaci nekonečně krátkých a dlouhých ložisek, existuje řešení v uzavřeném tvaru. Vyhodnocení hydrodynamické síly pro ložiska s konečnou délkou se provádí pomocí korekčních polynomických funkcí. Koeficienty tuhosti a tlumení pro ložiska konečné délky jsou pak odvozeny na základě korigovaných polynomů.

Vyvinuté programy jsou určeny pro statické výpočty ložisek, posouzení stability systému ložisko-rotor a simulace v časové oblasti: a) odezvu rotoru na buzení nevývažkem; b) přechodových dějů při rozběhu a doběhu. Vypočtené odezvy se analyzují pomocí: detekce limitních rychlostí, bifurkačních diagramů, FFT analýzy, fázových portrétů a Poincareho map.

Otázky a komentáře do diskuze:

- Pro modelování pohybu čepu v ložiscích byl použit 2dof model umožňující použití 2D model ložisek s korekcemi. Jaká jsou limity tohoto předpokladu na ohybové kmitání rotoru a natočení čepu rotoru v ložisku?
- Při "flutteringu" naklápěcích segment je stále splněna podmínka laminárního proudění?
- Pro modelování kontaktních sil byly použity elastické síly. Byly uvažovány i třecí síly v kontaktu segmentů s čepem?
- Na str. 57 je vyhodnocena chyba statické polohy čepu mezi referenčními hodnotami [38] a navrženým výpočtním modelem v závislosti na Sommerfeldovu číslu (S). Proč jsou největší chyby při nízkých hodnotách S ?

Drobné formální nedostatky:

- Pro lepší přehlednost chybí seznam značek a zkratk na začátku práce.
- V práci se často objevuje termín „in-house software“ (23x). Je tento program použitelný i pro další zájemce? Má nějaké manuály? Něco jako „open source“.

Závěrem

Předložená práce na vysoké úrovni popisuje metody modelování kmitání a dynamické analýzy rotorů turbodmychadel. 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 kluzných ložisek a vázaného kmitání rotorů kluzných ložiscích. Jeho výstupem je i komplexní výpočtní nástroj pro statické a stabilitní výpočty chování systému rotor-ložisko, jež je možné dále rozvíjet o další jevy související s hydrodynamickým mazáním. Výsledky byly autorem průběžně publikovány v odborných časopisech (WOS, SCOPUS) a 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 3.3.2022

Ing. Luděk Pešek, CSc.

Oponentní posudek disertační práce
Ing. Jana Rendla
**Nonlinear dynamics of rotating
systems with journal bearings**

Předložená disertační práce (DP) psaná v anglickém jazyce obsahuje 133 stran textu, obrázků a tabulek. Výčet pramenů je velmi rozsáhlý – obsahuje 102 titulů cizích autorů, 10 titulů autora citovaných v DP a 19 titulů autorových prací se vztahem k DP. Téma práce je rozčleněno do 10 kapitol, použité a citované literatury, dvou dodatků a českého a anglického shrnutí. Studium DP značně komplikuje absence seznamu použitého označení a zpočátku i užití zkratk. Na druhé straně je zapotřebí pochválit autora za přísné dodržování citací prací cizích autorů a i svých prací použitých k vypracování hodnocené disertace. V souladu se Studijním a zkušebním řádem ZČU uvádím:

- a) **Zhodnocení významu disertační práce pro obor.** Předložená DP pojednává o řešení velmi složitého multidisciplinárního problému, jímž je nelineární kmitání rotoru uloženého na kluzných ložiskách různých typů, jimiž jsou válcová ložiska s pevným profilem a ložiska s naklápěcími segmenty. Kromě běžných ložisek je značná pozornost věnována i speciálním ložiskům s texturovanými povrchy pánví užívanými pro zvyšování meze stability. Těžiště práce je v problematice kluzných ložisek.
- b) **Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění určeného cíle.** V disertační práci jsou definovány následující cíle:
- Odvození jednoduchého a úplného modelu různých typů ložisek v interakci s rotorem prostřednictvím tenkého kapalinného filmu nebo tvrdým stykem je-li film přerušen nebo chybí.
 - Vývoj komplexního vlastního softwaru pro statickou analýzu, analýzu stability a časovou simulaci rotorů uložených v různých typech ložisek s důrazem na nelineární dynamiku rotorů.
 - Určení mezních otáček a výzkum různých ložisek v nestabilních režimech za využití různých přístupů modelování a studium jejich vlivu na chování systému včetně jevů, jako jsou olejové víření, hystereze mezních otáček a flutter nosných ploch.
 - Implementace výpočetního modelu pro texturovaná ložiska a analýza dopadu texturování na stabilitu systému.
 - Experimentální ověření výpočtově určené stability válcového a texturovaného ložiska.

Je škoda, že se v cílech DP neobjevila problematika vývoje tepla v nosné vrstvě olejového filmu. Protože teplota oleje podstatně ovlivňuje jeho viskozitu, lze očekávat, že se vlivem proměnné teploty filmu změní i rovnovážná poloha středu čepu a tím i dynamické vlastnosti filmu. Že i autor je si toho vědom, objevuje se studium vlivu teploty oleje ve výhledu budoucích prací. Je pravdou, že zahrnutí vývoje teploty do výpočtu celou věc značně zkomplikuje jak ve výpočtu vlastností celé sítě tak i v nutnosti nové definice Sommerfeldova čísla také závislého na teplotě olejového filmu.

Problematické je i dodržení přesnosti geometrie nosné vrstvy zejména na mini zařízení rotor-kit s průměrem čepu ložiska 1 palec. Potom je geometrie měřená v mikronech těžko

dodržitelná jak výrobně a montážně tak i provozně při měření. Proto volba průměru čepu ložiska při simulačních výpočtech může poskytnout podstatně důvěryhodnější výsledky, které však nejsou ověřeny měřením.

S ohledem na veliký rozsah výsledků a jejich prezentací na konferencích lze konstatovat, že definované cíle byly dosaženy v plném rozsahu. Z předložených materiálů vyplývá, že se pro řešení použily vhodné metody a to i ve vlastních blíže nedefinovaných programech s dobrými výsledky z jejich běhů, jak je v práci ukázáno na množství diagramů ze simulačních běhů. Jejich výsledky jsou porovnávány s japonskými výsledky z knihy uvedené v bibliografii pod číslem [38] - Someya ed., Journal-Bearing Data Book. Konstatuje se, že rozdíly jsou zejména pro režimy s nízkými Sommerfeldovými čísly, což se dalo očekávat.

Není zcela lehké stručně charakterizovat strukturu DP, protože se podstatně liší od jiných disertací. Zatímco ty obvykle definují problém, který pak zpracovávají (např. odvozováním), předložená disertace pojednává o hotovém díle, jehož řešení je většinou v citovaných článcích nebo prezentacích. To pak komentuje a v případě potřeby se přímo odvolává na výsledky uvedené v citované literatuře. Dílčí problémy se probírají v příslušných kapitolách práce, jimž patrně nejlépe vyhovuje termín esej. Ústav pro jazyk český ve svém Akademickém slovníku uvádí, že esej je "útvár duchaplně a na vysoké (umělecké) stylistické úrovni pojednávající o otázkách kultury, filozofie, aktuálních společenských otázkách, a pod." Rozšíříme-li předmětnou oblast eseje z kulturních nebo společenských otázek i na technické otázky, pak lze předloženou DP označit za soubor technických esejí na téma kluzných ložisek v interakci s jimi nesenými rotory.

- c) **Stanovisko k výsledkům DP a k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele DP.** Výsledky disertační práce jsou obdivuhodné a značně rozsáhlé. To je patrně důsledek toho, že jsou i výsledkem týmového řešení rozsáhlých projektů. To se v DP nezastírá, ale nikde se neuvádí podíl autora na dosažených výsledcích. Autor v bibliografii uvádí 102 pramenů od cizích autorů a 29 prací s jeho účastí. Pro představu - ve všech 29 citovaných byl alespoň spoluautorem, dokonce v 9 byl prvním autorem ve skupině, případně v 6 z nich byl jediným autorem. Jako spoluautoři byli nejčastěji Ing. Smolík PhD (20x), Ing. Dyk PhD. (9x), doc. Ing. Hajžman PhD. (7x), doc. Dr. Ing. Polach (6x) a ostatní (9x).

Přínos předkladatele DP je nepopíratelný a spočívá v dosažení souladu mezi teoretickými pracemi z oblasti proudění vazké tekutiny proměnlivou mezerou mezi povrchy pánve a čepu při respektování konstrukčních prvků reálných ložisek takřka obecných tvarů a prostředky výpočetní techniky a jejich efektivním využíváním pro účely analýzy vlastností díla.

Bývalo dobrým zvykem, že se při hodnocení účasti na výsledcích společného díla uváděl (procentní) podíl každého ze spoluautorů na nich. Skončila již tato praxe? Bylo by vhodné, aby pracovníci zodpovědní za řešení projektů, v nichž výsledky vznikly (doc. Dr. Ing. Polach, příp. doc. Ing. Hajžman PhD.), se při obhajobě vyjádřili k podílu hodnoceného, protože oponent to z informací uvedebných v DP udělat nemůže. Při studiu DP vznikly následující otázky:

- Byla-li většina simulací a výpočtů dělána pomocí "in-house" softwaru, proč je to muto klíčovému prvku disertace věnována pouze polovina strany 111 disertace?
- Jak je možno rozumět poznámce v odst. 10.2, že "doplňek A byl pro konečná ložiska původně sestaven autorem."?
- Proč není práci na vlastním softwaru věnována větší pozornost, když umožnila jednak zrychlit výpočty tak, že byly vůbec realizovatelné v rozumném čase, a potom získat v mnoha směrech původní výsledky a i podklady pro vlastní závěry?

- d) **Vyjádření k systematice, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce.** Disertační práce Ing. Jana Rendla je zpracována vzorově až na výše uvedený chybějící přehled použitého označení. Nejen, že je zpracována perfektně po formální stránce, ale i členění do kapitol je dobře promyšlené, takže se již jednou řečené informace neopakují na více místech. Práce je napsaná v angličtině živým jazykem, takže se i dobře čte a usnadní tak i prezentace na konferencích a jiných akcích.
- e) **Vyjádření k publikacím studenta.** Autor hodnocené DP se staral i o informování odborné veřejnosti o výsledcích svého výzkumu. Za pětileté období svého doktorandského studia se podílel na 25 příspěvcích vydaných tiskem nebo přednesených na tuzemských i zahraničních konferencích. Protože ve všech případech procházejí tyto příspěvky posuzovacím procesem a jen ty, které byly dobře hodnoceny se zveřejňují, je i počet jejich zveřejnění dostatečným průkazem jejich kvality.
- f) **Jednoznačné vyjádření oponenta, zda doporučuje či nedoporučuje disertační práci k obhajobě.** Autor DP dostal nelehký úkol, totiž zpracovat nově problematiku, která se začala řešit již před 150 lety, takže na ní vyrostla řada uznávaných vědců a nutno říci, že tato práce přispěla opět k pokroku v dané oblasti a tím i v technice, která výsledky výzkumu využívá. Je napsána velmi pečlivě, takže v ní nelze nalézt chyby ani překlepy. Doporučuji proto, tuto disertační práci k obhajobě před příslušnou komisí.

V Plzni, dne 20. února 2022

