

Prof. Ing. Jiří Křen, CSc.
Katedra mechaniky
Fakulta aplikovaných věd
Západočeská univerzita v Plzni
Technická 8
306 14 Plzeň

OPONENTSKÝ POSUDEK

disertační práce paní **Ing. Jitky Klečkové**
nazvané

Modelování aeroelastických jevů se zaměřením na predikci flutteru turbínových lopatek

Disertační práce Ing. J. Klečkové se zabývá aktuálním problémem modelování aeroelastických jevů se zaměřením na matematické modelování těchto jevů s aplikací na nestabilitu typu flutter u lopatek parních turbín. Problematika modelování v uvedené oblasti je velmi rozsáhlá, a je tedy zcela běžné, že se disertantka věnuje modelování vybraných problémů.

Cíle disertační práce jsou směřovány do dvou oblastí, a to na numerické řešení proudění stlačitelných tekutin na oblastech s nehybnou a pohyblivou hranicí a na modelování nestability typu flutter na lopatkách oběžných kol turbín. Nedílnou součástí těchto cílů je samozřejmě odpovídající úvod a rešerše obvykle používaných matematických modelů proudění tekutin a flutteru a základní analýza jejich vlastností.

Práce o 96 stránkách je rozdělena do 7 kapitol. V úvodu autorka vyjadřuje motivaci, zařazuje práci do řešené problematiky a stanovuje cíle disertační práce. Zároveň stručně uvádí nástin obsahu práce. Druhá kapitola je věnována přehledu aeroelastických jevů a metodám jejich modelování. Je zde uveden pohled do historie a rešerše těchto jevů, základní matematické přístupy k jejich modelování včetně ALE přístupu. Dále jsou zde připomenuty základní vztahy (systém Eulerových rovnic) pro řešení proudění stlačitelné tekutiny v oblastech s nepohyblivou a pohyblivou hranicí oblasti včetně ALE formulace základních zákonů zachování. V závěru kapitoly jsou stručně uvedeny metody řešení interakce kontinuí různých fází. Třetí kapitola je věnována konstrukci matematických vztahů, které jsou v další kapitole použity pro vlastní numerické řešení proudění stlačitelné neviské tekutiny ve 2D oblasti s nepohyblivou a pohyblivou hranicí (ALE formulace). Pro prostorovou diskretizaci obou problémů je aplikována metoda konečných objemů. Dále je zde naznačena rekonstrukce řešení s Barthovým limitérem, způsob implementace okrajových podmínek a algoritmus určení změny polohy uzlů sítě při uvažování pohyblivé hranice. Ve čtvrté kapitole disertantka realizuje numerické řešení proudění viské stlačitelné tekutiny pomocí vlastního software konstruovaného v interpretu Matlab. Detailně popisuje algoritmus řešení pro oblast s nepohyblivou i pohyblivou hranicí. Správnost navrženého algoritmu ověřuje na řešení proudění ve 2D GAMM kanálu (nepohyblivá hranice) a při obtékání tekutiny okolo leteckého profilu NACA 0012 (pohyblivá hranice). Dosažené numerické výsledky vyhodnocuje graficky a verifikuje pomocí literárních zdrojů. Výsledky vykazují velmi dobrou shodu. Pátou

kapitulu lze chápat jako teoretický základ pro posuzování nestability typu flutter na lopatkách turbínových kol. Jsou zde uvedeny základní pojmy a parametry používané při predikci flutteru a zkráceně historie řešení tohoto problému. Pro řešení flutteru jsou předloženy dvě metody, a to tzv. energetická metoda (kde se autorka opírá především o práce autorů J. Panovsky a R.E. Kielb) a tzv. TBR (Transient Blade Row) metodu, která je součástí výpočtového systému ANSYS CFX. Jsou zde popsány principy těchto metod, jejich aplikace v praxi a jejich přednosti i slabiny. V závěru této kapitoly je potom řešen problém vlastních hodnot a modální analýza turbínové lopatky. Šestá kapitola je završením řešení problému flutteru a je zde provedeno numerické řešení na konkrétních turbínových lopatkách. Opět je poměrně podrobně popsán algoritmus predikce flutteru lopatek turbín s využitím dříve uvedených dvou metod řešení. S ohledem na výpočtovou složitost je vlastní numerické řešení realizováno ve výpočtových systémech ANSYS (Fluent, Mechanical, CFX). 2D problém CFD analýzy proudění byl řešen ve Fluentu a pro predikci flutteru byl potom vyvinut vlastní postup disertantky založený na modelování obtékání tří lopatkových profilů, jejichž pohyb byl determinován definovanou funkcí (jednosměrná „interakce“ struktura – tekutina). Výpočtový systém CFX byl použit pro analýzu flutteru celé 3D turbínové lopatky. Metodika predikce flutteru byla testována na oběžných lopatkách předposledního stupně nízkotlakého dílu parní turbíny. Numerické výsledky (výchyly lopatek, rozložení tlaku, izoplochy relativního Machova čísla, koeficient aerodynamického tlumení) jsou přehledně zpracované v grafické podobě a jsou dobře okomentovány. Závěr celé disertační práce potom komplexně shrnuje dosažené cíle s příslušnou diskusí a analýzou. Nakonec je potom naznačena možná cesta dalšího rozvoje řešené problematiky predikce nestabilního chování turbínových lopatek.

Předložená práce splňuje kritéria disertačních prací jak po stránce teoretické a odborné, tak i po stránce grafické a stylistického zpracování. Práce je vyvážená, má logickou stavbu a je doplněna konkrétními algoritmy řešení vybraných úloh mechaniky kontinua. Použité metody a přístupy k řešení daného problému lze hodnotit kladně, dosažené numerické výsledky jsou vyhodnoceny převážně ve formě grafů. Zásadní závěry jsou doplněny vhodným komentářem. Jsem toho názoru, že disertantka v práci prokázala svoje hluboké znalosti v oblasti mechaniky kontinua, aplikované matematiky, ale i v oblasti programování a modelování složitých problémů proudění tekutin a interakce kontinuí různých fází. Použité metody a přístupy k řešení daného problému dokazují schopnost disertantky řešit na vysoké úrovni složité teoreticko-aplikační úlohy z různých oblastí mechaniky kontinua.

Disertační práce je napsána pečlivě, věcně, je srozumitelná a má logickou stavbu. Shrnuje na malém prostoru poměrně velké množství informací o modelování a numerickém řešení proudění tekutin na oblasti s nepohyblivou a pohyblivou hranicí. Práce dále dává základní informace o interakci kontinuí různých fází. Práce může být využita i pro pedagogické účely. Práce má výbornou grafickou úpravu s malým počtem prepisů. Příznivý dojem z práce malinko ruší ne vždy vhodné používání interpunkčních znamének (čárky) a psaní „Obr.“. Některé formulace by možná také bylo možno více precizovat (např. vztah (2.1) byl také vytvořen pomocí materiálové derivace, F je skalární veličina, trojúhelníkové kontrolní objemy, kombinace globální a indexové symboliky, u podmínek na hranici interakce chybí rychlost, validace apod.).

Nyní si dovoluji ještě položit disertantce několik otázek jako úvod do diskuse při vlastní obhajobě disertační práce.

- 1) Prosím o explicitní vyjádření disertantky k vlastnímu přínosu práce (řešeno v rámci Centra kompetence).

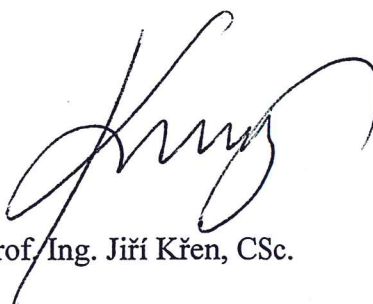
- 2) Dávají sdružené metody řešení interakce kontinuí různých fází skutečně „přesnější“ výsledky? Je pravda, že při tomto řešení není nutné řešit přenos „informací“ na hranici interakce? Víte také něco o metodě přídavných hmotností?
- 3) Proč jsou na vstupu a výstupu oblastí řešení proudění tekutin volena taková „chlupatá“ čísla?
- 4) Jsou zápisy vztahů např. (5.7), (5.8) správné?
- 5) Na str. 75 se mluví o časově středovaných Navierových-Stokesových rovnicích. Jaké je Reynoldsovo číslo řešeného problému (to se obvykle váže k možnosti použití středování rovnic)?

Závěr

Doktorská disertační práce splnila všechny formulované a stanovené cíle. Práce má dobrou vědeckou úroveň s konkrétními teoretickými i praktickými přínosy. Je napsána pečlivě, má vysokou grafickou úpravu a je též východiskem pro další výzkum v oblasti modelování proudění tekutin na oblastech s nepohyblivou a pohyblivou hranicí a je dobrým úvodem do řešení problémů nestabilit turbínových lopatek. Publikační činnost disertantky považují za přiměřenou.

Disertační práci doporučuji k obhajobě. Za předpokladu její úspěšné obhajoby doporučuji, aby paní Ing. Jitce Klečkové byl udělen akademický titul „doktor“ v oboru Aplikovaná mechanika.

V Plzni dne 17. dubna 2019



Prof. Ing. Jiří Křen, CSc.

OPONENTNÍ POSUDEK DISERTAČNÍ PRÁCE

Autor : **Ing. Jitka Klečková**

Téma disertační práce : **Modelování aeroelastických jevů se zaměřením na predikci flutteru turbínových lopatek**

Předložená disertační práce Ing. Jitky Klečkové má 91 stran textu. Je rozdělena do sedmi kapitol. Obsahuje 57 citací použité literatury a 12 citací vlastních publikací a výzkumných zpráv. Práce se zabývá vzájemnou interakcí tekutiny a struktury se zaměřením na metody matematického modelování jevů vyskytujících se v parních turbínách.

První tři kapitoly jsou teoretickým úvodem popisující mimo jiné způsob vzniku flutteru, příklady jeho výskytu v historii a základní matematické přístupy pro jeho modelování. Ve třetí kapitole je detailněji popsán matematický model proudění stlačitelné nevazké tekutiny v oblasti nepohyblivé, resp. v oblasti s pohyblivou hranicí v tzv. ALE formulaci. Popsána je rovněž umělá vazkost ve tvaru Barthova limiteru, způsob implementace okrajových podmínek a nakonec algoritmus deformace sítě pro obtékání kmitajícího tuhého tělesa.

Ve čtvrté kapitole je představen vlastní výpočtový software, který byl vytvořen na základě matematického modelu popsaného v kapitole 3. Software je vyvinutý v systému Matlab. Ověření jeho správné funkčnosti je ukázáno pro transsonické proudění stlačitelné nevazké tekutiny jednak v GAMM kanálu ve 2D a následně pak okolo symetrického leteckého profilu NACA 0012 s úhlem náběhu proudu $1,25^\circ$. V obou případech lze konstatovat, že bylo dosaženo relativně dobré shody s výsledky známými z literatury.

Další dvě kapitoly se již plně věnují problematice posuzování stability turbínových lopatek. Vysvětleny jsou základní pojmy a energetická metoda predikce flutteru. Popsána je starší metodika výpočtu flutteru ve 2D podle autorů Panovsky a Kielb a následně poté i modernější metody pro výpočet flutteru ve 3D v systému ANSYS CFX. Detailněji jsou pak rozebírány zejména metoda Fourierovy transformace v časové oblasti a metoda harmonické analýzy ve frekvenční oblasti. Zmíněna je rovněž modální analýza turbínové lopatky.

Předposlední šestá kapitola aplikuje navržené postupy pro posouzení možného rizika vzniku flutteru u předposlední nevázané (volné) lopatky parní turbíny. K určení vlastních tvarů a vlastních frekvencí byl použit výpočtový systém ANSYS Mechanical. Pro výpočet proudění byl použit ve 2D ANSYS Fluent a ve 3D ANSYS CFX. Analýza ve 2D byla provedena na profilu blízkému špičce lopatky. Ve 3D byly pro hledání numerického řešení použity již zmiňované metody Fourierovy transformace a metoda harmonické analýzy. Ve všech případech byla přes silové účinky určena aerodynamická práce tekutiny na povrchu lopatky, resp. koeficienty aerodynamického tlumení. Výsledné průběhy koeficientů aerodynamického tlumení byly nakonec mezi sebou porovnány. Autorka v závěru zmiňuje, že 2D metoda je sice výrazně rychlejší, ale dle výsledků a porovnání s 3D metodami není příliš přesná a nedoporučuje ji pro zkroucené lopatky používat. Nicméně její použití nevylučuje pro prizmatické lopatky na základě zdrojů z literatury. Oproti tomu výsledky z obou 3D analýz vykazují velmi dobrou shodu. Na základě násobně větší rychlosti konvergence výpočtu pak autorka doporučuje použití harmonické analýzy ve frekvenční oblasti. Další rozbor přesnosti výpočtu průběhu koeficientu aerodynamického tlumení pro jednotlivé uzlové průměry již bohužel chybí. Určitý rozbor nebo minimálně komentář by měl být uveden zejména z důvodu neočekávaného průběhu výsledného koeficientu tlumení, který nemá tvar jedné sinusovky jak je to běžné. Minimálně z tohoto důvodu bych v této kapitole 6, zabývající se predikcí flutteru pomocí ANSYSu, resp. v části 6.3 nazvané Zhodnocení dosažených výsledků a diskuze, očekával diskuzi ohledně volby výpočtové domény. Výpočet je proveden pouze na doméně rotoru, tj. proudové okrajové podmínky jsou předepsány velmi blízko vlastní lopatce a tedy mohou mít nezanedbatelný vliv na výsledný koeficient aerodynamického tlumení. U diskuze nad výsledky by právě volba axiálně velmi krátké výpočtové

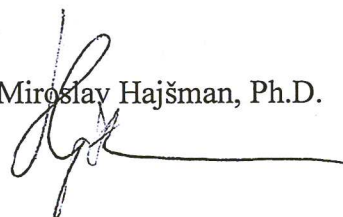
domény neměla chybět. Také zde zcela chybí poznámky, co do budoucna zlepšit, aby výsledky byly přesnější, resp. důvěryhodnější, v případě, že by někdo chtěl na tuto práci navázat.

V práci mě chybí i globálnější náhled při hledání odpovědi na otázku odolnosti počítané lopatky vůči flutteru. Zejména chybí jakákoliv zmínka či podrobnější rozbor okrajových podmínek úlohy. Výpočet byl proveden pouze pro jedny okrajové podmínky, nicméně každá turbinová lopatka je v rámci jedné turbíny, resp. jednoho elektrárenského bloku, během celé své životnosti podrobena celému rozsahu provozních podmínek a tedy odolnost lopatky musí být splněna pro celý uvažovaný (výrobce povolený) pracovní diagram lopatky. Jakákoliv zmínka o pracovním diagramu a tedy celé škále okrajových podmínek a z ní plynoucí flutter mapě bohužel chybí.

Poslední sedmá kapitola nakonec rekapituluje dosažené výsledky vlastním softwarem na testovacích úlohách, tak i výsledky flutter analýz v ANSYS CFX.

Závěrečné zhodnocení.

- a) Předložená disertační práce řeší velmi závažný technický problém. S jeho řešením se při vývoji těchto nejdelších lopatek potýkají všichni výrobci parních turbín na světě. Teprve v posledních letech se objevují první uspokojivé numerické výsledky z komplexních matematických modelů zabývajících se problematikou flutteru dlouhých lopatek. Předkládaná práce patří do skupiny těchto úloh.
- b) Postup řešení lze hodnotit kladně. Použité metody odpovídají současným trendům numerického řešení úloh v mechanice tekutin. Stanovené cíle byly splněny.
- c) Výsledky výpočtů z vlastního softwaru byly na testovacích úlohách v souladu s dostupnými výsledky v literatuře. Výsledky výpočtů v ANSYSu jsou diskutabilní zejména s ohledem na neočekávaný průběh výsledného koeficientu tlumení. To může, ale také nemusí souviset s volbou domény, která obsahuje pouze rotorovou lopatku a je axiálně velmi krátká. Nicméně výpočtová oblast nebyla zvolena a priori chybně. To je vidět zejména na starší metodice výpočtu flutteru ve 2D. A tak i když došlo v posledních letech k výraznému rozvoji numerických metod a nárůstu hardwarových možností, přesto je stále nutné brát v potaz poměr přesnosti a výpočtové náročnosti. I přes výše uvedené nedostatky opomíjející větší diskuzi nad výsledky, definicí výpočtové domény a okrajovými podmínkami, je odborná úroveň předložené práce na dobré úrovni. Mám ještě následující dotazy:
 - 1) Ve výpočtu jsou uvedeny okrajové podmínky celkového stavu tlaku a teploty a směrové úhly. Odkud byly tyto podmínky na vstupu do domény (do rotorové lopatky) převzaty?
 - 2) Ve výpočtu je jako proudící médium uvažován ideální plyn. Jak byla provedena náhrada páry ideálním plynem, tj. jak byly stanoveny parametry ideálního plynu? Proč nebylo počítáno přímo s párou, což ANSYS CFX umožňuje?
 - 3) Jak si vysvětlujete neobvyklý tvar křivky koeficientu aerodynamické tlumení?
- d) Téma práce je zpracováno systematicky (od teoretických základů ke konkrétním praktickým aplikacím). Práce je přehledná, rovněž formální úprava práce je na velmi dobré úrovni, obrázky a grafy jsou pečlivě provedeny.
- e) Uvedené publikace autorky svědčí o tom, že se touto problematikou zabývá systematicky delší dobu a získala tak zajímavé zkušenosti.
- f) Na základě výše uvedeného **doporučuji disertační práci k obhajobě.**



doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.
V Horkách 242/7
46007, Liberec

Posudek disertační práce Ing. Jitky Klečkové

Modelování aeroelastických jevů se zaměřením na predikci flutteru turbínových lopatek

Rešerše

Předložená disertační práce obsahuje celkem 96 stran textu. Součástí práce jsou neočíslované: titulní list v českém a anglickém jazyce, prohlášení, poděkování, abstrakt v českém i anglickém jazyce a obsah. Tématem disertační práce je modelování úloh interakce proudící tekutiny s pohyblivou stěnou, zejména se zaměřením na samobuzené kmitání turbínových lopatek.

Práce je členěna do kapitol, první kapitola *Úvod* stručně uvádí motivaci k výzkumu a členění práce. Zpracovaná rešerše o aeroelastických jevech a jejich modelování je prezentovaná v kapitole druhé *Aeroelastické jevy a jejich modelování*. Třetí kapitola je *Matematické modelování proudění stlačitelné nevazké tekutiny se zaměřením na obtékání kmitajících těles*. Ve čtvrté kapitole autorka popisuje *Vlastní výpočetní software vyvinutý v systému Matlab*.

Hlavní náplní práce je *Flutter lopatek parních turbín*, který je obsažen v kapitole páté a *Predikce flutteru lopatek parních turbín pomocí výpočtového systému ANSYS* v kapitole šesté. Sedmou kapitolou je *Závěr*.

Hodnocení formální stránky práce

Po formální stránce je práce na velmi vysoké úrovni, je zpracována pečlivě a přehledně. Rovněž jazyková a stylistická úroveň práce je vynikající, oponent v práci nenašel překlepy, krkolomná vyjádření či jiné prohřešky. Také po grafické stránce je práce příkladná. Oponent si dovolí pouze upozornit na drobné detaily, které nesnižují ani formální ani odbornou úroveň práce:

- Oproti zvyklostem neobsahuje seznam značení jednotky použitých veličin.
- Na str. 7 je na některých místech nevhodně použit spojovník „-“ místo pomlčky „ – “.
- Na str. 52 v první větě druhého odstavce zřejmě chybí slovo.
- Autorka nadužívá ukazovací zájmena (např. „tato práce“) zejména v první a druhé kapitole.

Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Práce se zabývá aktuálním a bezesporu vědecky a technicky velice zajímavým tématem interakce proudící tekutiny s tělesem, přičemž práce se konkrétně zaměřuje na kmitání lopatek parní turbíny. Téma tedy vychází přímo z požadavků technické praxe na stabilitu lopatek a provozní spolehlivost parních turbín obecně. Význam pro obor je především ve vývoji nástroje pro rychlou analýzu rizika vzniku flutteru dlouhých štíhlých lopatek a dále v provedeném porovnání různých metod řešení daného problému.

Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění určeného cíle

Postup řešení předložené disertační práce je správný. Autorka provedla rešerši modelování aeroelastických jevů, vyčerpávajícím způsobem uvádí matematické přístupy jak pro modelování proudění stlačitelné tekutiny v nepohyblivé oblasti, tak pro modelování úloh interakce proudící tekutiny s kmitajícím tělesem. Dopodrobna je vysvětlena implementace okrajových podmínek a algoritmus deformace sítě.

Autorka posléze vyvinula vlastní výpočetní software pro proudění neviské stlačitelné tekutiny v systému Matlab. Software použila k simulaci proudění v nepohyblivé oblasti, v tzv. GAMM kanálu. Prezentovaná data působí věrohodně a výhoda použití Barthova limiteru je zřejmá, data jsou nicméně porovnána pouze s numerickými výpočty jiného autora (disertační práce školitele) a to v oddělených diagramech.

O něco lépe jsou zpracovány výsledky získané pro obtékání profilu NACA 0012, kde ovšem autorka poznamenává, že bylo dosaženo relativně „dobré shody“. Podobně jsou prezentované výsledky pro pohyblivou hranici – opět bylo dosaženo „dobré shody“. Oponent má za to, že ve vědecké práci by měla být případná shoda či neshoda specifikována vědecktějším přístupem.

Těžiště práce spočívá v numerickém výzkumu flutteru lopatek parních turbín. Autorka k identifikaci rizika vzniku flutteru používá energetickou metodu. Opět jsou přehledně popsány použité metody a lze konstatovat, že disertaci bude jistě možné použít i k výukovým účelům. K analýze kmitání lopatek již autorka nepoužívá vlastní software, ale komerční software ANSYS, konkrétně jeho část Mechanical (k určení vlastních kmitů), Fluent (2D výpočet proudění) a CFX (3D výpočet proudění). Při analýze jsou použity metody Fourierovy transformace a metody harmonické analýzy.

Stanovisko k výsledkům a k původnímu konkrétnímu přínosu disertační práce

Předložená disertační práce je na vysoké jak formální tak odborné úrovni. Autorka ve své práci představila funkční nástroj pro rychlou analýzu rizika vzniku flutteru lopatek parní turbíny, porovnála různé přístupy k řešení daného problému a dochází k závěru použít pro inženýrský přístup CFD analýzu ve výpočtovém systému ANSYS CFX a metodu harmonické analýzy, neboť umožňují přímé vyhodnocení koeficientu aerodynamického tlumení. Získané výsledky jsou přínosné pro obor lopatkových strojů a s uvedenými závěry lze souhlasit.

Pro účely obhajoby má oponent tyto otázky a připomínky

1. Autorka často konstatuje „dobrou shodu“ výsledků. Naskýtá se otázka, zda je dobrá shoda nějak definována, respektive kde končí shoda dobrá a začíná shoda vynikající případně shoda nedostatečná.
2. Bylo by možné prezentovat získaná data a referenční data ve stejném diagramu (obr. 4.7 a 4.8) a získané porovnání okomentovat?
3. Diagram na obr. 6.7 obsahuje výsledky 2D výpočtu zpracované vztahem (6.7). Je zde tedy zřejmě zobrazen výkon vztahený na jednotkovou délku lopatky, tj. W/m.
4. Proč k analýze flutteru (ve 2D případě) nepoužila autorka vlastní software?

Publikace studenta

Oponent se nemůže vyjádřit k publikacím studenta, neboť nedostal jejich soupis.

Celkové hodnocení disertační práce

Výše zmíněné připomínky nejsou zásadního charakteru a nijak nesnižují vynikající formální a odbornou úroveň předložené disertační práce. Autorka prokázala hluboké teoretické znalosti a schopnost řešit praktické problémy v oboru interakce proudící tekutiny s pohyblivou stěnou.

Disertantka splnila všechny cíle práce v ní vytyčené. Dosažené výsledky jsou přínosné v oboru a prokazují schopnost vědecké práce. Práci doporučuji k obhajobě. Při úspěšném průběhu obhajoby doporučuji udělení titulu Ph.D.

V Liberci 17. 5. 2019



doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.

