

# OPONENTNÍ POSUDEK DISERTAČNÍ PRÁCE

## Vliv geometrických úprav na účinnost kompresorového stupně

Ing. Tomáš Syka

---

### Zhodnocení významu pro obor

Disertační práce se zabývá modelováním vlivu ucpávek nosného a krycího kotouče, vlivu přechodových zaoblení oběžných lopatek a vlivu technologických otvorů v lopátkách oběžného kola radiálního kompresoru. Všechny tyto prvky mají prokazatelně negativní vliv na účinnost a na stlačení kompresorového stupně a způsobují ztráty. V praxi obvykle není k dispozici dostatečně přesná metoda jak zjistit míru těchto ztrát. Vliv ucpávek nosného a krycího kotouče je obvykle zahrnován pomocí vztahů, které vznikly částečně na základě měření. Podrobná analýza vlivu ucpávek krycího a nosného kotouče zpřesňuje a zejména kvantifikuje jejich vliv jak na účinnost, tak na stlačení stupně. Zároveň ukazuje cestu, jak s využitím CFD zlepšit výpočty ztrát způsobených vlivem ucpávek. Protože ucpávkové ztráty vždy představují nebezpečí zvýšení nepřesností výpočtu kompresorového stupně a samozřejmě i celého kompresoru, lze považovat analýzu v disertační práci provedenou za velmi významnou pro obor radiálních kompresorů.

Další řešená problematika, kterou je vliv přechodových zaoblení lopatek oběžného kola, je dobře využitelná zejména ve fázi návrhu radiálního stupně a následně při technologické přípravě výroby oběžného kola. Výsledky řešení poskytují prostor k nalezení kompromisu mezi možnostmi technologie výroby oběžného kola a návrhem jeho geometrie s ohledem na maximální účinnost a stlačení.

Analýza a numerický model vlivu technologických otvorů v lopátkách dávají zřetelnější náhled na vliv těchto otvorů na chování stupně. Otvírá se tak cesta ke snížení negativního ovlivnění stupně technologickým otvorem, který je z pevnostních důvodů vždy u svařovaných oběžných kol přítomen.

### Vyjádření k postupu řešení problému, k použitým metodám, ke splnění stanoveného cíle.

Disertant zvolil vhodný postup řešení, který využívá současné možnosti modelování proudění v kompresorovém stupni a který umožnil provést podrobnou analýzu vlivů sledovaných konstrukčních prvků na pracovní charakteristiky radiálního kompresorového stupně. Považuji za zvláště významné to, že bylo provedeno porovnání numerických simulací v prostředí softwaru NUMECA FINE/Turbo, s naměřenými hodnotami z výzkumného kompresorového standu. Toto porovnání a následné zhodnocení výrazně zvyšuje hodnotu získaných výsledků.

Pro všechny tři sledované konstrukční prvky byly provedeny simulace pro několik vybraných typů oběžných kol a pro tři varianty otáček.

V případech numerických simulací proudění má na výsledek řešení velký vliv volba typu prvků sítě, jejich hustoty a vhodného modelu turbulence. Touto problematikou se disertant ve své práci zabývá s ohledem na typ stupně a na sledovaný konstrukční prvek.

Cíl práce, zjistit vliv přítomnosti různých konstrukčních prvků na pracovní charakteristiky stupně radiálního kompresoru, byl beze zbytku splněn.

### **Stanovisko k výsledkům disertační práce a původního konkrétního přínosu předkladatele disertační práce**

Výsledky disertační práce, kterými je podrobná analýza vlivu sledovaných konstrukčních prvků, otvírají cestu k dalšímu zlepšování výkonnostních parametrů radiálních kompresorových stupňů a ke zvyšování jejich účinnosti. Práce předkládá původní výsledky, doplňuje a rozšiřuje tak poznatky o chování radiálních kompresorových stupňů.

### **Vyjádření k systematickosti, přehlednosti a k formální úpravě práce**

Disertační práce je zpracována systematicky, velmi přehledně, s dobrou grafickou úpravou. Úvodní část poskytuje nezbytné informace a podklady, které tvoří základ k následujícím kapitolám věnujícím se již plně tématům disertační práce. Každá z hlavních kapitol obsahuje podrobný popis přípravy a postupu simulace, výsledky jsou velmi přehledně graficky zpracovány a na závěr jsou shrnuty dosažené výsledky.

### **Vyjádření k publikacím disertanta**

Disertant je autorem nebo spoluautorem poměrně velkého množství publikovaných prací. Část uvedených prací jsou příspěvky na konferencích a část jsou technické zprávy. Publikované práce se vztahují k numerickým simulacím a experimentům týkajícím se proudění tekutin. Poměrně velké množství publikací se týká přímo kompresorů. To svědčí o tom, že disertant získal v oboru numerických simulací proudění a vyhodnocování experimentů provedených na turbostrojích velké zkušenosti.

### **Závěr**

Disertační práce beze zbytku splňuje stanovené požadavky.

**Práci doporučuji k obhajobě (dle zákona č. 111/1998 Sb. §47) .**

V Praze dne 30.9.2015

Oponent:

Ing. Jiří Oldřich, CSc.

Howden ČKD Compressors

## ***Oponentský posudek na disertační práci na téma***

### **Vliv geometrických úprav na účinnost kompresorového stupně**

**Doktorand: Ing. Tomáš Syka**  
**Fakulta strojní**  
**Katedra energetických strojů a zařízení**  
**Západočeská univerzita v Plzni**

Téma disertační práce je zaměřeno na zhodnocení pracovních charakteristik a účinnosti stupně radiálního kompresoru, které jsou ovlivněné ucpávkami krycího a nosného kotouče oběžného kola, geometrickými úpravami oběžných lopatek, technologickými otvory v oběžných lopatkách použitím metod numerického modelování. Téma je velmi aktuální, neboť zvýšení účinnosti u energetických strojů přináší významné úspory energie.

Práce obsahuje 105 stran, z toho 2 přílohy. Je členěna do 13 kapitol, jednotlivé kapitoly na sebe logicky navazují. Kapitola první až třetí se zabývají úvodem do problematiky a teorií radiálních kompresorů a jejich charakteristik. Ve čtvrté a páté kapitole je shrnuta stručná teorie o matematickém řešení proudění. Významnou částí jsou úvahy na téma tvorby sítě a její kvality a výběru matematického modelu turbulence. Následuje kapitola šestá týkající se metodiky vyhodnocení výsledků simulací a vlivu výpočetní sítě na přesnost řešení. Nejvýznamnější částí práce je aplikace dané metodiky na modelování vlivu ucpávek krycího a nosného kola, zaoblení oběžných lopatek a technologického otvoru v lopatkách oběžného kola pro tři varianty kompresorového stupně na přesnost řešení. V závěru je zhodnocen význam práce.

#### **Aktuálnost tématu a jeho přínos pro obor**

Problém definovaný v disertační práci je velmi aktuální, neboť řeší problematiku vlivu detailních konstrukčních prvků na pracovní charakteristiky a především účinnosti stupně radiálního kompresoru. Tento problém je teoreticky i prakticky velmi obtížně řešitelný. Na základě zobecnění výsledků je možno rozšířit oblast použití. Práci je možno považovat za metodický základ k rozvoji tohoto vědního oboru s výhledem na rozvoj a využití matematických modelů v dalších analogických aplikacích.

### **Zvolené metody zpracování, splnění cíle práce**

Pro řešení byla vybrána metoda řešení proudění plynů definovaného matematickým modelem turbulence a využití metody konečných objemů v programu NUMECA FINE/Turbo. Použitá metoda byla ověřena v dřívějších aplikacích na pracovišti. Vzhledem ke komplikovanosti problému byly všechny varianty výpočtu konfrontovány s experimentem. V práci je ale zdůrazněno, že platnost modelů je omezena, proto je nutné zabývat se jejich verifikací, tzn. mít k dispozici kvalitní fyzikální experiment nebo věrohodný matematický model. Cíl práce zde není specifikován, proto nemohu posoudit jeho splnění. Nicméně výsledky práce shrnuté v závěru korespondují s názvem práce a jsou rozpracované do různých variant z hlediska geometrického.

### **Stanovisko k výsledkům dizertační práce**

Práce je přehledně tématicky členěna do kapitol. Po stránce jazykové je na velmi dobré úrovni. Grafické zpracování je na vyhovující úrovni, jen u grafů jsou méně čitelná měřítka.

Formální nedostatky:

- V „Upozornění“ a „Poděkování“ se hovoří o diplomové práci, ne o dizertační práci
- Str. 11 – špatná jednotka objemového průtoku
- Str. 18, rov. (5) – nejsou specifikovány proměnné a indexy ani v textu ani v seznamu označení
- Str. 24, první věta shora – uvádí se součinitel  $\gamma$ , který není v rovnicích využit
- Str. 34 – není definováno a uvedeno zkosení buňky
- Str. 35 – nejsou definovány turbulentní modely a jejich vlastnosti
- Str. 36, obr. 24 – nejsou uvedeny pozice 1, 2, 3 a nejsou zřetelně specifikovány varianty výpočtu
- Str. 37, obr. 25 a následné vztahy - občas se pro výstup používá index 0 a občas OUT
- Str. 39, rov. (37) – chybně označený arccos

- Str. 40, kap. 6.5 – není specifikován návrhový program KSTK a použité metody v něm, pak je obtížné hovořit o shodě, navíc není specifikován pojem „dobrá shoda“
- Str. 69, obr. 70 – nepřesný název obrázku

Otázky na doktoranda:

- Str. 12 – co si doktorand představuje pod pojmem „numerická optimalizace“?
- Str. 35 – není specifikován experiment ani odkaz na literaturu, který byl použit k porovnání s výsledky numerického řešení a vyhodnocení vhodnějších modelů. Mohou být doplněny informace o experimentu?
- Str. 47 – jak byla sledována nestabilita výpočtu a po kolika iteracích se začalo průměrovat?
- Str. 60 – posl. odstavec – nejsou zde podrobnější informace o 1D KSTK návrhovém modelu. Pak je třeba vysvětlit, v jakém smyslu se porovnává tento pravděpodobně zjednodušený model s 3D modelem. Je možné je vůbec srovnávat?

Obecné nedostatky práce jsou:

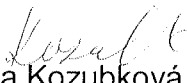
- V práci chybí kapitola „Přehled současného stavu poznání“,
- Cíle dizertační práce nejsou jasně specifikovány, je provedeno pouze shrnutí i když kvalitních výsledků v závěru, ale jestli byly cíle přesně splněny, není jasné.
- Přínos práce je dle mého pohledu obecně významný, ale není specifikována vlastní práce v této oblasti, neboť vzhledem ke spoře použitým odkazům to není zřejmé.

Přínosem práce je především vytvoření velmi kvalitní studie o metodice řešení s využitím matematických metod ve velmi komplikované aplikaci. Obsahuje řadu výsledků, které byly časově náročné a svědčí o výborných schopnostech doktoranda pracovat v oblasti modelování a simulace. Pro takto složitý problém byly výsledky srovnány s experimentálně získanými daty, což umožnilo vyhodnotit použité postupy řešení. Díky řešení účinnosti matematickou cestou se v současné době otvírají možnosti specifikace oběžného kola již ve stadiu návrhu.

Výsledky byly publikovány na konferencích a časopisech v dostatečném počtu. Velké množství práce je zde prezentováno také formou výzkumných zpráv.

Dizertační práce dokumentuje, že doktorand je schopen používat vysoce odborný matematický aparát v aplikacích na návrh oběžného kola kompresorového stupně, řešit matematické modely a verifikovat výsledky. Práce je na vysoké teoretické a aplikační úrovni. Proto doporučuji dizertační práci k obhajobě.

Ostrava, 11/10/2015

  
Prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc.  
katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení  
Fakulta strojní  
VŠB-TU Ostrava