

Prof. Ing. Miroslav Balda, DrSc., FEng.
Kardinála Berana 10
301 00 Plzeň

Oponentský posudek
disertační práce

Ing. Zdeňky Rendlové

Dynamické chování rotorů turbodmychadel

Předložená práce o 89 stránkách a 11 stránkách dodatků je rozdělena kromě úvodu a závěru do pěti kapitol a čtyř dodatků. Zabývá se důležitým problémem technické praxe – dynamickým chováním vysokootáčkových turbodmychadel pro automobily.

a) **Zhodnocení významu disertační práce pro obor.**

S ohledem na veliké objemy výroby turbodmychadel a automobilů, které je využívají, je nutno konstatovat, že téma disertační práce má velký význam pro spolehlivý chod automobilů.

b) **Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění určitého cíle.**

Postup řešení je logický, stejně jako použité metody. Stanovený cíl je náročný a je formulován ve čtyřech dílčích cílech (zestručněno):

- využití existujícího linearizovaného modelu ložiskové vazby pro poddajný rotor v kluzných ložiskách s plovoucími pouzdry,
- návrh metodiky modelování ložiskové vazby s plovoucími pouzdry využitelné v nelineární oblasti,
- teoreticky zpracovat, zalgoritmizovat a ověřit funkčnost a robustnost použitých algoritmů,
- využít programové vybavení pro model konkrétního turbodmychadla a výsledky porovnat s experimentálními daty.

Zatímco první tři dílčí cíle jsou vcelku splněny, není jisté, zda čtvrtý dílčí cíl byl zcela naplněn. Důvodem pro tyto pochybnosti je fakt, že čtvrtá kapitola disertační práce má jen jednu stranu textu bez jakýchkoliv výsledků. V páté kapitole je však jisté porovnání experimentálních výsledků s vypočtenými uděláno, avšak vzápětí je zpochybněno výrokem (str. 72), že „amplitudy uzlů 4 a 5 získané numerickým řešením jsou násobně větší než amplitudy výchylek získané experimentálně“.

To se však dalo očekávat, když si uvědomíme, že rozhodující parametr ovlivňující tuhost uložení, tj. teplota olejové vrstvy, byl *zvolen*! Byl učiněn alespoň pokus o identifikaci teplot z dosažitelných dat, který by přiblížil shodu mezi modelem a skutečností?

c) **Stanovisko k výsledkům disertační práce a k původnosti.**

Výsledky disertační práce jsou překvapivé, protože z hlediska linearizovaného systému říkají, že systém je nestabilní v celém intervalu provozních otáček. Naproti tomu jej lze provozovat patrně díky nelineárnímu chování olejových vrstev mezi plovoucími pouzdry a vývrtem pánve a mezi plovoucími pouzdry a čepy rotoru.

Pokud jde o původnost práce, je role oponenta značně ztížena, protože celá práce je pojata komplexně, takže přínos autorky práce nelze snadno separovat od přínosu jiných řešitelů ze stejného pracoviště. Ani autorka v této věci neusnadňuje oponentovi jeho roli, protože sama neuvádí, co nového vložila do nového řešení. Naproti tomu autorka poctivě uvádí prameny, ze kterých bylo čerpáno. Ze struktury práce vyplývá, že realizace matematického modelu rotoru i s uložením v kluzných ložiskách s plovoucími pouzdry, algoritmicizace procedur řešení dílčích úloh a jejich odladění je její dílo.

d) **Vyjádření k systematice, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni.**

Celý problém je v disertační práci podrobně strukturován, takže se lze v ní snadno orientovat. Formální úprava práce je perfektní stejně jako jazyková úroveň. Do práce se vloudilo relativně málo tiskových chyb. Mezi nejvýznamnější patří chybné odkazy na tabulku 5.1, v níž nejsou informace o nevyváženosti, ale o charakteru vlastních čísel z hlediska stability.

e) **Vyjádření k publikacím autora.**

Seznam publikovaných prací autorky obsahuje 13 položek, z nichž v 5 případech byla jedinou autorkou. Dále spolupracovala jako spoluautorka na 6 veřejně nepublikovaných pracích pro objednavatele z průmyslu. V posledních 5 letech vystoupila s příspěvkem na 6 vědeckých mezinárodních konferencích.

f) **Doporučení oponenta k disertaci.**

Autorka Ing. Zdeňka Rendlová svou disertační práci i dalšími aktivitami prokázala, že je schopná samostatně vědecky pracovat a výsledky svých prací prezentovat vědecké obci. Doporučuji proto, aby její disertační práce byla předložena příslušné komisi pro obhajoby.

V Plzni, dne 14. 11. 2016



Oponentní posudek disertační práce

Ing. Zdeňky Rendlové

„Dynamické chování rotorů turbodmychadel“

Turbodmychadla jsou s ohledem na stále se zpřísnující emisní normy nedílnou součástí většiny vyráběných spalovacích motorů. Specifickým rysem turbodmychadel je uložení rotoru v kluzných ložiskách s plovoucím pouzdrem, která mají vysoký útlum vzhledem ke dvěma olejovým filmům řazeným v sérii. Ložiska s rotujícím pouzdrem také snižují třecí ztráty tím, že redukují kluznou rychlost mezi hřídelem a skříní jejím rozdělením na dvě části.

a) Zhodnocení významu práce pro obor:

Vzhledem k tomu, že turbodmychadla jsou zařízení pracující s velmi vysokými parametry, zejména s extrémními otáčkami, je jejich konstrukční návrh vysoce sofistikovanou záležitostí. Jednou z nejdůležitějších součástí návrhu je kontrola dynamiky rotoru z hlediska kritických otáček, odezvy na nevyváženost a odolnosti proti nestabilitě. Nestabilita, která ohrožuje bezpečnost provozu a zkracuje trvanlivost uložení, byla měřením relativních vibrací rotoru zjištěna ve vnějším olejovém filmu i u některých turbodmychadel renomovaných výrobců. Amplitudy vibrací při tom dosahovaly prakticky celé ložiskové vůle a pouze značně nelineární chování olejového filmu při extrémně malé tloušťce filmu bránilo okamžitě havárii. Možnost věrného modelování chování rotoru a vlastností jeho uložení, umožňující co nejpřesnější zjištění výše uvedených parametrů, má proto značnou důležitost a je jedním z předpokladů pro úspěšné navrhování těchto strojů.

b) Vyjádření k postupu řešení, použitým metodám a splnění určeného cíle:

Téma disertace je komplikované, neboť zasahuje do více oborů. Na rozdíl od uložení ve valivých ložiskách, jejichž vlastnosti lze převzít od výrobce, bylo nutno při analýze dynamiky rotoru řešit i vlastnosti hydrodynamických ložisek s plovoucím pouzdrem. Autorka postupovala systematicky s využitím širokého spektra informací z dostupné literatury, o čemž svědčí rozsáhlý seznam citovaných prací. Cílem řešení bylo sestavení reálného výpočetního modelu rotor-ložiska turbodmychadla a jeho konfrontace s experimentálními daty. Nejprve byl sestaven model hřídele, ve kterém je respektován i vnitřní útlum materiálu a gyroskopické účinky. Podstatnou součástí řešení je modelování ložiska s plovoucím pouzdrem. Linearizovaný model ložiskových sil vychází ze vztahů pro úzké ložisko, což je u většiny rotujících plovoucích pouzder vzhledem k jejich šířce použitelný předpoklad. Jediné, co lze použitému postupu vytknout, je předpoklad o konstantním poměru otáček pouzdra a hřídele. Ve skutečnosti se tento poměr mění, a s otáčkami rotoru klesá. Vzhledem k malé tuhosti ložisek má však tato skutečnost větší vliv pouze na tzv. ložiskové kritické otáčky, které jsou vesměs dobře tlumené a jen zcela výjimečně se projeví výrazným zvýšením vibrací rotoru. Za pozitivní lze označit také srovnání výsledků výpočtu s experimentem, i když je tomu věnována jen relativně malá část disertace.

Je možno konstatovat, že všechny vytčené cíle byly splněny.

c) Stanovisko k výsledkům disertační práce a k původnímu konkrétnímu přínosu práce:

Vypracované výpočetní postupy jsou použitelné v praxi a vykazují potenciál pro další rozšíření a zpřesnění. Mezi konkrétní přínosy práce patří zahrnutí vnitřního útlumu do modelu rotoru a zavedení buzení vlivem nelineárních sil. Originálním přínosem práce je také využití kondenzace a zpracování citlivostní analýzy.

Ze simulace zpracované v obr. 5.4 vyplývá, že rotor je nestabilní v celém rozmezí otáček. Výpočtem určená nestabilita rotoru s rotujícími pouzdry je obvyklá, přestože ve skutečnosti může být běh rotoru stabilní. Zjištěný nesoulad mezi trajektoriemi získanými numerickou simulací a měřením není rovněž příliš překvapivý. Trajektorie získané vlastními výpočty s lineárním přístupem byly ve většině případů naopak významně menší než naměřené. Vysvětlením mohou být výrazné změny vyvážení, resp. zbytkové nevyváženosti, k nimž nutně dochází při demontáži a opakované montáži turbodmychadla. I při zachování původní polohy kompresorového kola dojde vlivem jeho sejmutí a opětného nasazení k určité změně vyvážení. Změny zbytkových nevyvážeností mohou způsobit i deformace způsobené extrémním mechanickým namáháním a vysokými provozními teplotami.

Do budoucna by bylo vhodné rozšířit výpočetní model o plovoucí pouzdra nerotující, která využívají pouze tlumicí účinek vytlačování vnějšího olejového filmu. Tato ložiska se v turbodmychadlech současné generace objevují častěji než pouzdra rotující.

d) Vyjádření k systematice, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce

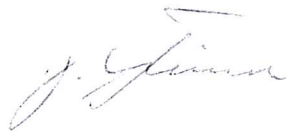
Práce je členěna zcela logicky, je zpracována velmi přehledně a její grafická úprava je na vysoké úrovni. Rovněž k jazykové úpravě disertace nemám připomínky. Autorka používá výrazy, které jsou v daném oboru běžné a je vidět, že se touto problematikou zabývá již delší dobu. V některých případech by prospělo podrobnější vysvětlení, např. popis označení veličin v tabulkách 5.2. a 5.3.

e) Vyjádření k publikacím:

V seznamu publikací uvádí autorka disertace 13 publikovaných a 6 nepublikovaných prací, které se vesměs týkají předmětu disertace. S ohledem na počty publikací jiných disertantů se takový počet publikací zdá spíše vysoce nadprůměrný.

f) Vyjádření oponenta

Na základě dosažené úrovně disertace a jejích výsledků doporučuji disertační práci k obhajobě (dle zákona č. 111/1998 Sb. § 47).



V Praze 27.10.2016

Ing. Jiří Šimek, CSc.