



Analytické metody v motorsportu

Bronislav Růžička

ÚK ústav
konstruování

školitel : Doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.

Ústav konstruování – Odbor konstruování strojů

Fakulta strojního inženýrství
Vysoké učení technické v Brně

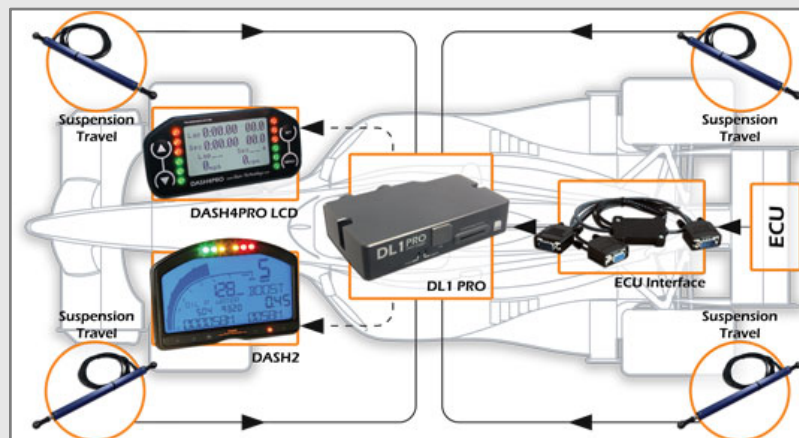
Obhajoba disertační práce

12. listopadu 2113, FSI VUT v Brně, Česká republika

- Úvod do problematiky
- Formulace problému
- Shrnutí současného stavu poznání
- Cíle disertační práce
- Metody přístupu a způsob návrhu řešení
- Interpretace výsledků
- Závěr
- Publikace



„Všechny modely jsou špatné, ale některé jsou užitečné“ George E.P.Box



- Výkonnosti vozu je definována jako komplexní souhrn kvalit funkcí všech systémů

- Aktuální výkonnost vozu je možno identifikovat pomocí procesu sběru a vyhodnocení dat (datalogging)



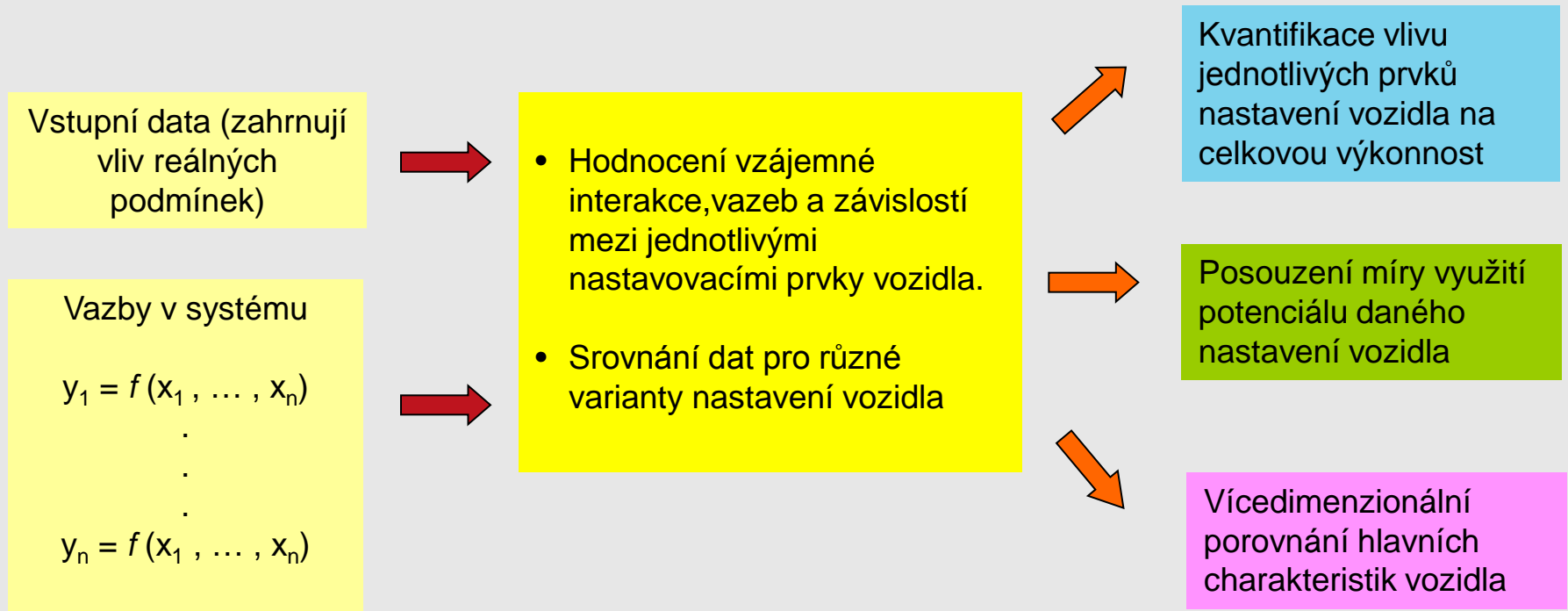
- Návrh vhodné optimalizace výkonnosti vozidla závisí významně také na efektivnosti analýzy získaných dat



- Zkušenosti závodního inženýra jsou důležitým faktorem při volbě správných analytických přístupů pro vyhodnocení skupin parametrů

Formulace problému

- Analýza výkonnosti vozu a jezdce zpracováním velkého množství dat
- Identifikace závislostí změn nastavovacích prvků a jízdní dynamiky vozidla
- Nalezení vhodného nastavení závodního vozidla v reálných podmínkách
- Omezené časové možnosti pro klíčové rozhodnutí
- Efektivnost jednotlivých metod pro proces optimalizace vozidla

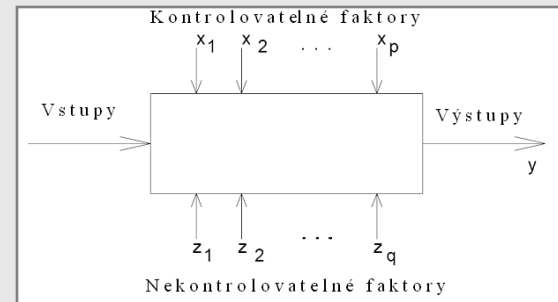


Přístupy pro analýzu výkonnosti vozidla

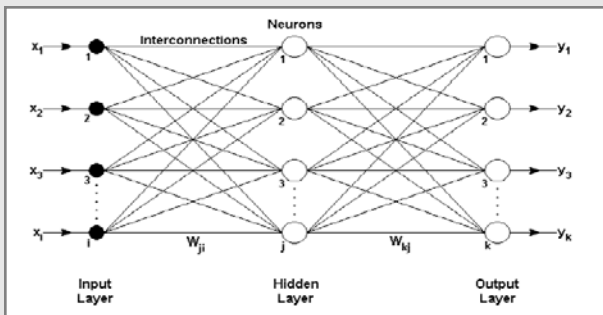
■ Standardní datové analýzy



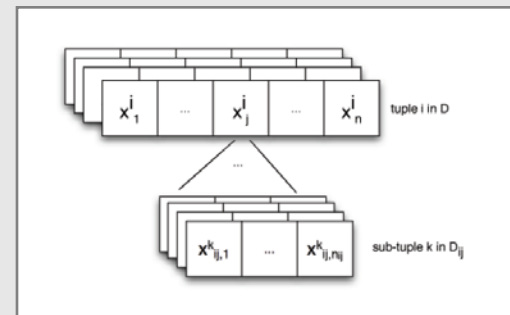
■ Metody řízeného experimentu



■ Využití prvků umělé inteligence



■ Multivariační analýzy dat



- Návrh nové metodiky pro rychlé nalezení optimálního nastavení sportovního vozu při zkušebních jízdách. Vícerozměrný charakter metodiky, kdy na rozdíl od konvenčních metod bude možno při testech seřizovat více prvků současně bez promyšleného pořadí změn

Vedlejší cíle

- Vytvoření jednoduché softwarové aplikace pro pre-processing dat (implementace metodiky)
- Ověření metodiky v interaktivním režimu na testovacích datech



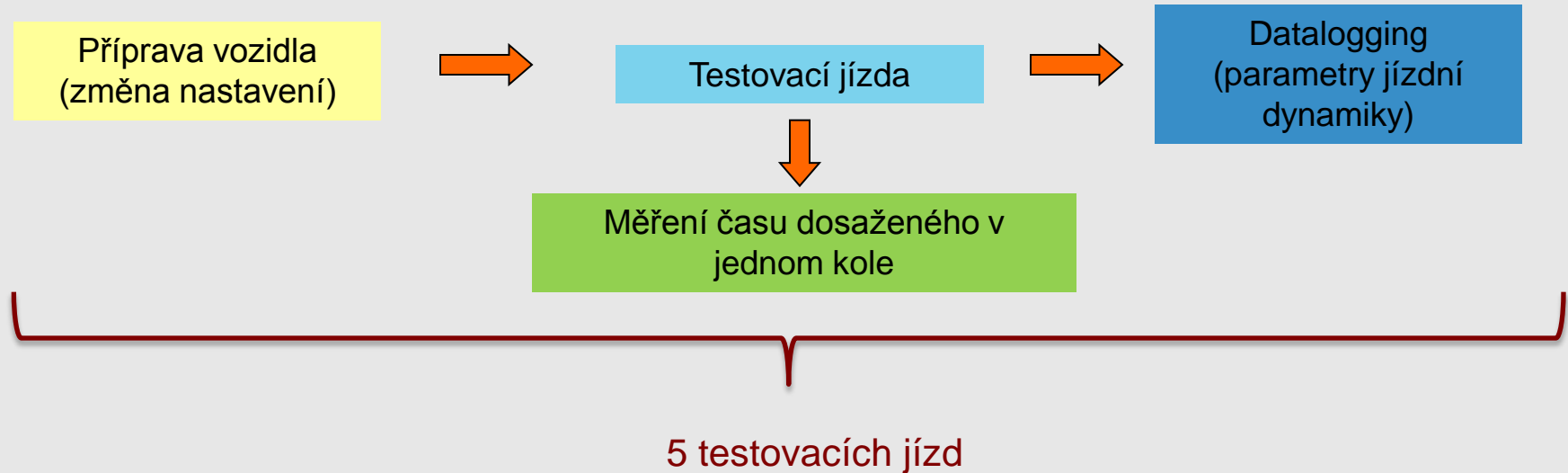
Popis experimentu

Hodnocený parametr

čas dosažený v jednom kole = f (nastavovacích prvků vozidla)

Cíl

nalezení efektivní metody pro určení minima funkce v omezeném počtu kroků



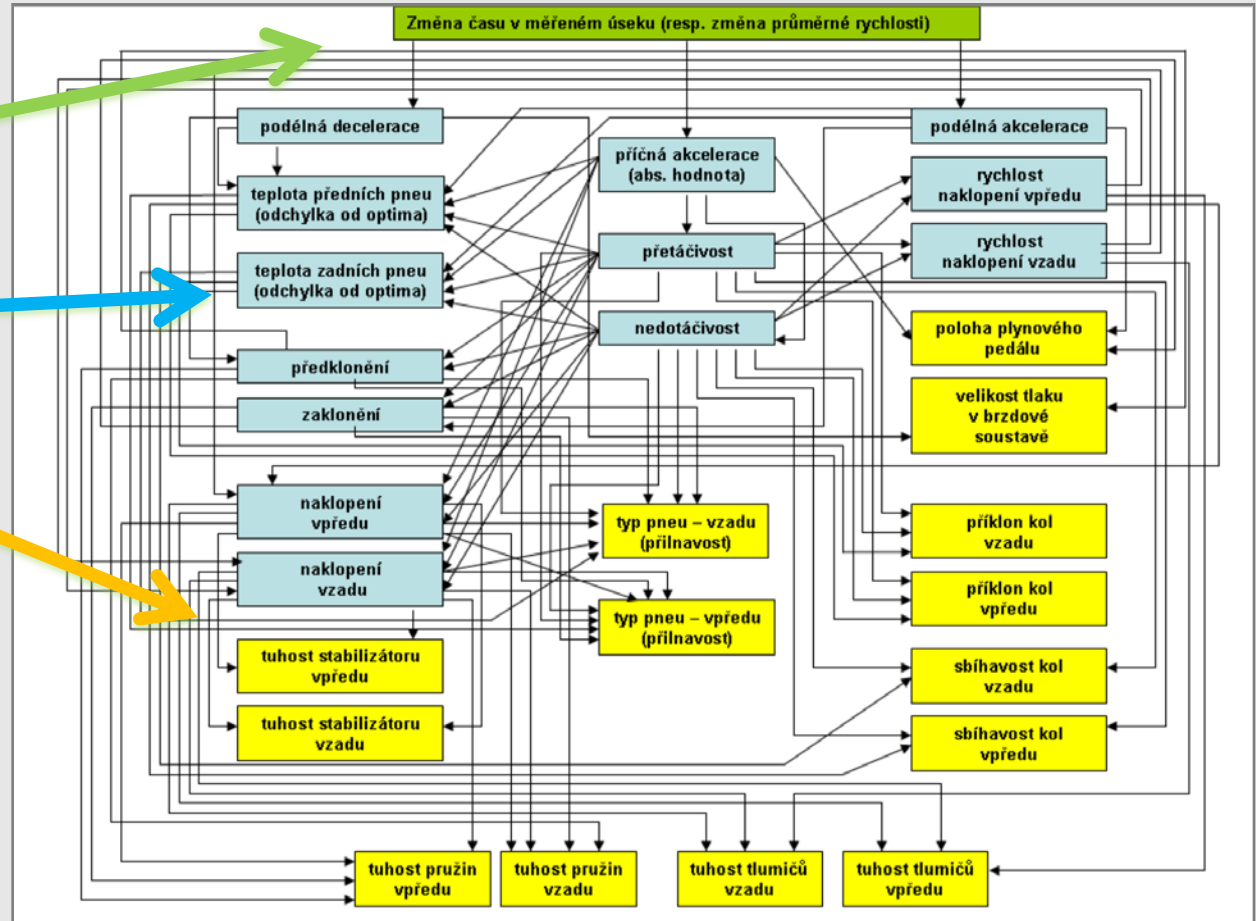
Popis funkčních závislostí

měření
hodnotící
veličiny

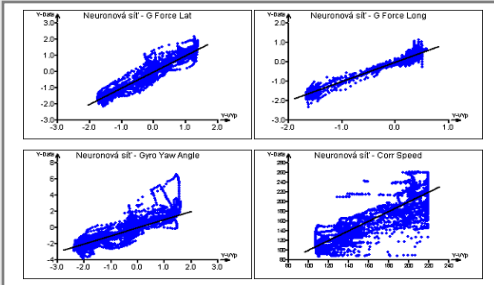
měření
dynamických
veličin vozidla

provádění změn
nastavení prvků
vozidla

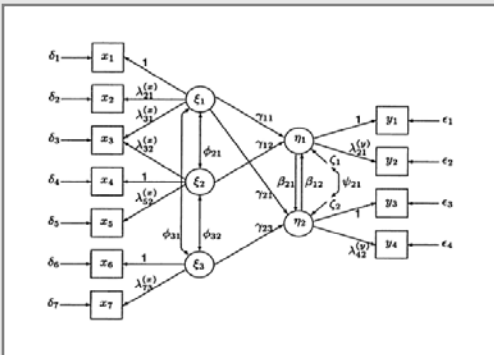
- časová náročnost v případě hodnocení postupných změn



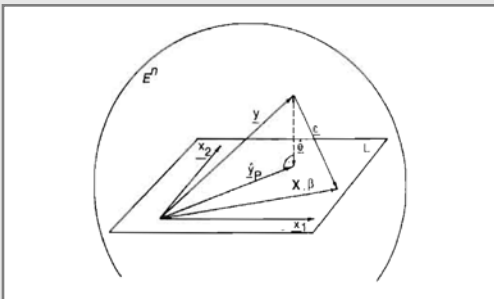
Výběr vhodného typu výpočtové metody



- Neuronové sítě (ANN)
- + výkonná metoda, podobné aplikace
- časová náročnost výpočtu a tvorby modelu



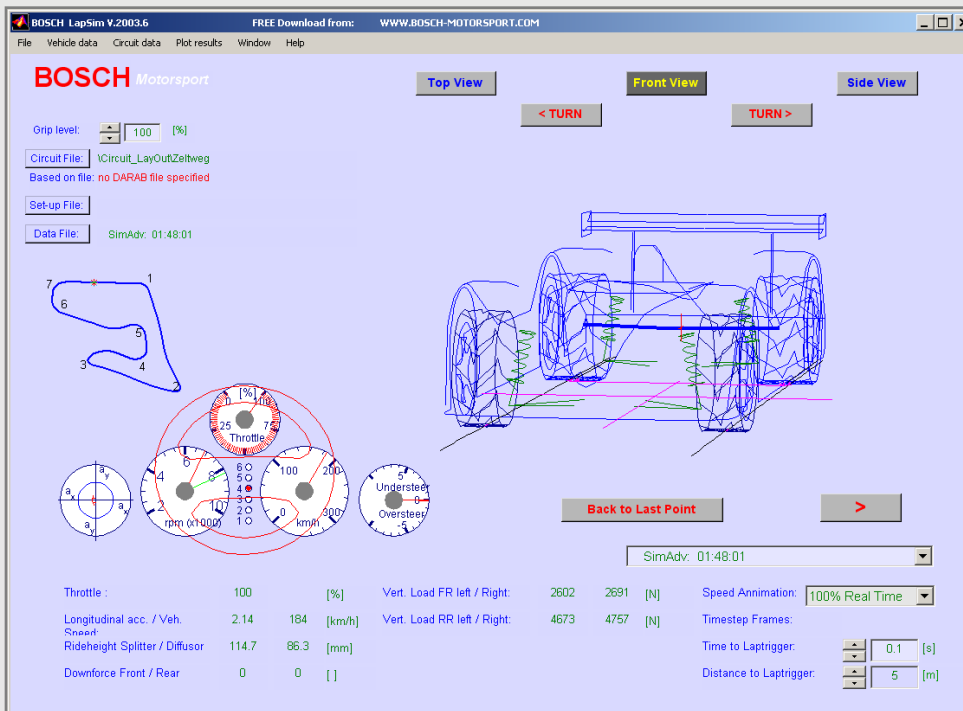
- Strukturální rovnice (SEM)
- + přímá tvorba strukturovaného modelu
- náročnější validace modelu, zkušenosti



- Lineární regresní model (LRM)
- + poměrně jednoduchá tvorba a modifikace modelu, ověřená metoda
- relativně vyšší riziko vlivu chyb měření na výsledek

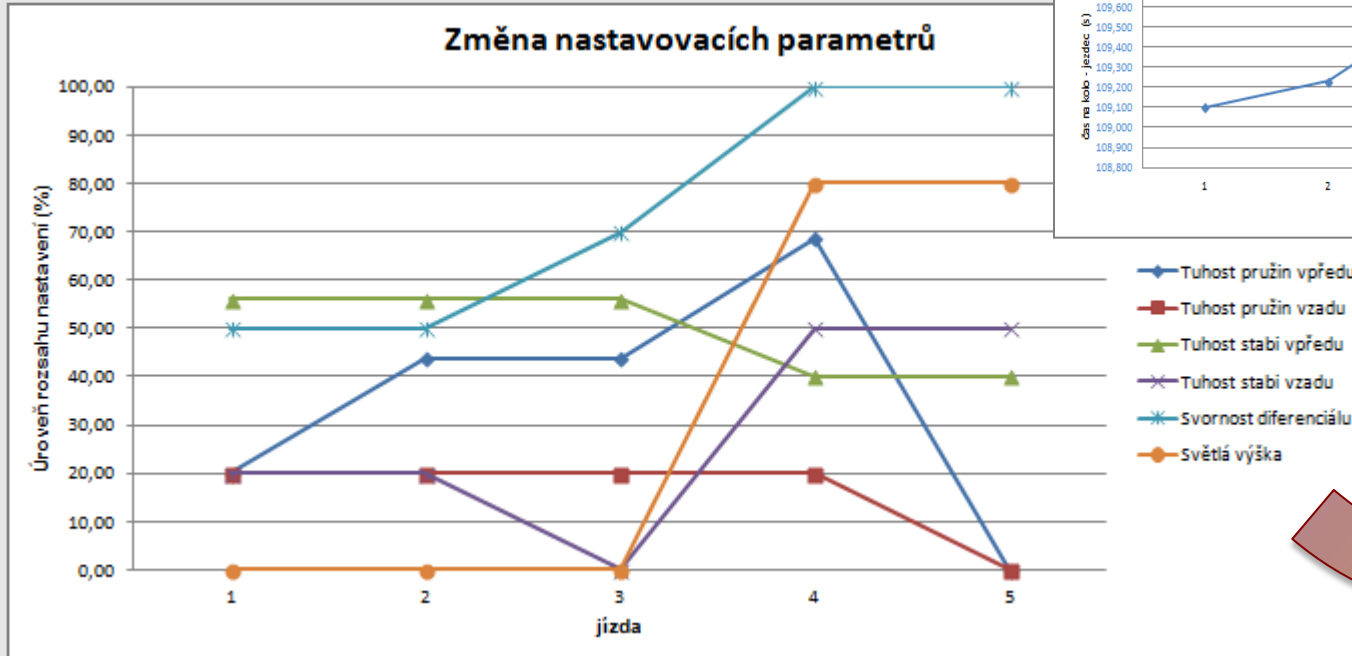
Získání experimentálních dat pro analýzu

- Volba simulačního programu Bosch LapSim - výhoda možnosti interaktivního ověřování vlivu vybraných prvků nastavení vozidla na jeho výkonnost (čas na jedno kolo)



- Applikace Bosch LapSim nahradila časově a finančně náročné jízdy reálného vozidla
- Hodnocení vlivu vybraných vstupních parametrů nastavení
 - svornost diferenciálu
 - světlá výška
 - tuhost pružin přední nápravy
 - tuhost pružin zadní nápravy
 - tuhost stabilizátoru přední nápravy
 - tuhost stabilizátoru zadní nápravy

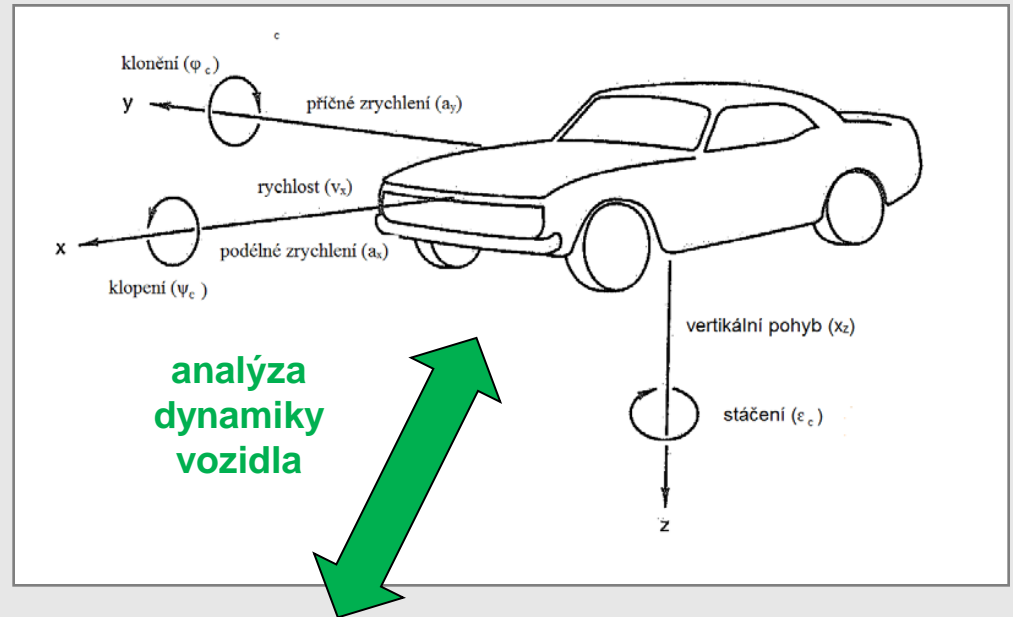
Průběh nastavení parametrů



- Náhodný charakter úrovně změny nastavovacích parametrů
- Záměrná shoda/souběh provádění změn více nastavovacích parametrů (test statisticky nejméně příznivé kombinace)
- Vygenerování omezeného množství dat v limitovaném počtu jízd odrážející situaci v reálném prostředí

Transformace vlivu jednotlivých nastavovacích prvků

- Transformovaný parametr - řešení vlivu opakování souběžných změn při nastavení více prvků
- Každý z transformovaných parametrů jednoznačně charakterizuje jízdní dynamiku vozidla
- Využití dynamických parametrů pro sestavení transformačních funkcí



- rozdíl rychlostí kol hnané nápravy $\approx f_{T1}$ (*míry svornosti diferenciálu*)
- celkový dynamický přenos váhy na nápravě $\approx f_{T2}$ (*velikosti světlé výšky*)
- klopení vozidla $\approx f_{T3}$ (*tuhosti pružin & stabilizátorů přední / zadní nápravy*)
- klonění vozidla $\approx f_{T4}$ (*tuhosti pružin přední / zadní nápravy*)

Tvorba transformovaných parametrů

- Příklad transformace změny technického parametru světlá výška vozidla (výška těžiště) na ukazatel RHI

Ukazatel vlivu změny světlé výšky

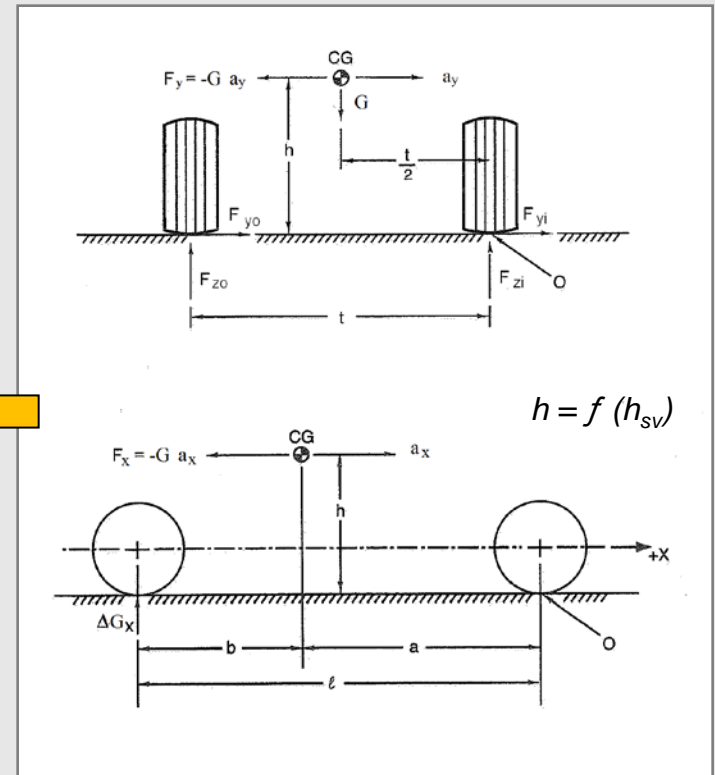
$$RHI = a_T \cdot h_{sv}$$

$$\Delta G_y = \frac{G \cdot a_y \cdot h}{t}$$

$$\Delta G_x = \frac{G \cdot a_x \cdot h}{l}$$

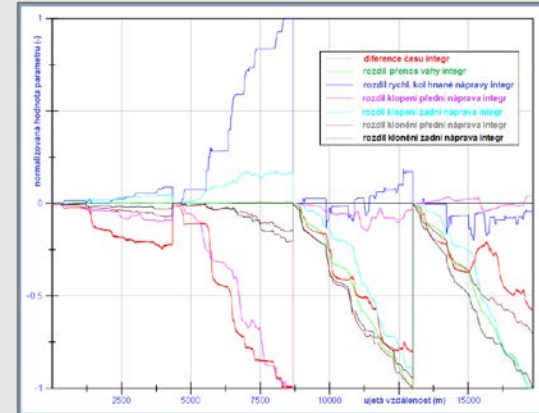
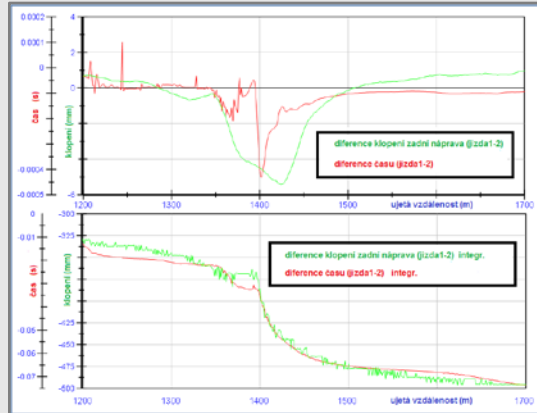
$G, l, t = \text{konst.}$

$$a_T = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}$$



Zpracování experimentálních dat

- Vytvoření scriptu NI DIAdem - výpočet transformovaných parametrů, úprava pro regresní analýzu
- Stanovení diferencí jednotlivých parametrů z každé jízdy vůči referenční (nejrychlejší) jízdě
- Integrace diferencí transformovaného parametru reprezentuje jeho přínos v okamžitém bodě zkušební dráhy
- Sumarizace dat z celého experimentu a jejich normalizace maximální hodnotou



- Návrh regresního modelu

Aplikace vícerozměrného regresního modelu

- Diference času v měřeném úseku (závislá proměnná) jako funkce změny parametrů nastavení (nezávisle proměnné)

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon$$

- Metoda nejmenších čtverců

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 \cdot x_i)^2 = \min$$

- Ověření kvality modelu



statistická významnost
koeficientů a vhodnost modelu



míra korelace nezávislých
proměnných, resp. přítomnost
multikolinearity

- Výpočet regresních koeficientů proveden v prostředí STATISTICA a MINITAB

Vyhodnocení experimentálního testu (Vozidlo 1 & Trať 1)

Evaluace regresních koeficientů

The regression equation is

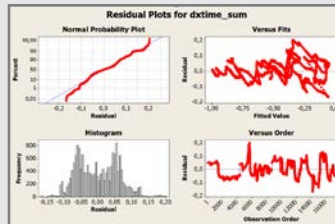
$$\begin{aligned} \text{dxtime_sum} = & - 0,0559 - 0,615 \text{ Diff_Speed_integr_sum} \\ & + 2,03 \text{ weight_trans_infl_integr_sum} \\ & + 0,247 \text{ front_roll_stiff_infl_integr_su} \\ & - 1,08 \text{ rear_roll_stiff_infl_integr_sum} \\ & + 0,213 \text{ front_pitch_infl_integr_sum} \\ & - 0,584 \text{ rear_pitch_infl_integr_sum} \end{aligned}$$

Ověření vlastností navrženého modelu

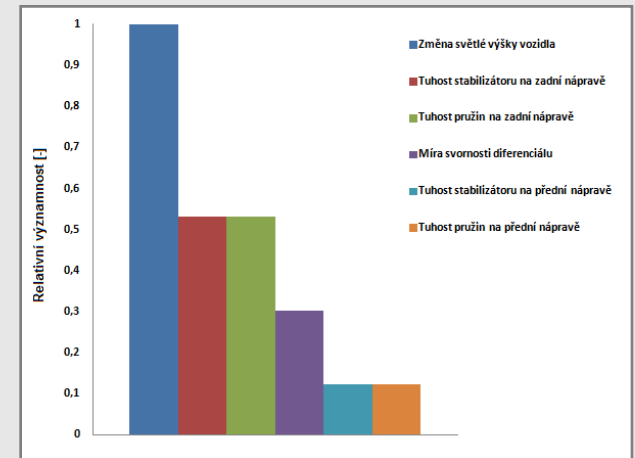
	weight_trans_infl_integr_sum	rear_roll_stiff_integr_sum	Diff_speed_integr_sum	rear_pitch_infl_integr_sum	front_roll_stiff_integr_sum	front_pitch_infl_integr_sum
p-value < 0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
t-test (t)	53.94	-52.60	-68.84	-37.47	24.10	19.26
směrodat. odch. residu (s)	OK					
koef. determ. R-sq / R-sq adj.	0.952 / 0.952					
F-test (F)	56840.57					
VIF < 10	696.43	207.337	28.856	115.21	32.031	41.452
norm. rozložení residu modelu	OK					
nezáv. resid. na hodnot. odchodu	OK					
nezáv. resid. na poř. pozorování	OK					

	weight_trans_infl_integr_sum	Diff_Speed_Integr_Sum	weight_trans_infl_integr_sum	front_roll_stiff_integr_sum	rear_roll_stiff_integr_sum	front_pitch_infl_integr_sum
Diff_Speed_Integr_Sum	-0.615					
weight_trans_infl_integr_sum	0.378	0.353				
front_roll_stiff_integr_sum	0.7	-0.976	-0.311			
rear_roll_stiff_integr_sum	0	0	0			
front_pitch_infl_integr_sum	0.213	0.242	0.945	-0.417		
rear_pitch_infl_integr_sum	0	0	0	0		
front_pitch_infl_integr_sum	0.433	0.256	0.964	-0.274	0.914	
rear_pitch_infl_integr_sum	0	0	0	0	0	
front_pitch_infl_integr_sum	0.432	0.272	0.986	-0.274	0.951	0.937
rear_pitch_infl_integr_sum	0	0	0	0	0	0

Cell Contents: Pearson correlation
P-Value



Určení vlivu jednotlivých prvků nastavení (normalizace max. hodnotou)

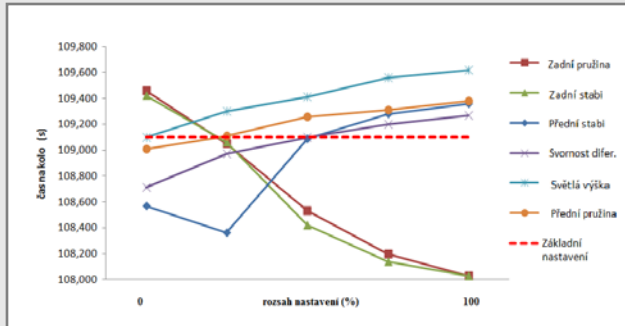


změna nastavení

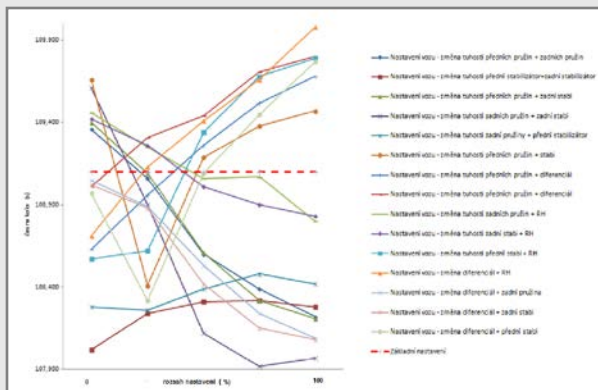
zlepšení **1.09 sec/kolo** ve srovnání s nejrychlejším časem v experimentu

Srovnání výsledků regresní metodiky s výsledky jiných postupů

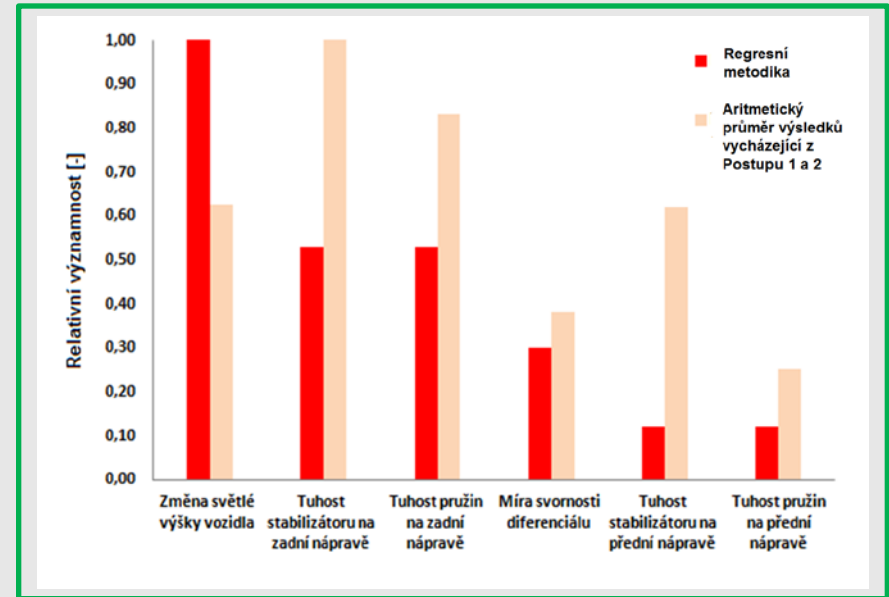
■ Postup 1 (vliv změny jednoho parametru)



■ Postup 2 (vliv současné změny dvou parametrů)



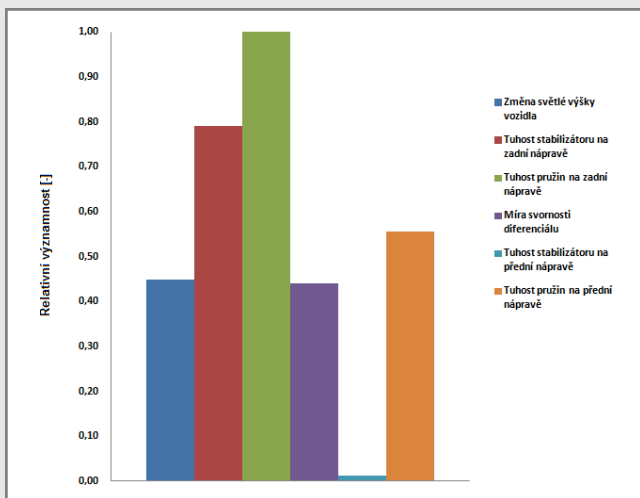
■ Relativní významnosti vlivu jednotlivých prvků nastavení stanovených regresní metodikou a jinými postupy



Aplikace metodiky na dalších příkladech

■ Vozidlo 1 & Trať 2

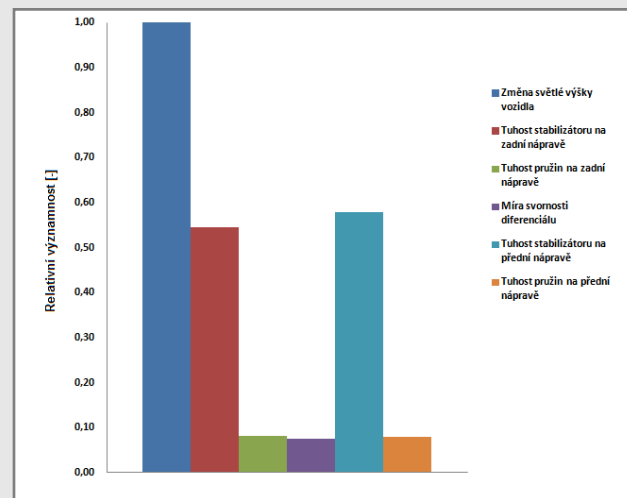
■ Vozidlo 2 & Trať 1



ověření postupů při
správné interpretaci
vyšší míry korelace
nezávislých
parametrů



změna nastavení



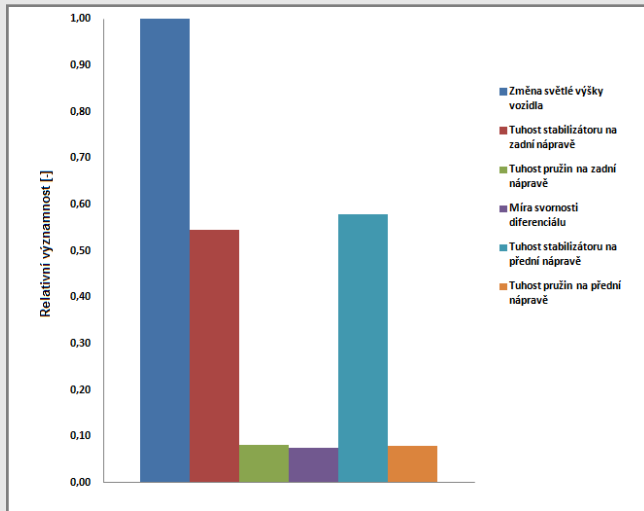
zlepšení **0.18 sec/kolo** ve srovnání
s nejrychlejším časem v experimentu



zlepšení **0.01 sec/kolo** ve srovnání
s nejrychlejším časem v experimentu

Srovnání metodiky s alternativním postupem (DOE)

■ Metodika – vícerozměrná regrese

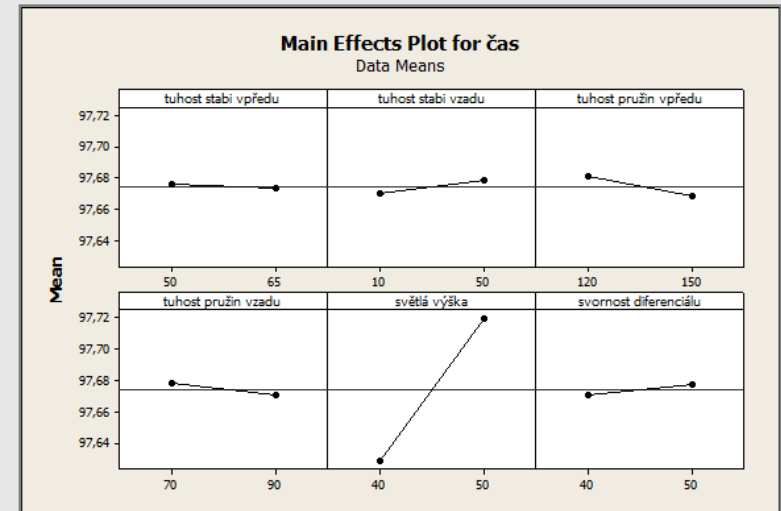


5 testovacích jízd



dosažený čas na kolo po provedení úprav
97,58 sec

■ DOE – plný faktorový plán



64 testovacích jízd



dosažený čas na kolo po provedení úprav
97,59 sec

drobné odlišnosti v interpretaci vlivu parametrů (přední stabilizátor, diferenciál)



- Návrh metodiky představuje dosud nepublikovaný přístup k aplikaci vícerozměrného lineárního regresního modelu pro hodnocení vlivu nastavovacích parametrů na výkonnost sportovního vozidla
- Ve srovnání s dosud používanými postupy je přínosem operativnost a efektivita v procesu optimalizace výkonnosti sportovního vozidla
- Princip metodiky dovoluje implementaci na dalších sofistikovanější výpočtové metody (ANN, SEM)
- Získané poznatky lze využít pro vícerozměrné analýzy i u jiných dynamických technických systémů



SUCHOMEL, O., RŮŽIČKA, B. Technical Note on Design of Suspension Parameters for FSAE Vehicle. *TRANSACTIONS ON TRANSPORT SCIENCES*, 2111, roč. 3, č. 4, ISSN: 1802- 971X.

STRECKER, Z. ; RŮŽIČKA, B. The Application of MR Dampers in the Field of Semiactive Vehicle Suspension. In *Mechatronics*. Berlin Heidelberg: Springer - Verlag, 2111. s.149-154. ISBN: 978-3-642-23243- 5.





Děkuji vám za pozornost

Bronislav Růžička

UK ústav
konstruování

Ústav konstruování – Odbor konstruování strojů

Fakulta strojního inženýrství

Vysoké učení technické v Brně

Obhajoba disertační práce

12. listopadu 2013, FSI VUT v Brně, Česká republika