

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

WP06: Turbodmychadla a výkonové turbiny – 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 – Prof. Ing. V. Píštěk, DrSc., 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/turbiny, řízení turbodmychadla (s využitím spolehlivé předpovědi pracovních map lopatkových strojů), snížení mechanických ztrát.

Dílčí cíle balíčku pro nejbližší období

Detailní 1-D model turbiny včetně metody pro efektivní kalibraci. (ČVUT)

Virtuální prototyp turbodmychadla umožňující řešit podstatné problémy dynamiky rotorů. (VUT v Brně)

Popis obsahu 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).

2012 - 2016: 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 obsahu 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 spalín obsažené ve výfukových plynech vozidlového motoru (Honeywell s.r.o).

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

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).

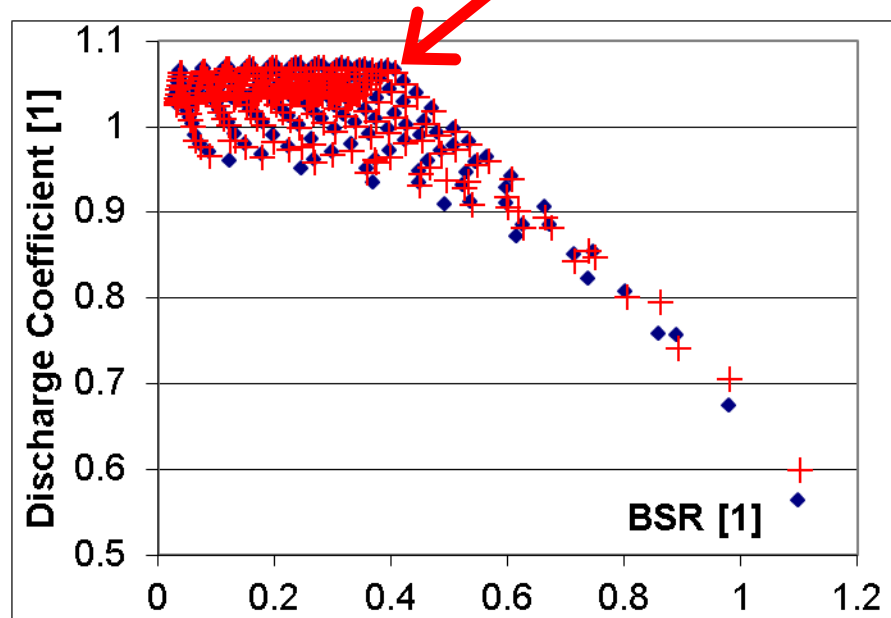
2016 – 2017: Optimalizování řídicího systému rozdělení výkonu v případě aplikace výkonové turbíny, definování vhodných regulačních strategií (Honeywell s.r.o).

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

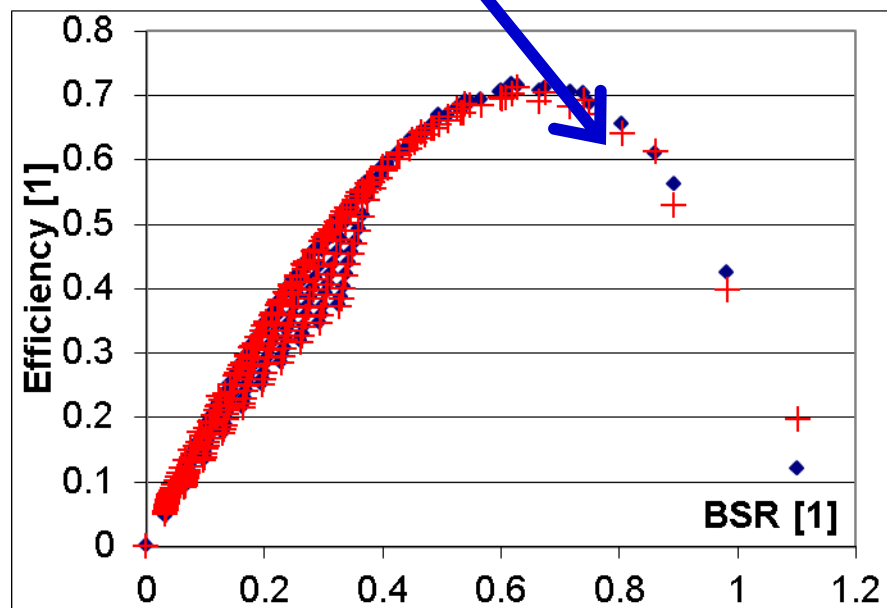
Popis obsahu balíčku WP06 Turbodmychadla a výkonové turbíny – aerodynam. optimalizace, dynamika rotorů a přiřazení pro účinné přeplňované motory

Popis výstupů a výsledků: 1-D model radiální turbíny

0-D Turbine Map

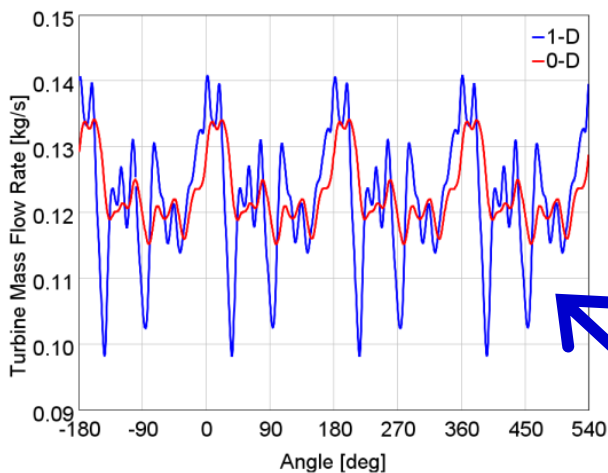
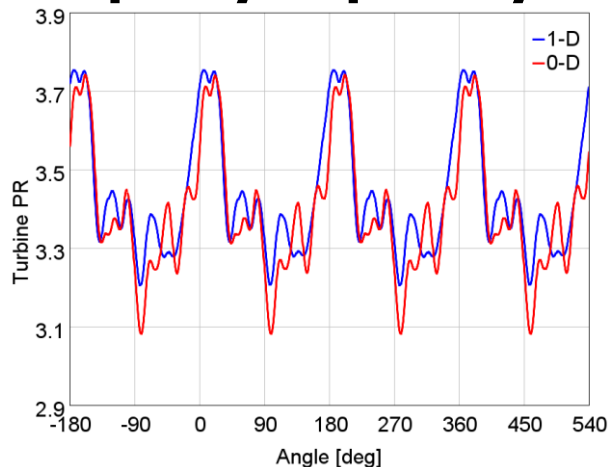


1-D Model



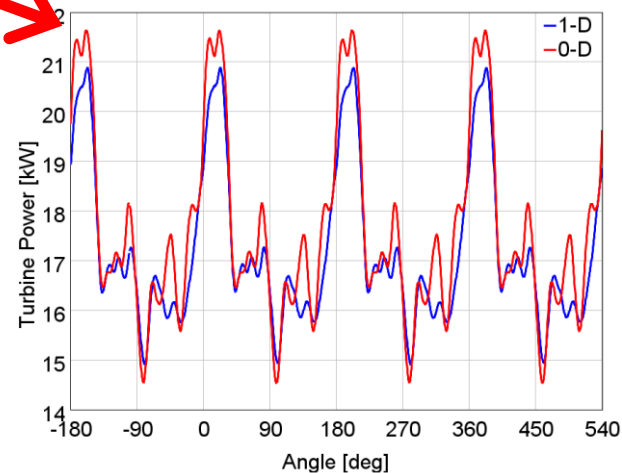
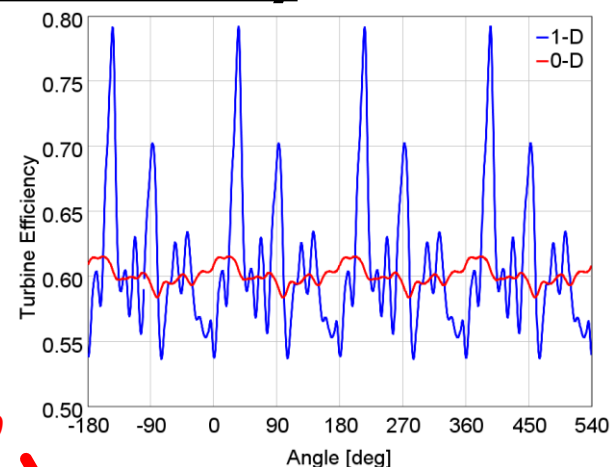
Popis obsahu balíčku WP06 Turbodmychadla a výkonové turbíny – aerodynam. optimalizace, dynamika rotorů a přiřazení pro účinné přeplňované motory

Popis výstupů a výsledků: 1-D model radiální turbíny



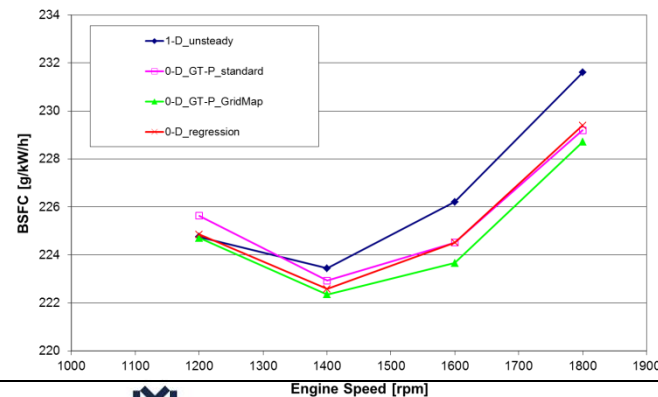
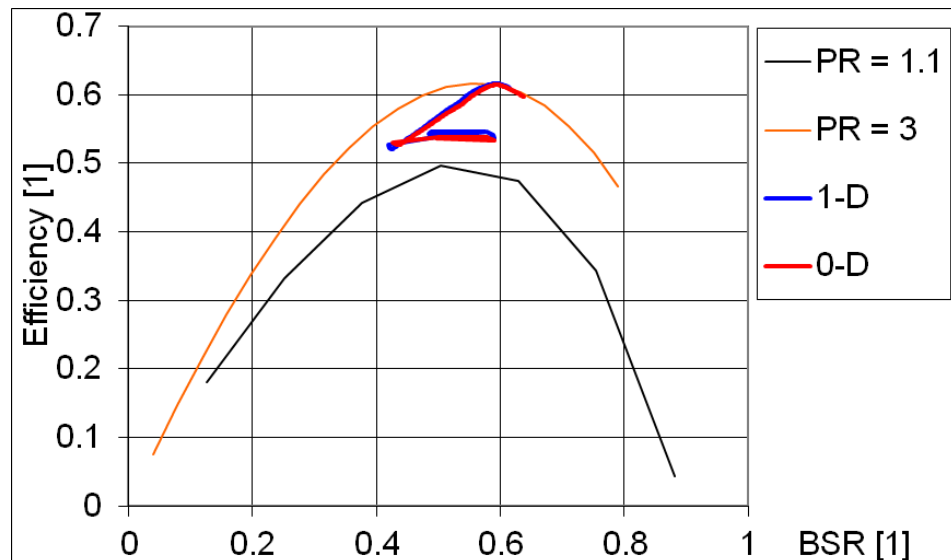
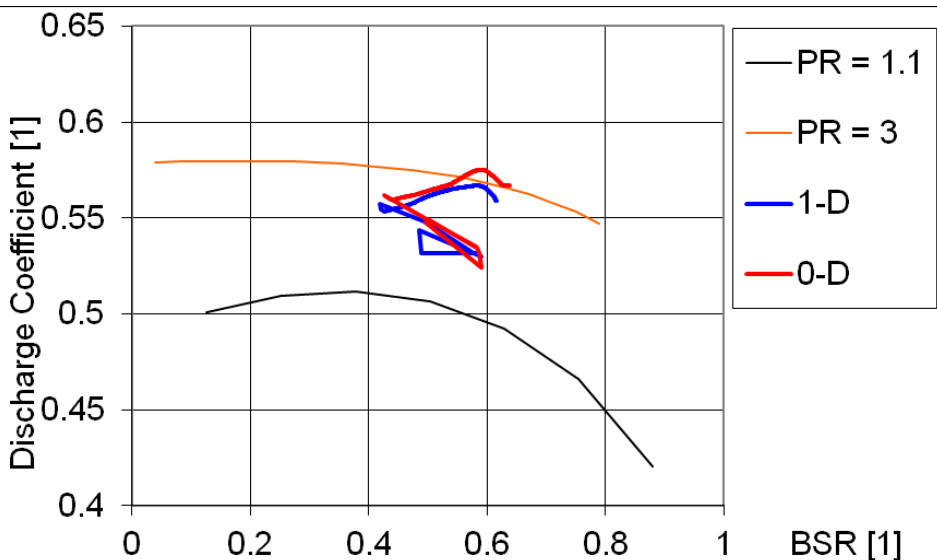
1-D Model

0-D Turbine Map



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

Popis výstupů a výsledků: 1-D model radiální turbíny



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

Popis výstupů a výsledků: 1-D model rad. turbíny (experimenty)

John Deere 6068 Diesel

Vrtání [mm]: 106.4

Zdvih [mm]: 127

Zdvihový objem [dm³]: 6.8

Palivo: nafta

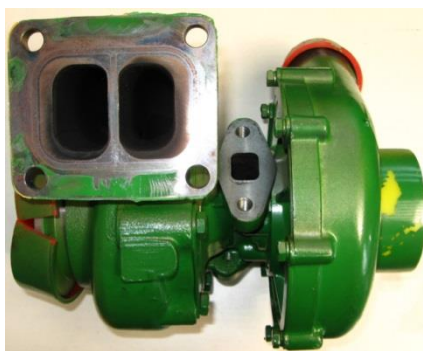
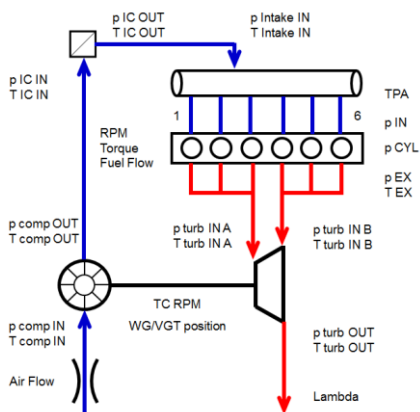
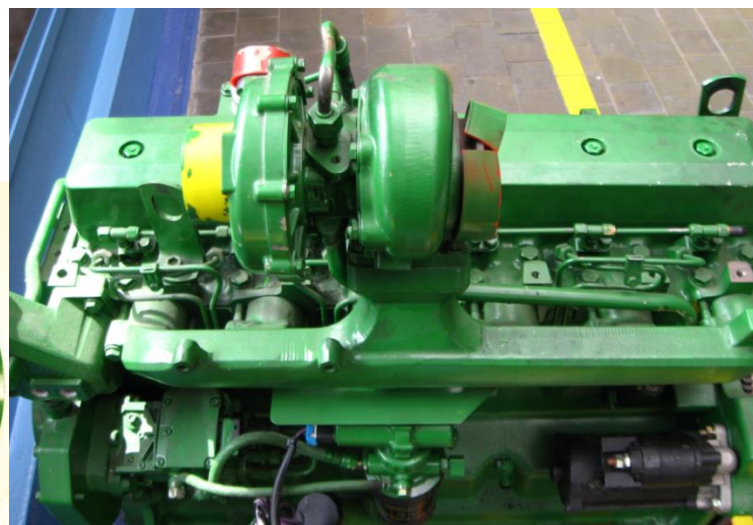
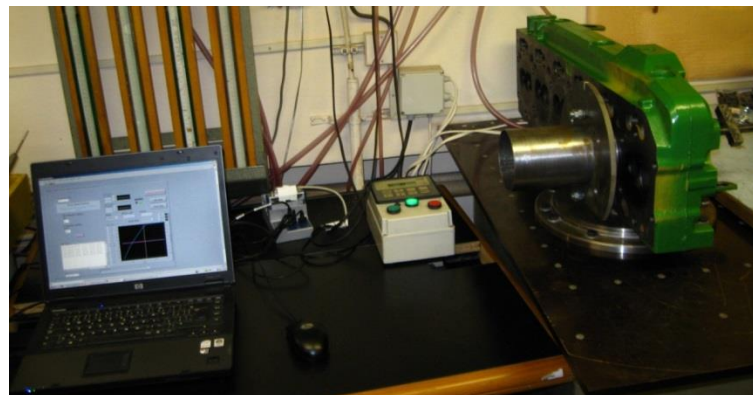
Uspořádání: řadový šestiválec

Pořadí zapalování: 1-5-3-6-2-4

Počet sacích ventilů: 1

Počet výfukových ventilů: 1

Kompresní poměr: 17



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

Popis výstupů a výsledků: Zjednodušený CFD nástroj turbíny

- Založen na řešení Eulerových rovnic v meridiální ploše s uvažováním proměnné šířky mezilopatkového kanálu

- Jednorozměrná verze výchozích rovnic:

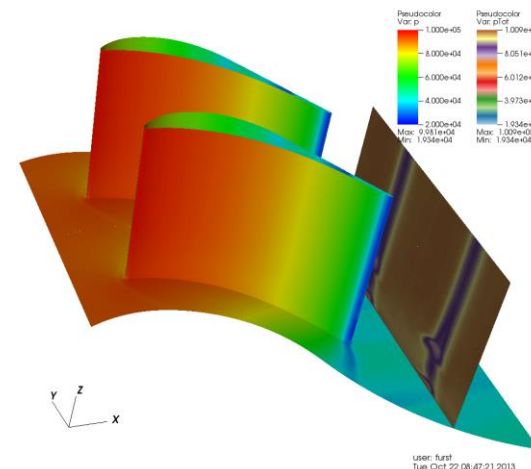
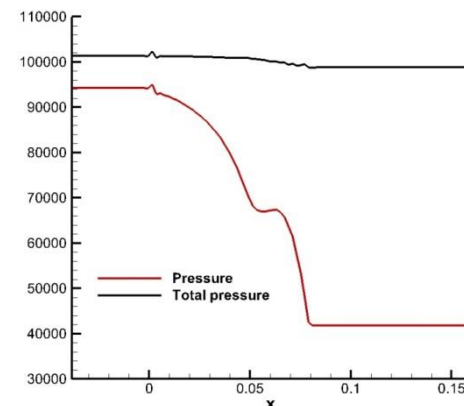
$$W_t + F(W)_x = Q_B(W) + Q_L(W)$$

Q_B – zdrojový člen zahrnující vliv tvaru lopatkování

Q_L – zdrojový člen zahrnující ztráty modelované pomocí empirických vztahů

- Testy pro axiální turbínu:

- Navržen iterační postup řešení
- 2D výsledky pro mříž SE1050
- 3D metoda odladěna, získány první výsledky



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

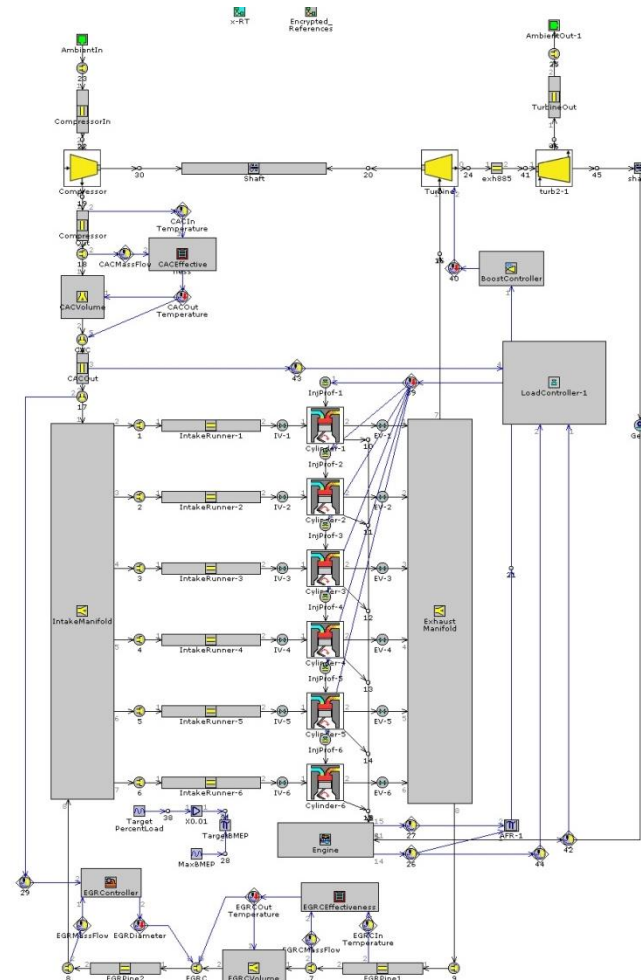
Popis výstupů a výsledků: Využití odpadního tepla

- Shromážděny varianty možných konceptů využití tepla ve výkonové turbíně s přenosem výkonu elektrickým a mechanickým
- Zatím simulovány systémy s mechanickým přenosem výkonu
- Dokončeny simulace s pevným převodovým poměrem
- Pro simulaci vytvořeny modely motoru v nástroji GT-Power
- Zvolen 9-ti litrový 6-ti válcový naftový motor pro nákladní vozidlo o výkonu 304 kW při 2000 ot/min
- Provedeny simulace s radiální výkonovou turbínou
- Při použití axiální turbíny možnost zvýšení účinnosti díky menší tlakové ztrátě na výstupu turbodmychadla
- Modely regulovány na stejný cílový výkon na klikovém hřídeli motoru a daný poměr paliva a vzduchu
- Modely porovnávány na základě vypočtené BSFC motoru

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

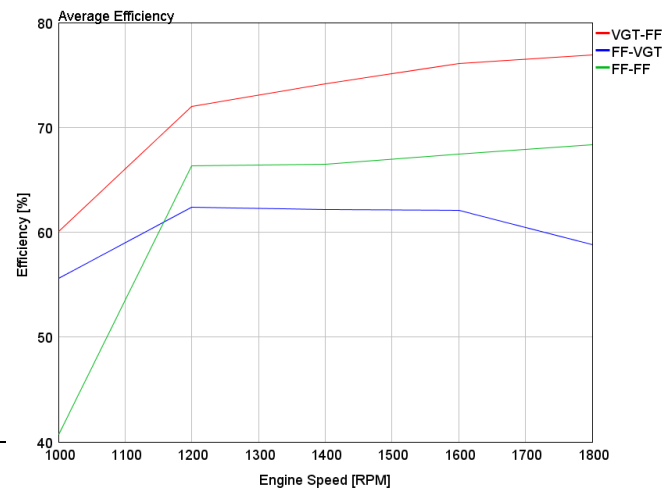
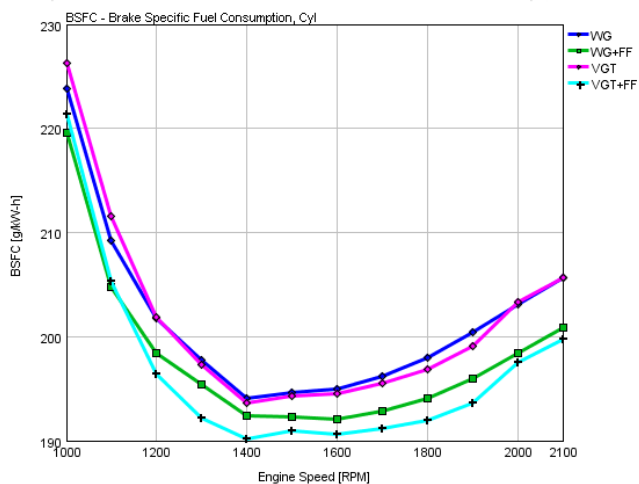
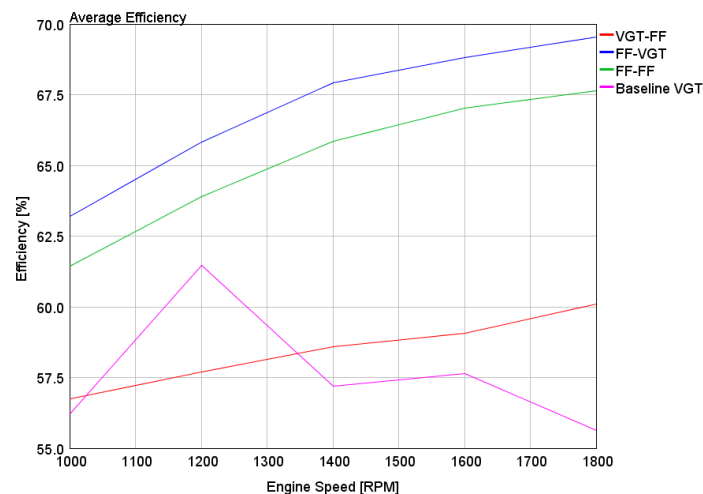
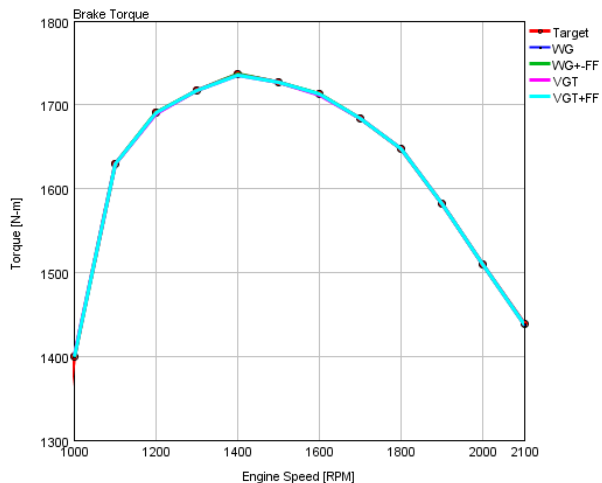
Popis výstupů a výsledků: Využití odpadního tepla

- Jako výchozí základní varianta použito přeplňování turbodmychadlem s proměnlivou geometrií turbíny (VGT)
- Detailněji simulovány následující varianty:
 - VGT+FF
 - WG+FF
 - FF+VGT
 - FF+FF



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

Popis výstupů a výsledků: Využití odpadního tepla



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

Popis výstupů a výsledků: Virtuální prototyp turbodmychadla

Základní výpočtový model rotoru TD

- Výpočtový konečnoprvkový model (ANSYS) na základě nosíkových prvků se zahrnutím vliv Coriolisova efektu a gyroskopických momentů
- Automatická generace na základě makra
- Modely ložiska na základě Somerfeldových čísel (koordinace s WP08)
- Výsledkem modální analýza rotoru
- Implementace do DASY (12/2013)

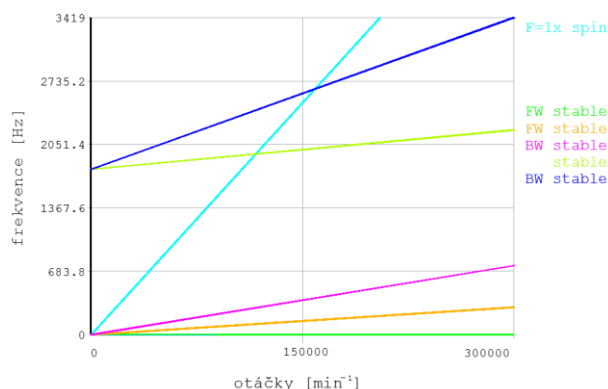
Výpočtový model rotoru TD



Zadání rozměrů pro jednotlivé úseky na hřídeli

úsek číslo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
průměr [mm]	4	5	8	20	6,5	8	6,5	8	6,5	6,5	6,5	16	32	6,5
délka [mm]	4	10	2	14	15	1	4	1	3	23	7	2	8	21

Campbellův diagram pro rozsah otáček do 300 000 min⁻¹



Vlastní tvary a frekvence rotoru

Konický tvar kmitání příslušející první vlastní frekvenci



První ohybový tvar kmitání příslušející druhé vlastní frekvenci



Druhý ohybový tvar kmitání příslušející třetí vlastní frekvenci

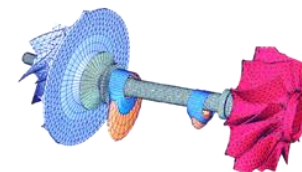


Popis obsahu balíčku WP06 Turbodmychadla a výkonové turbíny – aerodynam. optimalizace, dynamika rotorů a přiřazení pro účinné přeplňované motory

Popis výstupů a výsledků: Virtuální prototyp turbodmychadla

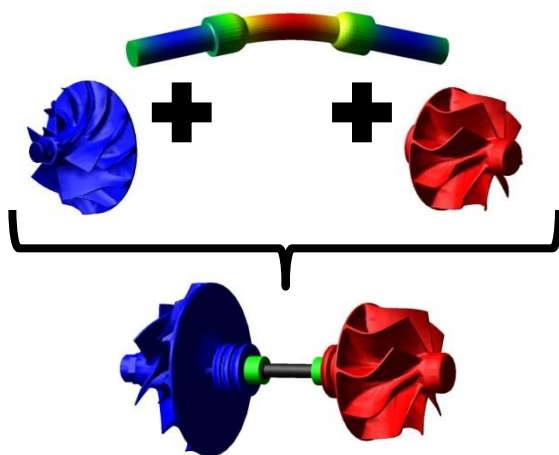
Výpočtový model na základě MBS – model rotoru

- Rotor: Pružné těleso na základě MKP (pouze hřídel, celý rotor)



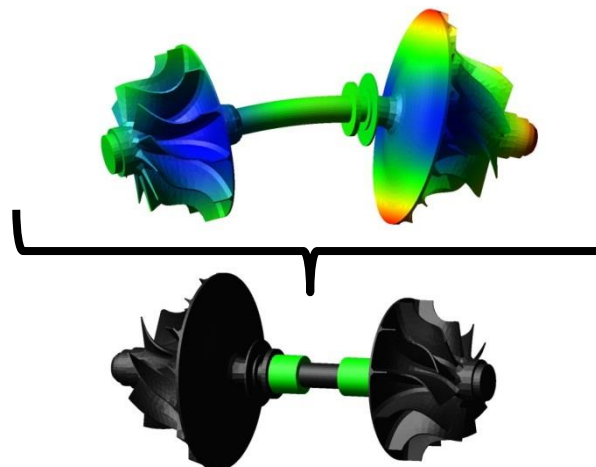
Přístup k výpočtovému modelování rotoru TD

Pružná hřídel + tuhá kola



Malé turbodmychadlo ($\Phi_{d_{lo\check{z}}} = 6\text{mm}$)
Motor pro osobní automobil

Pružná hřídel + pružná kola



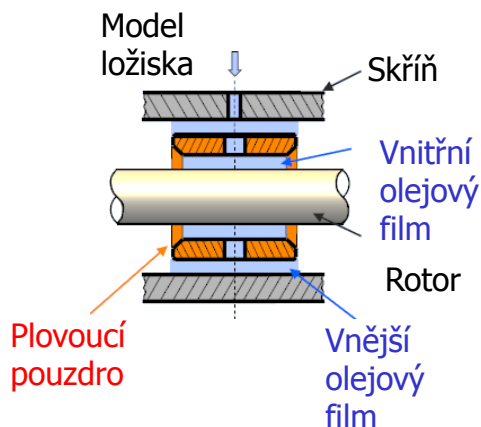
Větší turbodmychadlo ($\Phi_{d_{lo\check{z}}} = 13\text{mm}$)
Motor pro nákladní automobil

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

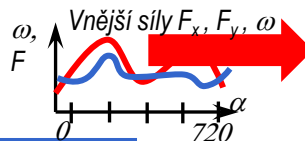
Popis výstupů a výsledků: Virtuální prototyp turbodmychadla

Výpočtový model na základě MBS – model ložiska

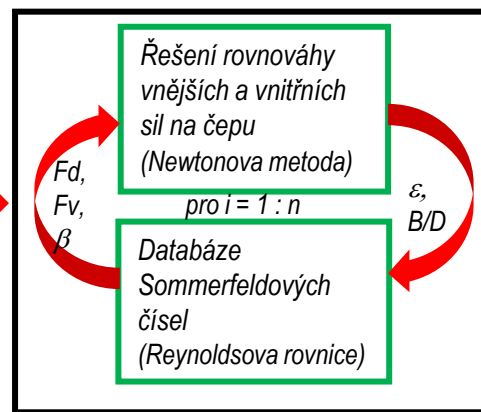
- Klíčová část výpočtového modelu
- Adaptace výpočtového modelování pohonných jednotek (koordinace s WP08)
- Model vnější a vnitřní olejové vrstvy na bázi Reynoldsovy rovnice



Dynamika rotoru TD
(Excel, ADAMS)

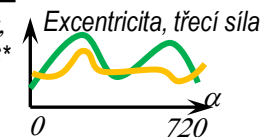


j ... pořadí tepelného kroku
 T_{err} ... maximální rozdíl teplot po sobě jdoucích iteracích, např. 1 K



Viskozita $\eta(T_j)$

Dokud $T_j - T_{j-1} < T_{err}$



Stanovení oteplení

Výpočet ztrátového výkonu

$$T(j) = T_0 + \frac{P_{Rm}}{Q_m \cdot c}$$

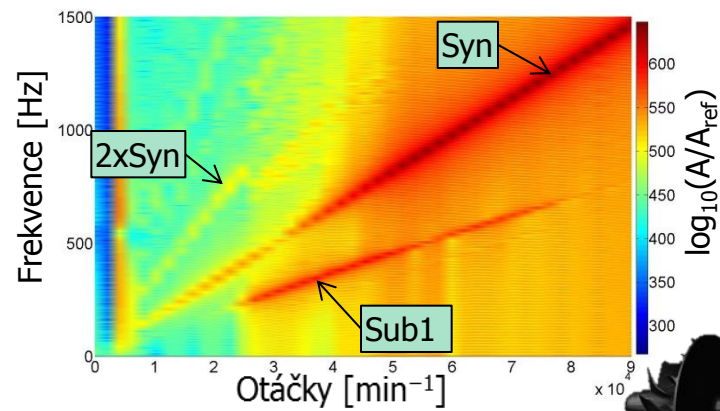
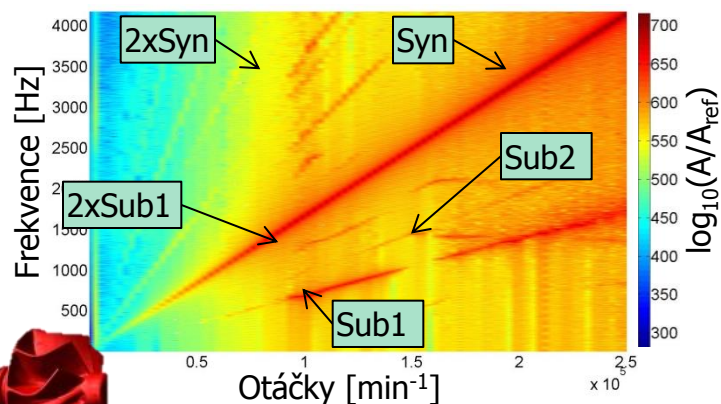
Ztrátový výkon P_{RM}

$$P_{Rm} = \frac{BD^2 \eta \omega_{cep}^2}{2\psi} \frac{1}{\alpha_A} \int_0^{\alpha_A} S^*(\alpha) d\alpha$$

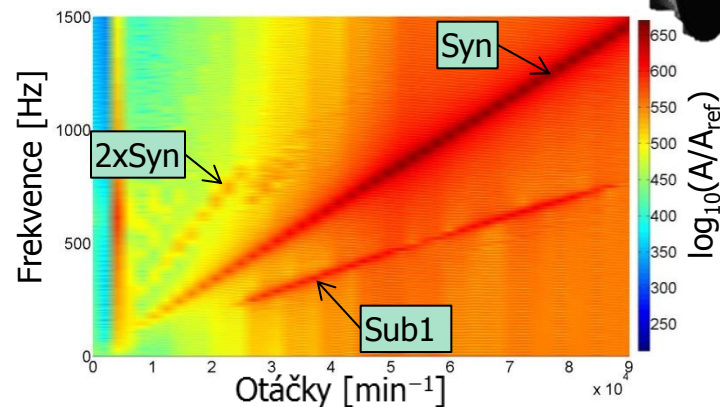
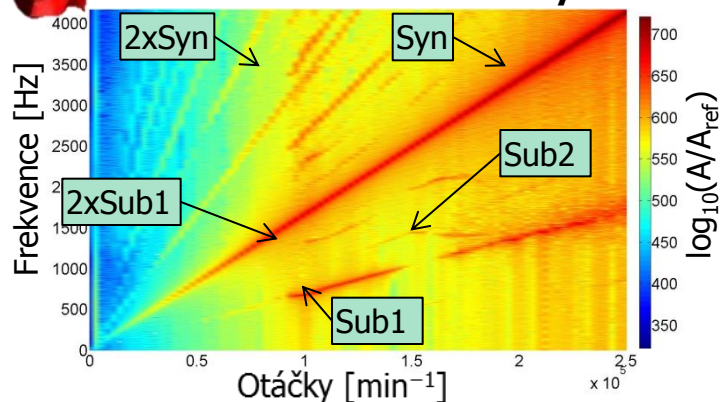
Popis obsahu balíčku WP06 Turbodmychadla a výkonové turbíny – aerodynam. optimalizace, dynamika rotorů a přiřazení pro účinné přeplňované motory

Popis výstupů a výsledků: Virtuální prototyp turbodmychadla

Dynamika rotorů – plovoucí pouzdra



Zrychlení na turbínové straně



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

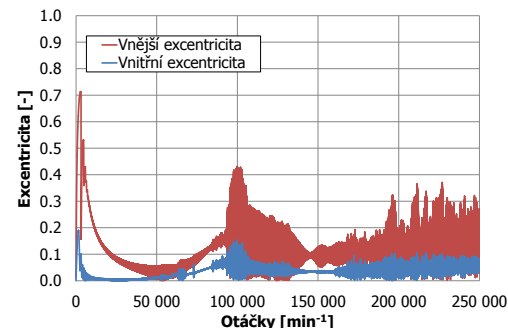
Popis výstupů a výsledků: Virtuální prototyp turbodmychadla

Dynamika rotorů – plovoucí pouzdra

- Příklad výsledků řešení rozběhu TD

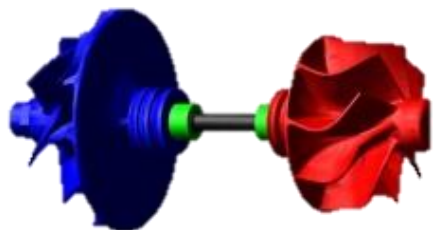
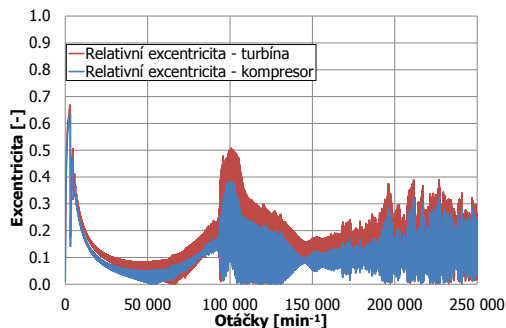
Relativní excentricita

(vnější a vnitřní ložisko)

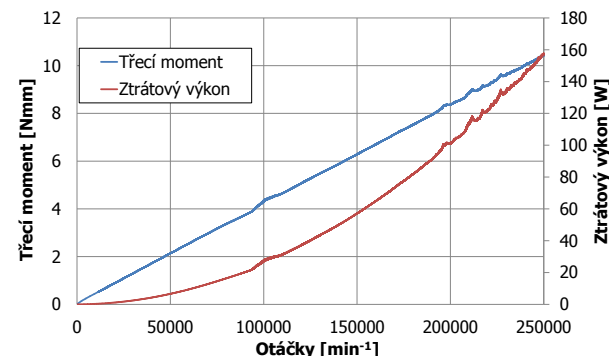


Relativní excentricita

(kompresorová a turbínová strana)



Třecí moment a ztrátový výkon



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

Popis výstupů a výsledků

ČVUT:

Žák, Z., Vítek, O., Macek, J.: "Application of a Radial Turbine 1-D Model," In: MECCA Journal of Middle European Construction and Design of Cars. 2013, vol. 11, no. 1, p. 1-8. ISSN 1214-0821, ISSN 1804-9338 (Online)

Honeywell s.r.o.:

(interní zpráva ER-13-1183)

VUT:

Novotný, P., Knotek, J.: "Rotordynamics Simulation based on Advanced Computational Models." Brno. 2013. p. 1 – 15 (Výzkumná zpráva)

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

Návrh dalšího postupu včetně návrhů na spolupráci a realizaci výstupů

ČVUT je odpovědné za výstupy v rámci WP06, které se týkají CFD simulací lopatkových strojů.

Honeywell s.r.o. je odpovědné za práce týkající se návrhu řešení pro využití energie ve spalínách.

VUT v Brně bude řešit problémy týkající se dynamiky rotorů.

Spolupráce ČVUT – Honeywell v oblasti termodynamických simulací a VUT – Honeywell v oblasti dynamiky rotorů.

Provázanost s pracovním balíčkem WP20.

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

Návrh dalšího postupu (podrobně):

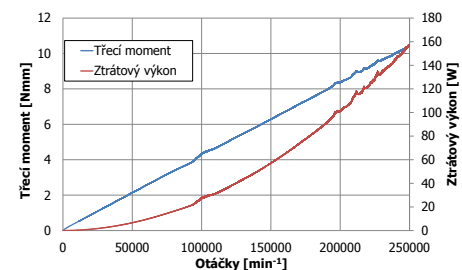
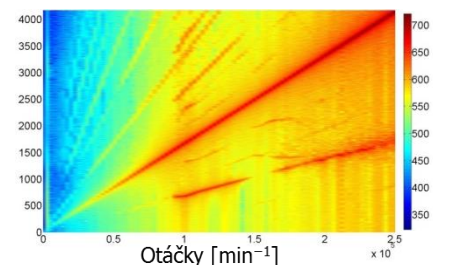
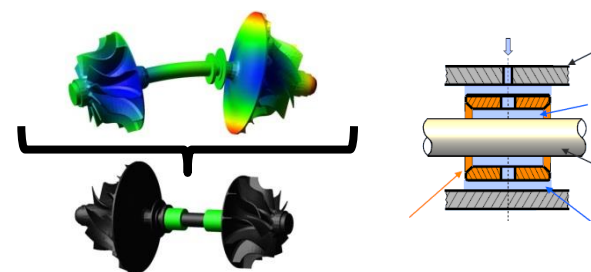
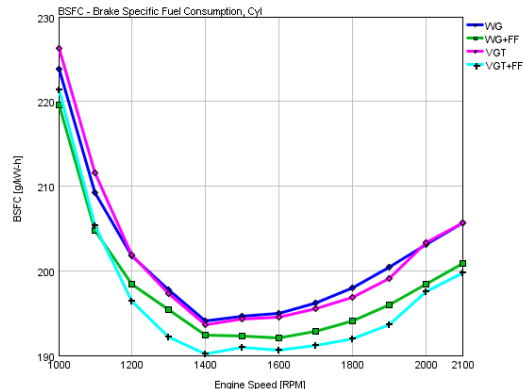
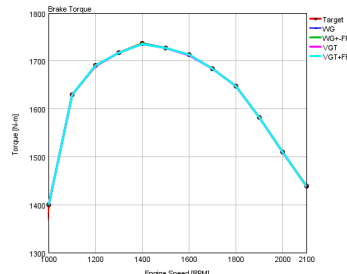
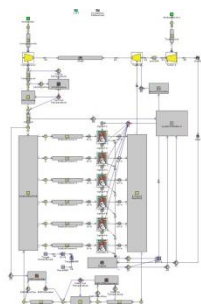
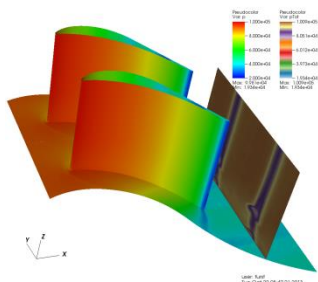
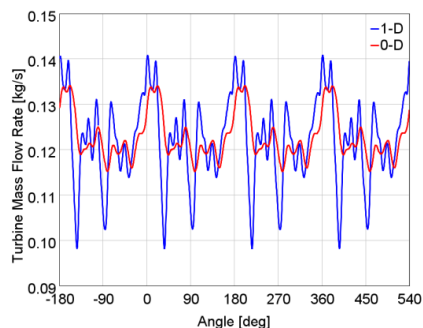
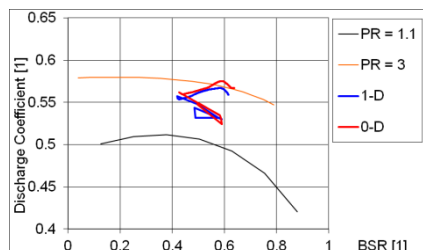
- ČVUT:
 - detailní experimenty na motoru zaměřené na kalibraci 1-D modelu turbíny
 - další vývoj 1-D modelu turbíny a jeho aplikace pro nestacionární režimy
 - zahájení prací na 1-D modelu radiálního kompresoru
 - Další vývoj zjednodušených vícerozměrných CFD nástrojů
- Honeywell s.r.o.:
 - simulace s axiální výkonovou turbínou
 - optimalizaci převodového poměru
 - simulace použití proměnlivého převodového poměru
 - simulace daného jízdního cyklu vozidla
 - omezení vlivu pulzů pro lepší účinnost turbodmychadla v nižších otáčkách
- VUT v Brně:
 - Vytvoření nástroje pro optimalizaci parametrů turbodmychadel (vliv momentu setrvačnosti, nevývahy, parametrů ložisek, viskozita oleje, teplota atd.)
 - Uživatelské prostředí na bázi ADAMS/View
 - Výpočtový model kluzného ložiska vyšší úrovně (detailnější popis naklopení, detailnější model oteplení s vlivem okolí, setrvačné síly, turbulence, nestabilita olejové vrstvy)
 - Vnější zatížení (přídavné matice hmotnosti, tuhosti a tlumení)

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

ČVUT: CFD modely turbíny

Honeywell: výkonová turbína

VUT: virtuální prototyp turbodmychadla



Abstract of WP06 Turbochargers and power turbines – aerodynamic optimization, rotor dynamics and matching for highly efficient engines

ČVUT: CFD turbine models

Honeywell: power turbine

VUT: virtual turbocharger

