

WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

Vedoucí konsorcia podílející se na pracovním balíčku

Vysoké učení technické v Brně – doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D.

Tým – Ing. Ondřej Maršálek, Ing. Peter Raffai, Ing. Josef Dlugoš, Ing. Jiří Knotek

Členové konsorcia podílející se na pracovním balíčku

České vysoké učení technické v Praze – Ing. Miroslav Emrich, Ph.D.

Technická univerzita v Liberci – Ing. Robert Voženílek, Ph.D.

Hlavní cíl balíčku

Výzkum, vývoj a realizace výpočtových a experimentálních přístupů vhodných ke kompletnímu řešení mechanických ztrát s následnými návrhy pro snížení spotřeby paliv a emisí CO₂ budoucích pohonných jednotek na bázi spalovacích motorů, elektromotorů nebo hybridních pohonů.

Dílčí cíle balíčku pro nejbližší období

WP08M01: Soubor zobecněných návodů pro návrh a optimalizaci parametrů nové generace pohonných jednotek splňujících budoucí legislativní nároky v oblasti emisí CO₂ a spotřeby fosilních paliv 12/2015.

WP08C02: Soubor výsledků řešení problematiky mazací soustavy pohonné jednotky 12/2015.

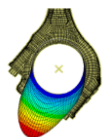
WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

▪ Úvod

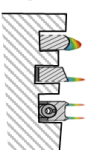
Specializované výpočtové přístupy

Dynamika & tribologie komponent

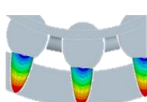
BearDYN 4.0



RingDYN 2.0

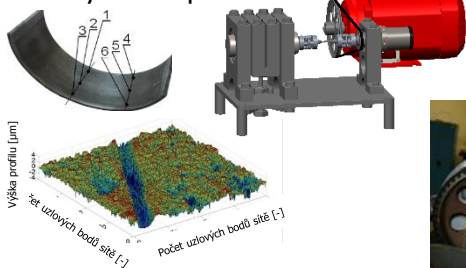


RollDYN 1.0



Specializované experimentální přístupy, komponenty

Analýza komponent

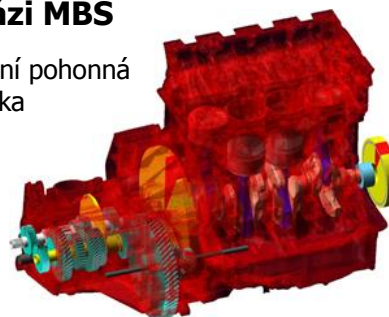


Ověření dílčích
řešení



Výpočtové přístupy na bázi MBS

Virtuální pohonná
jednotka

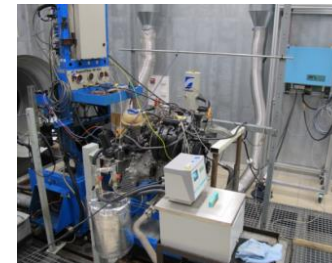


Nová řešení pro zvýšení mechanické účinnosti pohonných jednotek



Experimentální přístupy – kompletní pohonné jednotky

Experimentální Víceválcový motor
jednoválec

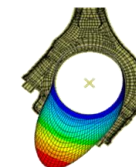


WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

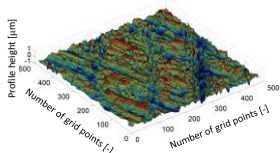
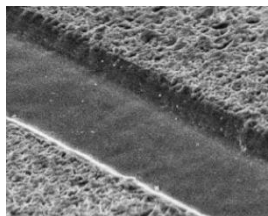
▪ Reálné povrchy kluzných dvojic – přehled činností (VUT v Brně)

- Pokračování vývoje jednotlivých dílčích výpočetních přístupů
 - Softwarové generování drsných povrchů
 - Skenování reálných povrchů
 - Měření a statistický popis reálných povrchů
- Vývoj specializovaného řešiče popisující smíšené mazání (Mixed Lubrication)
 - Vliv kontaktu nerovností na hydrodynamické mazání
 - Výpočet kontaktní tlaků na základě reálných povrchů

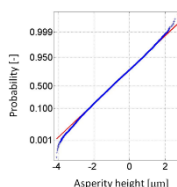
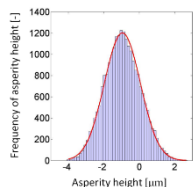
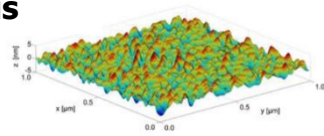
BearDYN 4.0



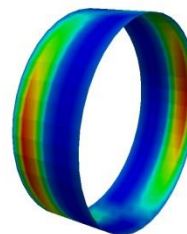
Reálné povrchy



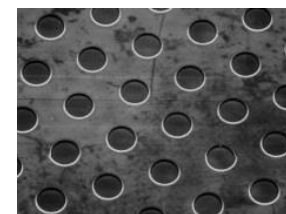
Statistický popis



Řešení hydrodynamiky s vlivem nerovnosti povrchů



Cílená topografie povrchu



WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

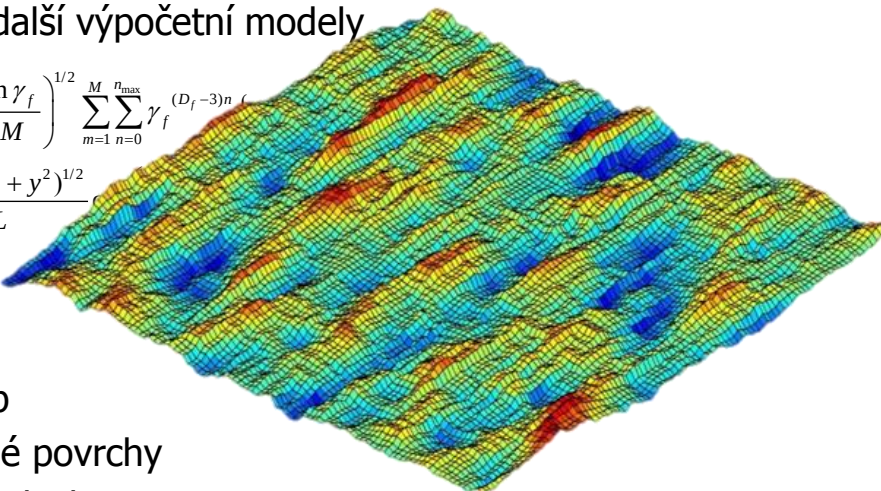
▪ Softwarové generování drsných povrchů (VUT v Brně)

- Generování drsných povrchů s charakteristickými rysy (soustružení, frézování, honování atd.)
- Fraktální přístup

- Návaznost na další výpočetní modely

$$z(x, y) = L \left(\frac{G}{L} \right)^{(D_f - 2)} \left(\frac{\ln \gamma_f}{M} \right)^{1/2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^{n_{\max}} \gamma_f^{(D_f - 3)n} \left(-\cos \left[\frac{2\pi \gamma^n (x^2 + y^2)^{1/2}}{L} \right] \right)$$

$$n_{\max} = \text{int} \left[\frac{\log(L / L_s)}{\log \gamma_f} \right]$$



- Statistický přístup

- Směrově závislé povrchy
- Rychlost, jednoduchost

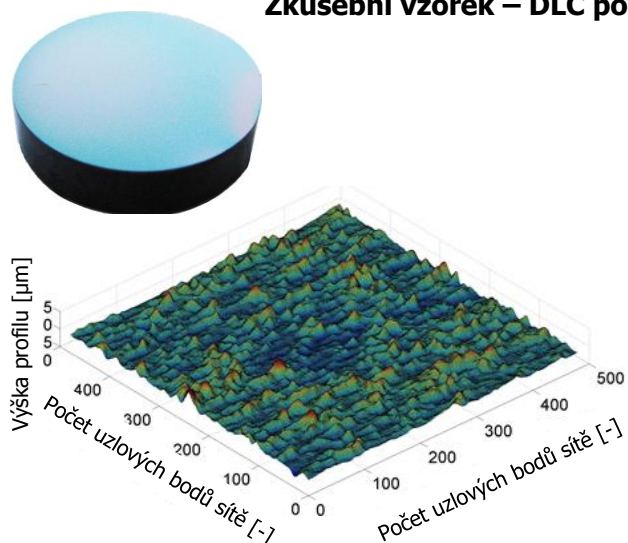
$$z(x, y) = \frac{\sigma}{\sqrt{nm}} \sum_{k=1}^n \sum_{l=0}^m \eta_{x+k, y+l}$$

WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

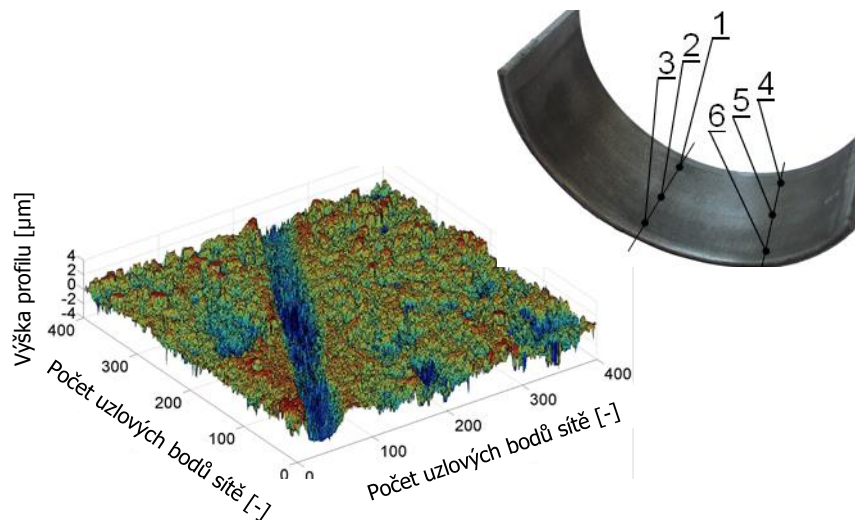
▪ Skenování reálných povrchů (VUT v Brně)

- Zkušební vzorky
- Komponenty

Zkušební vzorek – DLC povrch



Pánev kluzného ložiska



WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

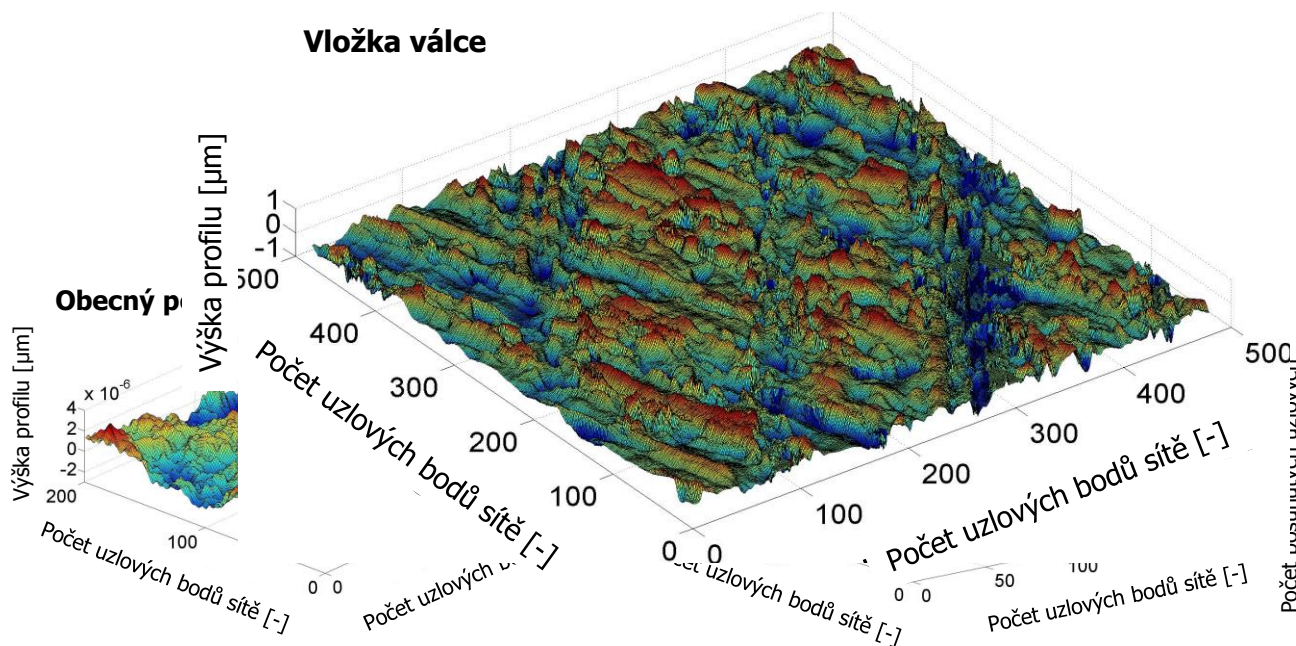
Popis drsných povrchů (VUT v Brně)

– Kvantifikace směrové závislosti drsných povrchů

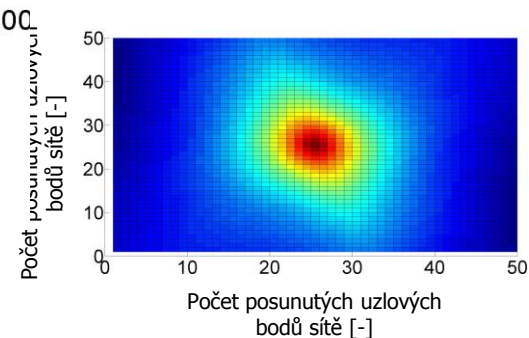
- Plošná autokorelační funkce (AACF)

$$R(\tau_i, \tau_j) = \frac{1}{(M-i)(N-j)} \sum_{l=1}^{N-j} \sum_{k=1}^{M-i} \eta(x_k, y_l) \eta(x_{k+i}, y_{l+j}), \quad \gamma_R = \frac{\lambda_{x0,5}}{\lambda_{y0,5}}$$

Vložka válce



AACF (2D)

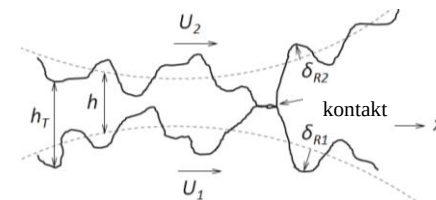


WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

▪ Ovlivnění hydrodynamické mazací vrstvy povrchovými drsnostmi

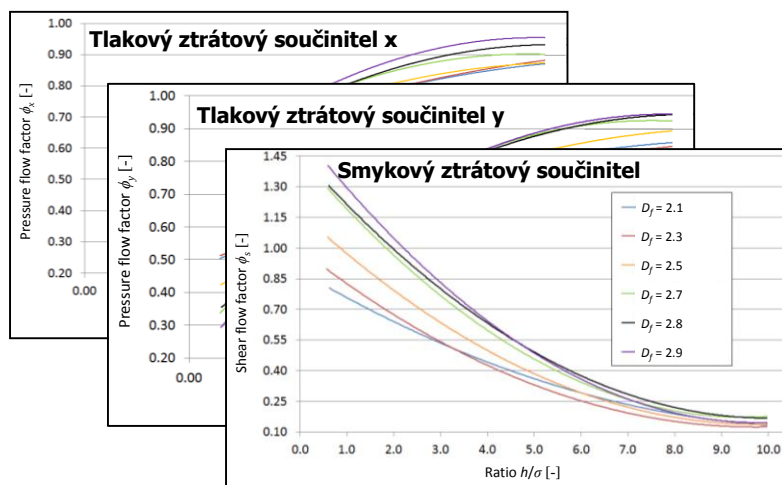
– Popis tenkých vrstev tekutiny s vlivem nerovností – modifikovaná Reynoldsova rovnice

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\phi_x \frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\phi_y \frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = \frac{U_1 + U_2}{2} \frac{\partial(\rho h_T)}{\partial x} + \frac{U_1 - U_2}{2} \sigma \frac{\partial(\rho \phi_s)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho h_T)}{\partial t}$$

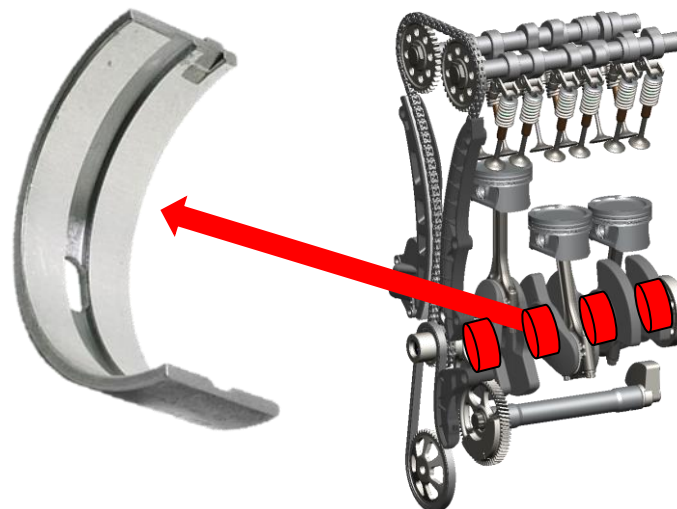


▪ Stanovení ztrátových součinitelů toku

– Řešení průtoku mezi jednotkovými dvěma povrchy



Možnosti snížení třecích ztrát cílenou modifikací povrchu kluzných dvojic

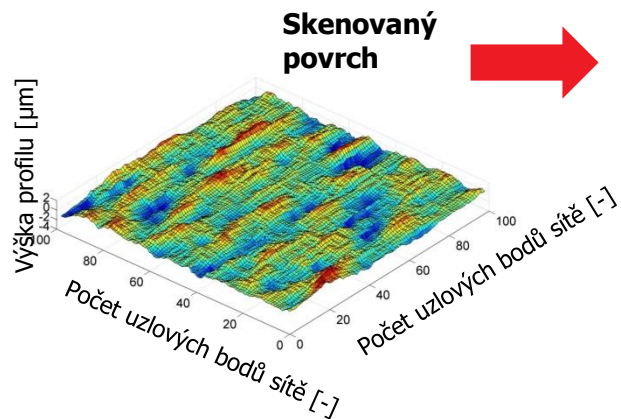


WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

▪ Výpočetní modelování kontaktního tlaku

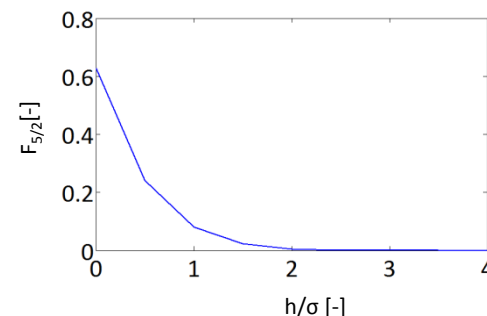
– Přístup Greenwood & Tripp

$$p(d) = \frac{8\pi}{5}(\eta\beta_c\sigma)KF_{5/2}\left(\frac{d}{\sigma}\right) ; \quad K = \frac{2\sqrt{2}}{3}(\eta\beta_c\sigma)E'\sqrt{\left(\frac{\sigma}{\beta_c}\right)}, \quad \sigma = \sqrt{Ra_1^2 + Ra_2^2}, \quad \frac{1}{E'} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}$$



**Koeficienty pro
přístup
Greenwood &
Tripp**

Tlaková funkce



– Aplikace Hertzovy teorie

$$\delta = |\sigma - h|, R = \beta_c^2 / 2\beta_c, W = \frac{\sqrt{\delta^3 E'^2 R \frac{1}{1.0397^3}}}{N_a}, a = \left(\frac{3WR}{E'}\right)^{1/3}$$

$$P_{\max} = \frac{3W}{2\pi a^2}, P = \frac{W}{\pi a^2}$$

WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

▪ Zjednodušený EHD výpočtový model valivého ložiska nebo kontaktu ozubených kol (VUT v Brně)

- Deformace struktury (Hertzův výpočet nebo MKP kontaktní úloha)

Čárový kontakt

$$\delta_s = 0,319 \left(\frac{W}{E'l} \right) \left(\frac{2}{3} + \ln \left(\frac{4R_A R_B}{b^2} \right) \right)$$

$$\Phi_s(\delta_s) = \frac{W}{\delta_s}$$

Bodový kontakt

$$\delta_s(W) = 1,0397 \left(\frac{W^2}{E'R'} \right)^{1/3}$$

- Deformace olejové vrstvy (Hamrock & Dowson)

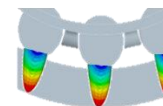
$$\delta_F = h_0 - h_C = h_0 - \left[2,69R' \left(\frac{\eta_0 U}{E'R'} \right)^{0,67} \left(\frac{W}{E'R'^2} \right)^{0,53} \left(1 - 0,61e^{-0,73k} \right) \right] = \frac{W}{\Phi_F}$$

- Výsledná pružná a tlumicí síla zahrnují EHD podmínky

$$W_s = \frac{\delta}{\frac{1}{\Phi_s} + \frac{1}{\Phi_F}} = \Psi \delta$$

$$W_D = -\beta \frac{L\eta_0 e^{\alpha_{pH}} b^3}{h_C^3} \frac{dh}{dt} = -\beta \frac{2L\eta_0 e^{\alpha_{pH}} b^3}{h_C^3} v$$

RollDYN 1.0

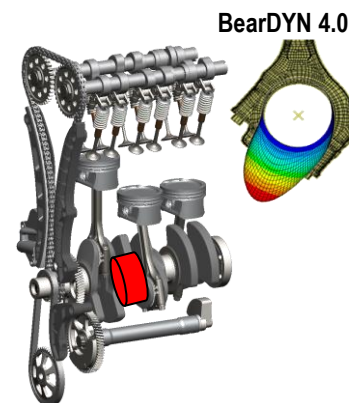


WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

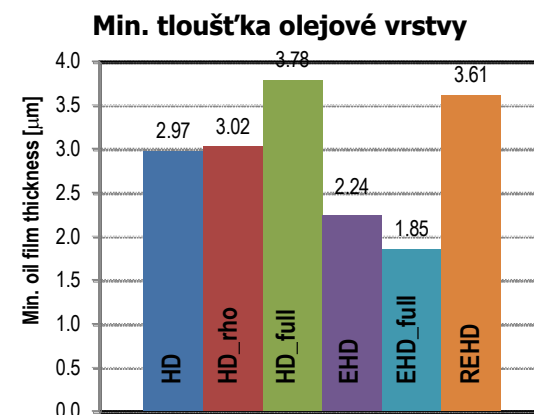
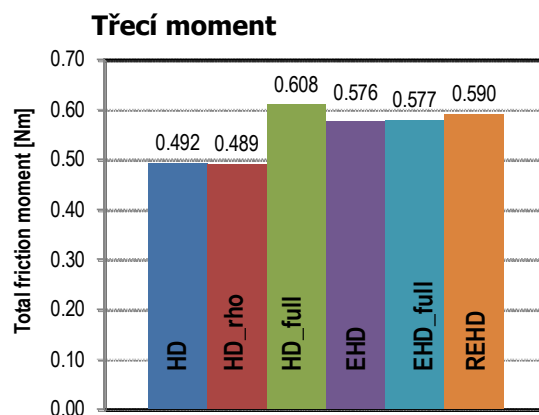
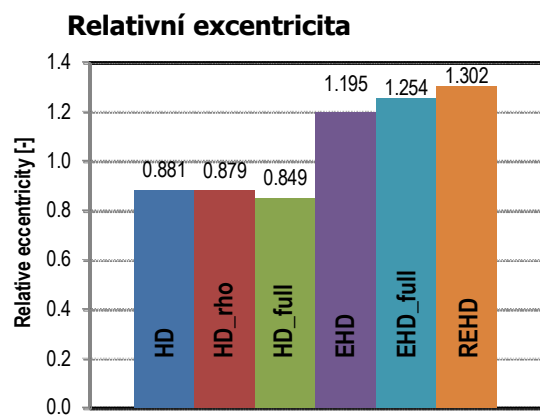
▪ Aplikace výpočtových metod (VUT v Brně + ŠKODA AUTO)

– Studie vlivu výpočtového modelu – kluzné ložisko řadového tříválce 1,2 HTP

- HD – hydrodynamické řešení
- HD_rho – hydrodynamické řešení s proměnnou hustotou
- HD_full – hydrodynamické řešení s proměnnou hustotou a viskozitou
- EHD – elasto-hydrodynamické řešení, tuhý čep
- EHD_full – elasto-hydrodynamické řešení
- REHD – elasto-hydrodynamické řešení včetně drsných povrchů



Výsledky řešení pro $F = 15\,000\text{ N}$ a otáčky $n = 3000\text{ min}^{-1}$

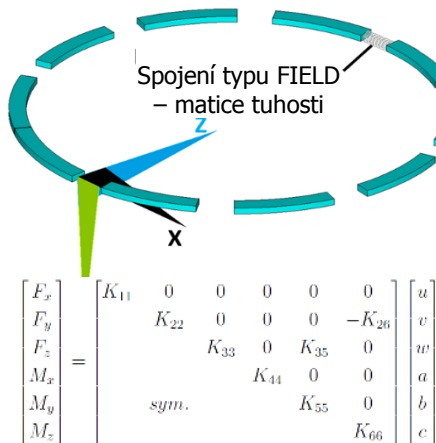


WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

▪ 3D výpočtový model pístního kroužku – pístu – vložky válce (VUT v Brně)

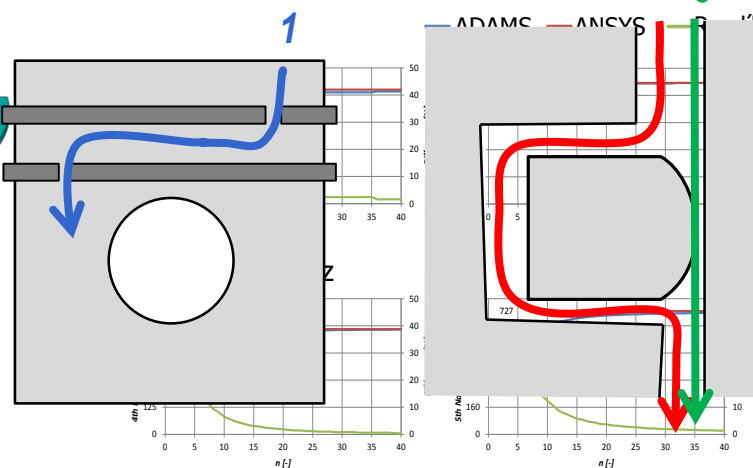
- Detailní analýza dynamiky kroužku a popis mechanismu profuku pístní skupinou
- 3D multibody diskretizovaný model na základě **Timoshenkovy teorie**
- Studie počtu elementů

Výpočtový multibody model



F_i, M_i – silové účinky
 u, v, w, a, b, c – posuvy a rotace
 K_{xx} – prvky matice tuhosti

Vliv diskretizace kroužku



485 Hz

727 Hz

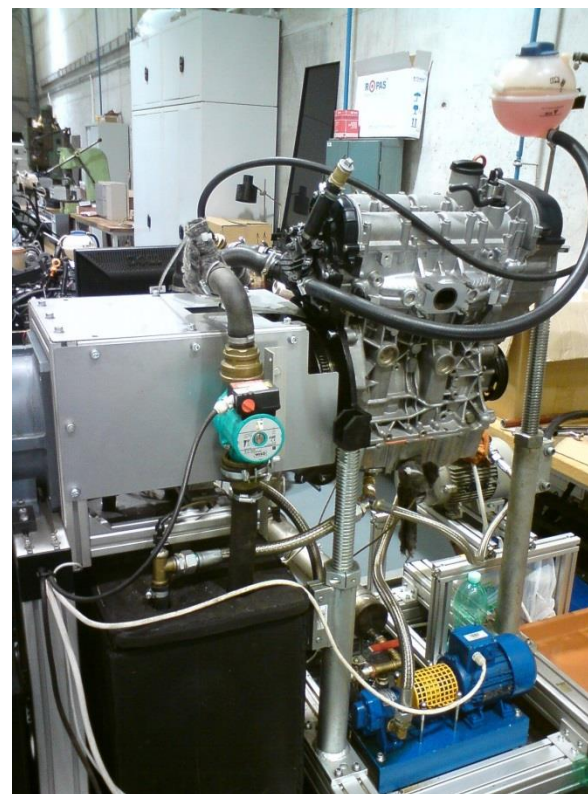
1089 Hz

Vlastní frekvence (ANSYS a Adams)

WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

Určení podílu hlavních konstrukčních skupin na celkových mechanických ztrátách motoru (TUL)

Ve spolupráci s útvarem vývoje motorů Škoda Auto a.s. byla vytvořena maketa čtyřválcového spalovacího motoru pro určení podílu hlavních konstrukčních skupin na celkových mechanických ztrátách motoru. Měření probíhá na specializovaném zkušebním stanovišti s využitím metody protáčení makety spalovacího motoru.



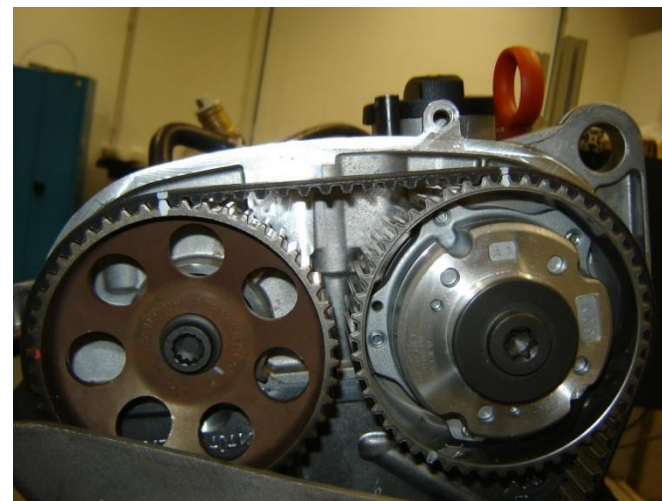
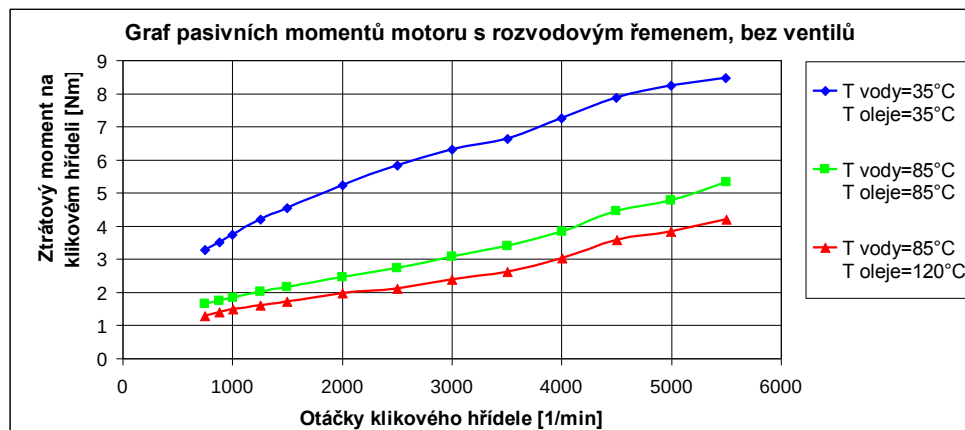
WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

Určení podílu hlavních konstrukčních skupin na celkových mechanických ztrátách motoru (TUL)

V současnosti probíhají měření zaměřená na identifikaci mechanických ztrát dílčích částí řemenového rozvodu motoru. Maketa motoru má originální klikový hřídel s protivývažky.

Měření proběhnou ve třech fázích:

- 1) měření kompletního rozvodu
- 2) měření rozvodu bez ventilů (s vačkou)
- 3) měření bez řemenu – samotného klikového hřídele



WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

Experimentální přístupy pro stanovení mechanických ztrát (ČVUT)

Metoda určování okamžitých mechanických ztrát z měření okamžité úhlové rychlosti a tlaku ve válci:

- Metoda ve fázi ověřování – analýza vhodného způsobu zpracování a filtrace naměřených signálů
- Vyvinut SW pro synchronizovaný záznam rychle proměnných analogových veličin a okamžitých otáček motoru měřených čítačovým vstupem s následnou interpolací do časové domény analogových kanálů.
- Stanoviště dovybaveno o značkovací kotouče a snímače otáček
- Pomocí SW naměřena sada dat (různé otáčky/zatížení) na jednoválcovém výzkumném motoru AVL SCRE 5404.088 pro ověření metody.

Příprava experimentálního jednoválce pro měření dílčích pasivních odporů pro kalibraci matematického modelu:

- Záznam okamžité hodnoty točivého momentu z měřicí příruby
- Eliminace pomocných zařízení (vstřikovací čerpadlo nahrazeno volnoběžkou, příprava pohonu čerpadla elektromotorem)

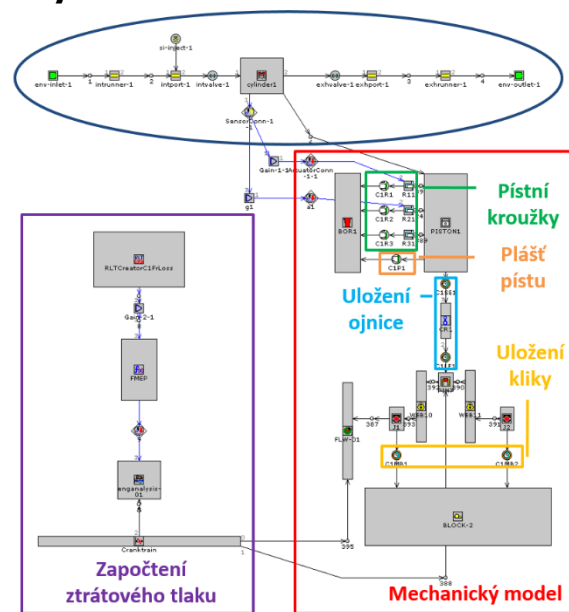


WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

Stavba pokročilého matematického modelu v programu GT-Power (ČVUT)

- Termodynamický model motoru vytvořený v prostředí GT-SUITE
- Propojení s prediktivním modelem mechanických ztrát
- Doplnění modelu o model profuků přes pístní skupinu – simulace nestacionárního blow-by

Termodynamický model



WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

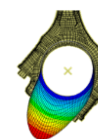
▪ Další postup

- Vývoj zkušebního zařízení (**VUT v Brně**)
- Validace výpočetních modelů technickými experimenty (**VUT v Brně**)
- Aplikace navržených postupu ve Virtuální pohonné jednotce – koordinace WP07 a WP15 (**VUT v Brně**)
- Cílené modifikace povrchů (**VUT v Brně**)
- Aplikace navržených postupů na komponenty pohonných jednotek (**VUT v Brně**)
- Zjištění dílčích pasivních odporů jednotlivých skupin jednoválcového motoru (vstřikovací čerpadlo, rozvody, protáčení se zavřenými ventily–emulace deaktivace válce, protáčení bez 2. kroužku, protáčení klikové hřídele) (**ČVUT**)
- Kalibrace modelu dle experimentálních činností (**ČVUT**)

WP08: Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek

- **Děkuji za pozornost.**

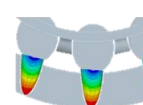
BearDYN 4.0



RingDYN 2.0



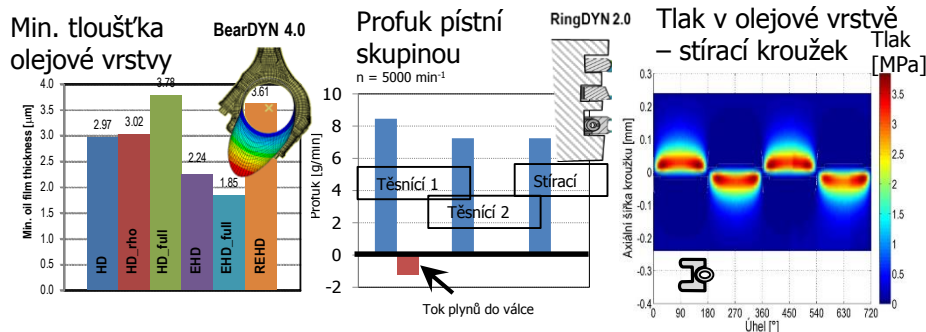
RollIDYN 1.0



Výsledky WP08 Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek za období 2012 – 2014

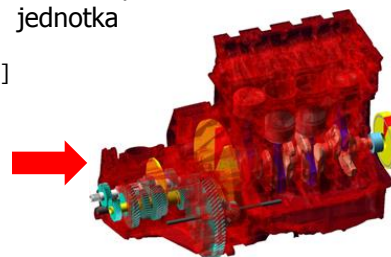
Specializované výpočtové přístupy

Dynamika & tribologie komponent



Výpočtové přístupy na bázi MBS

Virtuální pohonná jednotka

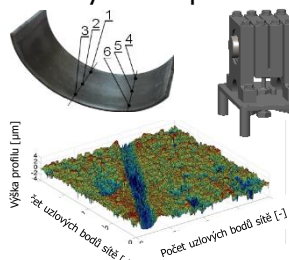


Inovovaný konstrukční návrh, prototyp pohonné jednotky s vysokou mechanickou účinností



Specializované experimentální přístupy, komponenty

Analýza komponent

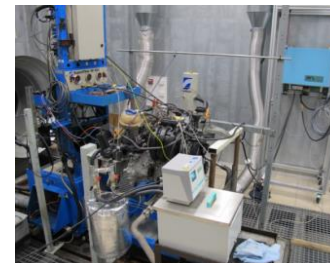


Ověření dílčích řešení



Experimentální přístupy – kompletní pohonné jednotky

Experimentální Víceválcový motor
jednoválec

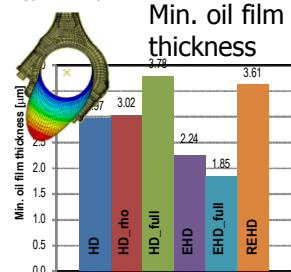


Results of WP08 Reducing of powertrain mechanical losses achieved in 2012 – 2014

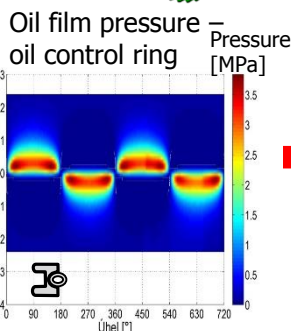
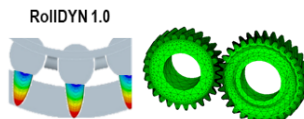
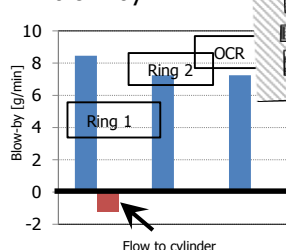
Specialized computational models

Dynamics & tribology of bearings, rings, tooth wheels, cams, chain etc.

BearDYN 4.0

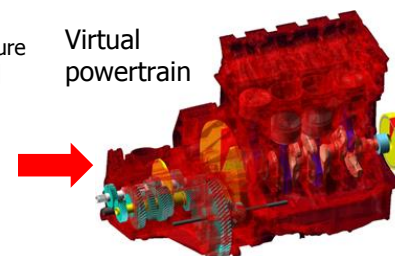


Piston assembly blow-by



Computational models based on MBS

Virtual powertrain

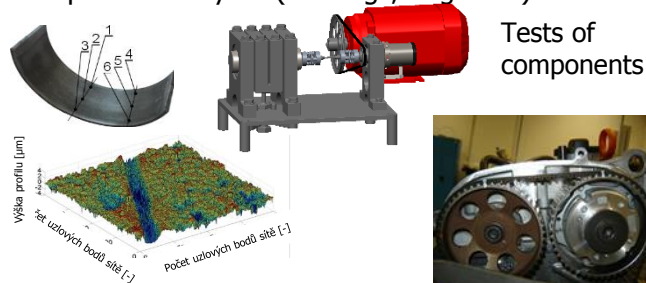


Innovative design, powertrain prototype with high mechanical efficiency



Specialized technical experiments, components

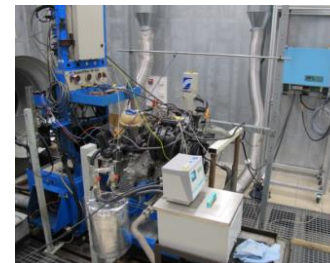
Component analyses (bearings, rings etc.)



Technical experiments – complete powertrains

Experimental single cylinder

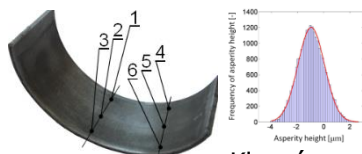
Multi-cylinder engines



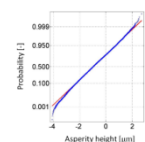
Výsledky WP08 Snižování mechanických ztrát pohonných jednotek za rok 2014

Specializované výpočtové přístupy

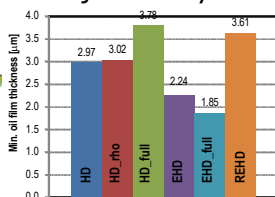
Zahrnutí vlivu drsných povrchů na chování olejové vrstvy, generování, skenování a popis povrchů



Kluzná ložiska

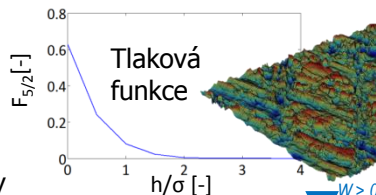


Min. tloušťka olejové vrstvy

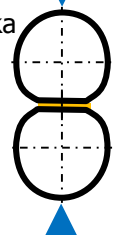
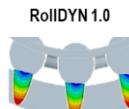


Zahrnutí vlivu kontaktu nerovností, generování koeficientů pro přístup Greenwood a Tripp

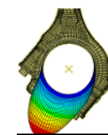
Pístní kroužky



Valivá ložiska

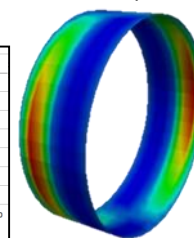
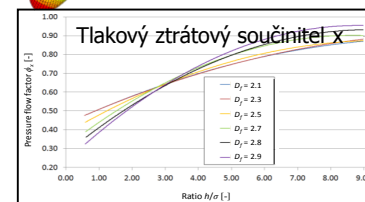


BearDYN 4.0



Vývoj numerického řešení

Modifikovaná Reynoldova rovnice, metoda konečných diferencí, SOR, variabilní krok



$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\phi_x \frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\phi_y \frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = \frac{U_1 + U_2}{2} \frac{\partial(\rho h_T)}{\partial x} + \frac{U_1 - U_2}{2} \sigma \frac{\partial(\rho \phi_s)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho h_T)}{\partial t}$$

Výpočtové přístupy na bázi MBS

Aplikace dílčích poznatků



Specializované experimentální přístupy

Ověření komponent



Ověření dílčích řešení – výzkumný jednoválec



Ověření pohonné jednotky

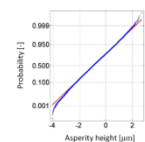
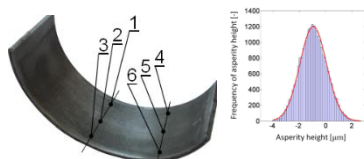


Inovovaný konstrukční návrh ke zvýšení mechanické účinnosti

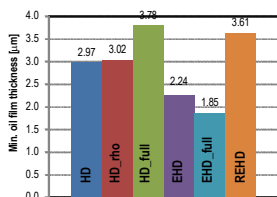
Results of WP08 Reducing of powertrain mechanical losses achieved in 2014

Specialized computational approaches

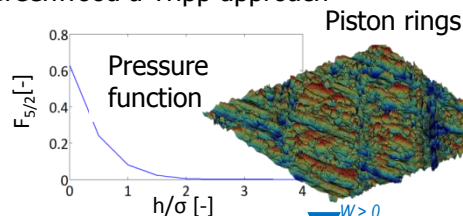
Influence of rough surface on lubrication, generation, scanning and description of surfaces



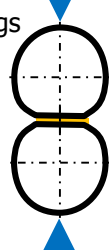
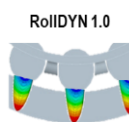
Min. oil film thickness



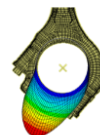
Influence of rough surface contacts, coefficient generation for use the Greenwood a Tripp approach



Rolling bearings

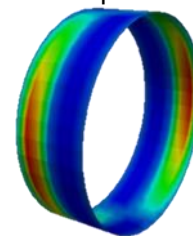
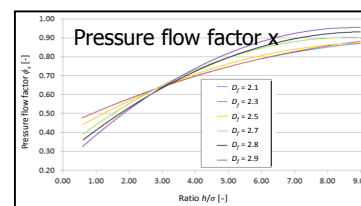


BearDYN 4.0



Numerical solution development

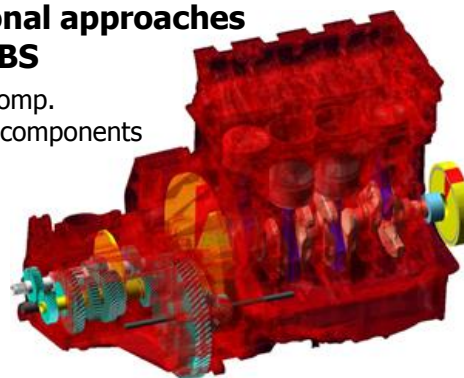
Modified Reynolds equation, Finite Difference Methoda, SOR, variable step



$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\phi_x \frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\phi_y \frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = \frac{U_1 + U_2}{2} \frac{\partial(\rho h_r)}{\partial x} + \frac{U_1 - U_2}{2} \sigma \frac{\partial(\rho \phi_s)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho h_r)}{\partial t}$$

Computational approaches based on MBS

Application of comp. approaches for components



Innovative design for mechanical efficiency increase

Specialized experimental methods

Tests of components



Tests of partial solutions – single cylinder engine



Test of powertrains

