

## Oponentský posudek na písemnou disertační práci

**Autor práce:** Ing. Luboš Smolík

**Název práce:** Modelování kmitání a dynamická analýza rotorů turbodmychadel

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

Předložená disertační práce se zabývá modelováním ohybového kmitání rotorů turbodmychadel uložených v kluzných ložiscích s plovoucími pouzdry. Numerické simulace dynamického chování turbodmychadla jsou zaměřeny k navržení efektivních radiálních ložisek turbodmychadla. Experiment provedený v součinnosti s výrobcem má sloužit k verifikaci numerických simulací. Výzkum rychloběžných turbodmychadel je spojen s vývojem moderních přeplňovaných motorů ke snížení emisí oxidu uhličitého z automobilové dopravy.

Disertační práce je zpracována přehledně do kapitol. V první kapitole je uvedení do dané problematiky s podrobnou rešerší. V druhé kapitole jsou odvozeny pohybové rovnice popisující ohybové kmitání rotoru v kluzných ložiscích jako vázaného problému metodou konečných prvků. Třetí kapitola se podrobně zabývá modelováním hydrodynamického mazání v radiálních kluzných ložiscích s plovoucími pouzdry. Čtvrtá je zaměřena na výpočet hydrodynamických sil působících na hřídel rotoru v ložiscích. Pátá kapitola je věnována základním metodám pro analýzu vibrací točivých strojů. Pomocí simulací je zde také vyhodnocen vliv parametrů navrženého modelu ložiska na velikost hydrodynamických sil. V šesté kapitole je nejprve popis použitého numerického modelu k analýze sériově vyráběného rotoru. Dále je prezentována analýza výsledků ohybového kmitání a ztrát numerických simulací na různé vlivy – nevývaha, ložisková vůle, proudění oleje mazacími otvory v plovoucích pouzdrech. V závěru této kapitoly je ukázán způsob snížení ztrát ve vnitřním olejovém filmu pomocí podélných drážek. V sedmé kapitole jsou popsány zkoušky na experimentálním modelu a metody měření. Výsledky těchto zkoušek, jako vibrace rotoru, poměrná rychlost rotujících plovoucích pouzder, sloužily k verifikaci numerického modelu.

V osmé závěrečné kapitole je doporučení pro další směry výzkumu a shrnuty hlavní přínosy práce:

- A) Za hlavní přínos lze považovat navržení konstrukčního řešení kluzného ložiska s plovoucími pouzdry, které podle výpočtu může vést ke snížení amplitud absolutního kmitu čepu hřídele turbodmychadla v ložisku o více než 40%. Dále u nového návrhu ložiska dochází ke snížení hydrodynamických ztrát v ložiskách o více než 10%.
- B) Do výpočetního modelu ložiska byl zaveden efektivní model laminárního proudění oleje mazacími otvory v plovoucích pouzdrech.
- C) Byla navržena metoda pro odhad provozních vůlí radiálního ložiska.
- D) Byl realizován experiment pro verifikaci teoretických výsledků.

Podstatná část práce se věnuje numerickému modelování hydrodynamických ložisek s plovoucími pouzdry, jejichž vlastnosti jsou určující pro chování (parametrické rezonance a kombinované rezonance) rotoru turbodmychadla. Při modelování kluzného hydrodynamického ložiska autor velmi pečlivě pracoval s literaturou a použil známý model založený na Reynoldsových rovnicích. Dále jsou v práci odvozeny vztahy popisující úhlovou rychlost plovoucího pouzdra v ložisku, proudění maziv otvory v pouzdře a provozní vůli ložiska. Pro numerické řešení vázaného problému modelu ložiska s pohybovými rovnicemi rotoru turbodmychadla byly vytvořeny programy pro jeho řešení. K ověření tohoto komplexního numerického modelu byl sestaven experiment a byly získány cenné výsledky dynamického chování turbodmychadla roztáčeného vzduchem.

#### Otázky a komentáře do diskuze:

- Jaký numerický model ložisek byl použit pro simulace dynamického chování turbodmychadla – analytické řešení, Bastaniho aproximativní řešení či řešení metodou konečných prvků?
- Jaký je vztah frekvencí subharmonických složek (sub1, sub2, sub3) k odhadnutým vlastním frekvencím rotoru turbodmychadla? Vztah mezi obrázky 6.7 a 6.8? Sub1 složka vztažená k dopřednému kónickému kmitání rotoru je frekvenčně jinde než je odhadnutá vlastní frekvence tohoto módu kmitání.
- V práci se konstatuje, že teoretické výsledky byly verifikovány experimentem. Výsledné grafy vertikálního kmitání hřídele u výpočtu a experimentu se však kvalitativně liší. Subharmonické složky u experimentu jsou slovně komentovány, ale chybí jejich označení v diagramech obr. 7.14 a 7.15. Jaké bylo kritérium pro posouzení shody s výpočtem? Jaký návrh ložiska byl pro ověření zvolen?

#### Drobné formální nedostatky:

- Obrázky 5.8b, d, f a 6.8a) – popisky nejsou dostatečně zřetelné.
- V abstraktu, poslední paragraf - ..rychlosti plovoucích s využitím.. namísto ...rychlosti plovoucích pouzder s využitím..

#### 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 vázaného kmitání rotoru turbodmychadla v hydrodynamických ložiscích. Dále přináší navržení nového konstrukčního řešení kluzného ložiska s plovoucími pouzdry ke snížení vibrací a ztrát. 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 22. 3. 2019



Ing. Luděk Pešek, CSc.

# OPONENTSKÝ POSUDEK

## DOKTORSKÉ DIZERTAČNÍ PRÁCE

**Doktorand :** Ing. Luboš Smolík  
**Název práce :** Modelování kmitání a dynamická analýza rotorů turbodmychadel  
**Školitel :** Ing. Michal Hajžman, Ph.D.  
**Oponent :** prof. Ing. Jaroslav Zapoměl, DrSc.

Předložená disertační práce se zabývá rozvojem matematického modelování rotorů turbodmychadel automobilových motorů a analýzou jejich kmitání. Skládá se z osmi kapitol, z nichž první je úvod a osmá závěr, ze seznamu literatury a jedné přílohy.

V úvodu práce podává dizertant základní popis turbodmychadla, popisuje jeho funkci, účel použití a pracovní podmínky. Rovněž se věnuje popisu současného stavu poznání v této oblasti a definuje cíle své dizertační práce. Druhá kapitola je věnována modelování jednotlivých komponent turbodmychadla (hřídele, lopatkových kol, ložisek) a modelování jejich zatížení. Ve třetí kapitole se autor zaměřuje na odvození Reynoldsovy rovnice a její modifikace pro složitější tribologické podmínky. Čtvrtá kapitola je věnována výpočtu hydraulických sil v hydrodynamických ložiskách a stanovení jejich tuhostních a tlumicích koeficientů. Pátá kapitola se zabývá charakteristikami ohybového kmitání rotorů turbodmychadel a metodami jejich analýzy. Šestá a sedmá kapitola tvoří základ práce. Autor se v nich zabývá analýzou kmitání sériově vyráběného rotoru turbodmychadla a měřením jeho ohybového kmitání. V závěru autor shrnuje hlavní přínosy své dizertační práce a formuluje doporučení pro další směr výzkumu.

### Věcné připomínky k práci

- Kapitoly 2 až 5, které tvoří téměř dvě třetiny rozsahu práce, mají silně kompilační charakter. Autor v nich odvozuje i ty vztahy a rovnice, které lze nalézt v řadě časopiseckých i knižních publikacích. Naopak složitější jevy, včetně těch, které lze očekávat u vysokorychlostních rotorů, nejsou popsány vůbec nebo jim není věnována dostatečná pozornost (např. vliv rychlosti rotace na tuhost hřídele, řešení Reynoldsovy rovnice s uvážením kavitace v ložisku, atd.).
- Na několika místech práce autor zdůrazňuje vliv teploty na chování ložisek a přesto, že uvádí řadu tvarů Reynoldsovy rovnice, žádný z nich vliv teploty nepopisuje. Chybí Reynoldsova rovnice s disipační funkcí.
- Zcela chybí informace o řešení Reynoldsovy rovnice s časově proměnnými okrajovými podmínkami, které jsou nutné pro stanovení tlakového rozložení v olejovém filmu, tvoří-li jeden z ložiskových povrchů otáčející se kroužek s otvory.
- V práci jsou uvedeny počítačové simulace v kapitolách 5.3 a v kapitole 6. V obou případech není dostatečně popsán výpočtový model. Není uvedena soustava rovnic, které popisují chování soustavy. Jsou uvedeny pouze odkazy na vztahy z první části práce, které jsou však neurčité. Zdá se, že autor nesestavoval vlastní programy a používal pouze komerční software.
- K provedení analýzy prezentované v kapitole 6 použil autor komerční software. Není partno, jaký tvar Reynoldsovy rovnice je použit (které jevy a jaké úrovně rozlišení jsou uváženy).

- Rovnice (2.56) popisuje kmitání rotoru nedostatečně. Chybí v ní vliv materiálového tlumení, které je příčinou samobuzeného kmitání rotoru. To popisuje cirkulační matice, která v rovnici chybí.
- Popis pohybu plovoucího kroužku v simulacích je nejasný.
- Všechny rovnice, které jsou uvedeny v práci, popisují ohybové kmitání rotoru. Ve výsledcích autor uvádí i výsledky torzních vlastních tvarů a příslušných vlastních frekvencí bez jakékoliv zmínky o teoretickém aparátu, který by popisoval jejich stanovení.
- V kapitole tři se autor zabývá odvozením vztahu pro tlakovou ztrátu v otvoru plovoucího kroužku, který propojuje vnitřní a vnější olejový film. Odvození tlakové ztráty je přijnejmenším diskutabilní. Proudění v otvoru kroužku lze těžko považovat za ustálené proudění v potrubí. Přechodové děje na okrajích otvoru budou významné zejména, protože tloušťka kroužku je malá a protože se v těchto místech mění dominantní směr proudění z obvodového na radiální a naopak. Navíc v další části práce není uvedeno, jak je toto odvození využito při formulaci okrajových podmínek.
- Výsledky počítačových simulací a výsledky měření nejsou kvantitativně srovnány a srovnání kvalitativní je jen minimální. Není ani uvedeno, zda byly provedeny pro stejné parametry soustavy.

### Formální připomínky k práci

- V disertační práci se vyskytuje několik pravopisných chyb. Na několika místech používá autor nečeských slov nebo obrátů, i když k nim existují běžné české pojmy.

### Dotaz k rozpravě :

V kapitole 6.5 je analyzováno proudění mazacími otvory v plovoucích pouzdrech. Jaké je fyzikální zdůvodnění tlaků  $p_s$  a  $p_o$  v jednotlivých modelech a ohledem na otáčení se plovoucího kroužku a jak jsou tyto okrajové podmínky realizovány ve výpočtových modelech?

### Závěr

Zvolené téma předložené disertační Ing. Luboše Smolíka je aktuální a je předmětem výzkumu na řadě pracovišť, o čemž svědčí např. řada prezentovaných konferenčních příspěvků v současnosti. Je nutné ocenit, že součástí práce jsou i výsledky experimentálních měření. Příliš velká část dizertační práce má komplilační charakter a další část práce je napsána značně neurčitě. Nejsou dostatečně popsány výpočtové modely, není jasně uvedeno na základě jakých teorií byly sestaveny (jsou uvedeny pouze odkazy na kompilační část práce). Dizertant odvodil nebo rozšířil několik vztahů (pro stanovení aerodynamických sil nebo pro popis proudění v otvoru plovoucího kroužku), ale není zřejmé, zda-li je použil, neboť k realizaci počítačových simulací používal (alespoň převážně) komerční software. Autor představil metodu pro odhad vůlí radiálních ložisek, ale už ne pro odhad vstupních parametrů (ekvivalentních teplot) nutných pro její použití. Experimentální verifikace výpočtových modelů spočívá pouze v souhlasu několika kvalitativních parametrů. Cíl práce "Implementovat výpočtový model reálného turbodmychadla" je natolik neurčitý, že se k němu nelze vyjádřit. Cíl "Formulovat úlohu dynamické analýzy rotoru turbodmychadla zahrnující reálné provozní podmínky a navrhnout vhodné řešení" je v práci řešen jen částečně. V úvodu práce se uvádí, že předmětem zkoumání jsou turbodmychadla určená pro automobilové motory. Jízda, jízdní manévry a další provozní situace jsou zdrojem dalšího buzení, které má vliv na kmitání turbodmychadel. Při tom žádný z těchto faktorů není v práci ani zmíněn.

Pro vypracování práce disertant použil moderních metod a postupů.

Ze seznamu vlastních publikací vyplývá, že se dizertant dané problematice věnuje již po dobu několika let. Jeho dosavadní práce byly publikovány v impaktovaných časopisech i ve sbornících prestižních konferencí. Z tohoto hlediska je nutno publikační aktivitu hodnotit jako velmi dobrou.

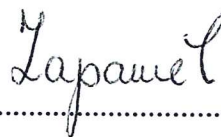
Úprava i grafické provedení předložené dizertační práce jsou dobré. Jazyková úroveň byla zmíněna ve Formálních připomínkách k práci.

Dizertační práce Ing. Luboše Smolíka přináší výsledky experimentálního měření. I přes značné neurčitosti autor dospěl k několika závěrům o chování turbodmychadel a k několika konstrukčním doporučením, a proto dizertační práci

### **d o p o r u č u j i**

k obhajobě.

V Ostravě 7. března 2019



.....  
prof. Ing. Jaroslav Zapoměl, DrSc.  
(oponent)

**prof. Ing. Jaroslav Zapoměl, DrSc.**

VŠB - Technická univerzita Ostrava, Katedra aplikované mechaniky, 17. listopadu 15,  
708 00 Ostrava - Poruba

