

## Oponentský posudek disertační práce

Vypracoval: Ing. Petr Straka, Ph.D.

Název disertační práce:

### “Numerical Simulations of Turbine Blade Flutter“

Autor práce: Ing. Marek Pátý

Předložená disertační práce se zabývá implementací aeroelastického modelu kmitání samostatného profilu a lopatek v přímých lopatkových mřížích, a to včetně vývoje numerického řešiče dvourozměrného proudění nevazké stlačitelné tekutiny. Zvláštní pozornost je věnována implementaci vhodné vstupní a výstupní okrajové podmínky.

Cíle práce jsou:

1. návrh strategie pohybu výpočetní sítě pro řešení proudění na deformujících se oblastech se zvláštním zřetelem na přímé lopatkové mříže,
2. analýza způsobů numerické rekonstrukce gradientu řešení a jeho omezení,
3. implementace bezodrazových okrajových podmínek,
4. validace výpočetního modelu.

Autor začíná úvodem, ve kterém stručně popisuje problematiku flutteru turbínových lopatek a představuje stručný obsah jednotlivých kapitol disertační práce. Následuje rozsáhlá kapitola pojednávající o problematice aeroelasticity lopatkových strojů včetně popisu současného stavu poznání v oblasti výpočetních metod. V další kapitole se autor věnuje popisu matematického modelu proudění, okrajovým podmínkám a modelu interakce tekutiny a tuhého tělesa. Následující kapitola popisuje implementaci matematického modelu, je navržen vhodný způsob řešení pohybu výpočetní sítě pro případ, kdy se obtékaný povrch pohybuje. Je popsána metoda konečných objemů na pohyblivých sítích včetně geometrického zákona zachování. Zvláštní pozornost je věnována problematice numerické rekonstrukce gradientu řešení a jeho omezení. Je popsána implementace bezodrazových okrajových podmínek. V této kapitole je též popsán způsob aproximace tuhého tělesa a jeho interakce s proudící tekutinou. Dále následuje kapitola popisující validaci a aplikaci implementovaného aeroelastického modelu pro celkem čtyři příklady. V závěrečné kapitole autor shrnuje a rozebírá dosažené výsledky, komentuje splnění cílů disertační práce a nastiňuje další možný směr rozvoje řešené problematiky.

- Lze konstatovat, že autor dosáhl všech stanovených cílů disertační práce v plném rozsahu.
- Rozbor současného stavu řešené problematiky, kterou je numerická realizace aeroelastického modelu kmitání samostatného profilu nebo lopatkové mříže a predikce flutteru, lze jednoznačně považovat za nadstandartní.
- Teoretický a praktický přínos práce lze spatřovat v popisu vlivu bezodrazových okrajových podmínek na řešení stacionární úlohy a predikci flutteru a dále v analýze vlivu odlehlosti vstupní a výstupní hranice výpočetní oblasti.
- V práci uvedené výsledky, stejně jako autorova publikační činnost jasně dokládají jednak vhodnost použitých metod, jednak hluboké znalosti v oboru matematického modelování, numerické simulace stlačitelného proudění a aeroelasticity.
- Postup řešení uvedené problematiky je správný.

- Práce je obsahově plná, přehledně strukturovaná, srozumitelná, jednotlivé kapitoly na sebe logicky navazují. Po formální stránce je práce velice přehledná, konzistentní, vybavená všemi náležitostmi disertační práce.

Autor v předložené práci implementoval známé modely, schémata a okrajové podmínky publikované již jinými autory. Takto sestavený software pro řešení aeroelasticity samostatných profilů a lopatkových mříží poté autor použil k řešení tří validačních příkladů taktéž již dříve řešených a publikovaných jinými autory.

Software byl poté použit pro analýzu aeroelastické stability supersonického obtékání špičkové lopatkové mříže M8. Tato aplikace jasně demonstruje nezastupitelnou roli spektrální bezodrazové okrajové podmínky při predikci součinitele aerodynamického tlumení.

Dostatečný rozsah byl věnován popisu formulace a implementace různých vstupních a výstupních okrajových podmínek. Škoda že nebyl věnován trochu větší prostor i okrajové podmínce na stěně, neboť i tu lze realizovat několika způsoby s dopadem na kvalitu řešení nevázkého proudění v blízkosti zakřivených stěn.

Řešení jednotlivých validačních příkladů je provedeno a prezentováno naprosto precizně. Vždy je provedena simulace stacionárního proudění a následně simulace nestacionárního proudění s kmitajícím profilem, ať už s vynuceným nebo samobuzeným kmitáním. Vždy je provedena analýza vlivu zjemnění výpočetní sítě a vlivu odlehlosti vstupní a výstupní hranice výpočetní oblasti stejně jako vliv typu vstupní a výstupní okrajové podmínky. Numerické výsledky jsou vždy porovnány buď s publikovanými experimentálními daty, nebo s numerickými výsledky jiných autorů.

Analýza stability, tedy predikce podmínek flutteru, byla v jednotlivých příkladech provedena buď pro model obtékání profilu s vynuceným kmitáním, nebo pro model obtékání volně uloženého profilu se dvěma stupni volnosti. Škoda, že pro některý řešený případ nebyla provedena a porovnána analýza stability obou těchto modelů.

Otázky pro autora:

- Prosím, zda by mohl autor ukázat průběh obvodově středních hodnot celkového tlaku a vstupního úhlu proudu před mříží M8 v závislosti na vzdálenosti před odtokovou hranou.
- Prosím, zda by mohl autor podrobněji popsat analýzu vlastních tvarů a frekvencí „třírozměrným modelem konečných prvků“, který je zmíněn v odstavci 6.4.2.
- Analýza ukazuje, že lopatková mříž M8 je v daném režimu proudění aeroelasticky nestabilní. Poslední stupně nízkotlakých turbín však bývají vybaveny třecími tlumícími prvky. Bylo by možné nějakým způsobem zahrnout do aeroelastického modelu vliv třecího tlumení?
- Dokáže prezentovaná spektrální bezodrazová podmínka potlačit vznik parazitních tlakových poruch, jaké vznikají při průchodu vírové řady výstupní hranicí s jednoduchou výstupní okrajovou podmínkou?

Po formální a grafické stránce je práce velmi pečlivě provedená, bez nadsázky ji lze považovat za příklad toho, jak má disertační práce, a obecně vědecká publikace, vypadat.

Oponent rovněž velmi oceňuje rozsah celé kapitoly 2 popisující problematiku aeroelasticity lopatkových strojů.

Předloženou disertační práci doporučuji k obhajobě před komisí.