

## **WP07: Zlepšení návrhu hnacích traktů vozidel s využitím virtuálního hnacího traktu**

### **Vedoucí konsorcia podílející se na pracovním balíčku**

Vysoké učení technické v Brně – Prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.

Tým – doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D., Ing. David Svída, Ph.D., Ing. Pavel Kučera, Ing. Michal Janoušek

### **Členové konsorcia podílející se na pracovním balíčku**

TATRA TRUCKS a.s. – Ing. Radomír Smolka

ŠKODA AUTO a.s. – Ing. Jan Pavlíček

České vysoké učení technické v Praze - Ing. Radek Tichánek, Ph.D.

### **Hlavní cíl balíčku**

Výzkum a vývoj metod řešení mechanických problémů hnacích traktů osobních a nákladních vozidel. Výsledky získané z virtuálních prototypů a technických experimentů budou aplikovány při vývoji pohonných jednotek osobních a nákladních automobilů s cílem snížit mechanické namáhání i vibrace a současně zkrátit čas mezi výzkumem a vývojem koncepce a aplikací nového nebo inovovaného výrobku na trhu.

### **Dílčí cíle balíčku pro nejbližší období**

WP07M01: Prototyp klikového mechanismu zážehového spalovacího motoru osobního automobilu se sníženými mechanickými ztrátami ve srovnání s výchozím stavem 12/2014. WP07C01: Soubor výsledků výpočtového řešení dynamiky pohonné jednotky 12/2014. WP07C02: Soubor výsledků experimentálního ověření dynamiky pohonné jednotky 12/2014.

## WP07: Zlepšení návrhu hnacích traktů vozidel s využitím virtuálního hnacího traktu

### ▪ Základní přístup k řešení problematiky vibrací a pevnosti (VUT v Brně)

**Počáteční konstrukční  
návrh, prototyp  
hnacího traktu**

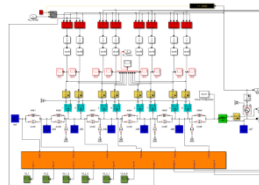


Problematika  
vibrací, hluku  
a pevnosti



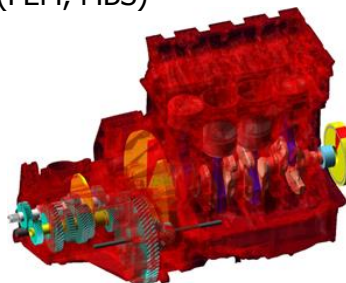
**Virtuální hnací trakt**

Vibrace (Simulink, Real time simulace)



**Virtuální pohonná  
jednotka**

Vibrace, hluk, pevnost  
(FEM, MBS)



Ověření  
navržených  
řešení



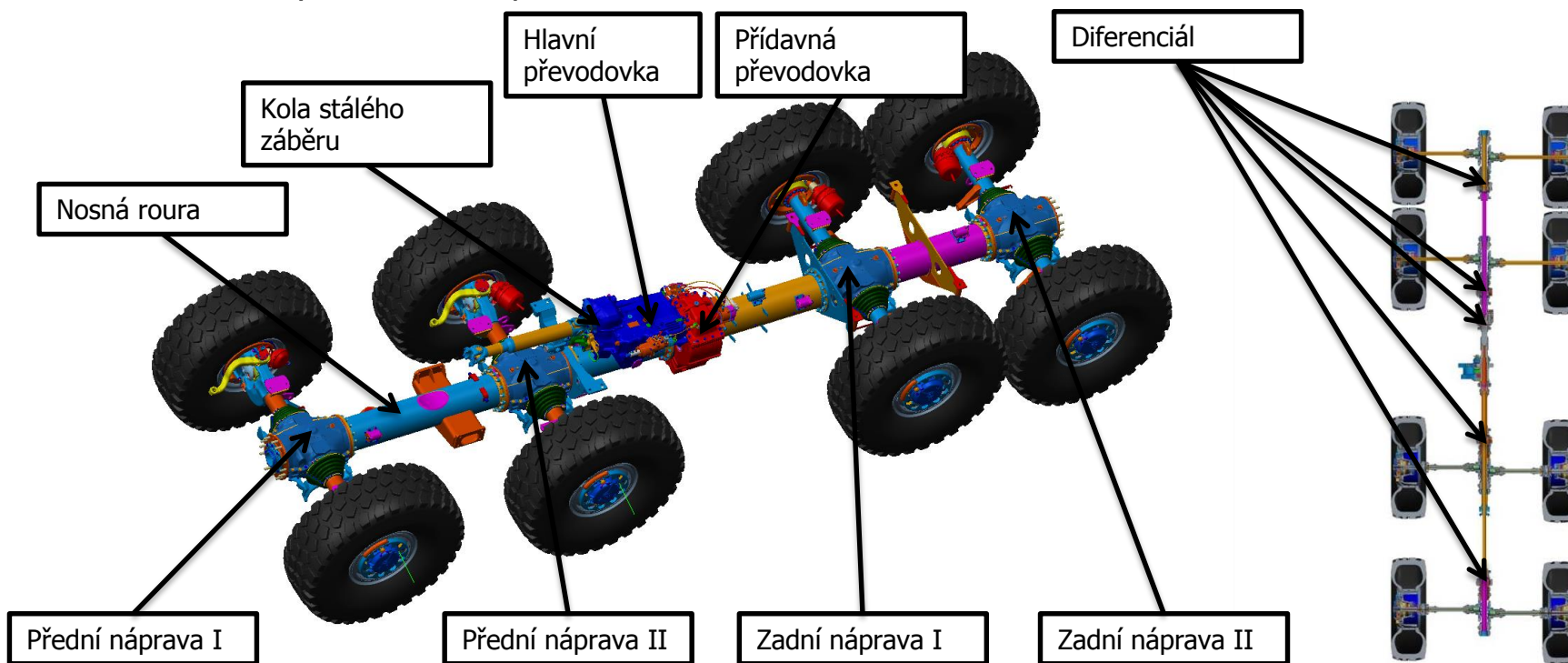
**Prototyp hnacího traktu  
ve vozidle**



## WP07: Zlepšení návrhu hnacích traktů vozidel s využitím virtuálního hnacího traktu

### ▪ Hnací trakt TATRA 8x8 (VUT v Brně, TATRA TRUCKS a.s.)

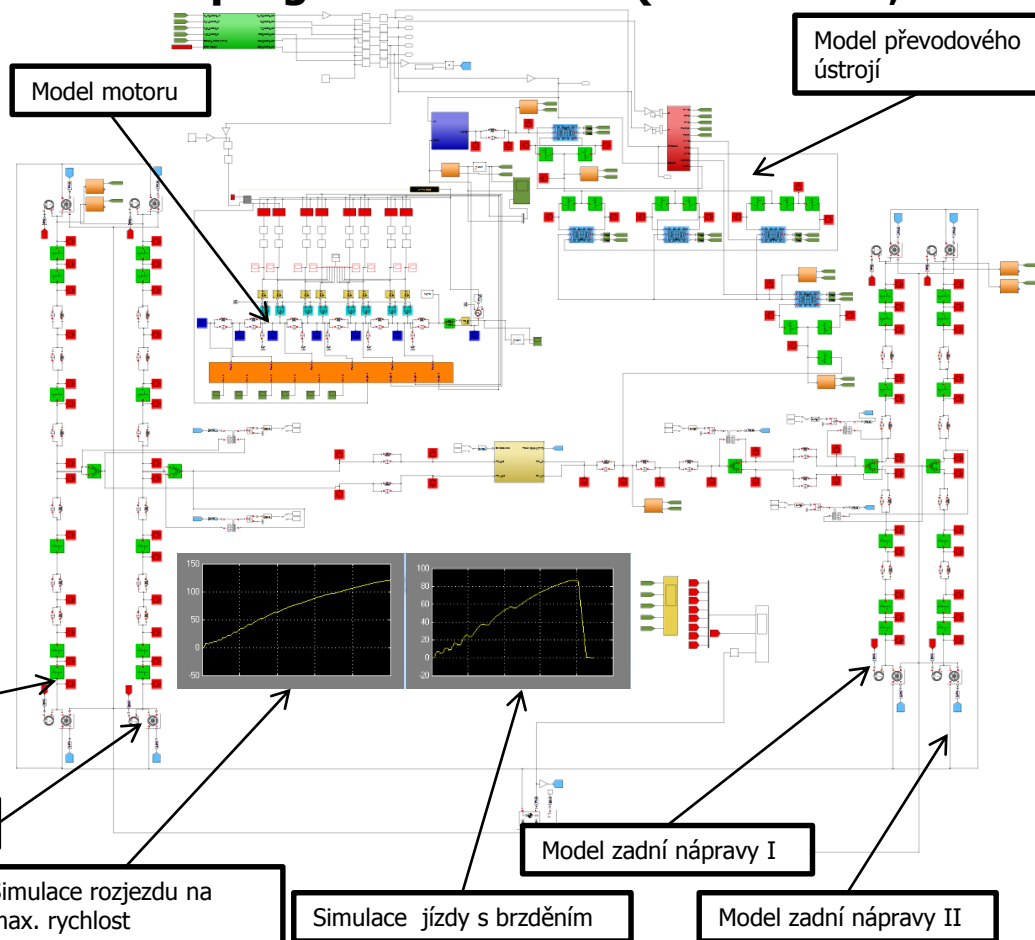
- Prvotní analýza podvozku 232R80-440
- Současná analýza vibrací na podvozku 790R99



## WP07: Zlepšení návrhu hnacích traktů vozidel s využitím virtuálního hnacího traktu

### ▪ Komplexní virtuální hnací trakt vozidla v programu Simulink (VUT v Brně, TATRA TRUCKS a.s.)

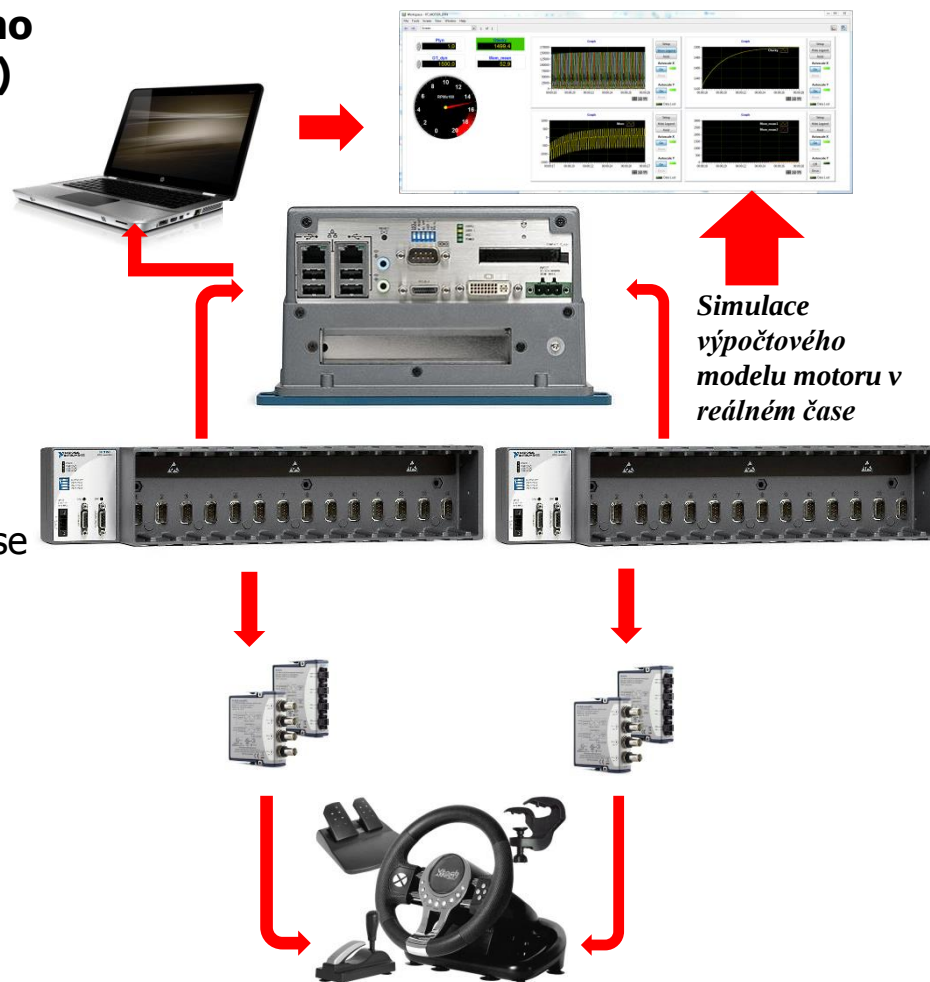
- Ovládání motoru nastavením plynu
- Řazení kol stálého záběru (N – R)
- Řazení hlavních rychlostních stupňů (6-7. rychlostní stupeň řazen v přidavné převodovce)
- Ovládání spojky
- Ovládání brzd
- Zapínání diferenciálů
- Spouštění pohonu předních náprav
- Návaznost na Real-time testování



## WP07: Zlepšení návrhu hnacích traktů vozidel s využitím virtuálního hnacího traktu

### ▪ Simulace jízdy užitím virtuálního hnacího traktu (VUT v Brně, TATRA TRUCKS a.s.)

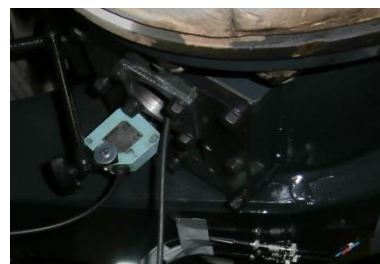
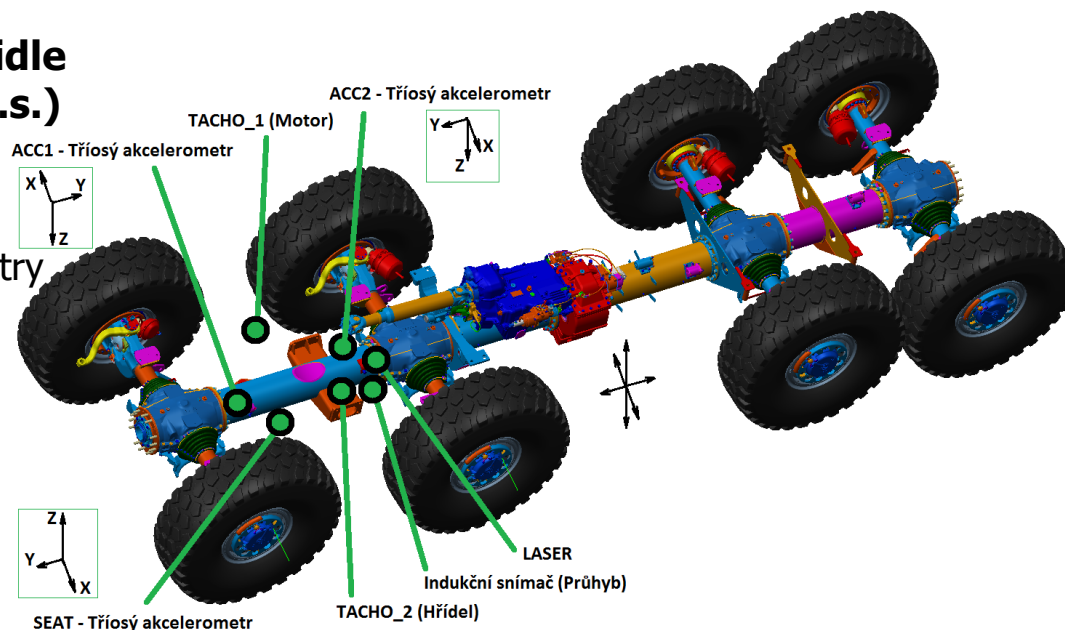
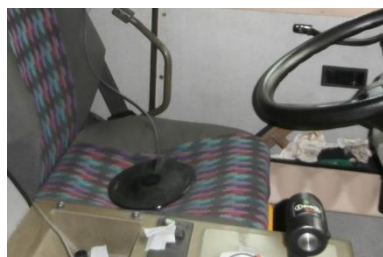
- Simulink
- NI VeriStand
- Hardware
- NI 3110RT - dvou-jádrový procesor Intel Core Duo.
- Nosiče NI 9159 a NI 9157
- CAN PCI 8513, NI 9229, NI 9239, NI 9206 analogové vstupy,
- NI 9264, NI 9263 - analogové výstupy, karta se simulací odporů,
- NI 9425, NI 9477, NI 9403 - digitální vstupy a výstupy .
- Postup
- Výpočtový model, kompilace modelu
- Připojení ovládacích prvků



## WP07: Zlepšení návrhu hnacích traktů vozidel s využitím virtuálního hnacího traktu

### ▪ Měření vibrací na reálném vozidle (VUT v Brně, TATRA TRUCKS a.s.)

- Měření laserem (torzní vibrace)
- Měření průhybu dlouhé hřídele
- Měření vibrací tříosými akcelerometry
- Měření otáček motoru
- Měření otáček dlouhé hřídele



## WP07: Zlepšení návrhu hnacích traktů vozidel s využitím virtuálního hnacího traktu

### ▪ Měření vibrací reálného vozidla na zkušebně a v provozu (VUT v Brně, TATRA TRUCKS a.s.)

***Měření 1 (VUT v Brně, TATRA TRUCKS a.s.) - vozidlo v sériovém provedení***

***Měření 2 (VUT v Brně, TATRA TRUCKS a.s.) - vozidlo s nově navrženými komponentami hnacího traktu***

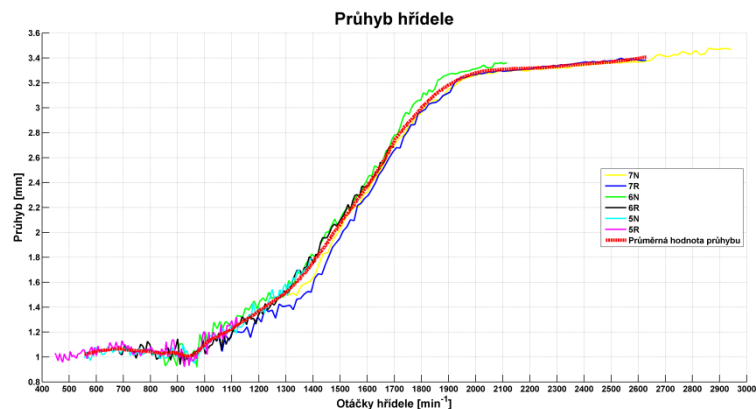
- Plynulé zvyšování otáček z volnoběhu po 2000 min<sup>-1</sup> pro převodové stupně 5R, 5N, 6R, 6N, 7R, 7N. Diferenciály uzavřeny.
- Měření s krokem 50 min<sup>-1</sup> pro převodové stupně 5R, 5N, 6R, 6N, pro 7R a 7N neprováděno z důvodu nebezpečí destrukce dílů vozidla
- Plynulé zvyšování otáček pro rychlosti 1x 5R, 1x 5N, 1x 6R, 1x 6N s otevřenými osovými diferenciály
- Měření odezvy po úderu modálním kladívkem na dlouhý hřídel pro vyhodnocení vlastních frekvencí ohybových (krouživých) kmitů
- Měření za jízdy na dálnici pro všechny rychlostní stupně, režimy se zapnutím a vypnutím pohonu přední nápravy

## WP07: Zlepšení návrhu hnacích traktů vozidel s využitím virtuálního hnacího traktu

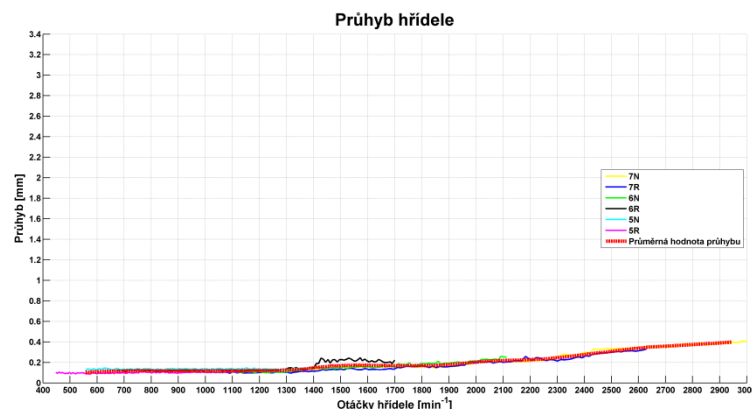
### ▪ Vyhodnocování měření vibrací na reálném hnacím traktu (VUT v Brně, TATRA TRUCKS a.s.)

- Porovnání průhybu hřídele
- Převodové stupně 5R, 5N, 6R, 6N, 7R a 7N
- Vozidlo v sériovém provedení / vozidlo s nově navrženými komponentami hnacího traktu

5R – 7N (sériové provedení)



5R – 7N (s novými komponentami)

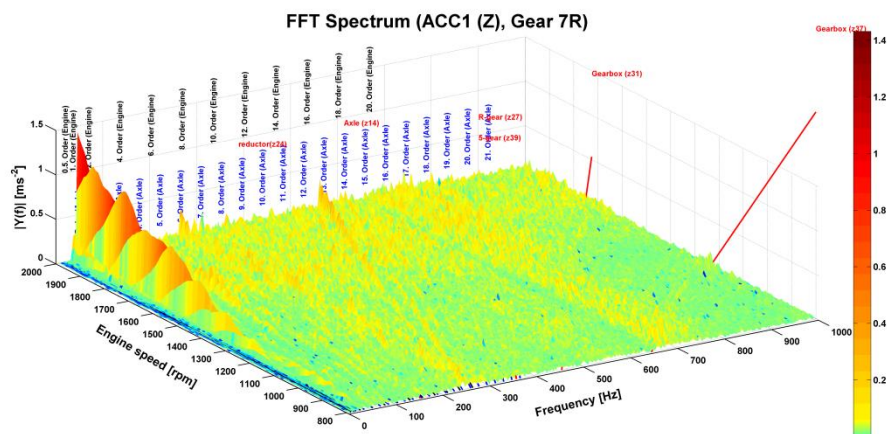


## WP07: Zlepšení návrhu hnacích traktů vozidel s využitím virtuálního hnacího traktu

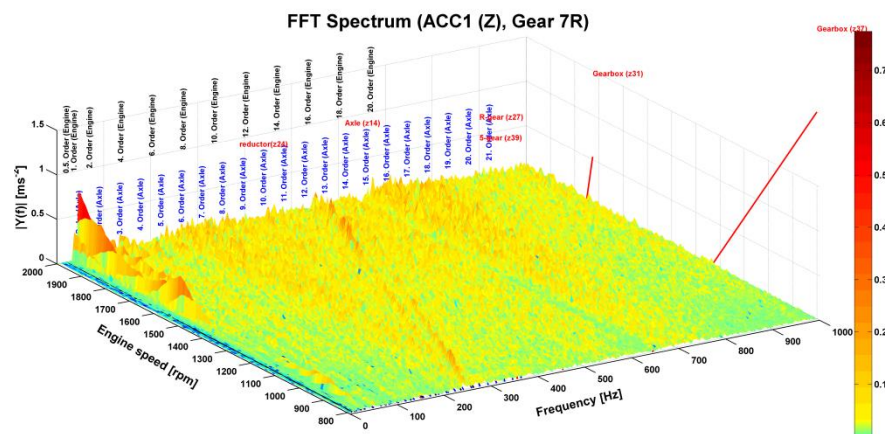
### ▪ Vyhodnocování měření vibrací na reálném hnacím traktu (VUT v Brně, TATRA TRUCKS a.s.)

- Ukázka vyhodnocení pro převodový stupeň 7, statické měření na montážním kanále s uzavřenými diferenciály
- Porovnání spekter vyhodnocených z ACC1 ve směru osy Z bez úpravy a s úpravou

*Třísosý snímač vibrací ACC1 osa Z (hnací trakt bez úpravy)*



*Třísosý snímač vibrací ACC1 osa Z (trakt s úpravou)*

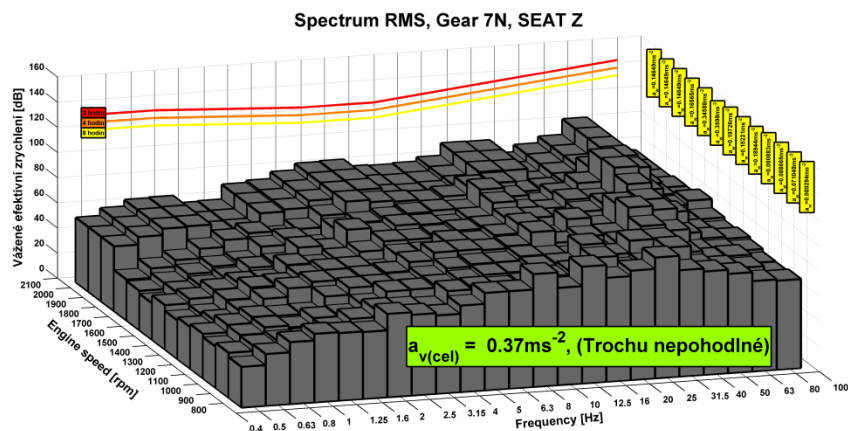


## WP07: Zlepšení návrhu hnacích traktů vozidel s využitím virtuálního hnacího traktu

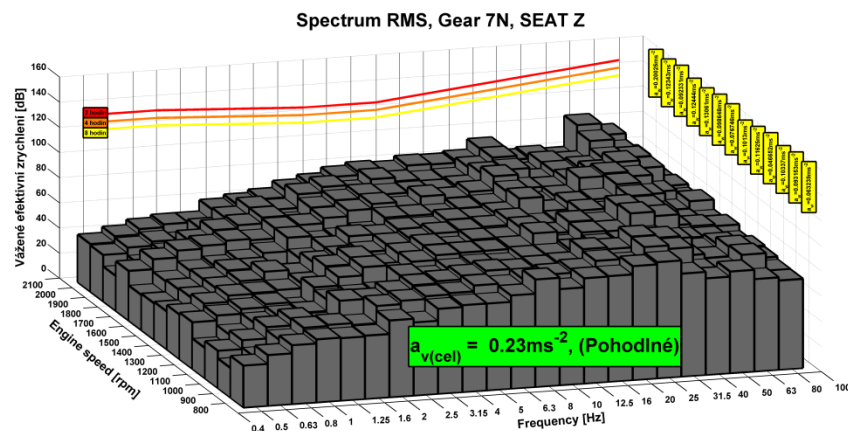
### ▪ Vyhodnocování měření vibrací na reálném hnacím traktu (VUT v Brně, TATRA TRUCKS a.s.)

- Ukázka vyhodnocení pro převodové stupeň 7N. Pro statické měření na kanále s uzavřenými diferenciály
- Porovnání efektivního zrychlení na sedadle vozidla ve směru osy Z bez úpravy ( $0,37\text{ms}^{-2}$ ) a s úpravou ( $0,23\text{ms}^{-2}$ )

7N (bez úpravy)



7N (s úpravou)

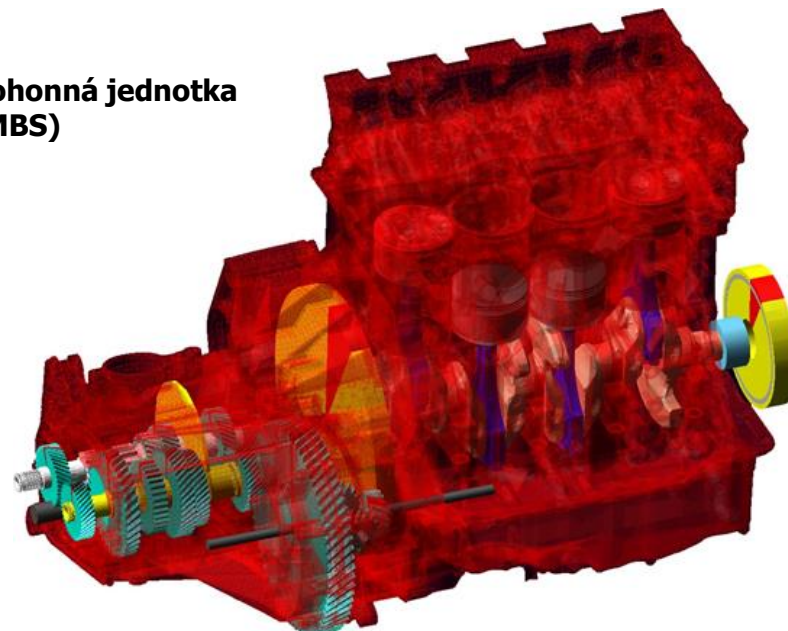


## WP07: Zlepšení návrhu hnacích traktů vozidel s využitím virtuálního hnacího traktu

### ▪ Výpočtové modelování pohonné jednotky na bázi MBS (VUT v Brně, ŠKODA AUTO a.s.)

- Řešení problematiky pevnosti (pohybující se komponenty a blok motoru/skříň převodovky)
- Řešení problematiky NVH (koordinace s **WP15**)
- Nově vyvinutý model kontaktu ozubených kol (nelineární MBS výpočtový model zohledňující proměnnou radiální tuhost a tlumení a vliv naklopení kol obecně pro nestacionární úlohy)
- Využité submodely
  - Valivé ložisko (koordinace **WP08**)
  - Pružné hřídele na základě MKP
  - Pružná skříň převodovky na základě MKP

Pohonná jednotka  
(MBS)

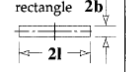


## WP07: Zlepšení návrhu hnacích traktů vozidel s využitím virtuálního hnacího traktu

### ▪ Kontakt ozubených kol – EHD (VUT v Brně)

– Zahrnutí vlivu elastických deformací kol

#### Analytický výpočet (Hertz)

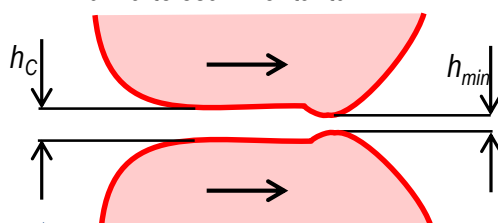
| Contact area dimensions                                                                                                                               | Maximum contact pressure                                          | Average contact pressure      | Maximum deflection                                                                                                       | Maximum shear stress                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| $b = \left( \frac{4WR'}{\pi E'} \right)^{1/2}$<br>rectangle $2b$<br> | $p_{max} = \frac{W}{\pi b l}$<br>Elliptical pressure distribution | $p_{average} = \frac{W}{4bl}$ | $\delta = 0.319 \left( \frac{W}{E'} \right) \times \left[ \frac{2}{3} + \ln \left( \frac{4R_s R_b}{b^3} \right) \right]$ | $\tau_{max} = 0.304 p_{max}$<br>at a depth of $z = 0.786 b$ |

– Zahrnutí vlivu olejové vrstvy

#### Tuhost (Hamrock & Dowson)

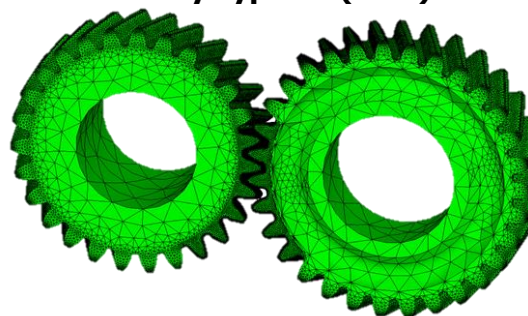
$$\frac{h_c}{R'} = 2,69 \left( \frac{U \eta_0}{E' R'} \right)^{0,67} (\alpha E')^{0,53} \left( \frac{W}{E' R'^2} \right)^{-0,067} (1 - 0,61 e^{-0,73k})$$

Pružná tělesa v kontaktu

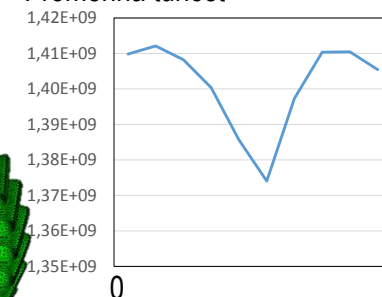


$h_c$  centrální tloušťka  
 $h_c$  minimální tloušťka  
 $k$  parametr elipticity  
 $\eta_0$  viskozita při atmosférickém tlaku

#### Numerický výpočet (MKP)



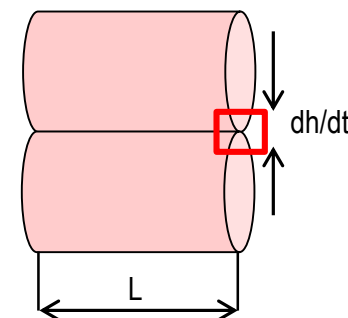
Proměnná tuhost



#### Tlumení (Novotný)

$$W_D = -\beta \frac{L \eta_0 e^{\alpha p_H} b^3}{h^3} \frac{dh}{dt}$$

Tělesa v kontaktu  
radiální pohyb



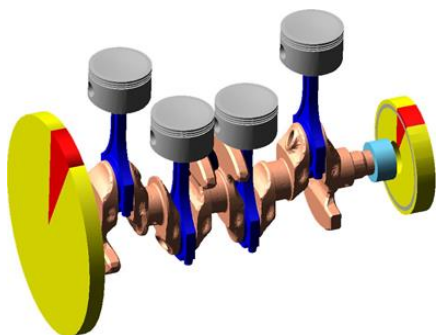
| B/L     | 1     | 5/6   | 2/3   | 1/2   | 2/5   | 1/3   | 1/4   | 1/5   | 1/10  | 0 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
| $\beta$ | 0.421 | 0.498 | 0.580 | 0.633 | 0.748 | 0.790 | 0.845 | 0.874 | 0.937 | 1 |

## WP07: Zlepšení návrhu hnacích traktů vozidel s využitím virtuálního hnacího traktu

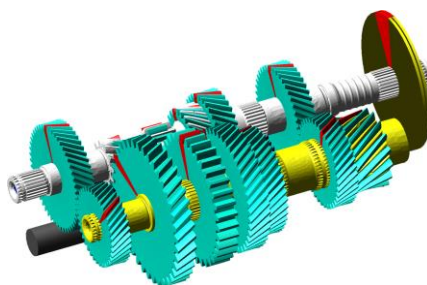
### ▪ Virtuální převodovka, Virtuální pohonná jednotka (VUT v Brně + ŠKODA AUTO a.s.)

– Submoduly virtuální pohonné jednotky na základě komplexních 3D výpočtových modelů (MBS)

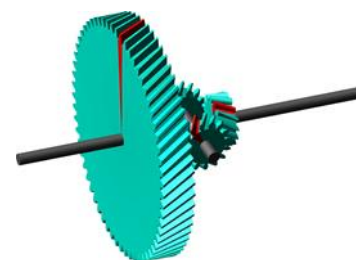
**Virtuální klikový mechanismus**



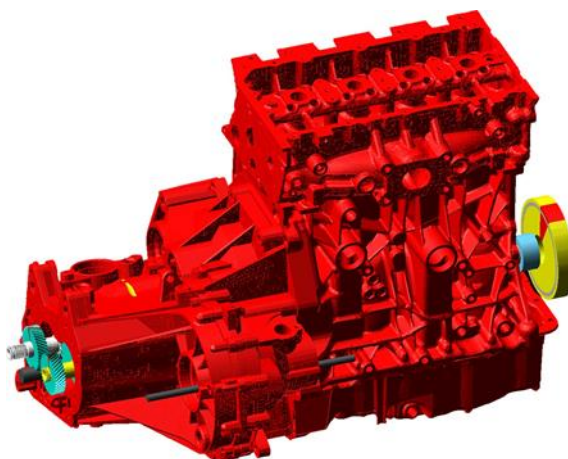
**Virtuální převodovka**



**Virtuální rozvodovka**

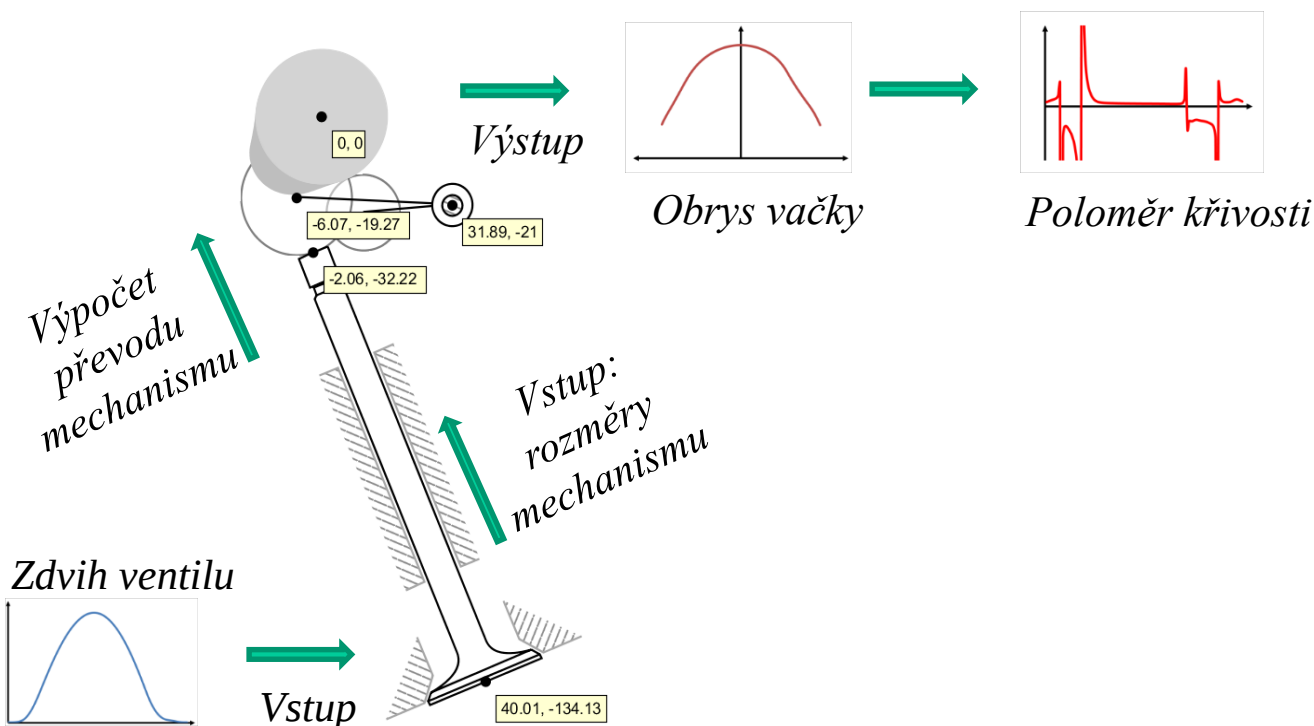


– Virtuální pohonná jednotka  
na základě komplexních 3D  
výpočtových modelů (MBS)



## WP07: Zlepšení návrhu hnacích traktů vozidel s využitím virtuálního hnacího traktu

- **Stavba kinematického modelu sériového rozvodového mechanismu motoru EA211 - kinematický model – GT VTDesign (ČVUT)**

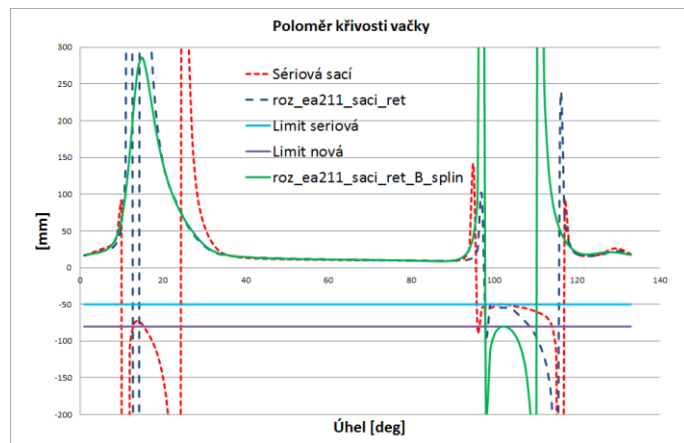


## WP07: Zlepšení návrhu hnacích traktů vozidel s využitím virtuálního hnacího traktu

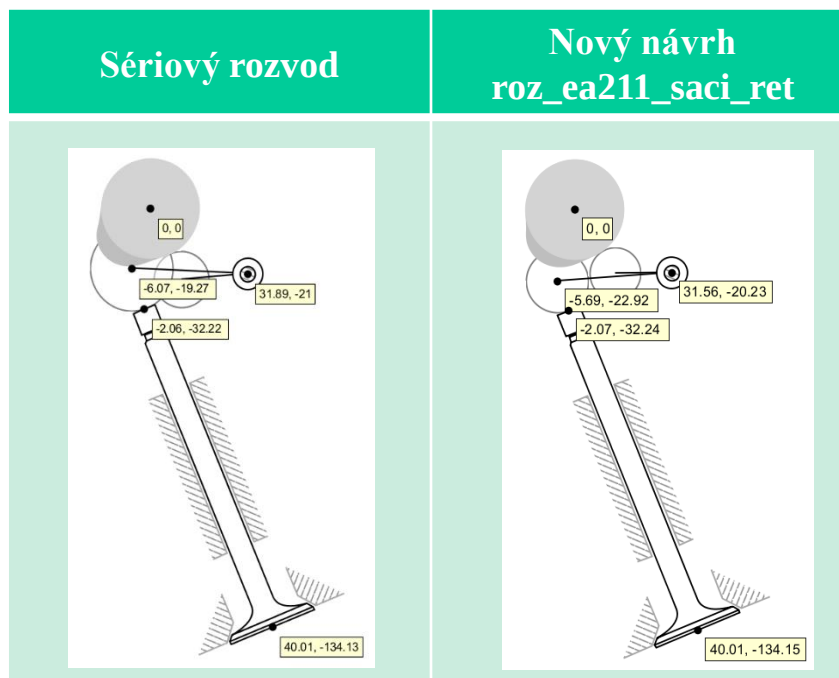
### ▪ Řešené úkoly v 2014 (ČVUT)

- Úprava kinematického modelu pro mechanismu s vypínatelnou podpěrou vahadla – změna geometrie vahadla

Návrh zdvihové křivky ventilu pro mechanismus s vypínatelnou podpěrou vahadla s omezením min. poloměru křivosti – porovnání poloměru křivosti, dosažení požadované hodnoty



Změna geometrie vahadla



## WP07: Zlepšení návrhu hnacích traktů vozidel s využitím virtuálního hnacího traktu

### ▪ Další postup

- Technický experiment a výpočtové modelování s využitím MATLAB/Simulink a HIL (VUT v Brně, TATRA TRUCKS a.s.)
  - Vyhodnocení měření na hnacím traktu různých variant vozidla 8x8
  - Ověření výpočtových modelů a ladění jejich vstupních parametrů
  - Využití výpočtových modelů pro Real-time testování a vývoj mechatronických systémů
- Vyhodnocení vibrací a únavové životnosti dílů pohonné jednotky (VUT v Brně, ŠKODA AUTO a.s.)
- Technický experiment na pohonné jednotce ŠKODA (VUT v Brně, ŠKODA AUTO a.s.)
- Automatizace procesu optimalizace zdvihové křivky s využitím genetického algoritmu v DASY (ČVUT)
- Dynamický model rozvodového mechanismu s vypínatelnou podporou (ČVUT)

## WP07: Zlepšení návrhu hnacích traktů vozidel s využitím virtuálního hnacího traktu

### ▪ Plnění milníků

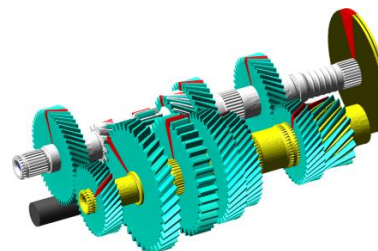
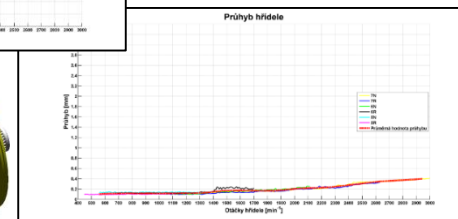
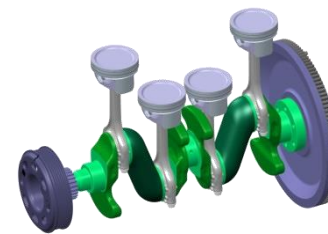
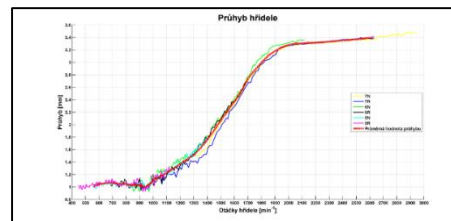
- WP07M01: Prototyp klikového mechanismu zážehového spalovacího motoru osobního automobilu se sníženými mechanickými ztrátami ve srovnání s výchozím stavem

### ▪ Plnění dílčích cílů

- WP07C01: Soubor výsledků výpočtového řešení dynamiky pohonné jednotky
- WP07C02: Soubor výsledků experimentálního ověření dynamiky pohonné jednotky

### ▪ Plnění dílčích výstupů

- WP07V003: Virtuální převodovka
- WP07V004: Testování pohonné jednotky

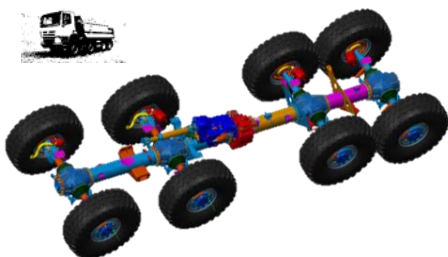


## WP07: Zlepšení návrhu hnacích traktů vozidel s využitím virtuálního hnacího traktu

▪ **Děkuji za pozornost**

## Výsledky WP07 Zlepšení návrhu hnacích traktů vozidel s využitím virtuálního hnacího traktu dosažené v letech 2012 – 2014

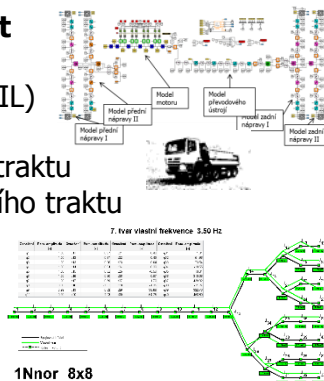
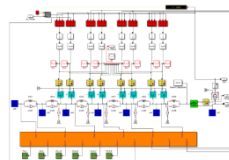
### Počáteční konstrukční návrh, prototyp hnacího traktu



### Virtuální hnací trakt

Vibrace  
(MATLAB, Simulink, HIL)

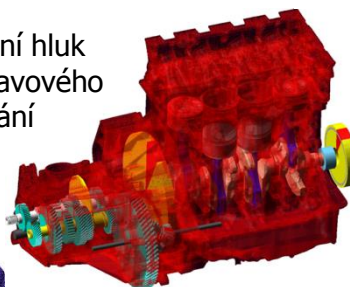
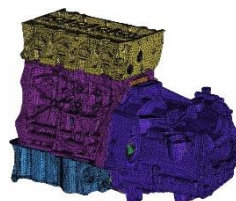
- modální analýzy
- dynamika hnacího traktu
- mechatronika hnacího traktu



### Virtuální pohonná jednotka

Vibrace, hluk, pevnost (FEM, MBS)

- ustálené nebo přechodové kmitání
- strukturální hluk
- řešení únavového poškození



### Technický experiment

Vibrace

- Měření laserem (torzní vibrace)
- Měření průhybu dlouhé hřídele
- Měření vibrací tříosými akcelerometry
- Měření otáček motoru
- Měření otáček dlouhé hřídele



### Prototyp hnacího traktu ve vozidle

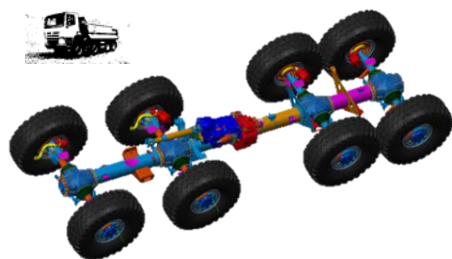


Ověření  
navržených  
řešení



## Results of WP07 Improvements of engine design using virtual engine and drivetrain dynamic models achieved in 2012 – 2014

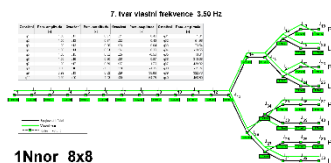
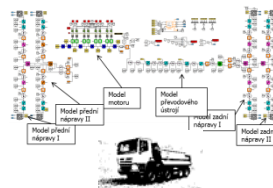
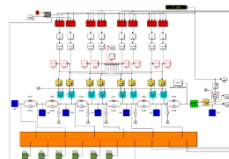
### Initial design, drivetrain prototype



### Virtual drivetrain

Vibrations (MATLAB, Simulink, HIL)

- modal analysis
- drivetrain dynamics
- mechatronics



### Experimental test

Vibrations

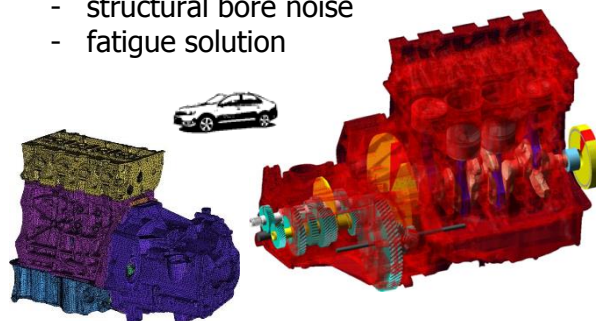
- Laser measurement (torsional vibration)
- Shaft deflection
- Acceleration measurement
- Engine speed measurement



### Virtual drivetrain

Strength and NVH (FEM, MBS)

- steady state of transient dynamics
- structural bore noise
- fatigue solution



### Drivetrain prototype in vehicle

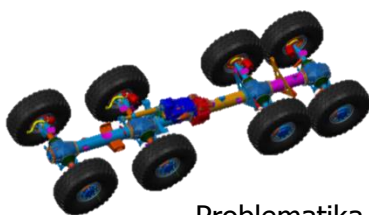


Ověření  
navržených  
řešení



## Výsledky WP07 Zlepšení návrhu hnacích traktů vozidel s využitím virtuálního hnacího traktu dosažené v roce 2014

### Počáteční konstrukční návrh, prototyp hnacího traktu



Problematika vibrací, hluku a pevnosti

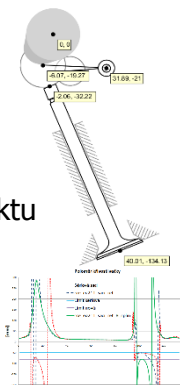
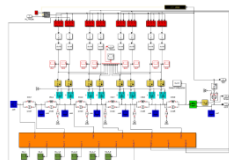


### Virtuální hnací trakt

Vibrace

(MATLAB, Simulink, HIL)

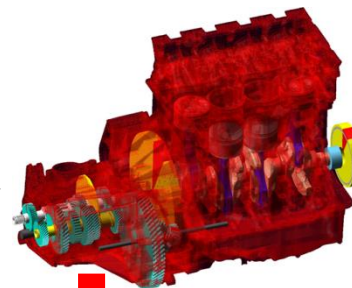
- modální analýzy
- dynamika hnacího traktu
- mechatronika hnacího traktu



### Virtuální pohonná jednotka

Vibrace, hluk, pevnost (FEM, MBS)

- ustálené nebo přechodové kmitání
- strukturální hluk
- řešení únavového poškození



### Prototyp hnacího traktu ve vozidle



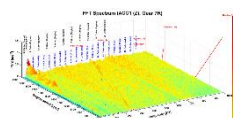
Verification of proposed solutions



### Technický experiment

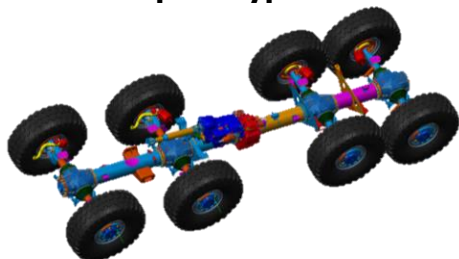
Vibrace

- Měření laserem (torzní vibrace)
- Měření průhybu dlouhé hřídele
- Měření vibrací tříosými akcelerometry
- Měření otáček motoru
- Měření otáček dlouhé hřídele



## Results of WP07 Improvements of engine design using virtual engine and drivetrain dynamic models achieved in 2014

### Initial design, drivetrain prototype

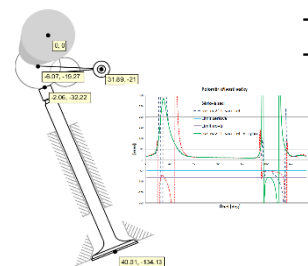
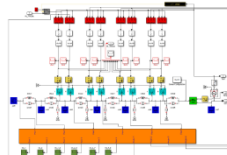


Strength and  
NVH challenges

### Virtual drivetrain

Vibrations (MATLAB, Simulink, HIL)

- modal analysis
- drivetrain dynamics
- mechatronics



### Virtual drivetrain

Strength and NVH (FEM, MBS)

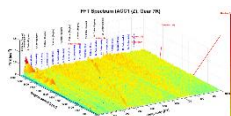
- steady state of transient dynamics
- structural bore noise
- fatigue solutions



### Experimental test

Vibrations

- Laser measurement (torsional vibration)
- Shaft deflection
- Acceleration measurement
- Engine speed measurement



Verification of  
proposed solutions



### Drivetrain prototype in vehicle

