

Popis obsahu balíčku WP06 Turbodmychadla a výkonové turbíny – aerodynam. optimalizace, dynamika rotorů a přiřazení pro účinné přeplňované motory

Vedoucí konsorcia podílející se na pracovním balíčku

České vysoké učení technické v Praze, zodpov. osoba Doc. Ing. Oldřich Vítek, Ph.D.

Členové konsorcia podílející se na pracovním balíčku

Vysoké učení technické v Brně – Doc. Ing. P. Novotný, Ph.D., Honeywell, spol. s r.o. – Ing. P. Škara

Hlavní cíl balíčku

Hlavním cílem je vyvinout nástroje, které umožní dosáhnout zlepšení účinnosti lopatkových strojů o 5% (relativně). To úzce souvisí s vylepšením následujících parametrů – návrh tvaru lopatek kompresoru/turbíny, řízení turbodmychadla (s využitím spolehlivé předpovědi pracovních map lopatkových strojů), snížení mechanických ztrát.

Dílčí cíle balíčku pro nejbližší období

Ověření vlastností a funkce 1-D modelu turbodmychadla (ČVUT).

Výkonová turbína – turbinový stupeň s maximální účinností (Honeywell).

Výpočtové modelování chování axiálního ložiska rotoru turbodmychadla (VUT).

Popis plnění balíčku WP06 Turbodmychadla a výkonové turbíny – aerodynam. optimalizace, dynamika rotorů a přiřazení pro účinné přeplňované motory

Náplň pracovního balíčku

2012 - 2015: Vývoj 1-D nestacionárních CFD modelů turbíny a kompresoru, jež se využijí v rámci 0-D/1-D simulací celého motoru včetně příslušenství (ČVUT). => **hotovo**

2012 - **2017**: Experimenty (realizované také ve spolupráci s Honeywell s.r.o) na spalovacích motorech zaměřené na zpřesnění kalibrace 1-D modelů turbíny/kompresoru (ČVUT).

2012 - 2017: Detailní 3-D CFD nástroj pro kalibraci 1-D modelu turbíny/kompresoru. (ČVUT).

2013 - 2017: Databáze 1-D modelů turbodmychadel. (ČVUT).

2014 – 2017: Virtuální testování turbodmychadel s cílem optimalizovat strategie řízení (společná aktivita ČVUT s Honeywell s.r.o).

Popis plnění balíčku WP06 Turbodmychadla a výkonové turbíny – aerodynam.
optimalizace, dynamika rotorů a přiřazení pro účinné přeplňované motory

Náplň pracovního balíčku

2012 - 2013: Porovnávání různých konceptů, které přicházejí v úvahu pro využití energie
spalin obsažené ve výfukových plynech vozidlového motoru (Honeywell s.r.o). => **hotovo**

2014 – 2015: Zpracovávání vybraného konceptu do podoby možného konstrukčního řešení s
ohledem na omezení daná zástavbovými prostory na vozidle (Honeywell s.r.o). => **hotovo**

2016 – 2017: Optimalizování turbínové části systému a interakce s ostatními komponenty tak,
aby bylo dosaženo maximální účinnosti při minimálním ovlivnění vlastností turbodmychadla
(Honeywell s.r.o).

2016 – 2017: Optimalizování řídicího systému rozdělení výkonu v případě aplikace výkonové
turbíny, definování vhodných regulačních strategií (Honeywell s.r.o).

Popis plnění balíčku WP06 Turbodmychadla a výkonové turbíny – aerodynam.
optimalizace, dynamika rotorů a přiřazení pro účinné přeplňované motory

Náplň pracovního balíčku

2012 – 2014: Dynamika rotorů turbodmychadel a tvorba virtuálního prototypu. (VUT v Brně).

=> **hotovo**

2016 – 2017: Návrhy pro zlepšení konstrukce axiálního ložiska rotoru turbodmychadla. (VUT v Brně).

Popis plnění balíčku WP06 Turbodmychadla a výkonové turbíny – aerodynam. optimalizace, dynamika rotorů a přiřazení pro účinné přeplňované motory

Probíhající plánované aktivity v rámci WP06:

- ČVUT:

- 1-D turbína (twinscroll) – simulace + experimenty
- 1-D model kompresoru – simulace
- zjednodušený CFD model radiální turbíny (2-D/3-D Eulerovy rovnice) – simulace
- 3-D CFD modely reálných geometrií turbíny/kompresoru – simulace

- Honeywell:

- výkonová turbína (turbocompound) – turbinový stupeň s maximální účinností

- VUT:

- modelování chování axiálního ložiska rotoru turbodmychadla

Popis plnění balíčku WP06 Turbodmychadla a výkonové turbíny – aerodynam. optimalizace, dynamika rotorů a přiřazení pro účinné přeplňované motory

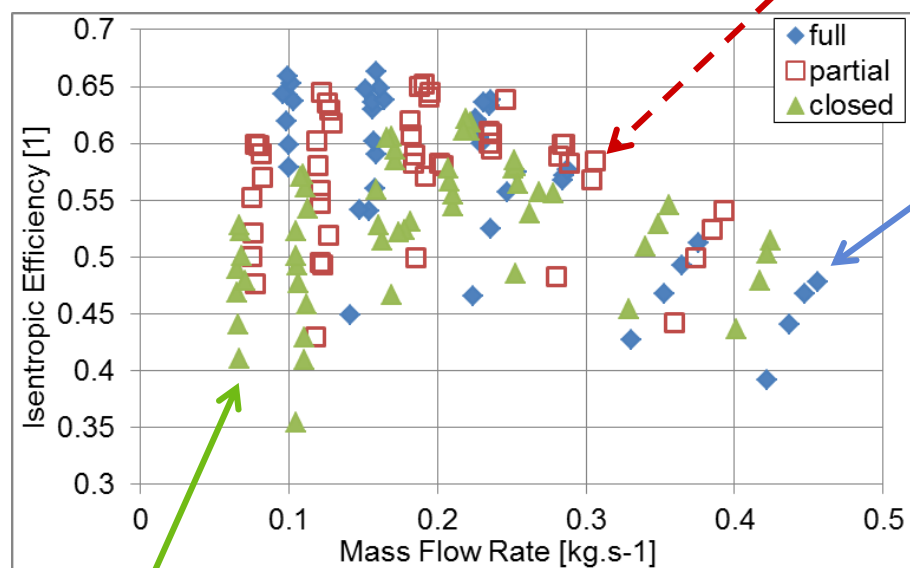
1-D turbína: (CZ K27 twin-scroll) – simulace + experimenty

- *simulace:*
 - model exp. stanoviště pro srovnání simulace vs. experiment
 - model motoru JohnDeer
- *experimenty:*
 - navrženo a realizováno měřicí stanoviště pro testování CZ turbin, a to včetně dvouvstupových verzí
 - experimenty na motoru JohnDeer (6-válec)

Popis plnění balíčku WP06 Turbodmychadla a výkonové turbíny – aerodynam. optimalizace, dynamika rotorů a přiřazení pro účinné přeplňované motory

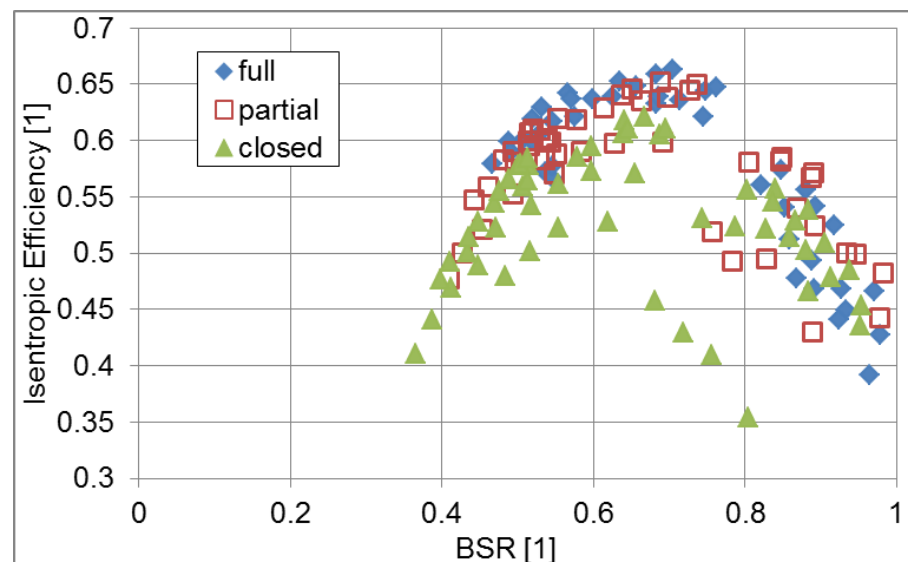
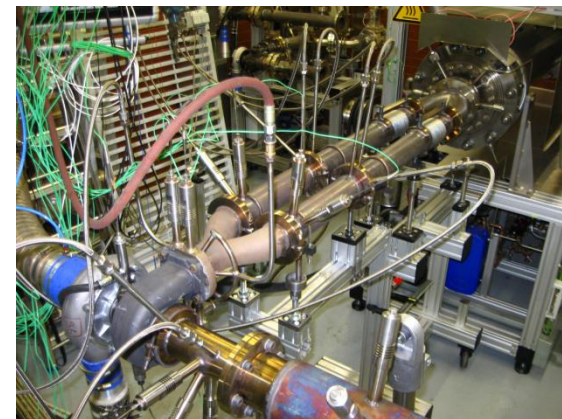
1-D turbína: experimenty

Partial admission (13:87)



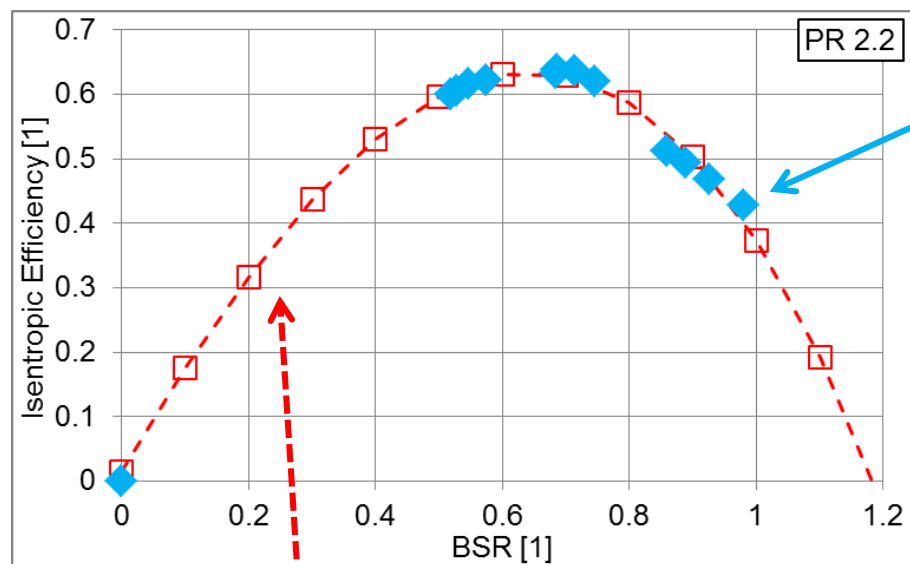
Closed section

$$level_A = \frac{\dot{m}_A \frac{c_{s,A}^2}{2}}{\dot{m}_A \frac{c_{s,A}^2}{2} + \dot{m}_B \frac{c_{s,B}^2}{2}}$$

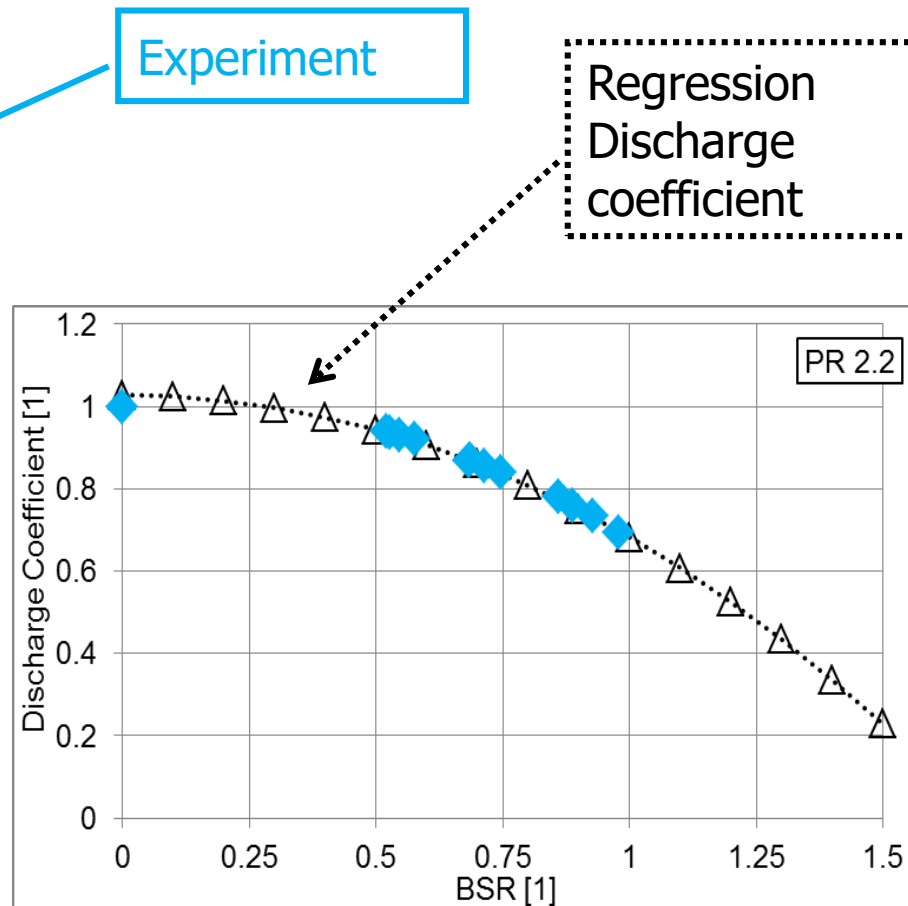


Popis plnění balíčku WP06 Turbodmychadla a výkonové turbíny – aerodynam. optimalizace, dynamika rotorů a přiřazení pro účinné přeplňované motory

1-D turbína: regresní náhrada turbíny (exp. data)

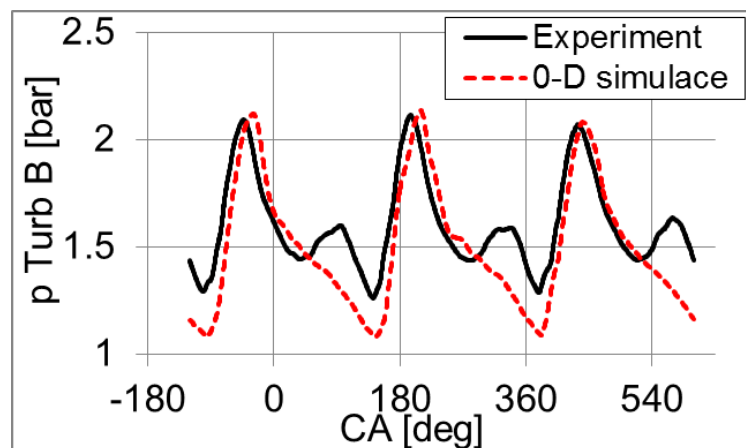
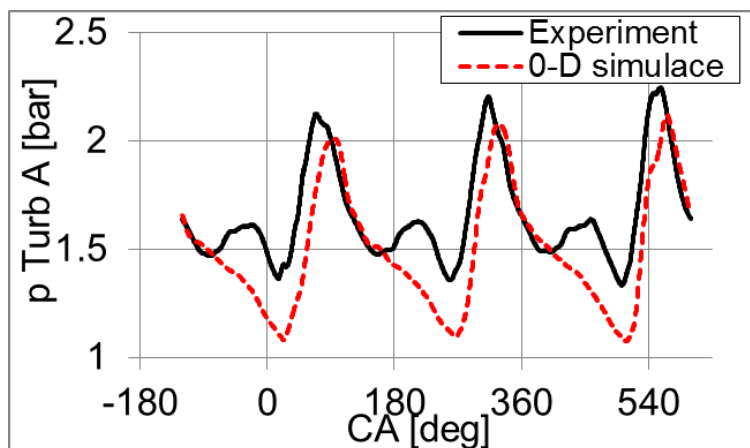
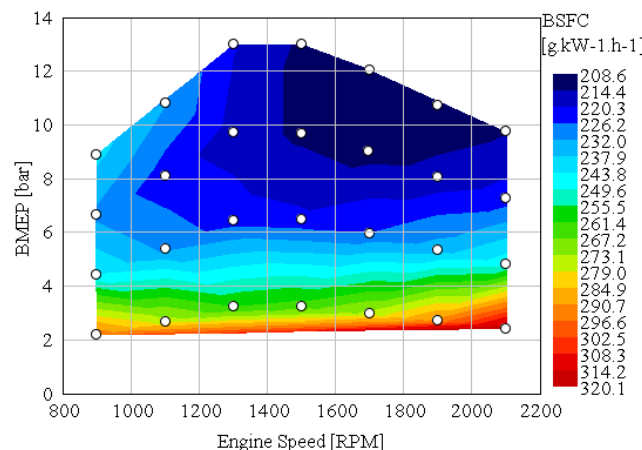
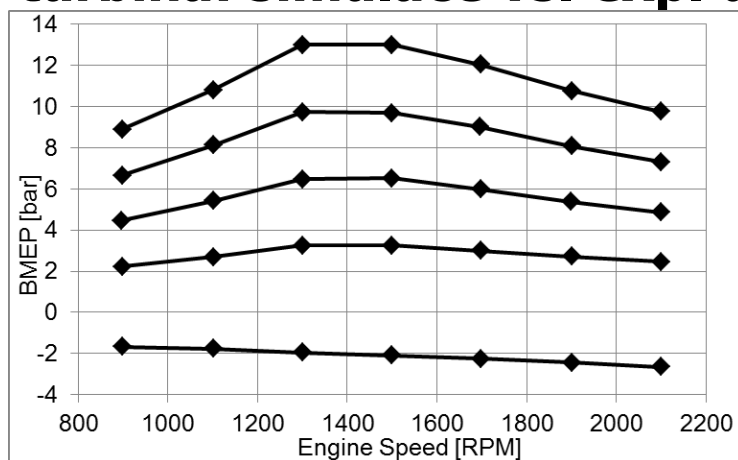


overall PR = 2.2
full admission



Popis plnění balíčku WP06 Turbodmychadla a výkonové turbíny – aerodynam. optimalizace, dynamika rotorů a přiřazení pro účinné přeplňované motory

1-D turbína: simulace vs. exp. data



Popis plnění balíčku WP06 Turbodmychadla a výkonové turbíny – aerodynam.
optimalizace, dynamika rotorů a přiřazení pro účinné přeplňované motory

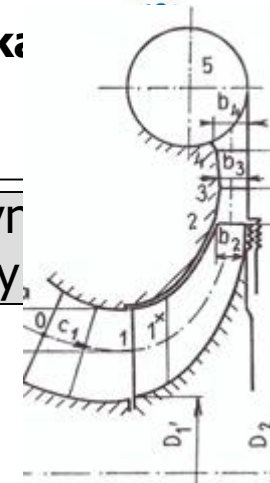
1-D kompresor: simulace + experimenty

- 1-D model kompresoru je založen na zkušenostech z modelu turbíny na střední proudnici. Poslední verze tohoto modelu používá přístup vlastní simulaci kompresoru, tj. určení tlaků v jednotlivých řezech kanálů na základě daného průtoku.
- Pro určení celkových tlaků byla vyvinuta iterace pomocí Newtonova algoritmu vhodná pro vysoké subsonické rychlosti, kde původně navržená prostá iterace pro turbínu selhává.

Postup: transformace stator-záběrník $\Rightarrow$ **Howellova modifikovaná ztráta** v záběrníku podle úhlu náběhu a oprava na supersonické jevy na špičkách záběrníku $\Rightarrow$ **Stodolův vír** v radiální části, ventilační ztráta disku a zpětný průtok netěsnostmi/IRC $\Rightarrow$ transformace rotor – bezlopatkový difusor $\Rightarrow$ **poloha rázové vlny (pro $M > 1$)** a **ztráta bezlopatkového difusoru** $\Rightarrow$ **ztráta lopatkového difusoru podle úhlu náběhu** $\Rightarrow$ **ztráta spirály**

Tučně vyznačeny parametry ztrát kalibrované pomocí měření a genetického optimalizačního algoritmu. **$M > 1$ není dosud hotovo.**

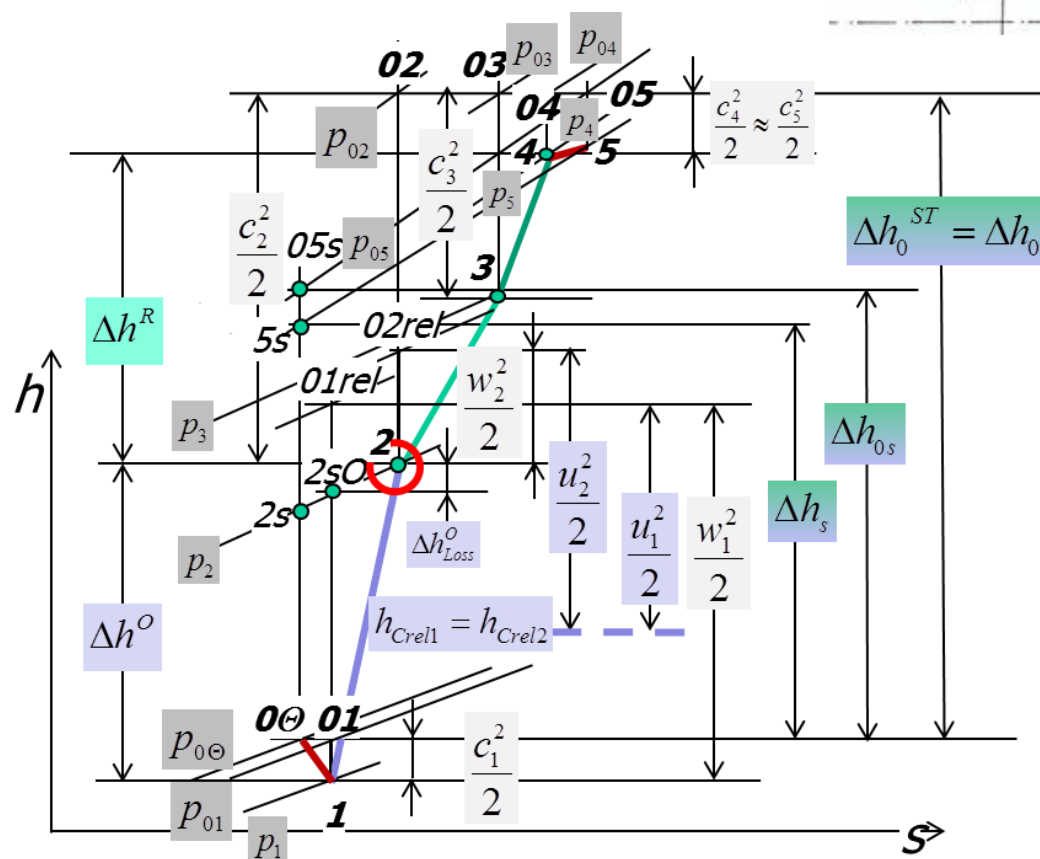
Popis plnění balíčku WP06 Turbodmychadla a výkonové turbíny – aerodynamická optimalizace, dynamika rotorů a přiřazení pro účinné přeplňované motory



h ... specific enthalpy, 0 ... stagnation, C ... total
 R ...diffuser, O ...impeller, ST ... stage

1-D kompresor:

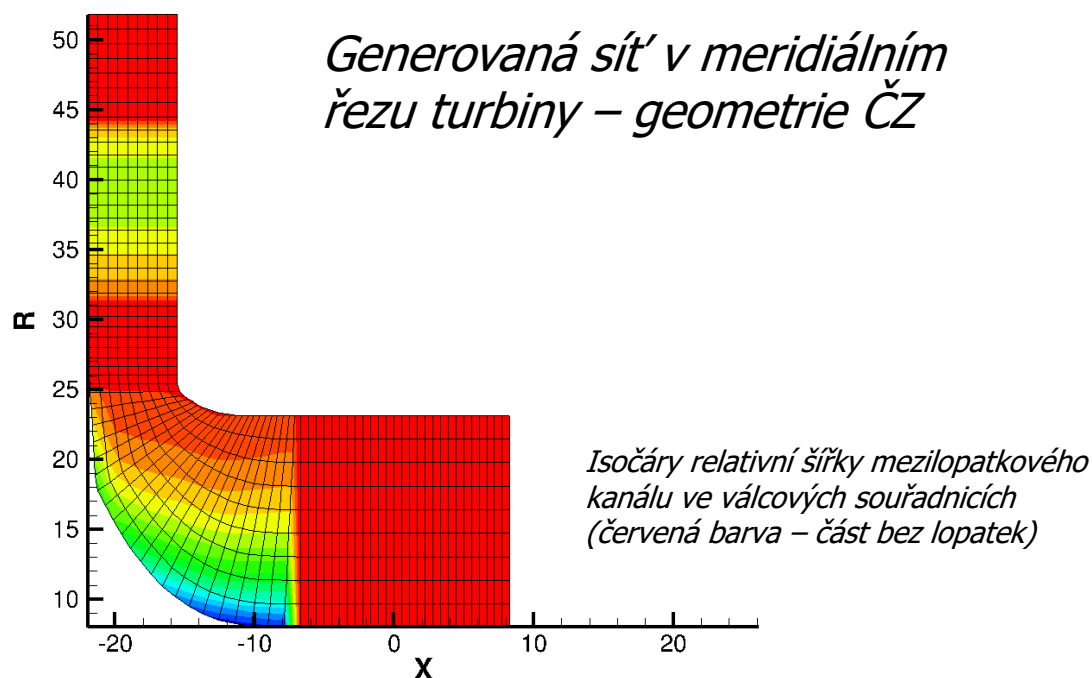
- Ztráty v mřížích s modifikovanými Howellovými vztahy podle úhlu náběhu. Určení kalibračních součinitelů včetně úhlů profilu dle optimalizace odchylek.
- Celá práce je předána v rotoru, podle modifikované Eulerovy věty lze najít parametry Stodolova víru (opět optimalizací).
- Netěsnosti a IRC parametry budou určeny podle průtoku a ztrát.
- Větrací ztráty jen dle empirických vzorců.



Popis plnění balíčku WP06 Turbodmychadla a výkonové turbíny – aerodynam. optimalizace, dynamika rotorů a přiřazení pro účinné přeplňované motory

Zjednodušený CFD nástroj pro popis dějů v lopatkových strojích:

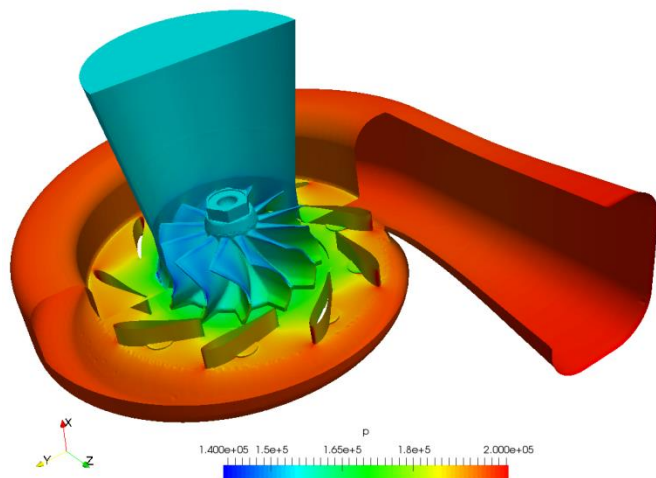
- etapa: rozšíření metody na radiální turbínu
- 2.5D metoda: Eulerovy rovnice + empirické modely



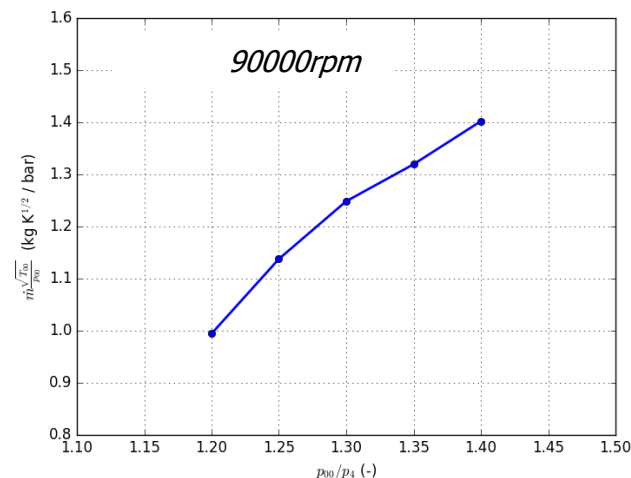
Popis plnění balíčku WP06 Turbodmychadla a výkonové turbíny – aerodynam. optimalizace, dynamika rotorů a přiřazení pro účinné přeplňované motory

Vlastní CFD nástroje: detailní 3-D CFD nástroj v prostředí openFOAM

- etapa: vývoj metody
- vlastní software implementovaný do prostředí OPENFOAM



Geometrie ČZ rozložení tlaku na stěnách
(„frozen rotor“)

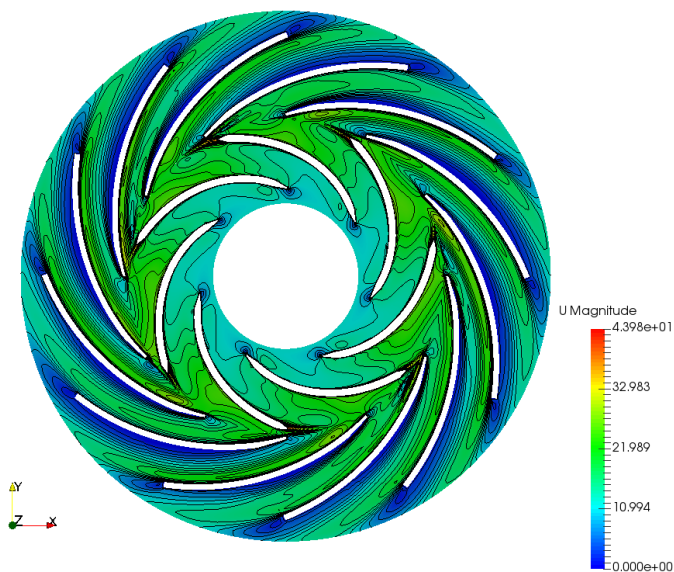


Relativní hmotnostní tok v závislosti na
výstupním tlaku

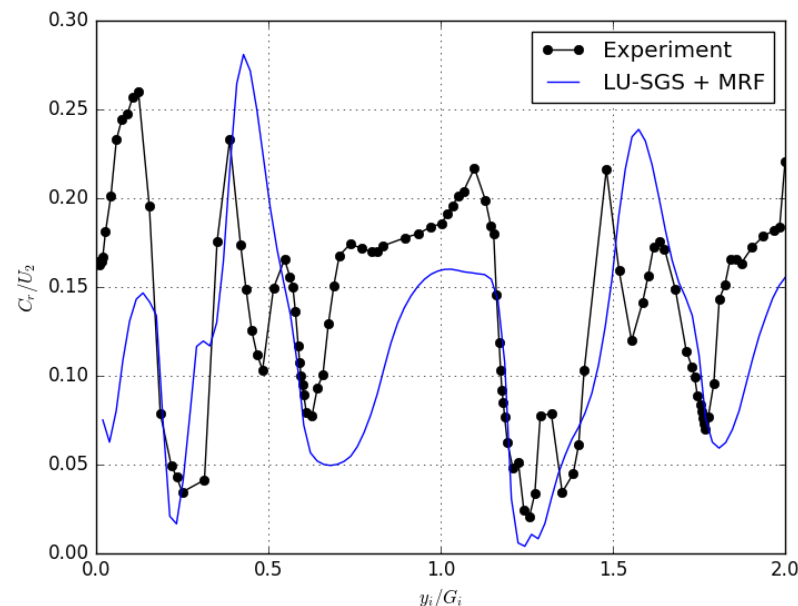
Popis plnění balíčku WP06 Turbodmychadla a výkonové turbíny – aerodynam. optimalizace, dynamika rotorů a přiřazení pro účinné přeplňované motory

Vlastní CFD nástroje: detailní 3-D CFD nástroj v prostředí openFOAM

- testovací případ ERCOFTAC



Isočáry velikosti rychlosti 2D výpočet („frozen rotor“)

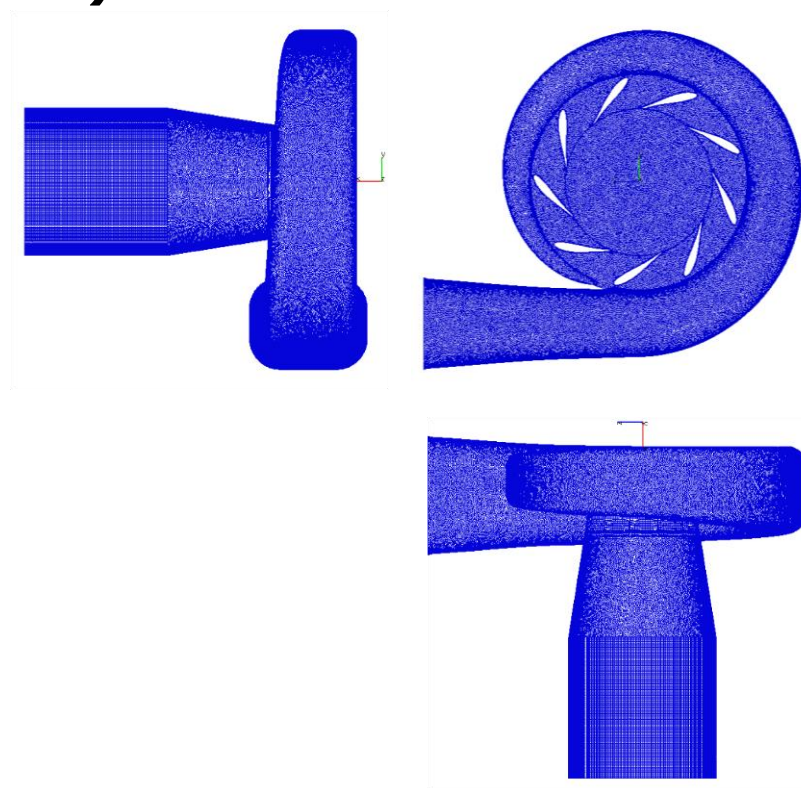


Obvodová složka rychlosti v mezeře mezi statorem a rotorem o závislosti na obvodovém směru

Popis plnění balíčku WP06 Turbodmychadla a výkonové turbíny – aerodynam. optimalizace, dynamika rotorů a přiřazení pro účinné přeplňované motory

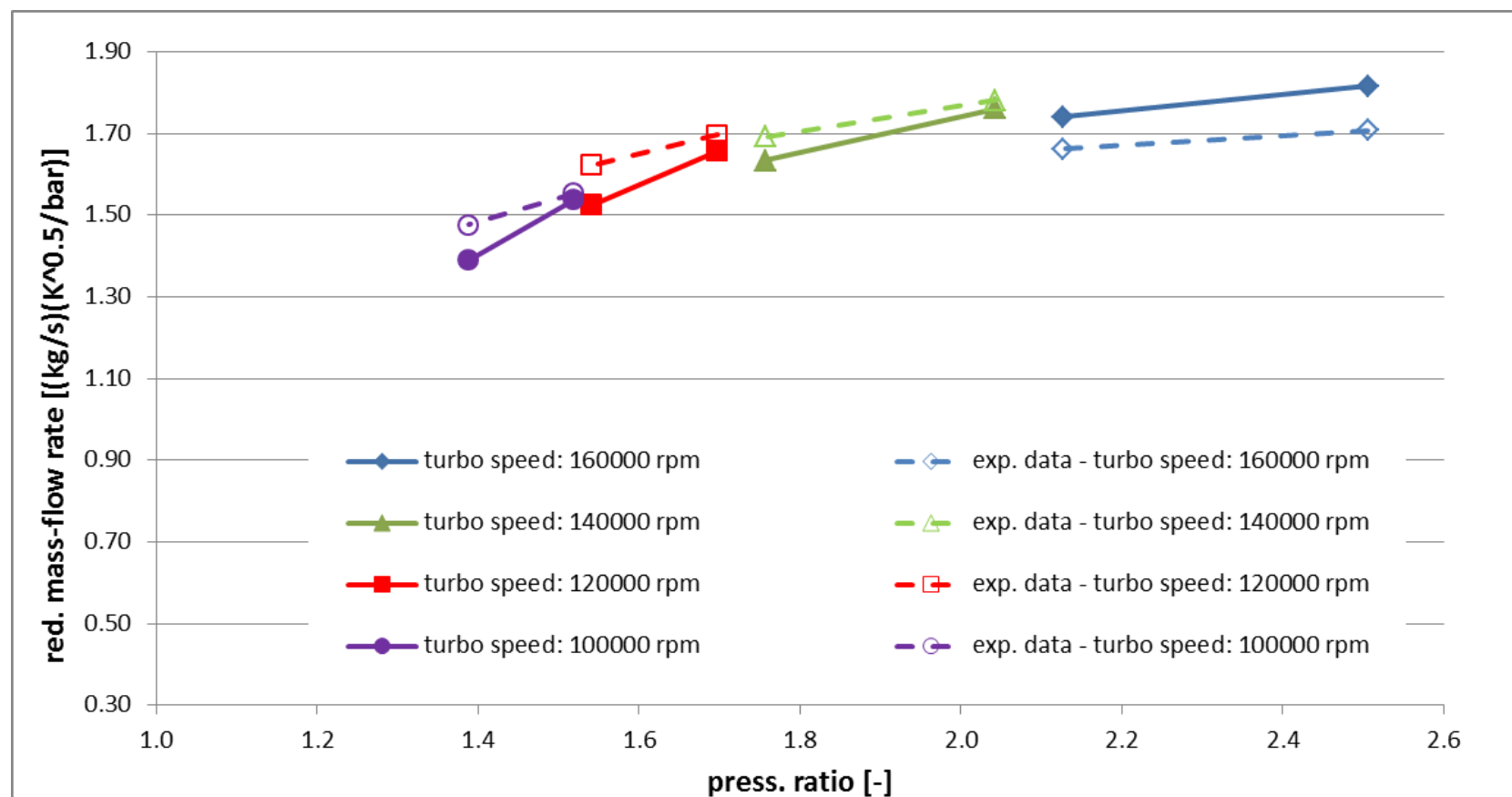
3-D turbína: 3- CFD model turbíny (C12VGT)

- zvládnuta metodika tvorby 3-D pohyblivé sítě při znalosti geometrie turbíny
- typická velikost oka sítě: 1mm
- model turbulence: AVL k- ζ -f
- srovnání s experimenty pro C12VGT
- ventilační ztráty odhadnuty pomocí empirického vztahu



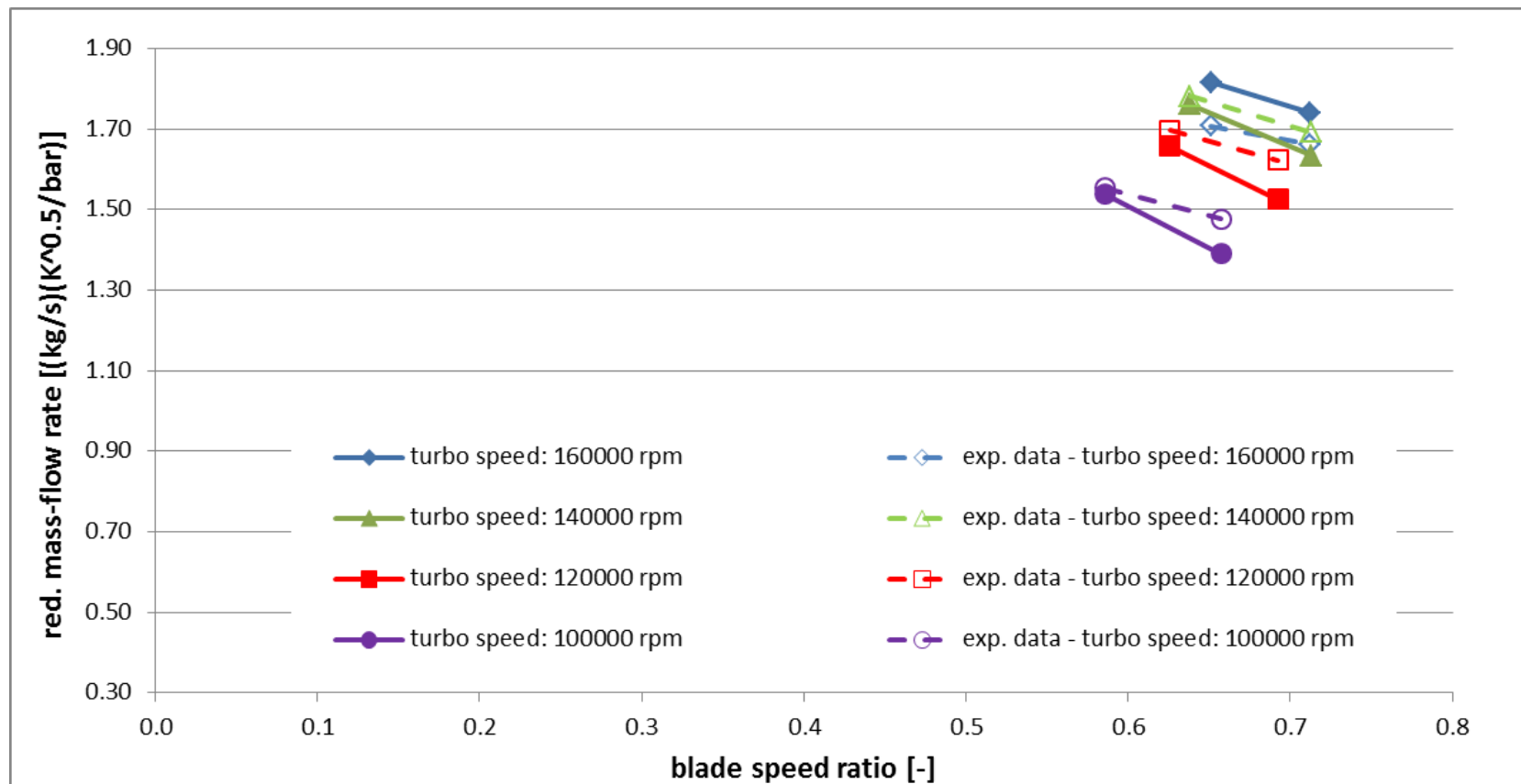
Popis plnění balíčku WP06 Turbodmychadla a výkonové turbíny – aerodynam. optimalizace, dynamika rotorů a přiřazení pro účinné přeplňované motory

3-D turbína: 3-D CFD simulace vs. exp. data



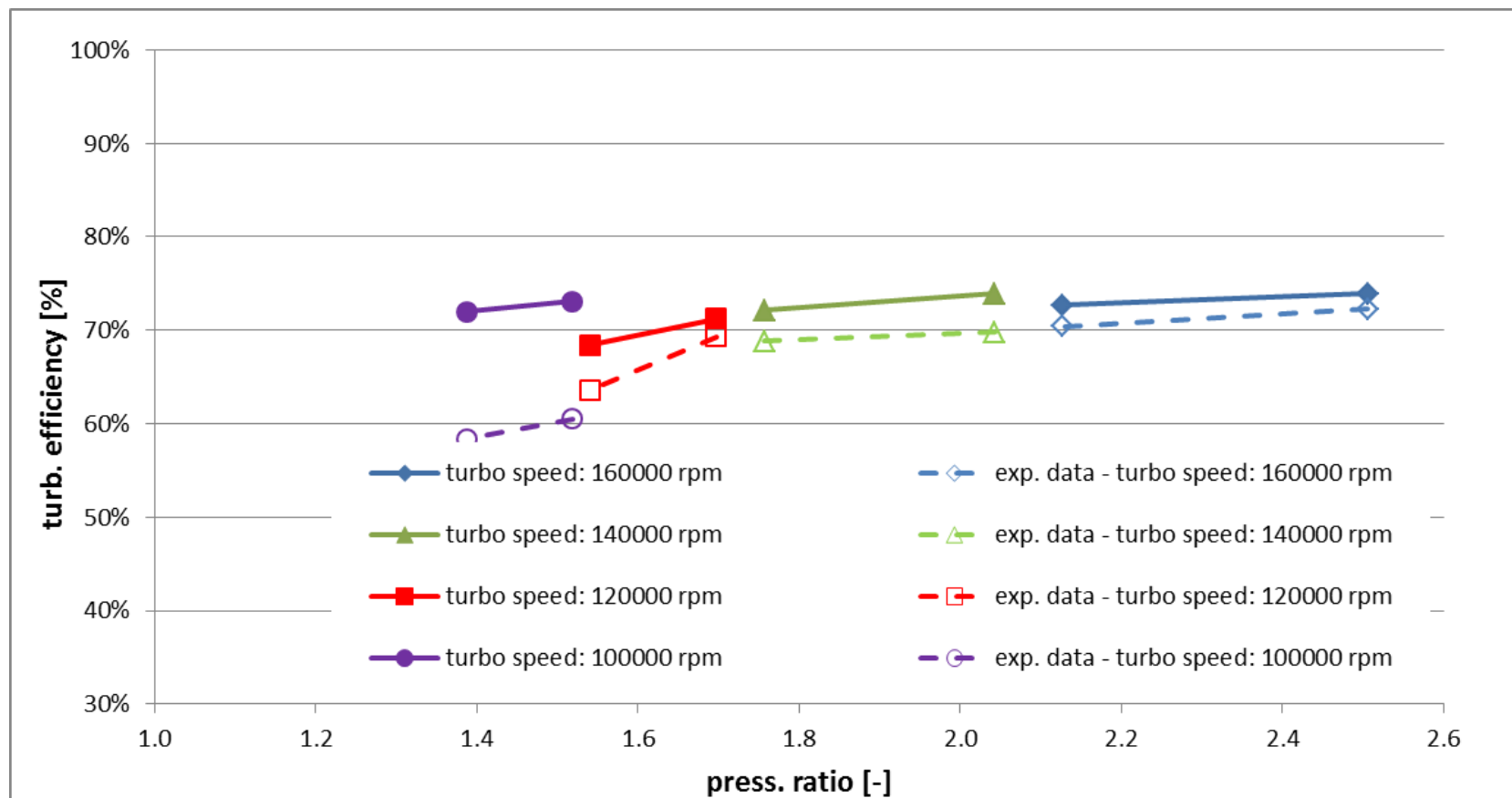
Popis plnění balíčku WP06 Turbodmychadla a výkonové turbíny – aerodynam. optimalizace, dynamika rotorů a přiřazení pro účinné přeplňované motory

3-D turbina: 3-D CFD simulace vs. exp. data



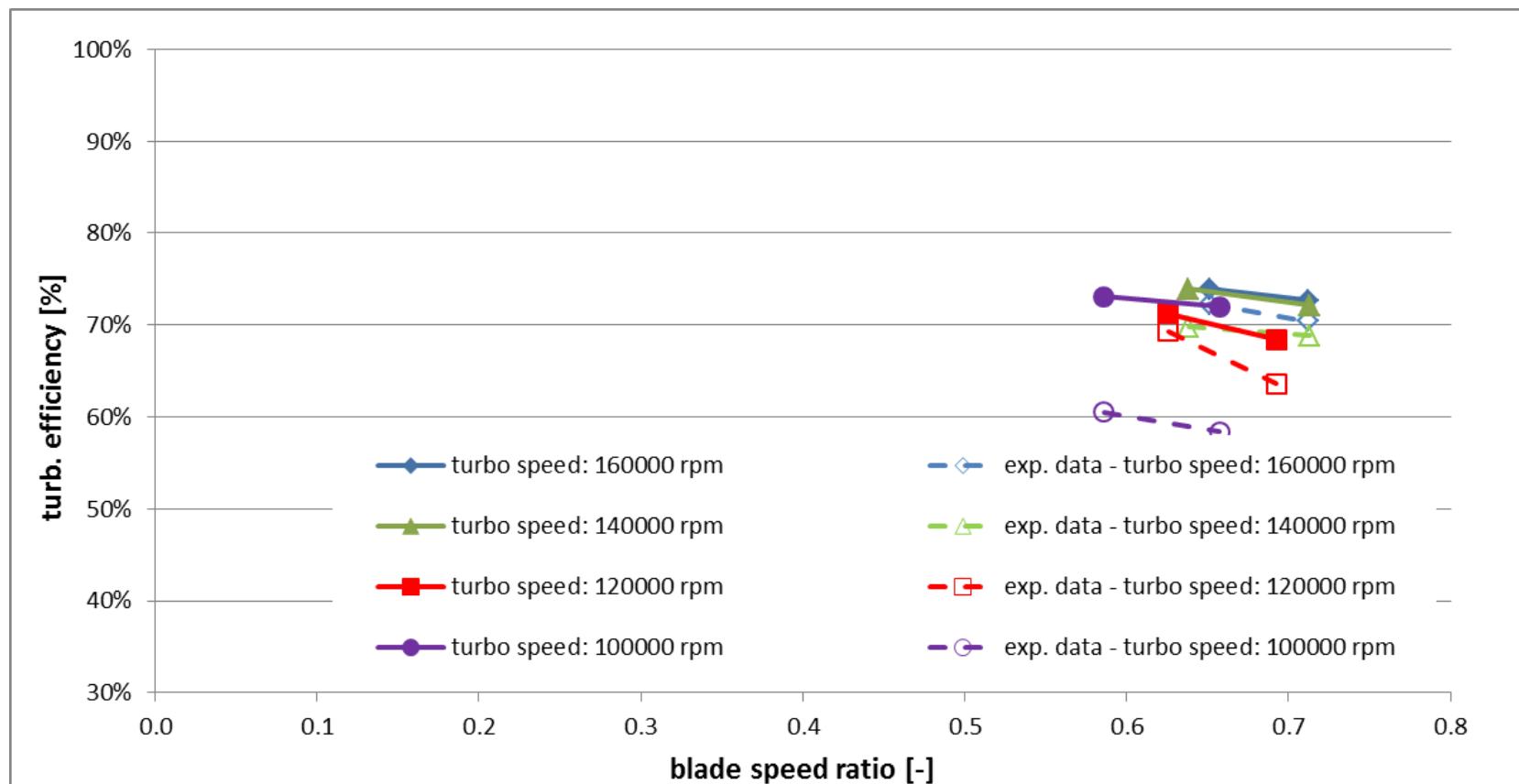
Popis plnění balíčku WP06 Turbodmychadla a výkonové turbíny – aerodynam. optimalizace, dynamika rotorů a přiřazení pro účinné přeplňované motory

3-D turbina: 3-D CFD simulace vs. exp. data



Popis plnění balíčku WP06 Turbodmychadla a výkonové turbíny – aerodynam. optimalizace, dynamika rotorů a přiřazení pro účinné přeplňované motory

3-D turbína: 3-D CFD simulace vs. exp. data



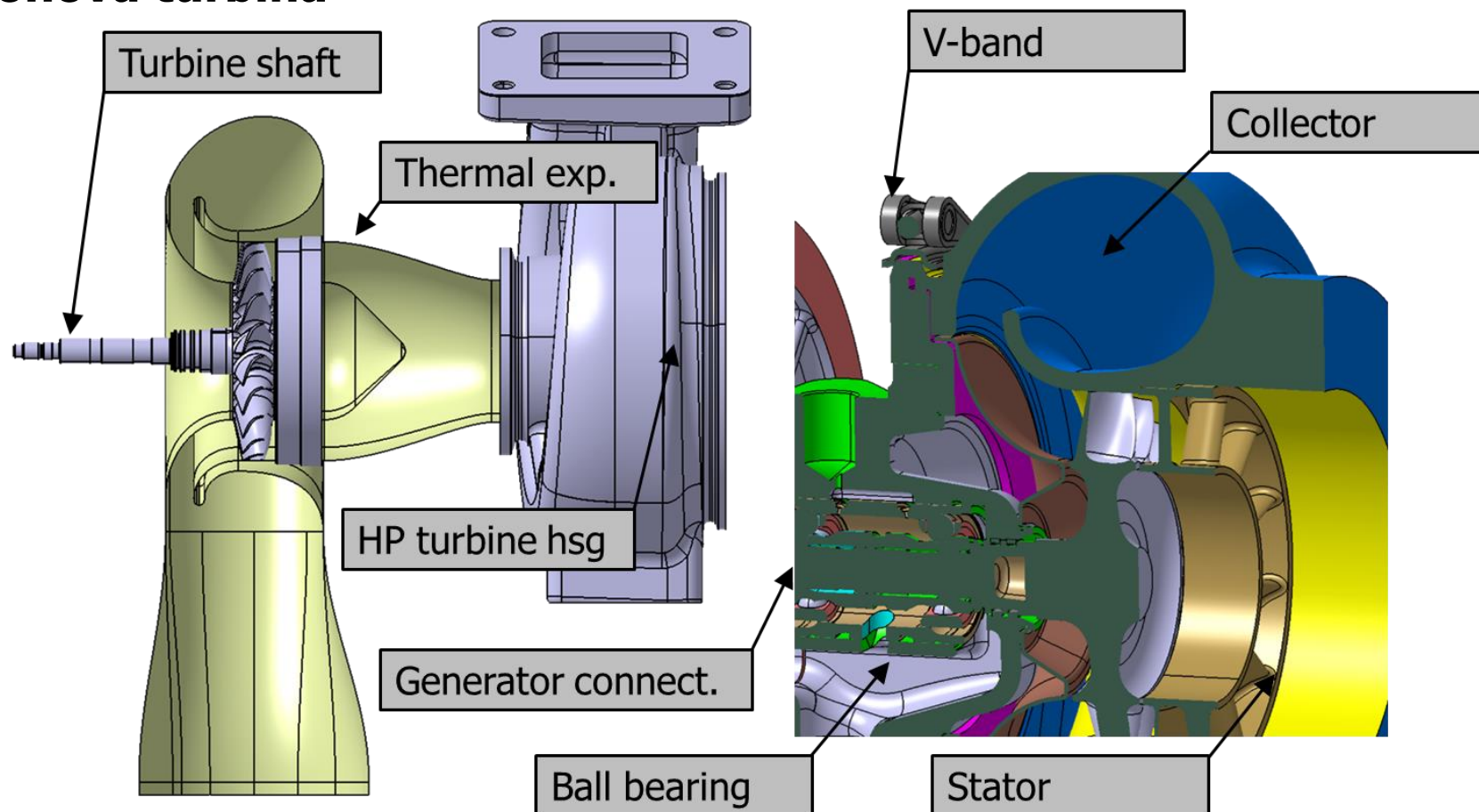
Popis plnění balíčku WP06 Turbodmychadla a výkonové turbíny – aerodynam. optimalizace, dynamika rotorů a přiřazení pro účinné přeplňované motory

Výkonová turbína: systém využití energie výfukových plynů s výk. turbinou

- Návrh přechodového kusu z HP turba do výkonové turbíny s ohledem na teplotní dilatace
- Návrh rozvaděče axiální turbíny s ohledem na maximální účinnost
- Návrh výstupu výfukových plynů z axiální výkonové turbíny pro napojení na instalaci ve vozidle
- Návrh napojení turbinové skříně na ložiskovou skříň s rotorem uloženým na valivých ložiscích
- Návrh napojení na generátor prostřednictvím pastorku a převodovky
- CFD simulace celého stupně výkonové turbíny

Popis plnění balíčku WP06 Turbodmychadla a výkonové turbíny – aerodynam. optimalizace, dynamika rotorů a přiřazení pro účinné přepřínované motory

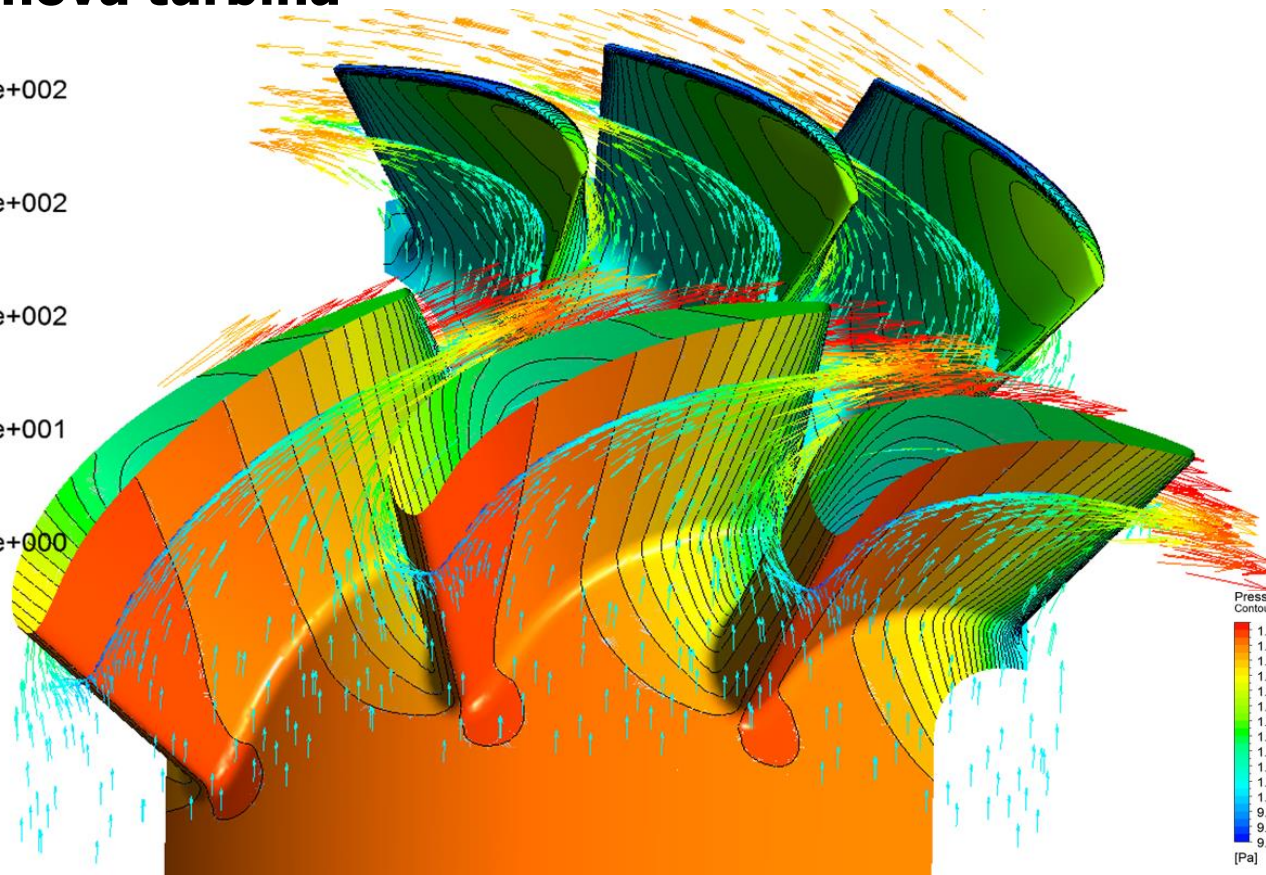
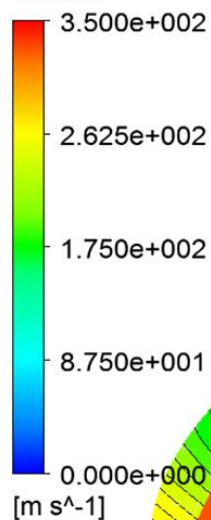
Výkonová turbína



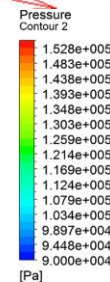
Popis plnění balíčku WP06 Turbodmychadla a výkonové turbíny – aerodynam. optimalizace, dynamika rotorů a přiřazení pro účinné přeplňované motory

Výkonová turbína

Velocity
Vector 2



Pressure
Contour 2



1.528e+005

1.483e+005

1.438e+005

1.393e+005

1.348e+005

1.303e+005

1.259e+005

1.214e+005

1.169e+005

1.124e+005

1.079e+005

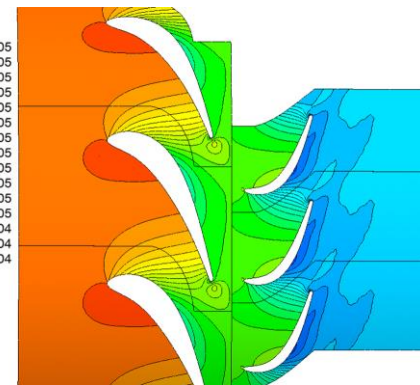
1.034e+005

9.897e+004

9.448e+004

9.000e+004

[Pa]

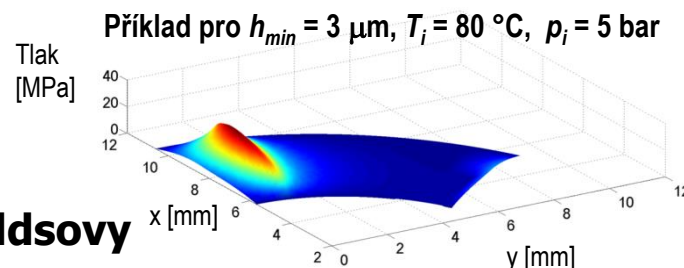


Popis plnění balíčku WP06 Turbodmychadla a výkonové turbíny – aerodynam. optimalizace, dynamika rotorů a přiřazení pro účinné přeplňované motory

Modelování axiálního ložiska

• Zpracování teorie mazání axiálního ložiska s vlivem

- Radiální tok tekutiny vlivem vysokým úhlových rychlostí
- Parametrický popis hlavních konstrukčních rozměrů
- Tepelná bilance při proudění kapaliny



• Popis proudění na základě modifikované Reynoldsovy rovnice

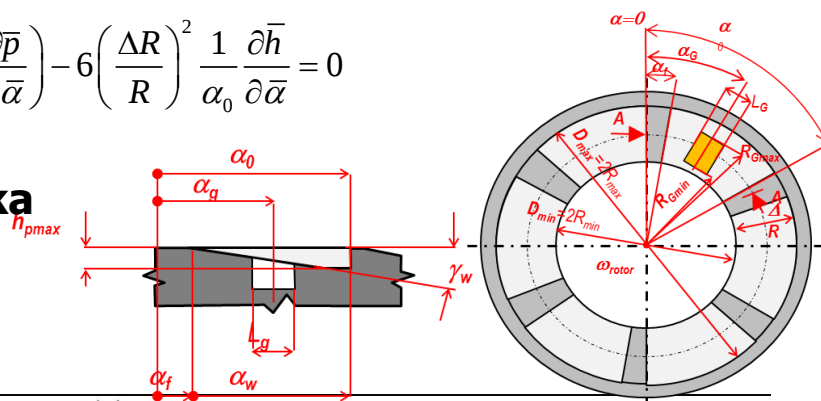
- Využití analytických a numerických přístupů
- Ustálené podmínky mazání
- Kavitace
- Vliv úhlové rychlosti
- Numerické řešení

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial r} \right) + \left(\frac{\Delta R}{R + \bar{r} \Delta R} \right) \bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial r} +$$

$$\left(\frac{\Delta R}{R + \bar{r} \Delta R} \right)^2 \frac{1}{\alpha_0^2} \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial \alpha} \right) - 6 \left(\frac{\Delta R}{R} \right)^2 \frac{1}{\alpha_0} \frac{\partial \bar{h}}{\partial \alpha} = 0$$

• Hlavní konstrukční parametry axiálního ložiska

- Vyhodnocení vhodných konstrukčních rozměrů
- Vyhodnocení reprezentativních provozních podmínek
- Vyhodnocení rozsahů parametrů



Popis plnění balíčku WP06 Turbodmychadla a výkonové turbíny – aerodynam. optimalizace, dynamika rotorů a přiřazení pro účinné přeplňované motory

Modelování axiálního ložiska

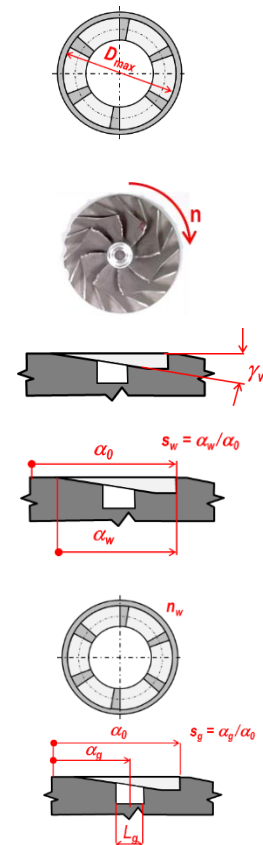
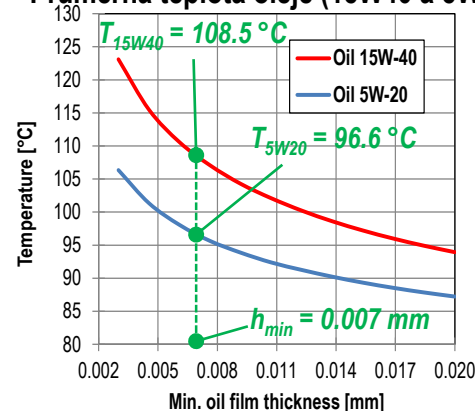
Analýza vlivu konstrukčních parametrů a provozních podmínek

- Geometrické rozměry funkčních ploch
- Počet a rozložení funkčních ploch
- Minimální tloušťka olejové vrstvy
- Teplota oleje vstupujícího do ložiska
- Tlak oleje vstupujícího do ložiska
- Typ oleje (15W40, 5W20, 0W30, 0W20)
- Otáčky

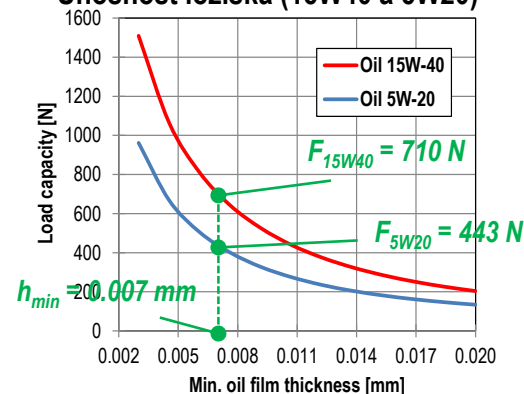
Vyhodnocované veličiny

- Únosnost ložiska
- Průměrná teplota olejové vrstvy
- Ztrátový výkon
- Třecí účinnost ložiska
- Požadavek na průtok oleje

Průměrná teplota oleje (15W40 a 5W20)



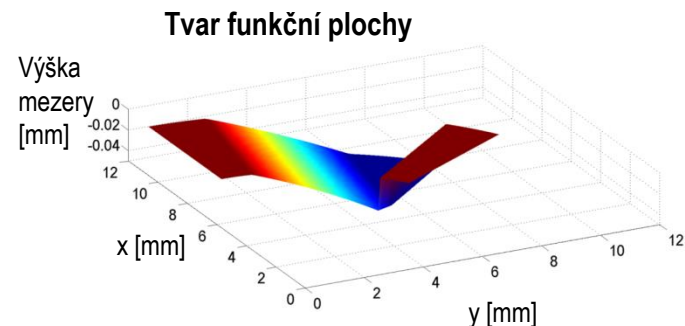
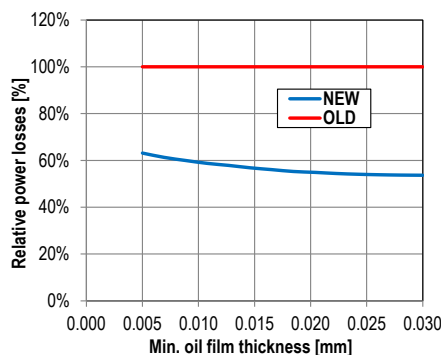
Únosnost ložiska (15W40 a 5W20)



Popis plnění balíčku WP06 Turbodmychadla a výkonové turbíny – aerodynam. optimalizace, dynamika rotorů a přiřazení pro účinné přeplňované motory

Modelování axiálního ložiska

- **Návrh konstrukčních úprav axiálního ložiska pro použití nízko viskózních olejů**
 - Kompenzace únosnosti změnou konstrukčních rozměrů
 - Umístnění mazacích otvorů
 - Tvorba metodiky pro konstrukční návrh ložiska
- **Výsledky → snížení třecích ztrát při zachování požadovaných parametrů (únosnost, oteplení oleje, požadavky průtoku oleje)**
 - Snížení ztrát průměrně o 43 % ve vybraných hlavních provozních režimech



- Příprava technického experimentu pro ověření teoretických předpokladů

Plnění cílů, milníků a výstupů, splněné výsledky balíčku WP06 Turbodmychadla a výkonové turbíny – aerodynam. optimalizace, dynamika rotorů a přiřazení pro účinné přeplňované motory

Plnění dílčích cílů, milníků a výstupů

WP06C08: Turbínový stupeň s maximální účinností pro převažující provozní režim (Honeywell). => **bude splněno do konce roku 2016**

Přehled splatných výsledků a jejich plnění

WP06V011: Popis systému řízení energie využitelné ze spalín (Honeywell).
=> **bude splněno do konce roku 2016**

Návrh dalšího postupu v balíčku WP06 Turbodmychadla a výkonové turbíny – aerodynam. optimalizace, dynamika rotorů a přiřazení pro účinné přepřínované motory

Návrh dalšího postupu včetně návrhů na spolupráci a realizaci výstupů

ČVUT: dle plánu + spolupráce s **WP20** při „ladění“ řízení motoru/simulace

Honeywell: dle plánu (výkonová turbína)

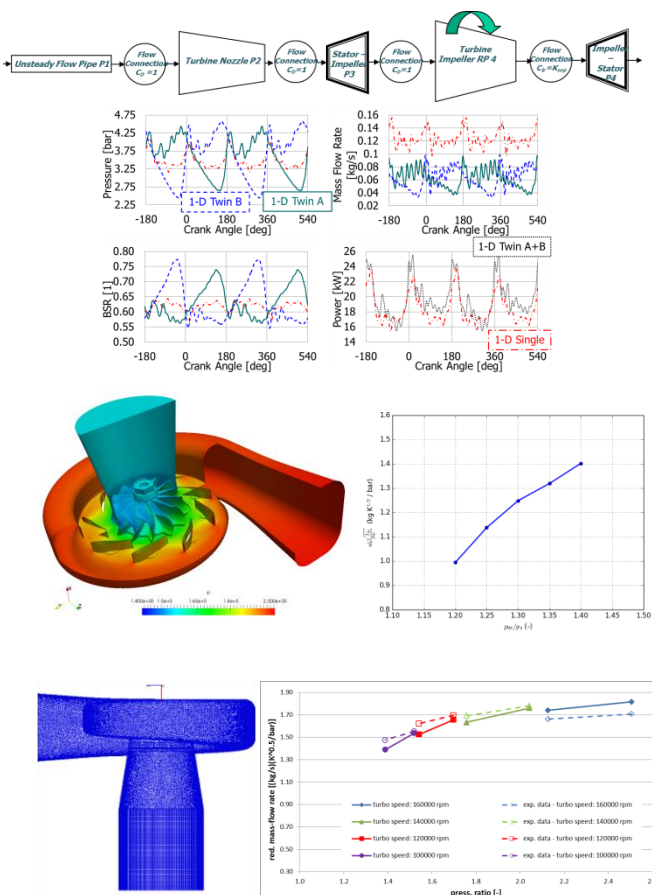
VUT: dle plánu (axiální ložisko turbodmychadla) + spolupráce s Honeywell

Návrh dalšího postupu v balíčku WP06 Turbodmychadla a výkonové turbíny – aerodynam. optimalizace, dynamika rotorů a přiřazení pro účinné přepínávané motory

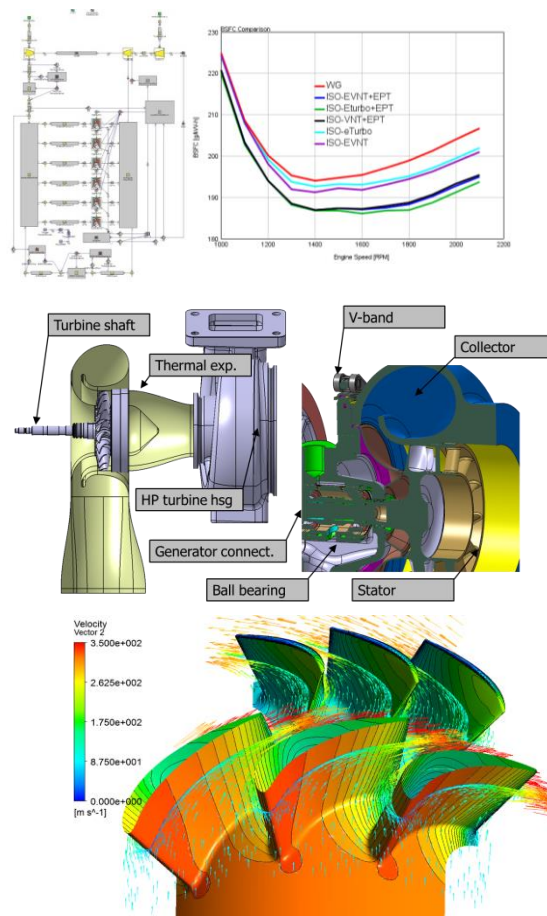
Děkuji za pozornost

Výťah z prací 2012-2016 na WP06 Turbodmychadla a výkonové turbíny – aerodynam. optimalizace, dynamika rotorů a přiřazení pro účinné přeplňované motory

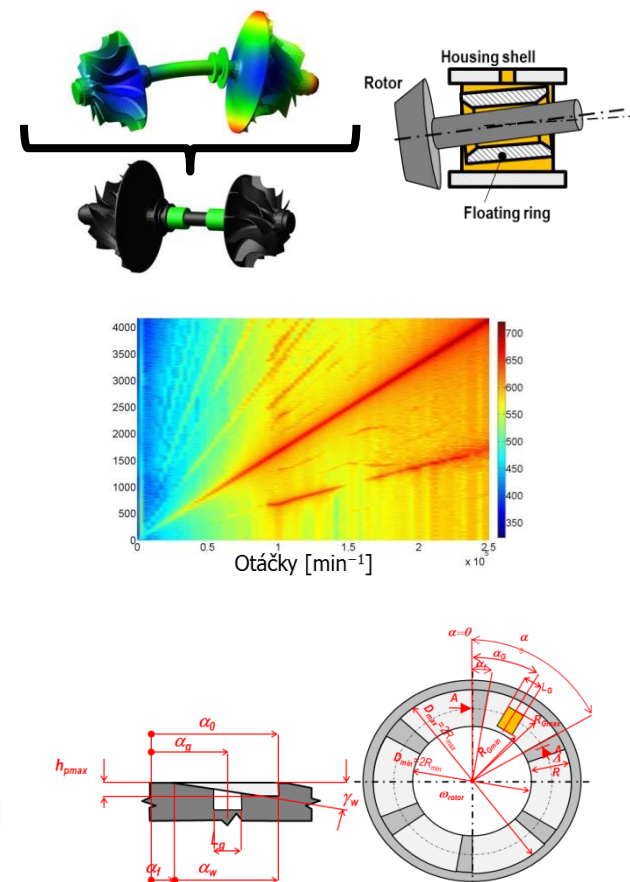
ČVUT: CFD modely turbíny



Honeywell: výkonová turbína



VUT Brno: virtuální turbo

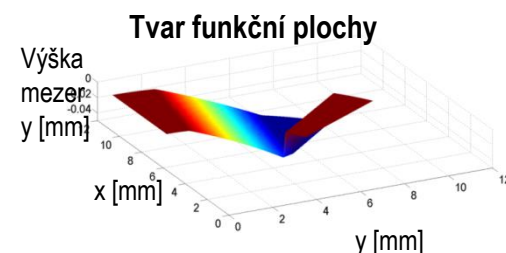
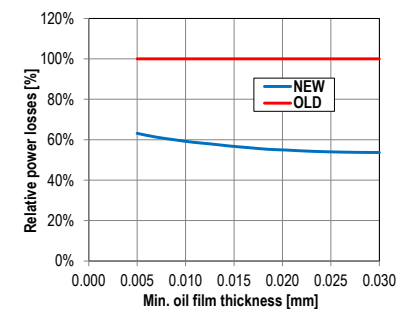
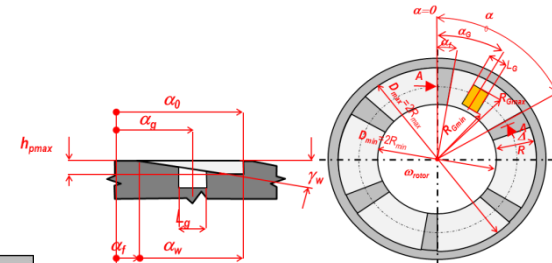
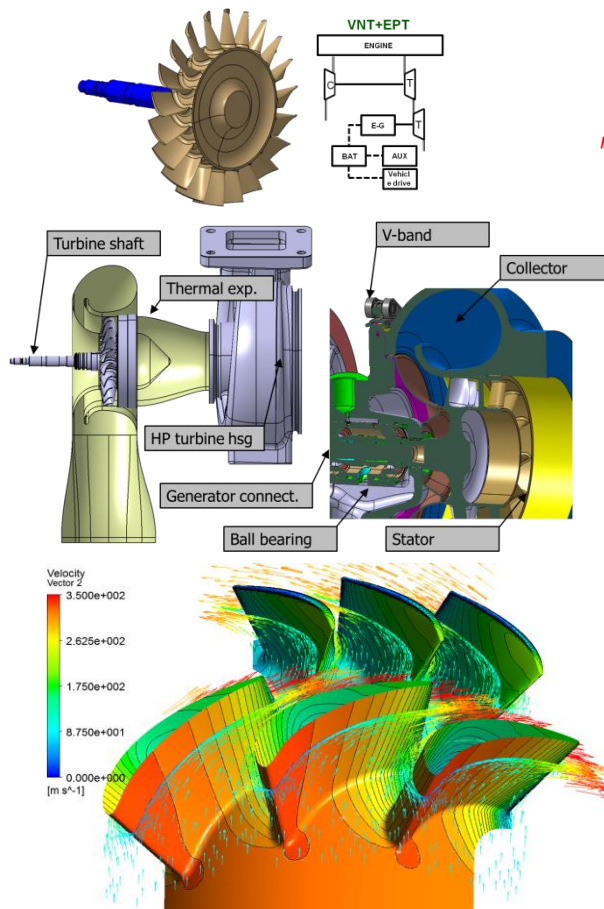
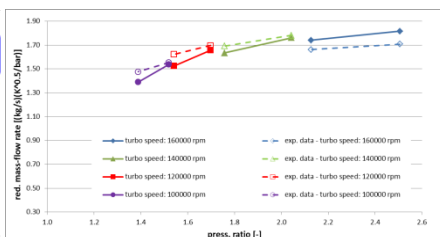
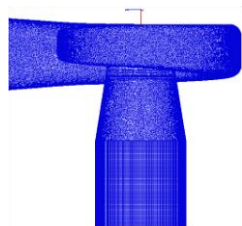
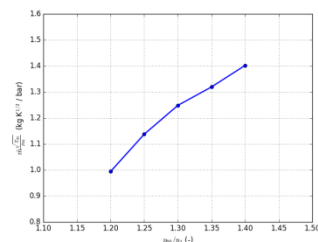
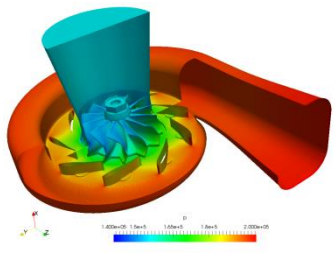
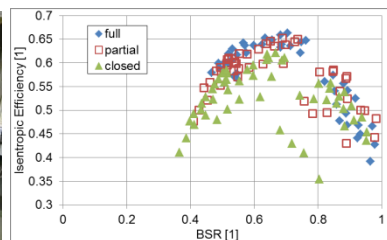
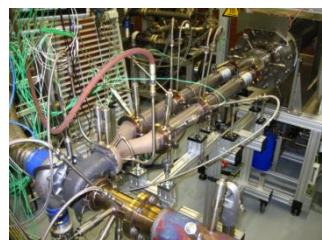


Výťah z provedených prací na WP06 Turbodmychadla a výkonové turbíny – aerodynam. optimalizace, dynamika rotorů a přiřazení pro účinné přepínávané motory

ČVUT: CFD modely turbíny

Honeywell: výkonová turbína

VUT Brno: axiální ložisko



Abstract 2016 of WP06 Turbochargers and power turbines – aerodynamic optimization, rotor dynamics and matching

ČVUT: CFD turbine models

Honeywell: power turbine

VUT Brno: thrust bearing

