

Posudek doktorské disertační práce

Název práce: Vliv ucpávkových proudů na integrální charakteristiky turbínového stupně

Disertant: Ing. Jan Uher

Obsah práce

Předkládaná doktorská disertační práce se zabývá studiem ztrát v turbínovém stupni způsobených mísením proudů pomocí experimentálních a numerických metod.

Práce je členěna do logických kapitol. V první teoretické části je představena práce turbíny na základě termodynamického popisu. Dále je ukázán matematický aparát používaný při standardním návrhu turbínového stupně. V teoretickém úvodu jsou také popsány současné možnosti numerického řešení proudění v turbínových stupních. Podrobně je rozebrána problematika ztrát. V rešerši odborné literatury je představeno několik modelů ztrát způsobených mísením dvou proudů od různých autorů. Rešerše se dále zaměřuje především na ztráty způsobené interakcí ucpávkových proudů s hlavním proudem.

V kapitole 6 je formulován cíl práce, jím je návrh analyticko-empirického modelu pro určení vlivu průtoku ucpávkou turbínového stupně na účinnost přeměny energie.

Druhá část práce popisuje experimentální zařízení, na kterém probíhalo ověřování teoretických předpokladů. Po popisu zařízení je představen i způsob vyhodnocení naměřených dat. Nechybí popis prováděných kalibrací měřidel a vyhodnocení nejistot měření.

Další část práce se zaměřuje na popis numerického řešení a detailní rozbor proudových poměrů v experimentálním turbínovém stupni, který je umístěn na ZČU. Výpočty byly provedeny v softwaru CFX, autor práce prováděl přípravu geometrie, okrajových podmínek a následně vyhodnocoval výsledky. Samotné řešení bylo provedeno externí společností.

Poslední část práce se věnuje srovnání experimentálně získaných výsledků s výsledky numerického řešení. Je provedena důkladná analýza výsledků z hlediska určení ztrát turbínového stupně a jejich rozdělení podle způsobu vzniku. Zvláštní pozornost je věnována ztrátám vznikajícím v důsledku mísení hlavního proudu s proudem z ucpávky.

Význam pro obor

Problematika energetických ztrát je v současnosti jedním z hlavních směrů ve výzkumu a vývoji proudových strojů. Detailní znalost fyzikálních dějů probíhajících v průtočné části proudových strojů je

klíčová z hlediska správného určení souvisejících energetických ztrát a hlavně je to výchozí pozice pro úpravy stroje za účelem snížení těchto ztrát.

Z obecného pohledu v rámci mechaniky tekutin je problematika mísení či interakce proudů jednou z nejobtížnějších úloh, protože nejsou detailně prozkoumány fyzikální mechanismy, které se v tomto procesu uplatňují. Tím také není zcela jasné, jaká metodika řešení je pro danou úlohu nejvhodnější. Obecně je proudové pole při interakci výsledkem nestabilního chování těchto proudů. Předkládaná práce představuje určitý přínos i z tohoto hlediska.

Předkládanou práci považuji v oboru turbinářství za průkopnickou. Je další v řadě prací zabývajících se problematikou energetických ztrát v turbínách a plynule navazuje na předchozí práce, které vznikly v poslední době na ZČU ve spolupráci s firmou Doosan. Předkládaná práce přináší nové poznatky, které doplňují předchozí práce, vyplňuje nedostatečně

Postup řešení, použité metody, splnění vytčeného cíle

Práce má logickou stavbu, obsahuje teoretický rozbor použitých metod, popis zkoumaného případu a výsledky.

Zvolené metody dle mého názoru zcela vyhovují danému účelu. Použití všech uvažovaných experimentálních metod považuji za logickou a správnou cestu k získání požadovaných informací. Z výsledků uvedených v práci je zřejmé, že disertant zvládl všechny použité experimentální metody. Pro matematické modelování byl použit standardní postup používaný ve firmě Doosan.

Cíl práce, vytvoření analyticko-empirického modelu pro určení ztrát způsobených únikem proudu technologickými vřely, byl podle mého názoru splněn v plném rozsahu.

Význam výsledků, přínos disertanta.

Disertant navrhl metodiku určování ztrát vznikajících únikem pracovního média technologickými vřely. Metodiku ve své práci validoval. Tato metodika může být využívána při návrhu stupňů turbíny. Navržená metodika určení tohoto typu ztrát má ambici stát se součástí standardní metodiky Doosan pro určování ztrát v turbínách.

Jsou důsledně srovnávány 3 případy lišící se reakcí stupně: nízká, střední a vysoká. Uvedené informace mohou sloužit jako vodítko pro volbu typu turbinového stupně v daném případě.

Formální stránka práce

Po formální stránce je práce na dobré úrovni, dobrá je grafická úprava i kvalita obrázků. Práce je přehledná, členění je vcelku systematické, množství překlepů je minimální, práce je tak srozumitelná. Práce obsahuje všechny potřebné součásti.

Slovník je ve značné míře převzat z praxe, pro tento typ práce by bylo lépe používat důsledně výrazy zavedené v mechanice tekutin.

Publikace disertanta

Seznam publikací disertanta není v disertaci uveden, je ale v autoreferátu a čítá 14 prací. Jedná se vesměs o články ve sbornících konferencí konaných převážně v ČR, v některých případech v zahraničí (Polsko, USA, Korea). Množství a kvalita publikací odpovídá

Závěr

Disertant odvedl v rámci disertace velký kus práce. Předkládaná práce představuje významný příspěvek k objasnění vzniku energetických ztrát turbinového stupně vlivem proudění ucpávkami. Jím vypracovaná metodika má ambice stát se součástí standardního postupu návrhu turbinového stupně.

Disertant prokázal dobrou orientaci v oblasti návrhu, přípravy i provádění experimentů v oblasti mechaniky tekutin a termodynamiky a také schopnost aplikovat získané znalosti na řešení konkrétního případu. Tím také prokázal schopnost vědecké práce.

Předkládaná práce podle mého názoru splňuje požadavky dle zákona č.111/1998 Sb. §47. Práci proto doporučuji k obhajobě.

Poznámky

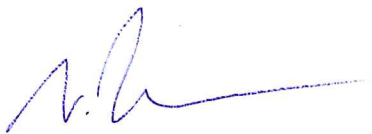
- Str. 32 – rovnice 31 je rozměrově nekonzistentní (pokud „r“ má fyzikální rozměr).
- Str. 35 – Reynoldsovo napětí je s^{-1} !
- Str. 35 – Nekonzistentní pravopis: „izotropní“ a „isotropie“.
- Str. 38 – tvrzení „Vyšší hodnoty intenzity turbulence vedou k zvětšení tloušťky mezních vrstev“ je obecně nepravdivé.
- Str. 38 – „zánik kinetické energie“. Kinetická energie nezaniká, pouze se přeměňuje.
- Str. 40 – termín „výška“ mezní vrstvy je nevhodný, používá se „tloušťka“.
- Str. 40 – na obr. 11 chybí přechodová oblast mezní vrstvy.
- Str. 41 – K separaci proudu (odtržení mezní vrstvy) dochází při **kladném** gradientu tlaku podél stěny a nikoli **záporném**.
- Str. 42 – u obr. 13 chybí zdroj.
- Str. 45 – pojem „incidenční ztráta“ není vysvětlen, sám termín není příliš vhodný.
- Str. 47 – „Hodnota nárůstu entropie je úměrná zaniklé kinetické energii ucpávkového proudu.“ Kinetická energie nezaniká, pouze se přeměňuje.
- Str. 61 – Termín „vlivnost“ je zvláštní.
- Str. 123, rovnice 71, pro „akceleraci“ by bylo vhodné zavést proměnnou.

- Některé obrázky, zejména převzaté z literatury, mají popis v anglickém jazyce.

Dotazy

- Na obr. 46 rozdíl mezi vypočtenou a změřenou hodnotou průtoku nadbandážovou ucpávkou dosahuje u pokusné turbíny i více než 10%, vysvětlete důvody. (str. 73)
- Jakým způsobem bylo indikováno vyrovnání tlaků u 3-otvorové sondy a s jakou přesností, jaká byla potom nejistota určení příslušného úhlu? (str. 74)
- Při CFD modelování proudění v pokusné turbíně bylo předpokládána okrajová podmínka na vstupu intenzita turbulence 5%. Jakým způsobem byla tato hodnota určena? (str. 102)

V Praze dne 11.11.20193
prof. Ing. Václav Uruba, CSc.
Ústav termomechaniky AV ČR, v.v.i.



Ing. Tomáš Jelínek, Ph.D.
Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s.
Beranovách 130, 19905, Praha – Letňany

Posudek na disertační práci pana Ing. Jana Uhera: Vliv ucpávkových proudů na integrální charakteristiky turbínového stupně

Posuzovaná disertační práce má rozsah 133 stran textu včetně doprovodných obrázků, tabulek, grafů, seznamu použité literatury, seznamů obrázků, tabulek a použitých symbolů. Dále obsahuje i ostatní důležité věcné a formální náležitosti.

Téma předložené práce je velmi aktuální a představuje jedno ze základních témat, která jsou řešena u producentů parních turbín v současné době. Jedná se o vytvoření zobecněného analyticko-empirického popisu vlivu mísení ucpávkového proudu s hlavním proudem v turbínovém stupni s cílem používat tento model při návrzích turbínových stupňů. Pro stanovení tohoto popisu je využito jak vlastních experimentálních výsledků získaných na zkušební turbíně při experimentálním vyšetřování tří stupňů s rozdílnou návrhovou reakcí, tak výsledků numerického simulování proudění.

Práce obsahuje velmi pěkně zpracované úvodní pasáže, ve kterých autor popisuje současný stav energetiky ve světě, v Evropě a v ČR a jeho návaznost na současné potřeby producentů parních turbín při návrzích nových lopatkových strojů. Dále popisuje základní rovnice termodynamiky, na jejichž základě je postaven návrh lopatkových strojů. Následuje seznámení s metodami návrhů lopatkových strojů získaných z rešerše odborné literatury. Tyto rešerše jsou zaměřeny především na popisy modelů ztrát způsobených interakcí ucpávkových proudů s hlavním proudem.

Další kapitola se věnuje popisu experimentálního zařízení, na kterém probíhal výzkum turbínových stupňů. Je představen vliv interakce ucpávkových proudů s hlavním proudem, včetně metodiky vyhodnocení dat a určení ztrát stupně. Výsledky jsou doplněny určením nejistot veličin měřených a veličin stanovených z experimentálních dat.

Numerické práce proběhly externě, ale autor se na práci podílel přípravou geometrií, okrajových podmínek a hlavně následným vyhodnocením výsledků. V práci dokládá znalost problematiky numerických simulací vhodně zvolenými okrajovými podmínkami, nastavením řešiče, volbou stěnové funkce.

Vlastní stěžejní část práce je vytvoření zobecněného analyticko-empirického modelu ztrát v axiálním turbínovém stupni způsobených únikem proudu v ucpávkách. Autor srovnává celkové ztráty získané z numerického výpočtu s jednotlivými přírůstky ztrát získanými pomocí návrhových modelů. Celková bilance ztrát získaných postupnými přírůstky určených pomocí modelů ale nedosahuje celkové ztráty stupně z numerického výpočtu pro případy s vefukováním pracovního média z hřídelové ucpávky. Na základě tohoto rozboru autor zavádí další dodatečnou ztrátu, kterou definuje jako ztrátu způsobenou incidencí na patě lopatky vzniklou mísením proudu z hřídelové ucpávky s hlavním proudem. Tato změna incidence způsobuje nárůst intenzity sekundárních struktur na patě oběžného kola.

Připomínky k textu:

1. Na straně 113 autor uvádí větu: „Ovlivnění sekundárními strukturami je u statorové mříže symetrické.“ Vzhledem k tomu, že sekundární ztráty jsou způsobeny dvěma mechanismy, a to: i) vlivem odstředivých sil v zakřivených kanálech a ii) vlivem vazkostí proudící tekutiny, obecně nemůžou vznikat na kruhové lopatkové mříži na patě a na špičce stejné sekundární struktury.
2. V Kapitole 9, která je stěžejní pasáží celé práce, se vyskytuje poněkud více nepřesností a nedostatečného popisu v některých odstavcích. Například nejednoznačnost v používání termínu „ztrátový výkon“ a „ztráta turbínového stupně“. Obrázky 83 – 85 by bylo lépe doplnit lepším popisem pro zvýšení přehlednosti a jednoznačnosti. V některých případech není úplně zřejmé, kde autor vychází z výsledků získaných pomocí experimentální práce a kde používá data z CFD výpočtů. Čtenář se to nakonec dozvídá až ve výstižně zpracovaném Závěru.

Dotazy do diskuze:

3. Při určení nejistoty vyhodnocené účinnosti stupně není zahrnut vliv nejistoty určení průtoku vzduchu. Může autor zdůvodnit proč?
4. Při tvorbě analyticko-empirického popisu rozložení ztrát jsou vztahovány predikované ztráty k „referenční ztrátě“ z numerického výpočtu. Výsledný rozdíl součtu ztrát jednotlivých přírůstků ve srovnání s „referenční ztrátou“ je pak deficitní. Autor uvádí rozbor nejistot v případě dat získaných z experimentální práce. Jaká je ale nejistota celkové ztráty stupně získané z numerického výpočtu?

Hodnocení práce:

- a) Disertant zvolil aktuální a v praxi využitelné téma, zaměřené na rozšíření stávajících ztrátových modelů používaných při návrhu turbínových stupňů. Jedná se o vytvoření zobecněného analyticko-empirického popisu vlivu mísení ucpávkového proudu s hlavním proudem v turbínovém stupni s cílem používat tento model při návrzích turbínových stupňů.
- b) Při řešení stanoveného cíle autor použil moderní metody, zejména je nutné ocenit kombinaci experimentálního a numerického přístupu k výzkumu proudění. Metoda pro určení dodatečného ztrátového výkonu je vhodně zvolena. Zahrnutí vlivu reakce stupně je významné pro používání ztrátového modelu v praxi. Cíl práce byl splněn.
- c) Získané výsledky jsou bezesporu přínosem pro obor stavby energetických strojů. Zpřesňují metodiku určení ztrát při návrzích turbínových stupňů se zohledněním vefukovaného proudícího média z hřídelové ucpávky. Velmi kvalitně je v práci zpracovaná rešerše, a je uveden přehled jednotlivých nejčastěji citovaných modelů ztrát způsobených mísením ucpávkových proudů.
- d) Práce je celkově velmi pečlivě zpracována, působí velmi přehledným a uceleným dojmem, obsahuje minimum překlepů a nepřesností. Úvodní pasáže velmi pěkně postupně zužují objekt zájmu autora. Od obecného popisu stavu energetiky ve světě se postupně dostávají k řešenému problému a vytčenému tématu práce. Jediné co oponent práci vytýká po formální stránce zpracování, jsou popisky v anglickém jazyce v řadě

převzatých obrázků z jiných zdrojů a taktéž používání desetinné tečky místo desetinné čárky v těchto obrázcích. Jedná se ale samozřejmě o marginální výtku.

- e) Doloženou publikační činnost disertanta je možno hodnotit jako uspokojivou. Oponent zejména oceňuje, že výsledky práce byly prezentovány na prestižní konferenci ASME Turbo Expo.

Závěr:

V disertační práci bylo dosaženo vytčeného cíle, práce obsahuje nové poznatky ve vědním oboru, výsledný zobecněný komplexní popis ztrát je přínosný pro návrhy turbínových strojů a přináší zpřesnění v určení celkové ztráty axiálního turbínového stupně. Autor dokazuje, že je schopen samostatné vědecké práce a proto **doporučuji tuto práci k obhajobě.**



Ing. Tomáš Jelínek, Ph.D.

V Praze 31. října 2019