

Fakulta strojního inženýrství  
Ústav konstruování / Odbor konstruování strojů

Faculty of Mechanical Engineering  
Institute of Machine and Industrial Design / Department of Machine Design

## Analytické metody v motorsportu

[Pojednání ke státní doktorské zkoušce]  
[Discourse on the Dissertation Thesis]

Autor práce: **Ing. Bronislav Růžička**  
Author

Vedoucí práce: **doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.**  
Supervisor



**OBSAH**

---

<b>OBSAH</b>	<b>3</b>
<b>1 ÚVOD</b>	<b>4</b>
<b>2 VYMEZENÍ ŘEŠENÍ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE</b>	<b>5</b>
2.1 Definice problematiky procesu optimalizace nastavení sportovního vozidla	5
2.2 Optimalizační postupy	6
2.3 Předpokládané cíle disertační práce	7
<b>3 SHRUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>8</b>
3.1 Standardní datové analýzy	8
3.2 Metody řízeného experimentu	21
3.3 Využití prvků umělé inteligence	35
3.4 Multivariační analýza dat	41
<b>4 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ</b>	<b>47</b>
<b>5 VYMEZENÍ CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE</b>	<b>52</b>
<b>6 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DIZERTAČNÍ PRÁCE</b>	<b>53</b>
<b>7 ZÁVĚR</b>	<b>57</b>
<b>8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>58</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ</b>	<b>61</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ</b>	<b>63</b>

## 1 ÚVOD

Cílem pojednání je zhodnocení současného stavu a analytických metod pro vyhodnocování jízdní dynamiky sportovních vozidel s návazností na možnost identifikace vlivů jednotlivých nastavovacích parametrů na celkovou změnu výkonnosti vozidla. V běžné praxi je obvyklé, že dochází k překrývání efektů způsobených změnami jednotlivých prvků nastavení vozidla pokud jsou tyto prováděny současně, což má za následek nesprávné či obtížně definovatelné stanovení postupů pro hodnocení a nasměrování dalších kroků při vývoji vozidla. Stejný problém nastává také při vyhodnocování množství dat získaných při numerických simulacích jízdní dynamiky vozidla. V tomto případě však může být potlačen využitím implementovaných optimalizačních nástrojů vedoucích k nalezení finálního nastavení touto cestou. I v tomto případě je však k pochopení bližších závislostí mezi teoretickou výkonností vozidla a jeho nastavením nutno provádět sofistikovanější analýzu výstupních dat, jejíž závěry by měla sloužit k finálnímu přizpůsobení reálným podmínkám resp. požadavkům jezdce. Toto pojednání bere rovněž v úvahu možnost využití metody analýzy dat nejen v motosportu, ale také pro diagnostiku dynamického chování obecných technických systémů, u nichž nalezení optimálního funkčního stavu závisí na víceparametrickém nastavení, jehož kombinace musí reflektovat rovněž častou změnu vnějších podmínek.

## 2 VYMEZENÍ ŘEŠENÍ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

---

**2**

Jednou z hlavních charakteristik motoristického sportu je jeho výrazný technický aspekt, který se nezanedbatelně promítá do celkového výsledku. Značná závislost mezi dosaženým výsledkem a kvalitou použité techniky (závodní vůz či motocykl) vytváří z této disciplíny velmi komplikovanou problematiku, jejíž řešení nemívá vždy jednoznačné závěry. Správná definice skutečné výkonnosti závodního vozu jako výchozího bodu pro další efektivní úpravy nastavení je tak výzvou pro techniky od samých počátků motosportu.

S bouřlivým rozvojem informačních technologií v poslední dekádě, který pomohl k rozvoji mnohem dokonalejších a sofistikovanějších metodik sběru dat se však tento úkol stal paradoxně v některých směrech mnohem komplikovanější díky obrovskému nárůstu množství dosažitelných informací o chování vozu. Tato skutečnost začala klást značné nároky na jejich vyhodnocování a správná analýza dat získaných ze závodního vozu se tak postupně stala jedním ze stěžejních pilířů pro následnou optimalizaci nastavení, čímž tyto dvě operace postupně splynuly v jeden nedílný celek. Protože však neexistuje jednotný univerzální postup, který by zaručil správnost požadovaných výstupů, je velmi obtížné navrhovat vhodnou universální metodiku. Jedním z možných řešení je pak vytváření kombinací již osvědčených přístupů (užívaných nejen v motosportu) tak, aby narostla efektivnost v procesu získávání klíčových informací za současného snížení nároků na celkový čas řešení.

### 2.1 Definice problematiky procesu optimalizace nastavení sportovního vozidla

---

**2.1**

Procesem optimalizace nastavení závodního vozidla rozumíme soubor takových postupů, které vedou k nalezení kombinace nastavení nebo výměny prvků vozidla, jež zaručí jeho maximální výkonnost, tj. minimalizaci času potřebného na projetí stanoveného úseku v konkrétních podmínkách. Stanovení optimálního nastavení je pak omezeno následujícími faktory:

- časovým rámcem testovacího programu nebo závodního víkendu
- dosažitelnými zdroji informací (datalogging, názor jezdce)
- zkušenostmi závodního inženýra
- kolísání výkonnosti jezdce
- průběžnou změnou aktuálních podmínek (např. povrchu trati)
- správným odhadem budoucích podmínek (počasí, konkurence apod.)
- kapacitními možnostmi technického týmu

Z uvedených skutečností vyplývá, že procedura nastavení závodního vozidla je vždy výsledkem určitých technických řešení vycházejících ze správné analýzy konkrétní situace a podmínek ve vztahu k technickým parametrům závodního vozidla. Protože kombinace nastavení spolu s vnějšími podmínkami výrazně ovlivňují celkovou

výkonnost vozidla je tedy nutno nalézt takový prostředek, který umožní tyto vztahy a závislosti pokud možno jednoznačně definovat. S ohledem na fakt, že vývoj některých vnějších vlivů nelze dost dobře odhadovat (např. počasí), je nezbytné nutné nalézt takovou metodiku, která dovolí stanovit míru citlivosti jednotlivých technických prvků na tyto podmínky a umožnit tak rychlou adaptaci na vnější změny. Tento problematika se však netýká pouze optimalizace nastavení vozidla s již pevně daným konstrukčním řešením (nastavení pro závod), ale dotýká se také vývoje prototypu u něhož je požadavek najít takovou kombinaci technických řešení, jež by umožnila budoucí konkurenční výhodu.

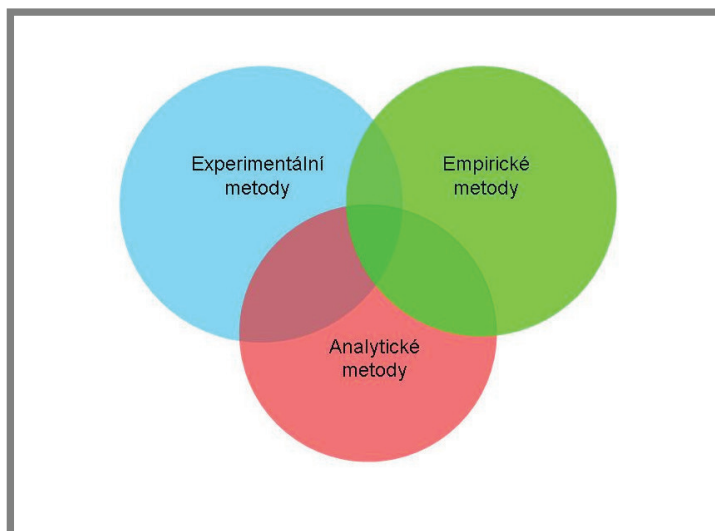
## 2.2 Optimalizační postupy

V běžné praxi motorsportu se lze setkat se třemi základními postupy užívanými během procesu finální optimalizace výkonnosti závodního vozu / motocyklu během testovacích jízd.

Experimentální - tato metodika je velmi rozšířená a využívá posuzování rozdílů v chování reálného vozidla po konkrétní změně nastavení jednotlivých prvků. Hodnotícím kritériem je především čas potřebný k projetí měřeného úseku a rovněž názor jezdce. Přestože je tento postup doménou především amatérských nezkušených týmů, lze se s ním setkat i v profesionálních sériích (např. americký NASCAR), kde je pravidly zakázáno použití systému sběru dat. Zásadní nevýhodou tohoto postupu je značná časová náročnost a především absence poznatků o skutečném vlivu jednotlivých změn na celkovou výkonnost vozidla.

Empirické – tato metodika využívá předchozích zkušeností a je výsadou především velmi zkušených závodních inženýrů. Jednotlivé kroky procesu optimalizace vozu nejsou vedeny na základě objektivních hodnocení (data), ale podle doporučení zkušeného odborníka. Nevýhodou je silná závislost na jednotlivci a omezená přenositelnost znalostí např. z formulových na rally-vozy. Protože však v případě kvalitního odborníka může být tento postup výjimečně efektivní jak časově tak i z hlediska konečného výsledku, je filozofie této metodiky součástí myšlenky vytváření expertních systémů.

Analytické – s rozvojem výpočetní techniky a elektroniky se tento postup stal nejrozšířenějším a to zejména v profesionálním motosportu. Základem je využití dat získaných v reálných podmínkách na trati nebo během simulací k nalezení neoptimalnějšího nastavení. Ačkoliv tato metodika poskytuje maximum informací o chování vozidla může se díky tomuto faktu paradoxně stát silně kontraproduktivní. Důležitou roli v efektivitě metody tedy hraje kvalitní proces analýzy a zpracování dat.



Obr. 1 Optimalizační přístupy v praxi

S ohledem na skutečnost, že se v reálné praxi až na výjimky ve své čisté podobě výše uvedené postupy téměř nevyskytují a většinou vzájemně prolínají (obr.1), bude za problematiku optimalizace závodního vozu / motocyklu v následujících řádcích považována kombinace všech výše uvedených postupů.

### 2.3 Předpokládané cíle disertační práce

2.3

Z výše naznačených faktů je možno dovodit, že výrazné zvýšení efektivity v procesu hledání správného nastavení vozu / motocyklu pro konkrétní podmínky závodní tratě lze v případě kdy pomíneme nesporný význam numerických simulací najít pouze v oblasti vylepšování analytických metod. Jejich výstupy by měli přinést mnohem komplexnější soubor informací na jejichž základě může i méně zkušený závodní inženýr provádět správné rozhodnutí. Tato úroveň dolování informací („Data mining“) však vyžaduje přístup, který zohlední vliv všech rozhodujících parametrů a závislostí tak, aby nedocházelo ke ztrátě klíčových informací či jejich nesprávné interpretaci. S ohledem na tuto skutečnost tak byly předběžné cíle disertační práce vybrány podle nejdůležitějších požadavků :

- Nalezení obecné metody vhodné pro zpracování a analýzu velkého množství dat charakterizovaných významnou mírou jejich vzájemné korelace
- Aplikace metody na specifika diagnostiky chování technického systému (závodního vozu / motocyklu)
- Stanovení rozhodujících charakteristik pro hodnocení výkonnosti, resp. dynamiky závodního vozu / motocyklu zahrnujících souběžné vlivy víceparametrických vstupů (seřizovací prvky)

### 3 SHRnutí SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

S obecných požadavků kladených na analýzu chování závodního vozu vyplývá, že její výstupy nemohou být pouhým konstatováním momentálního stavu, ale musí přinášet také konstruktivní prvek ve smyslu konkrétních informací definujících další směr pro úpravy vedoucích ke zvýšení výkonnosti. Každý postup či metodika analýz má jiný stupeň vypovídací schopnosti a její kvalitativní úroveň tak do značné míry závisí právě na této vlastnosti. Rešeršní činnosti bylo proto zaměřena na tyto následující hlavní oblasti:

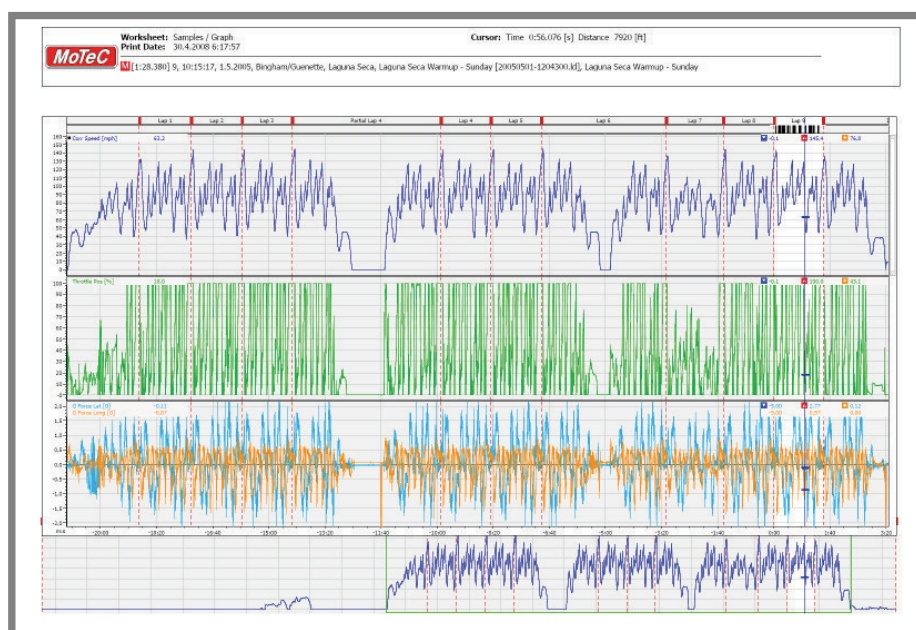
1. Standardní datové analýzy
2. Metody řízeného experimentu
3. Využití prvků umělé inteligence
4. Multivariační analýzy dat

#### 3.1 Standardní datové analýzy

Nejběžnější a nejrozšířenější metodou analýzy výkonnosti závodního vozu je zobrazení a vyhodnocení průběhu sledovaných parametrů v daném časovém úseku. K tomuto účelu je nutno vozidlo vybavit nejen potřebnými snímači, ale také dataloggerem s odpovídající kapacitou pro záznam dat. K vlastní analýze dat je pak většinou využíván software, který vizualizuje sledované parametry v požadovaném grafickém módu (obr.2). Analýzu lze rozdělit do dvou skupin.

- Funkční analýza - kontrola časového průběhu a kritických hodnot provozních parametrů (teploty a tlaky provozních náplní, úrovně elektrických veličin apod.) Tento způsob je zaměřen především na kontrolu funkčnosti jednotlivých soustav vozidla a proto až na výjimky nebude součástí dalších úvah zaměřených na optimalizaci výkonnosti vozidla.
- Výkonová analýza – vyhodnocení jednotlivých parametrů, které definují aktuální výkonnost vozidla – tj. úrovně zrychlení v jednotlivých osách, pohyb a polohu sledovaných prvků (natočení volantu, zdvihy kol, poloha plynového pedálu apod.) resp. další hodnoty jako otáčky motoru, teploty pneumatik atd. Tyto údaje jsou svázány časovou osou a umožňují tak sledování jejich jednotlivých závislostí.

Ačkoliv jsou uvedené způsoby analýz nejméně náročné z hlediska zpracování a vizualizace dat, vyžadují značnou zkušenost při vyhodnocení skutečné výkonnosti vozu. Důvodem je velké množství výstupních informací u nichž nemusí být jasně definované souvislosti. Tento fakt způsobuje že nejen velké množství amatérských týmů, ale i zkušení profesionálové často jednotlivé informace mylně interpretují, což vede k nesprávnému postupu při dalším vývoji vozu. S ohledem na tento aspekt bývají součástí kvalitních komerčních softwarových systémů další matematické a statistické funkce které usnadňují přesnější vyhledání závislostí mezi jednotlivými parametry. Většina standardních technik a postupů takovéto analýzy dat je popsáno v odborné literatuře [1],[2], [3],[4] a jejich využití lze najít také jako podpůrný prvek sofistikovanějších metodik.



Obr. 2 Příklad grafického uspořádání pro vizualizaci a vyhodnocení dat u analytického softwaru MoTeC (rychlost vozidla – nahoře, poloha akceleračního pedálu – uprostřed, příčné a podélné zrychlení – dole)

Přestože analýza dat popsána výše je v současné době nejrozšířenější formou stanovení výkonnosti vozu (resp. jezdce), její přínos pro systematický vývoj vozu s požadavkem na minimalizaci chybných rozhodnutí a zkrácení času celého procesu je nedostatečný. Tuto skutečnost lze shrnout v následujících bodech:

- Limitujícím faktorem pro vizualizaci závislostí mezi jednotlivými snímanými veličinami je omezení na maximálně třírozměrný prostor (3D grafy) v jednom analytickém kroku, tj.  $z = f(x, y)$ , což prodlužuje celkový čas analýzy.
- Zobrazené data charakterizují pouze celkový momentální stav resp. rozdíly v celkové charakteristice vozidla pro různá nastavení s absencí informace o jednoznačných souvislostech (příčina – následek) pro větší počet nastavovacích prvků.
- Vzájemná provázanost všech prvků na voze neumožňuje v datech jako celku jednoduše definovat příčinu malé výkonnosti nebo naopak identifikovat prvky výrazně se podílející na zvýšení výkonnosti. Tento fakt může velmi snadno vést k nesprávnému nasměrování dalších kroků optimalizace výkonnosti vozidla.
- Pro správnou selekci a interpretaci rozhodujících informací z dat je nezbytné disponovat odpovídajícími zkušenostmi, či způsoby hodnocení.
- Časová náročnost při základním zpracování odpovídajících výstupů z dat.

Z uvedených důvodů je vhodné tuto metodiku kombinovat s dalšími postupy tak, aby bylo dosaženo maximální efektivity při vývoji / konstrukci závodního vozidla, resp. při posouzení aktuální výkonnosti. Hlavní důraz je tedy při vytváření těchto složených postupů kladen na urychlení vyhodnocování dat a nalezení významných kritérií pro hodnocení dynamiky vozu.

VADURI S., „Development of Computer Tools for Analysis of Track Test Data and for Predictio of Dynamic Handling Response for Winston Cup Cars“, Ph.D. Dissertation, Dept. Of Mechanical Engineering, Clemson University, Clemson, 1999

VADURI S., LAW E.H., „Development of an Expert System for the Analysis of Track Test Data“ , SAE Transactions, 2000, vol. 109, n°6, pp. 2086-2099 , ISSN 0096-736X

MARTIN B.T, LAW E.H., „Development of an Expert System for Race Car Driver & Chassis Diagnostic“, SAE 2002 Automotive Dynamics & Stability Conference and Exhibition , Paper Number: 2002-01-1574, DOI: 10.4271/2002-01-1574

Společným tématem uvedených prací je návrh jednoduchého expertního systému implementovaného do prostředí MATLAB, který dokáže identifikovat některé hlavní charakteristiky popisující ovladatelnost závodního vozu. Expertní systém je založen na rychlém vyhodnocení dat získaných během testovací jízdy na závodním okruhu tak ,aby dokázal jednoznačně definovat situace ve kterých je chování vozidla nestabilní (přetáčivost či nedotáčivost). Pro vyhodnocení těchto charakteristik je jako součást algoritmu také aplikace fuzzy logiky.

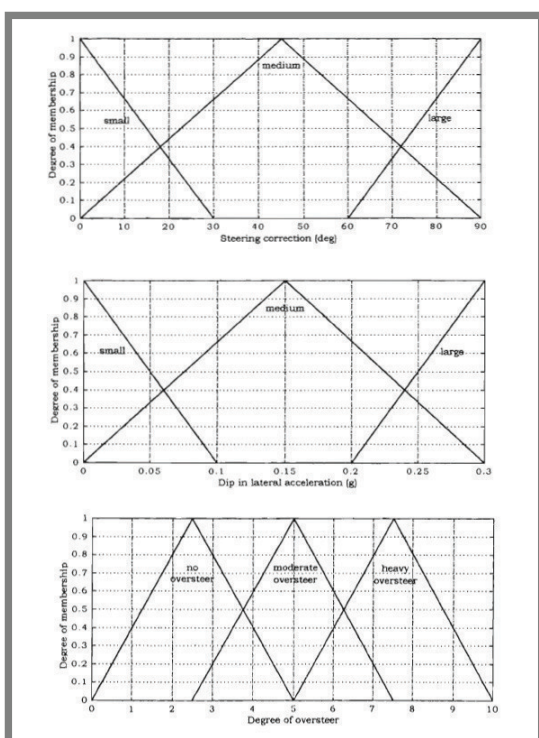
## Výsledky

Výchozím materiálem jsou poznatky zveřejněné Feyem [3], který se ve své odborné publikaci zabývá základními vztahy mezi jízdou dynamikou vozidla a odpovídajícími charakteristickými časovými průběhy signálů zaznamenaných dataloggerem z vybraných snímačů. Uvedené práce [5],[6] tuto problematiku pak částečně dále rozšiřují a pro potřeby expertního systému volí jako reprezentativní parametry následující hodnoty:

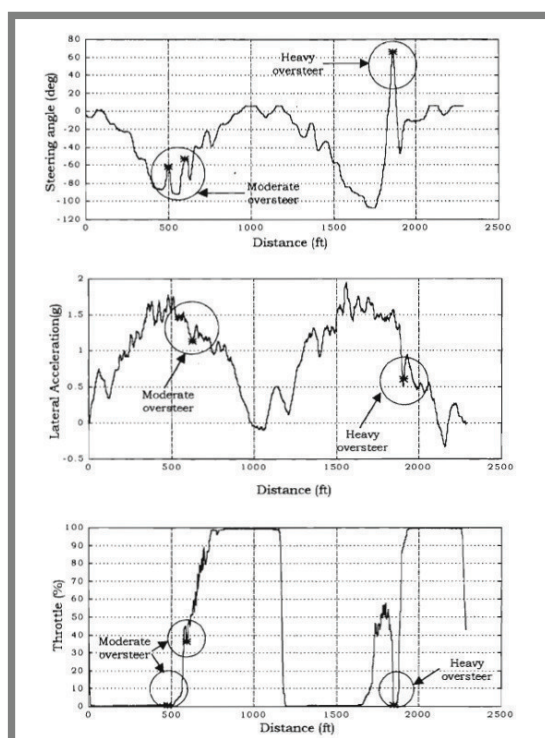
- příčné zrychlení vozidla
- úhel natočení volantu
- poloha akceleračního pedálu

Tyto hodnoty jsou zaznamenávány pro oblast nájezdu , střední části a výjezdu ze zatáčky za účelem hodnocení přetáčivosti (větší směrová úchylka zadní nápravy  $\alpha_R$ ) nebo nedotáčivosti (větší směrová úchylka přední nápravy  $\alpha_F$  ) vozidla Uvedené signály pak prochází sérií konvenčních logických rozhodovacích kroků, které napomáhají identifikovat specifické vzory, odpovídající jednotlivým situacím souvisejícími s ovladatelností vozidla. Součástí tohoto procesu, který je implementován v prostředí MATLAB je i využití fuzzy logiky [8]. Pro hodnocení stability vozidla při jízdě v zatáčce je považován limitní stav nazývaný autory jako

finální přetáčivost či nedotáčivost, kdy dochází k překročení nejvyšší dosažitelné příčné síly kterou jsou pneumatiky odpovídající nápravy schopny přenášet. Pro hodnocení přetáčivosti jsou dále na příkladu reálných dat (obr.4) demonstrovány charakteristické indikátory naznačující překročení hranice mezi ustáleným stavem zatáčení a nestabilitou vozidla. Jedná zejména o rychlou korekci řízení (cca 3.5Hz) a ubrání plynu, kdy v důsledku ztráty přilnavosti pneumatiky nemůže jezdec naplno akcelarovat. Překročení limitní hranice pro přenos boční síly se rovněž projeví v rychlé změně příčného zrychlení. Pro účely hodnocení jsou signály dvoustupňově vyfiltrovány. V prvním kroku (low-pass filtr 3.5 Hz) je takto vytvořen základní signál charakterizující reakci jezdce na ztrátu stability vozidla, v kroku druhém (low-pass filtr 0.5 Hz) je pro úhel natočení volantu a příčné zrychlení vytvořen signál odpovídající chování stabilního vozidla. Rozdíl mezi těmito dvěma hodnotami spolu s časovým úsekem ve kterém byl vyhodnocen slouží pro vytvoření členských funkcí (obr.3) jako vstupních hodnot pro fuzzy logiku reprezentovanou Fuzzy Inference Systémem (FIS). Výstupní hodnotou je pak stupeň míry přetáčivosti. V případě hodnocení míry nestability vozidla na výjezdu ze zatáčky je nutno v závěru celé procedury posoudit tuto skutečnost vyhodnocením informace o poloze (resp. změně polohy) plynového pedálu v daném časovém úseku. Pokud je zde výrazný rozdíl mezi reálnou a ideální hodnotou, nestabilita vozidla je potvrzena a takto označena na časové ose grafu nebo mapě trati.

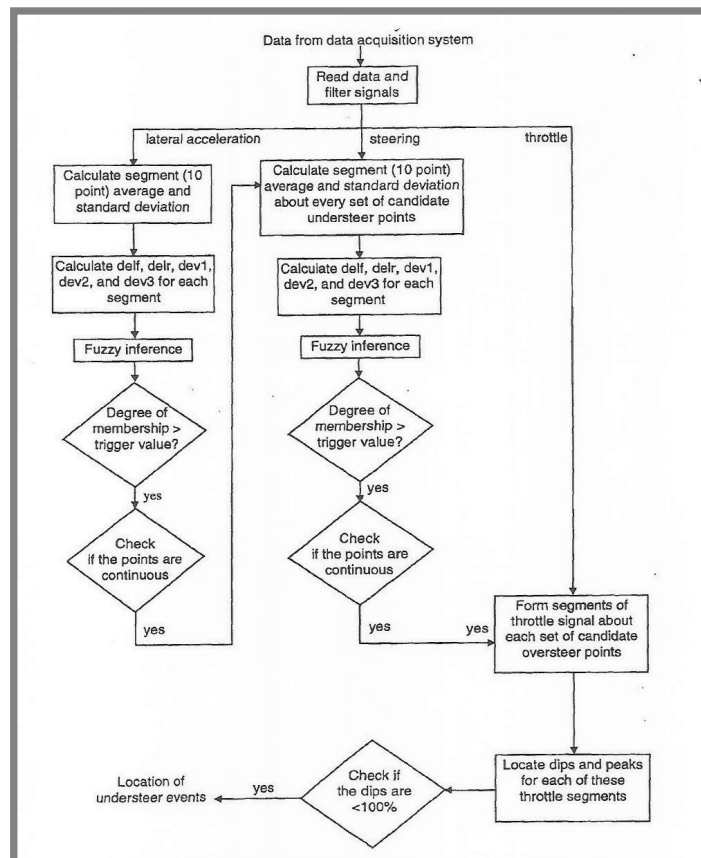


**Obr. 3** Příklad vstupní (korekce řízení, pokles příčného zrychlení) a výstupní (míra přetáčivosti) členské funkce – MF [5]



**Obr. 4** Indikátory přetáčivého chování vozidla v datech získaných na závodní trati [6]

Pro hodnocení nedotáčivosti je použit podobný proces resp. struktura algoritmu (obr.5) jako v případě hodnocení přetáčivosti vozidla. I zde je pozornost zaměřena především na sledování fáze výjezdu vozidla ze zatáčky. Klíčové je hodnocení průběhu příčného zrychlení, kdy nedotáčivé chování vozidla reprezentují oblasti s relativně plochým tvarem křivky signalizujícím nutnost udržování konstantního úhlu natočení volantu. Tato situace je konfrontována s ideálním průběhem vyváženého vozidla, kdy pokles příčného zrychlení probíhá plynule směrem k nulové hodnotě v souladu s tím jak jezdec postupně akceleruje a srovnává řízení do přímého směru. K nalezení těchto kritických oblastí je signál příčného zrychlení který prošel low-pass filtrem (3.5Hz) rozdělen na malé segmenty (10 vzorků pro vzorkovací frekvenci 50Hz) pro něž je vypočtena průměrná hodnota a směrodatná odchylka. Stanovení rozdílu průměrných hodnot tří sousedních segmentů ( $n^{th-1}$ ,  $n^{th}$ ,  $n^{th+1}$ ) a hodnoty jejich směrodatných odchylek pak slouží jako vstup do Fuzzy Inference systému (FIS).



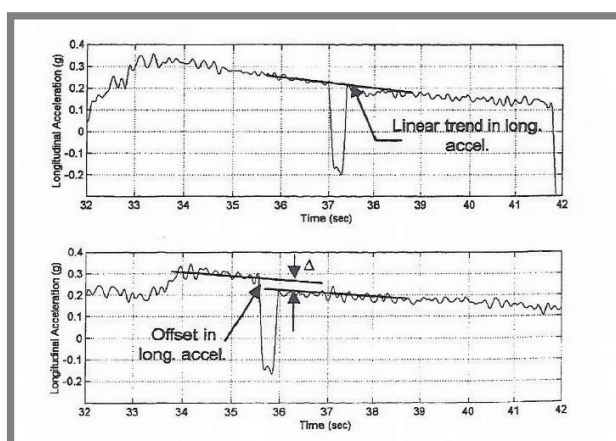
Obr. 5 Vývojový diagram logiky pro identifikaci případu nedotáčivého chování vozidla [6]

Pokud jsou tyto rozdíly resp. směrodatné odchylky malé, je zde předpoklad nedotáčivosti vozidla. Pro potvrzení této domněnky je nutno ve vytipované oblasti posoudit také signál úhlu natočení volantu podobným způsobem jako tomu bylo v případě příčného zrychlení. Jsou-li u obou signálů zjištěny předpoklady pro

nedotáčivost, je nutno výsledek v této oblasti opět potvrdit vyhodnocením průběhu polohy plynového pedálu.

Výše uvedený postup zaměřený především na klíčové parametry charakterizující výkonnost resp. stabilitu vozidla pak Martin a Law ve své další práci [7] rozšiřují o některé aspekty analýzy výkonnosti jezdce. Ta je rovněž velmi důležitá z pohledu celkového hodnocení, neboť jezdec tvoří s vozem v tomto případě nedílný výkonnostní celek. Pro toto hodnocení autoři zvolili následující kritéria

- rychlost změny převodového stupně
- volba optimálních otáček motoru pro přeřazení (obr.6)
- rychlost při aplikaci tlaku v brzdové soustavě při zpomalení před zatáčkou
- identifikace zda jezdec dosáhl maximální brzdné síly pro dané vozidlo a povrch
- rychlost při aplikaci plného výkonu motoru (sešlápnutí akceleračního pedálu) po výjezdu ze zatáčky
- identifikace zda jezdec akceleroval na maximum daném přilnavostí pneumatik



**Obr. 6** Profil podélného zrychlení pro optimální (nahore) a nesprávnou volbu řadicích otáček [7]

V návrhu algoritmu hodnocení se opět vychází z poznatků i empirických hodnot publikovaných Feyem [3], Mitchellem [9] a jako vstupní dle typu analýzy jsou brány v úvahu některé z odpovídajících parametrů:

- podélné zrychlení
- příčné zrychlení
- rychlost vozidla
- poloha akceleračního pedálu
- charakteristika vozidla (typ převodovky, výkon motoru, typ podvozku a pneumatik, umístění motoru)

Proces evaluace využívá stejně jako v předchozím případě [6] kombinaci konvenční i fuzzy logiky a jeho výstupem je informace o nedostatečné výkonnosti jezdce (resp. nesplnění limitních kritérií), která je pro jednotlivé události opět označena na časové ose grafu. Tímto způsobem je možno relativně rychle identifikovat jednotlivé místa na závodní trati, kde se jezdec dopustil chyb jejichž důsledkem je časová ztráta jež se promítá do celkového hodnocení výkonnosti.

### Hodnocení článků

- Autoři navrhli expertní systém sloužící k počítačovému zpracování a vyhodnocení dat ze závodního vozu získaných prostřednictvím dataloggingu., Ten se jeví jako velmi precizní při vyhledávání hlavních kvalitativních kritérií (přetáčivost a nedotáčivost) hodnotících výkonnost vozu při průjezdu zatáčkou.
- Rozšíření tohoto expertního systému o některé kritéria pro posouzení výkonnost jezdce pak přináší více možností pro komplexní hodnocení podílu dvou hlavních faktorů (vozidlo a jezdec) na celkovou výkonnost vyjádřenou např. časem potřebným pro absolvování jednoho okruhu.
- Expertní systém byl úspěšně odzkoušen na reálných datech pocházejících ze závodního vozu americké série NASCAR a ASA Stock Car.
- Aplikace konvenční i fuzzy logiky dovoluje vytvoření a posouzení sledovaného faktoru, např. stability vozidla při průjezdu zatáčkou, jako obecnou funkci víceparametrického vstupu (např. příčné zrychlení, úhel natočení volantu, poloha akceleračního pedálu).
- Navržený expertní systém se nezabývá řešením závislosti mezi úrovní stability vozidla při průjezdu zatáčkou a změnami v jeho nastavení.

REPLOGLE D.L., „A Model Driven Approach to Racecar Data Acquisition“, SAE 1994 Motorsports Engineering Conference & Exposition, Paper Number: 942483, DOI: 10.4271/942483

Tématem článku je návrh jednoduchého rozhodovacího modelu pro zpracování dat z dataloggeru, který umožní porozumět jízdě dynamice závodního vozidla. Jsou zde rozebrány základní požadavky na analytický model tak , aby dokázal vyhodnocovat míru stability vozidla při zatáčení v reálných podmínkách závodního okruhu.

### Výsledky

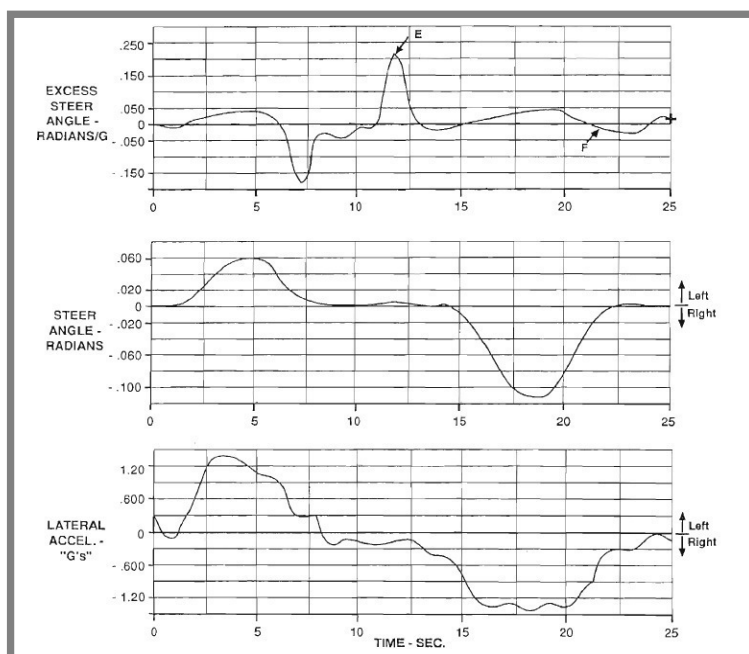
V úvodu autor formuluje obecné požadavky na vlastnosti systému pro datalogging s ohledem na kvalitu dat, resp. jejich vypovídací schopnost při analýze dynamiky vozidla. Vlastní měření na jehož datech jsou demonstrovány některé návrhy pro hodnocení stability vozidla pak probíhalo na závodní trati Mid Ohio Sports Car Course s vozem Ralt RT-5. Pro ilustraci byly zvoleny dvě zatáčky na uvedeném okruhu (nejrychlejší a nejpomalejší).

Pro vlastní vývoj systému byl navržen vhodný způsob záznamu a zpracování jednotlivých signálů ze senzorů :

- filtrování základního signálu pomocí 8-Pole low-pass Besselova filtru (5Hz)
- vzorkovací frekvence 20Hz pro převzorkování signálu
- vyhlazení signálu pomocí Blackman Window (cut-off frekvence 1Hz)

Tímto způsobem byly zpracovány data pro rychlost , úhlu natočení volantu a příčného zrychlení. V této souvislosti je také zdůrazněna výhoda nízkých nároků s ohledem na počet instalovaných senzorů (úhel natočení volantu, akcelerační senzor), která pokrývá požadavky na úsporné řešení vyžadované amatérskými jezdci.

V další části článku jsou diskutovány postupy pro hodnocení stability vozidla v zatáčce (přetáčivost / nedotáčivost) vycházející z výše uvedených parametrů. Jako první možný přístup je zde navrhován indikátor nazvaný „steering per g“, který vyjadřuje podíl úhlu natočení a příčného zrychlení. Nedostatkem tohoto indikátoru je problém jeho správné interpretace v rychlých a pomalých zatáčkách daný rozdílnými poměry rychlosti vozidla a natočení volantu. K tomuto problému se dále přidává nedostatek v podobě „falešného signálu“ daný přechodem hodnoty příčného zrychlení přes nulovou hodnotu při průjezdu zatáček tvaru „S“ nebo drobné korekci v přímém směru. Jako řešení je navržena funkce „excess steering angle“ jejíž principem je rozdíl mezi skutečnou hodnotou natočení volantu a hodnotou která odpovídá poloměru zatáčky za předpokladu nulového skluzu řízené nápravy.



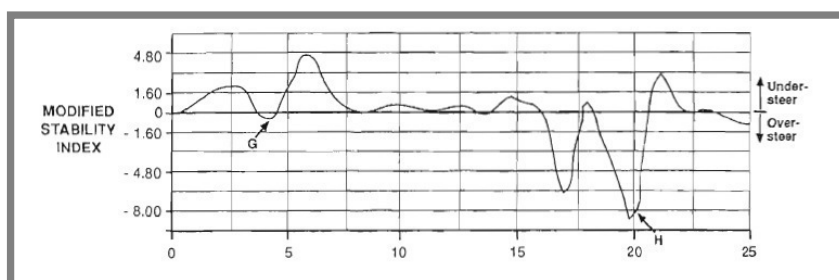
**Obr. 7** Zobrazení indikátoru „excess steer angle“ pro dvě navazující zatáčky. Vyznačeny jsou moment ukazující na přetáčivost vozidla při výjezdu ze zatáčky (F) a přílišná sensitivita na drobnou korekci řízení (E) v přímém směru [10]

V kombinaci s předchozím indikátorem pak byla vytvořena funkce nazvaná „excess steering angle per g“ (obr.7), která dokáže přesněji identifikovat přetáčivé či nedotáčivé chování vozidla. Její nedostatek, tj. extrémní sensitivita na drobné korekce řízení v přímé jízdě však odstraněna není.

Jako alternativní přístup v závěru autor navrhuje algoritmus porovnávající derivace směrových úchylek přední a zadní nápravy ve vztahu k příčnému zrychlení vozidla. pojmenovaný jako „stability index“.

$$\frac{d(\alpha_F)}{d(g)} - \frac{d(\alpha_R)}{d(g)} \quad (1)$$

Tento postup v porovnání s předchozími návrhy reflektuje mnohem lépe obecnou definici stability vozidla, nicméně v reálném prostředí (resp. na reálných datech) vykazuje opět nadměrnou citlivost na drobné oscilace příčného zrychlení. Aplikací několika dalších logických pravidel je pak funkce dále upravena (obr.8) tak, aby její vypočítací schopnost lépe splňovala požadavek s ohledem na korektní identifikaci přetáčivého a nedotáčivého stavu vozidla. Pro úplné odstranění nedostatků plynoucích např. s nerovnovážného chování vozidla je však nutno aplikovat další doplňkové logické pravidla.



**Obr. 8** Modifikovaný „stability index“ dokáže identifikovat drobný pokles v rovnováze vozidla (G) v zatáčce 1 a přetáčivé chování (H) na výjezdu ze zatáčky 2 [10]

### Hodnocení článku

- Ve své práci autor navrhuje jednoduchý postup pro hodnocení stability vozidla při průjezdu zatáčkou za využití kombinace dvou základních signálů – úhlu natočení volantu a příčného zrychlení, resp. signálů příčného zrychlení přední a zadní nápravy. Funkce indikátorů je demonstrována na reálných datech ze závodního vozu.
- Správná interpretace jednotlivých hodnotících kritérií vyžaduje jisté zkušenosti s analýzou jízdní dynamiky závodního vozidla. Využití je tedy omezeno tímto faktorem. Autor si je této skutečnosti vědom a jako budoucí

řešení navrhuje vytvoření dalších logických algoritmů umožňujících lepší a srozumitelnější výstupy..

- Navržené analytické postupy dokáží vyjádřit pouze aktuální úroveň výkonnosti vozidla. Identifikace závislosti změn v nastavení vs. dynamika vozidla tedy vyžaduje další zpracování těchto výsledků .
- Uvedená metodika nedokáže eliminovat vliv výkonnosti jezdce, resp. jezdeckého stylu, což může bez hlubší znalosti dalších souvislostí negativně ovlivnit závěry týkající se skutečné výkonnosti vozidla.

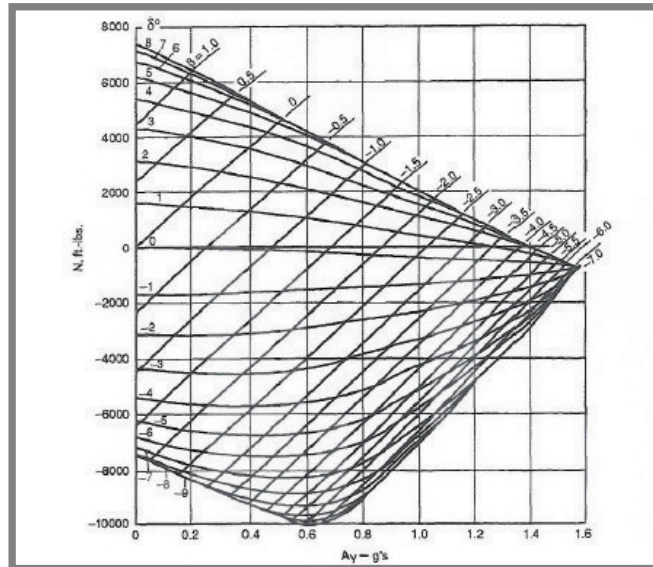
MILLIKEN W.F., WRIGHT P., MILLIKEN D.L., „Moment Method – A Comprehensive Tool for Race Car Development “, SAE 1994 Motorsports Engineering Conference & Exposition, Paper Number: 942538, DOI: 10.4271/942538

Využití originální metodiky „MRA Moment Method“ (MMM) pro analýzu stability a ovladatelnosti závodního vozu je zajímavou alternativou pro postupy standardně využívané v této oblasti. Tématem článku je základní popis této metodiky založené na hodnocení nelineárního model vozidla s využitím informací o pneumatikách, podvozku i aerodynamice a její demonstrace na reálném příkladu analýzy dat získaných během testovací jízdy s vozem Formule 1.

## Výsledky

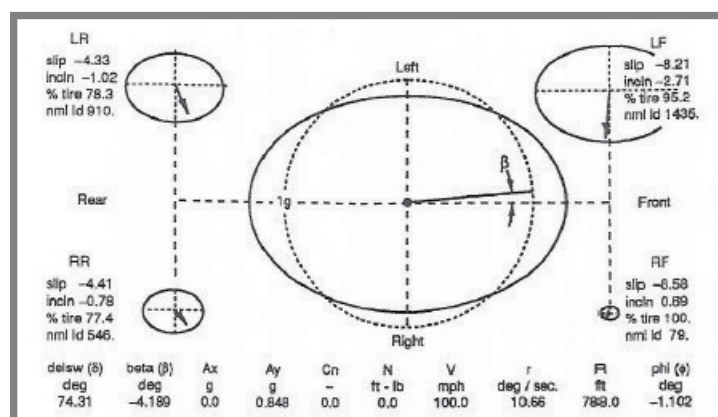
„MRA Moment Method“ je technika pro analýzu a grafické zobrazení stability a ovladatelnosti vozidla. Princip je analogický postupu využívaný v leteckém průmyslu pro ověřování stability letounu (resp. jeho modelu) v aerodynamickém tunelu. Vozidlo je pro potřeby této metody reprezentováno modelem se 14 stupni volnosti (6 šasí, 4 vertikální pro neodpružené hmoty, 4 rotace kol) a při inicializačním testu který lze považovat za statický (tj. vozidlo není v pohybu) se pak na speciální testovací stoličce v různých režimech zjišťuje velikost působících sil a momentů. Výhodou tohoto postupu je absence vlivů způsobených setrvačností, která jsou charakteristické pro dynamické provádění testů. Detailnější popis MMM je možné nalézt v referenční literatuře [12].

Výstupem výše uvedeného testu je tzv. silově-momentový diagram (obr.9), který je podkladem pro pozdější analýzy prováděné z daty získaných během jízdní zkoušky vozidla. Diagram vyjadřuje závislost stáčivého momentu (N) kolem svislé osy procházející těžištěm vozidla (CG) vs. příčná akcelerace ( $a_y$ ) pro konstantní rychlost vozidla bez vlivu brzdění či akcelerace. Součástí grafu jsou také hodnoty pro různé velikosti směrové úchylnosti vozidla ( $\beta$ ) resp. jeho těžiště spolu s různou velikostí úhlu natočení volantů ( $\delta$ ). Horní hranice diagramu reprezentuje saturaci předních pneumatik tj. maximální možnou příčnou sílu jež mohou přenášet, dolní hranice je stejný limit pro pneumatiky zadní. Sklon čáry vyjadřující úhel natočení volantů ( $\delta$ ) pak charakterizuje směrovou stabilitu vozidla. Průsečík křivky tvořící horní nebo spodní hranici s horizontální osou ( $N=0$ ), vyjadřuje maximální hodnotu příčného zrychlení při které je vozidlo stále vyvážené. Při vyšších hodnotách je jeho



**Obr. 9** Základní silově-momentový diagram vyjadřující závislost příčného zrychlení vozidla ( $A_y$ ), stáčivého momentu ( $N$ ) pro různé hodnoty směrové úchylny vozidla ( $\beta$ ) a úhlu natočení volantu ( $\delta$ ) pro normální zatížení a rychlost vozidla 225 kph [11]

stabilita (míra přetáčivosti či nedotáčivosti) dána tím, zda stáčivý moment generuje zadní či přední náprava. Konečná limitní hodnota příčného zrychlení je pak definována průsečíkem spodní a horní hraniční křivky. Pro další detailnější hodnocení využití potenciálu pneumatik při zatáčení vytvořil Milliken počítačový program, který dokáže ze vstupních dat vygenerovat nejen základní diagram ale také graficko-numerické vyjádření vycházející z adhezní (Kammovy) kružnice pneumatiky (obr.10).

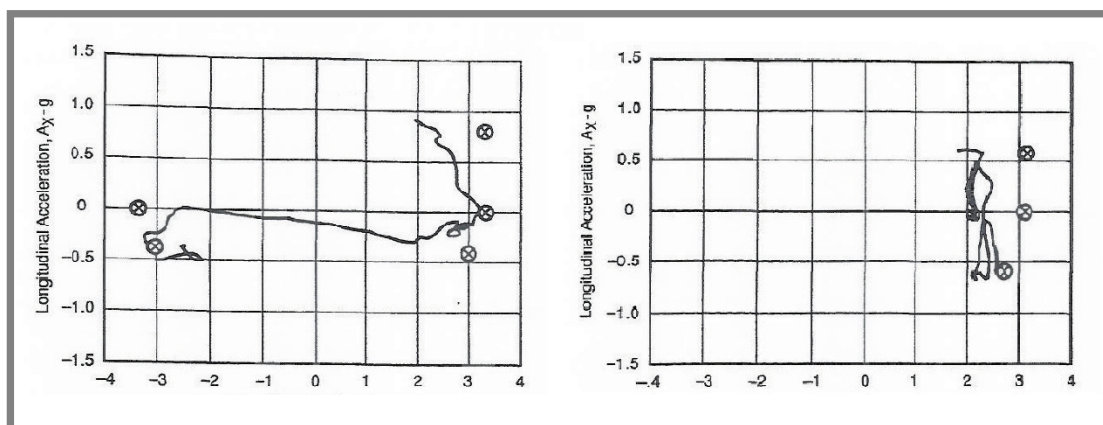


**Obr. 10** Grafické znázornění využití potenciálu jednotlivých pneumatik při zatáčení v rychlosti 160 kph [11]

Vlastní demonstrace MMM jako nástroje pro vývoj a analýzu dynamiky vozu Formule 1 (Team Lotus) vyžadovala přípravu vstupních dat ve třech hlavních oblastech.

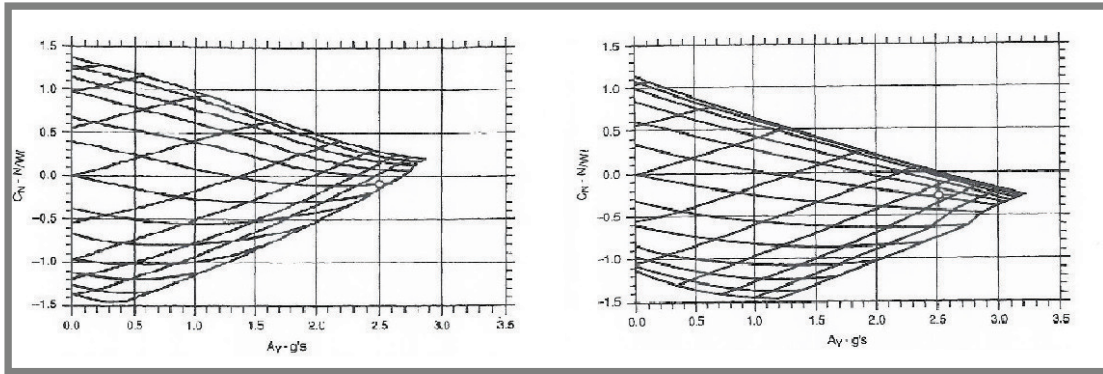
- charakteristiku silových vstupů (pneumatiky, aerodynamické prvky)
- kinemo-elastické charakteristiky zavěšení
- hodnoty setrvačnosti a hmotnosti vozidla

V této souvislosti je nutno poznamenat, že korektní vstupy ohledně pneumatik a působení aerodynamických prvků je velmi obtížné objektivně změřit a proto byly pro účely experimentu použity data výrobce (pneumatiky) a modifikované hodnoty aerodynamických koeficientů na základě dat ze zkušebních jízd. Během testu byly 18 kanálovým dataloggerem se vzorkovací frekvencí 50Hz zaznamenávány údaje týkající se ovládacích prvků jezdce, svislých zatížení i pohybu zavěšení kol a stáčivé rychlosti spolu zrychleními v těžišti vozu. Výsledkem pak byl soubor dat z průjezdu zatáček v rychlostním spektru 130-355 kph, ze kterých byly vybrány ty části jež nejvíce odpovídaly ustálenému stavu zatáčení. Spolu s údaji o zatížení jednotlivých kol byly následně využity pro vygenerování souboru silově-momentových diagramů.



**Obr. 11** „Diagram g-g“ pro zobrazení skutečné hodnoty příčného zrychlení ( $A_y$ ) současně s podélným zrychlením ( $A_x$ ) při průjezdu šikanou rychlostí 220 kph (vlevo) a zatáčkou rychlostí 200 kph. Kroužek v grafu označuje limitní hranici stanovenou pomocí MMM [11]

Následná analýza dat ukázala horší schopnost jezdce přiblížit se limitu pneumatik v přenosu příční síly odhadovanému pomocí MMM zejména v rychlých zatáčkách a při brzdění do zatáčky (obr.11). Zároveň bylo další analýzou dat z vozu odhalen vliv nerovnosti v jedné ze zatáček projížděné rychlostí 320 kph na stabilitu vozu. Podle původního diagramu byla rychlost průjezdu (resp. příčné zrychlení) zatáčkou významně nižší než předpokládané nicméně důvodem byl shledán nedostatek v aerodynamice vozu, jejíž citlivost na podélné kolébaní vozu způsobila významné změny v zatížení kol. Modifikace silově-momentového diagramu pro dva různé limitní stavy (obr.12) následně prokázala, že jezdec se pohyboval na obvyklé úrovni své výkonnosti a odstranění tohoto problému je nutno vyřešit úpravou vozidla.



**Obr. 12** Silově momentový diagram pro průjezd zatáčkou s nerovností rychlostí 200 kph. Změna svislého zatížení kol způsobené nedostatkem aerodynamického prvku při poklesnutí přídě (vlevo) způsobuje větší ztrátu ovladatelnosti než je tomu v případě nazvednuté přídě (vpravo). Skutečné příčné zrychlení vozidla získané z dat je označeno v grafu kroužkem [11]

### Hodnocení článku

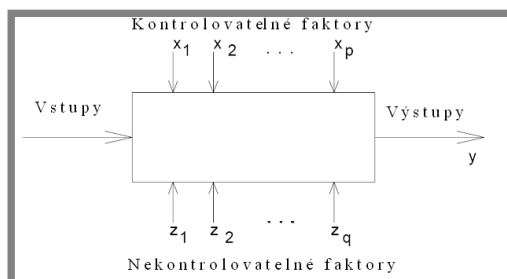
- „MRA Moment Metod“ (MMM) je kombinací dvou postupů, tj. vytvořením modelu vozidla (resp. silově-momentového diagramu), který je následně využíván pro analýzu okamžité výkonnosti vozidla na základě dat získaných během jízdy.
- Přestože metodu nelze považovat úplně za klasický postup pro analýzu dat, její účinnost pro hodnocení stability vozidla během testovací jízdy se ukázala jako poměrně vysoká. Závodní inženýr může takto porovnat teoretickou a skutečnou výkonnost vozu při průjezdu zatáčkou, což je důležitá informace potřebná pro další vývoj vozidla.
- MMM lze velmi dobře využít taktéž pro hodnocení výkonnosti jezdce, resp. jeho schopnosti přiblížit se při průjezdu zatáčkou limitu daném přilnavostí pneumatik.
- Nevýhodou uvedené metody je relativně vysoká komplikovanost při zajišťování vstupních dat (parametry pneu, kinematické charakteristiky apod) včetně nutnosti využití speciální testovací stolice pro vytvoření silově-momentového diagramu. V tomto ohledu se tento přístup přibližuje numerickým simulacím, kde je využití limitováno schopností uživatele tyto data získat a správně zpracovat. Tento problém se týká zejména vytvoření správného modelu pneumatik
- Dalším nedostatkem se jeví nutnost modifikovat silově-momentový diagram pro každou změnu podmínek (rychlost vozidla, hmotnost, ustálený stav vs. akcelerace či brzdění).
- MMM analyzuje dynamiku vozidla (resp. silové a momentové rovnováhy) pro dané podmínky komplexně. To má za následek skutečnost, že pomocí ní nelze jednoduše identifikovat parciální vlivy při současné změně více prvků v nastavení vozidla s ohledem na jeho výkonnost.

### 3.2 Metody řízeného experimentu

Jedním z nejvýznamnějších postupů pro hledání optimálního nastavení vozidla současně s požadavkem na analýzu vlivu jednotlivých změn na jeho celkovou výkonnost se v motosportu staly metody řízeného experimentu. Pomineme-li specifické postupy navrhované účelově pro některé typy testů (např. funkční zkoušky vozidla) a které nemusí mít jednotnou metodiku, velké roli v tomto směru hraje proces známý jako „Design of Experiment“ (DOE) [13]. Důvodem je zejména fakt, že se jedná o velmi propracovaný přístup relativně snadno aplikovatelný a to nejen v oblasti automobilového průmyslu. Výhody jeho využití v motosportu jsou dále detailněji shrnuty v rešerši textu publikovaného Hillem [14 - 16]. Pro úspěšnou aplikaci DOE k analýze citlivosti změn nastavení na celkovou výkonnost je však nutno provést pečlivou přípravu jejíž součástí je také definování dva základních druhů faktorů (obr.13).

Regulovatelný (kontrolovatelný) – jedná se o návrhovou proměnnou, o které si myslíme, že ovlivňuje odezvu a je přitom začleněna do experimentu. Hodnotu proměnné můžeme a zároveň chceme nastavit a udržovat. Patří zde například tuhost pružin, tlumičů, geometrie zavěšení, nastavení aerodynamických prvků apod.

Šumový (nekontrolovatelný) – jedná se faktor, který negativně ovlivňuje odezvu. Takový faktor nemůžeme nebo nechceme při vlastní aplikaci nastavit a udržovat na požadované hodnotě, ale můžeme toto provádět během vlastního experimentu. Mezi tyto faktory například patří koeficient tření mezi pneumatikou a vozovkou, vliv jezdců, odchylky od charakteristik regulovaných prvků apod.



Obr. 13 Obecný model procesu nebo systému [13]

Protože při reálných testech naráží závodní inženýr na časová (a finanční) omezení, bývá nutno proces DOE dále zjednodušovat a omezit především počet regulovatelných faktorů zahrnutých do experimentu. Tento krok má ovšem i svá negativa.

- Při malých zkušenostech s engineeringem závodního vozu může nesprávný výběr faktorů způsobit značný pokles účinnosti metody DOE (resp. vypovídací schopnost výstupních dat pro analýzu) při hledání optimálního nastavení.

- Snižování počtu regulovatelných faktorů přináší problémem s vlastní interpretací výstupů tak , aby nedocházelo k mylným závěrům a následně chybným rozhodnutím při nastavení vozidla.

Uvedené nedostatky nelze odstranit úplně, nicméně využitím vhodných postupů a dostupných komerčních softwarových produktů [17] je možno výrazně zvýšit pravděpodobnost správného postupu a závěrů z experimentu. Trvalou nevýhodou ovšem zůstává charakter statistické metody u které chybí jistá návaznost na detailní analýzu v časové ose a přímé srovnání vybraných parametrů jež může přinést další důležité poznatky. Slabinou pro aplikaci experimentálních metod také může být možná nestabilita výkonnosti vozu jako celku, kde čas od času působí nenáhodné a zároveň nežádoucí vlivy, tzv. vymezitelné příčiny proměnlivosti. Jejím typickým představitelem je například počasí nebo skrytá nefunkčnost některého ze systémů. Pro komplexní hodnocení je tedy nutno často kombinovat experimentální postupy s výše uvedenými metodami standardních analýz, což v konečném důsledku zvyšuje časovou i kapacitní náročnost procesu.

HILL J., „*Design of Experiment - Test of Time*“, Racecar Engineering, October 2001, vol. 11, no. 10, s. 31-35.

HILL J., „*Design of Experiment - Mind Games*“, Racecar Engineering, November 2001, vol. 11, no. 11, s. 74-80.

HILL J., „*Design of Experiment – Learning curve*“, Racecar Engineering, December 2001, vol. 11, no. 12, s. 65-70.

Tématem článků je analýza problematiky úspory času i finančních prostředků během testů závodního vozu v reálném prostředí a nástin výhod využití metody „Design of Experiment“ (DOE) v tomto procesu. Autor se zabývá otázkou jakým způsobem s využitím neúplného faktorového plánu co nejefektivněji test připravit, provádět a interpretovat získané závěry.

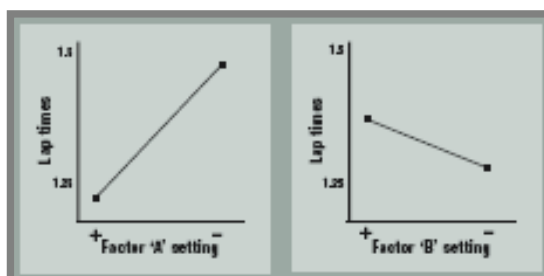
## Výsledky

Základní otázkou při hledání požadované výkonnosti vozidla zůstává, které nastavení (kombinace seřizovatelných prvků) dokáže směřovat k definovanému cíli. Cílem se v tomto případě rozumí dynamika chování vozidla vyžadovaná např. jezdcem nebo okolnostmi závodu (konzistentnost opotřebení pneumatik, kvalifikační kolo apod.). Důležitá je rovněž definice toho, které ze vstupů či nastavení mají malý nebo naopak velký vliv na aktuální výkonnost. V mnoha případech nutí závodní týmy časový tlak daný např. omezenou délkou tréninkových jízd k náhodným pokusům se změnou nastavení více prvků v jediném kroku (shotgun technique). Úspěšnost tohoto postupu však zůstává trvale velmi nízká. Obecně nejrozšířenějším testovacím postupem je pak tzv. metoda „O-FAT“ (One Factor at Time), kdy metodičnost tohoto typu experimentální optimalizace závodního vozu ověřily téměř všechny oblasti a úrovně motosportu. Princip známý z mnoha dalších i netechnických oborů spočívá

v posouzení hlavního kritéria (např. času v měřeném úseku) po změně pouze jednoho z nastavovacích parametru. Tím může být např. jiný typ pneumatik, tuhosti pružin na jedné nápravě, poloha těžiště apod. Následné vyhodnocení dat umožňuje porovnání provedené úpravy s předchozím stavem a posoudit zda změna směřuje proces vývoje vozidla žádoucím směrem. Hlavní výhodou procesu „O-FAT“ používaného mnohdy i plně profesionálními týmy spočívá v jednoduchost metodiky, nicméně jeho nedostatky jsou zjevné.

- Velká časová náročnost narůstající s počtem parametrů které je možno nastavit. Osm parametrů s pouhými dvěma úrovněmi znamená 256 testů aby byl zmapován jejich individuální vliv na výkonnost vozidla. V praxi těchto parametrů bývá násobně více.
- Pokud dojde ke změně více než jednoho parametru současně, je velmi obtížné odlišit, který z nich měl zásadní vliv na změnu výkonnosti vozu. Díky časovým a finančním omezením je tento postup bohužel často používán a dosažené závěry proto bývají většinou mylné. K nesprávným závěrům mnohdy přispěje paradoxně i značné množství dat z vozu (jsou-li k dispozici), které bez další potřebné podpůrné metodiky mohou proces vyhodnocení ještě více zkomplikovat.
- Změna v nastavení některého prvku může ovlivnit chování a tím i vlastnosti prvků dalších. Eliminace tohoto skrytého faktu vyžaduje velmi dobrou znalost konstrukce vozidla, aby bylo možno předejít nežádoucím změnám více parametrů.

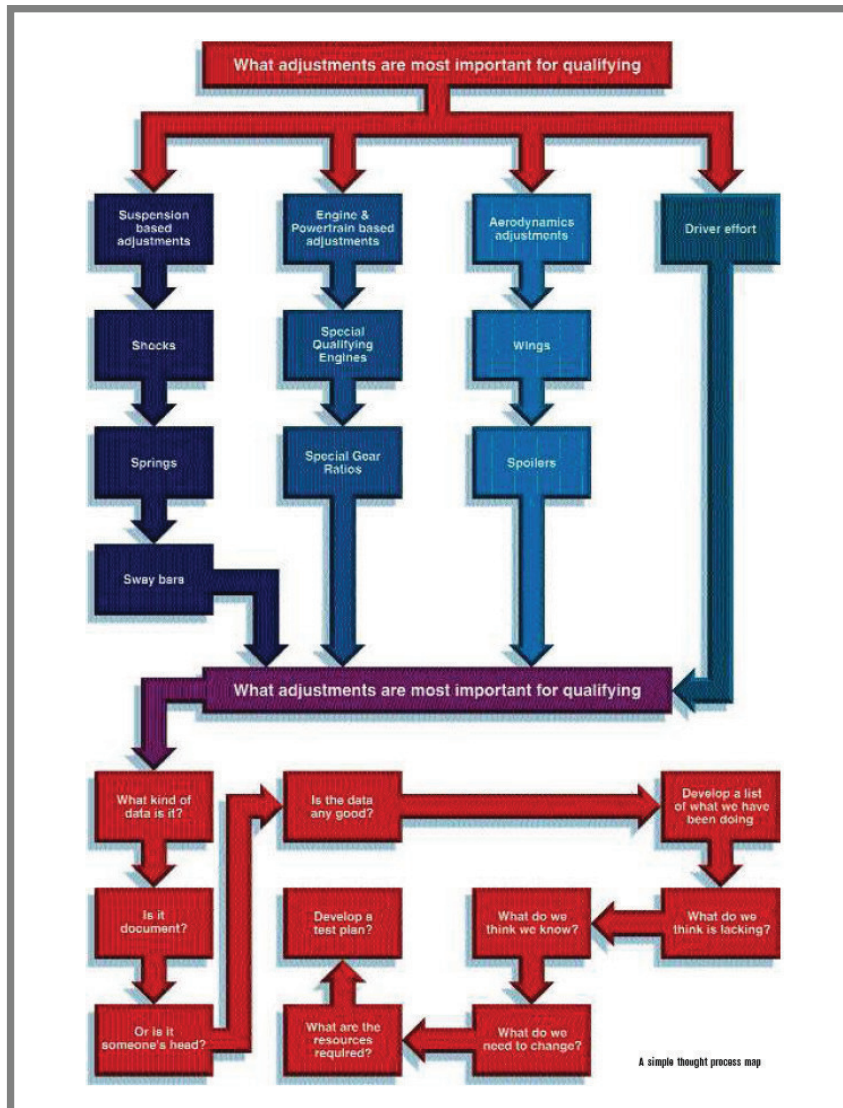
Protože motoristický sport je charakterizován především potřebou efektivně řešit velké množství technických změn v krátkém časovém úseku, je žádoucí metodiku „O-FAT“ nahradit výkonnějšími postupy DOE.



Obr. 14 Úroveň nastavení faktoru vs. čas měřeného kola [13]

Vytvoření správného experimentu vyžaduje především identifikaci parametrů které by mohli přinést významnější progres při zvýšení výkonnosti vozidla. Situace je komplikovaná faktem, že vliv těchto parametrů se může měnit podle typu trati nebo požadavků na vůz (kvalifikace vs. závod). K řešení tohoto problému je vhodné využití tzv. procesní mapy (obr.15), která usnadní práci nejen během celého testu (resp. tvorby DOE), ale také dokáže vést testovacího inženýra tak, aby při analýze výkonnosti vozu zaměřil svoji pozornost na nejdůležitější prvky vozu. Jejich správné sestavení však vyžaduje jisté zkušenosti s engineeringem závodního vozu, aby bylo

omezeno riziko nekorektních rozhodnutí během další aplikace. Základem procesní mapy je série vhodně formulovaných otázek jež umožní vygenerovat potenciální faktory experimentu jejichž význam je pro výkonnost vozidla v daných podmínkách rozhodující.



Obr. 15 Procesní mapa pro přípravu experimentu k nalezení optimálního nastavení vozidla pro kvalifikační jízdy [14]

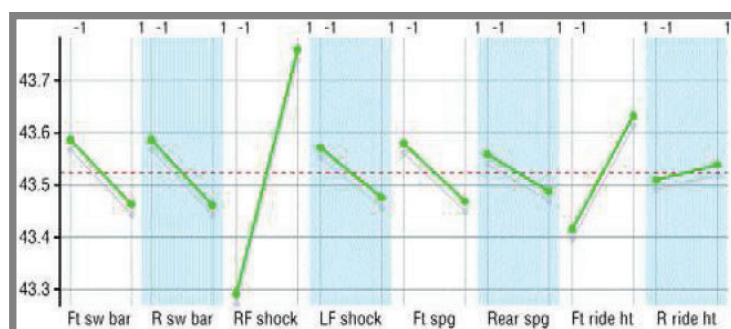
Tyto faktory by měly reprezentovat dvě rozdílné úrovně jejich nastavení (min./max.) tak, aby významně dokázaly ovlivnit výkonnost vozidla vyjádřenou časem v měřeném úseku. (obr.14). V následném kroku je sestaven testovací plán ve formě matice který využívá neúplný faktorový plán (Fractional Factorial Design – FFD). Princip uvedeného postupu známého také jako screening test spočívá v provedení série experimentálních měření na definované skupině parametrů (faktorů), s cílem stanovit jejich individuální vliv na celkový výsledek. Na příkladu (obr.16) je

demonstrován  $2^{8-4}$  neúplný faktorový plán který zahrnuje osm nastavovacích prvků závodního vozu s předpokladem , čtyřech neoddělitelných (aliases) efektů. Jako součást experimentu je v článku zmíněna i metodika přípravy dokumentů tak, aby celý proces testu byl dostatečně robustní a k dispozici byly pro pozdější analýzy také další informace (např. okolní podmínky atd.).

Test Number	Front sway bar	Rear Sway Bar	RF Shock	LF Shock	Front Spring	Rear Spring	Frt. Ride Height	Rear Ride Height
1	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	+	+	+	+	-
3	-	-	+	-	+	+	-	+
4	-	-	+	+	-	-	+	+
5	-	+	-	-	+	-	+	+
6	-	+	-	+	-	+	-	+
7	-	+	+	-	-	+	+	-
8	-	+	+	+	+	-	-	-
9	+	-	-	-	-	+	+	+
10	+	-	-	-	-	+	+	+
11	+	-	+	-	+	-	+	-
12	+	-	+	+	-	+	-	-
13	+	-	+	-	+	-	+	-
14	+	+	-	-	+	+	-	-
15	+	+	+	-	-	-	-	+
16	+	+	+	+	+	+	+	+

Obr. 16  $2^{8-4}$  neúplný faktorový plán pro osm nastavovacích parametrů podvozku ve dvou úrovních – maximum (+) a minimum (-) [15]

Vyhodnocení časů jednotlivých jízd podle experimentálního plánu ukázalo , že rozdíl mezi nejrychlejším a nejpomalejším časem na jedno kolo (42.972 sec vs. 44.024sec) činí přibližně 3%.Následná analýza individuálního vlivu jednotlivých faktorů (obr.17) pak detekovala významný vliv nastavení útlumu pravého předního kola (RF Shock) a světlé výšky vozu v přední části (Ft.ride ht).



Obr. 17 Grafické znázornění individuálního vlivu jednotlivých faktorů [15]

Pro dosažení co nejobektivnějších závěrů by celková analýza výsledků experimentu měla proběhnout na třech úrovních - praktický , graficky a analyticky. Každý z těchto přístupů má své opodstatnění a jejich kombinací by měly být eliminovány nedostatky způsobené nedokonalostí experimentálního plánu. Jelikož provedením screening testu bylo ztraceno jisté množství informací díky redukci z původních 20 parametrů důležitých pro kvalifikační trénink na konečných osm, doporučuje autor

jako další krok doplňující experimenty. Z osmi testovaných prvků pouze dva v přední části vozu vykazali významný vliv, takže jednou z možností je spolu s dalším jedním nebo dvěma významnými faktory provést plný faktoriálový test. Tímto se zpřesní míra vlivu všech těchto faktorů. Druhou možností je pak zaměřit pozornost plného faktoriálového testu na přední část vozu kde se oba prvky s nejvýznamnějším vlivem nacházejí. Při zahrnutí předních tlumičů a pružin na obou stranách, tj. čtyři faktory na dvou úrovních by tedy tento experiment vyžadoval úplný faktorový plán.

### Hodnocení článků

- Aplikace DOE s neúplným faktorovým plánem je mnohem komplexnější přístup k analýze výkonnosti závodního vozu (resp. vlivu jednotlivých seřizovacích prvků na tuto výkonnost) v porovnání s velmi rozšířeným přístupem „O-FAT“.
- Návrhu experimentu tj. správné identifikaci jeho faktorů může významně napomoci tzv. procesní mapa. Její sestavení však vyžaduje znalost postupů a zkušenost při optimalizaci nastavení závodního vozu.
- Správná volba faktorů je klíčová pro korektní závěry experimentu. Protože jejich výběr nepodléhá žádné metodice, je individuální a významně závislejší na předchozí zkušenosti, vzniká zde velké riziko pro výslednou analýzu výkonnosti vozu.
- Neúplný faktorový plán dokáže průběh testu značně urychlit. Cenou za tento benefit ale může být ovlivnění efektivity několika faktorů navzájem, které tímto experimentem nebude odhaleno.
- Stejně jako tvorba experimentu s neúplným faktorovým plánem i analýza jeho výsledků musí být provedena velmi kriticky tak, aby byla minimalizovaná ztráta informací plynoucí s redukcí faktorů.
- Výstupy z DOE dokáží poskytnout důležité informace o míře vlivu jednotlivých prvků na výkonnost vozidla. Tyto výstupy však nezahrnují detailní informace o příčinách tohoto vlivu a proto je v případě potřeby nutno provést standardní analýzu dat. Tímto se celý proces může výrazně prodloužit.

**BYAM B., COPPENS G., DISSETE M., JANSON K., McCLAIN J., RUEDIGER J., ZETTEL B.**, „*Formula SAE Design, Test, Tune, and Setup: A Design of Experiment Approach*“, SAE 2003 World Congress & Exhibition, Paper Number: 2003-01-1320, DOI: 10.4271/2003-01-1320

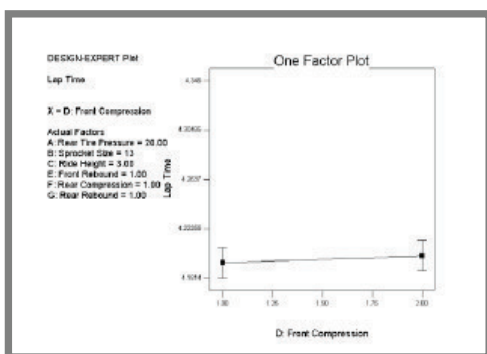
Tématem článku je praktická aplikace metodiky „Design of Experiment“ (DOE) pro nalezení optimálního nastavení vozu Formule SAE a definování citlivosti [20] tohoto nastavení na změny vybraných parametrů - příklon kola, sbíhavost, tlak pneumatik, nastavení tlumičů, záklon rejdového čepu, tuhost pružin i stabilizátoru, Ackermanův úhel a stály převod. Tento proces je zaměřen na to, aby vozidlo v každé ze soutěžních disciplín prokazovalo odpovídající výkonnost

## Výsledky

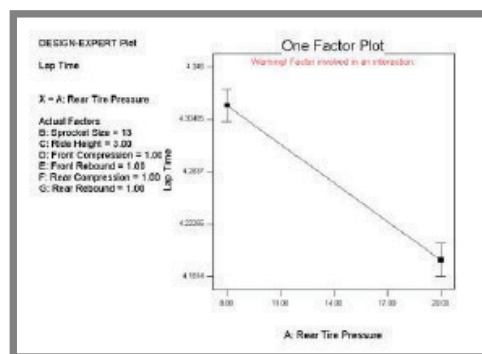
Soutěž FSAE probíhá ve čtyřech disciplínách resp. třech typech tratí. Akcelerační test v úseku 75m, ustálené zatáčení na trati ve tvaru osmičky, slalom a vytrvalostní závod na speciálním, kužely vytýčeném okruhu. Jezdci z jednoho týmu FSAE kteří se v této soutěži střídají se pak mohou rovněž výrazně lišit výškou, váhou a délkou, což dále rozšiřuje nutnou variabilitu nastavení vozidla. Z ohledem na tyto fakta navrhovaný DOE test proběhl následujícím způsobem.

- dva testy na akcelerační trati
- jeden test na dráze ve tvaru osmičky
- tři testy na dráze pro slalom resp. vytrvalostní závod

Pro všechny testy byla vytvořená matice kterou tvořila kombinace vybraných nastavovacích prvků u nichž byl předpoklad významnějšího vlivu na výkonnost vozidla v jednotlivých disciplínách. Každému prvku (faktoriálu) byly pak přiřazeny dvě hladiny (min/max) úrovně nastavení. S ohledem na maximální přesnost výsledků je v návrhu rovněž zmíněna myšlenka využití 2<sup>k</sup> úplného faktorového plánu. Pro každý test byl rovněž nominován pouze jeden pilot, čímž se eliminovaly nepřesnosti způsobené rozdílným jezdeckým stylem. Ze stejného důvodu také jezdec nebyl informován o konkrétním nastavení a výsledný čas vyjadřoval průměrnou hodnotu pěti konzistentně absolvovaných kol resp. pokusů.



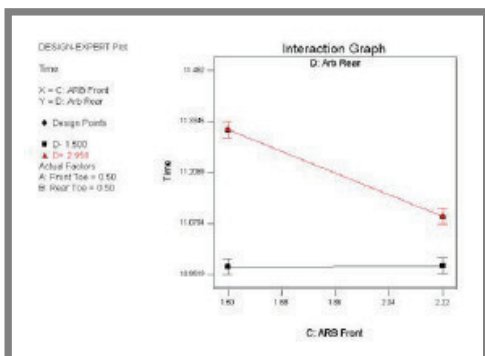
**Obr. 18** Citlivost na velikost útlumu pro stlačení tlumičů přední nápravy při akceleračním testu (minimální vliv) [18]



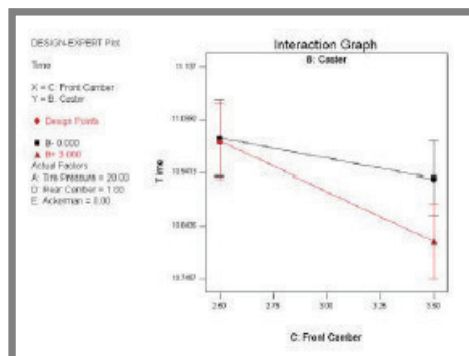
**Obr. 19** Citlivost na velikost tlaku pneumatik zadní nápravy při akceleračním testu (maximální vliv) [18]

Pro akcelerační test byla zvoleno osm faktorů: tlak předních a zadních pneumatik, tuhost předních a zadních tlumičů pro stlačení a roztažení, tuhost zadních pružin, velikost stálého převodu. První DOE test zahrnoval sedm parametrů (tlak v pneu 10 a 20 psi, stálý převod, jízdní výšku, útlum při roztažení a stlačení) a byl realizován podle 1/8 faktorového plánu, tj celkem 16 pokusů. Druhý DOE test vycházející z analýzy testu prvního zahrnoval čtyři parametry (tlak v pneu 15 a 25 psi, tuhost zadních pružin, útlum při roztažení a stlačení zadních tlumičů) pak využil 1/2 faktorového plánu s osmi pokusy. Z obou testů byly provedeny analýzy citlivosti (obr.18-19) a vybrány nejefektivnější kombinace nastavení. DOE software následně odhadnul teoretický čas pro absolvování akcelerační zkoušky, který byl reálně ověřen na trati. Současně bylo rozhodnuto věnovat v budoucnu větší pozornost vzájemné interakci tlumičů a pružin zadní nápravy.

Podobný postup jako pro akcelerační test byl zvolen i pro následující disciplínu, kterou je ustálená jízda na dráze ve tvaru osmičky v níž hlavní roli hraje vyváženost (přetáčivost/nedotáčivost) vozidla. V tomto případě byl proveden jeden experiment podle 1/8 faktorového plánu s osmi parametry (tlak v pneumatikách, hmotnost jezdce/vozidla, sbíhavost přední a zadní nápravy, příklon kol přední a zadní náprava, gradient naklápění přední a zadní nápravy) , tj celkem 32 měřených jízd. Analýzou výsledků bylo opět stanoveno optimální nastavení , definována sensitivita jednotlivých prvků a dodatečně stanovena také interakce mezi gradientem naklápění přední a zadní části vozu.



Obr. 20 Hodnocení citlivosti interakce předního a zadního stabilizátoru [18]



Obr. 21 Hodnocení citlivosti interakce záklonu rejdového čepu a příklonu předního kola [18]

Pro analýzu ovladatelnosti vozu při jízdě na slalomové dráze resp. vytrvalostním závodě byly provedeny tři experimenty s třinácti parametry (tlak v pneumatikách, hmotnost jezdce/vozidla, sbíhavost přední a zadní nápravy, příklon kol přední a zadní náprava, gradient naklápění přední a zadní nápravy, záklon rejdového čepu ,Ackermanův úhel, útlum pro roztažení a stlačení u přední i zadní nápravy) které byly nastaveny opět ve dvou úrovních. Tyto parametry byly zvoleny s ohledem na charakter dráhy (úzká trať vytýčená kužely) která předpokládá přesné nájezdy, průjezdy a výjezdy ze zatáček. Vyšší počet experimentů byl zvolen proto, aby se omezily nejistoty plynoucí s neúplného faktorového plánu. První test proběhl podle plného faktorového plánu se čtyřmi parametry (sbíhavost přední a zadní nápravy, gradient naklápění přední a zadní nápravy), druhý test s pěti parametry (tlak v pneumatikách, záklon rejdového čepu, příklon kol přední a zadní náprava, Ackermanův úhel) podle 1/2 faktorového plánu a třetí test opět s pěti parametry (tlak v pneumatikách, útlum pro roztažení a stlačení u přední i zadní nápravy) rovněž podle 1/2 faktorového plánu. Celkově tak každý z experimentů zahrnoval 16 zkušebních jízd. Z těchto jízd pak bylo stejně jako v předchozích případech vygenerováno optimální nastavení vozidla ověřené reálným testem na zkušební dráze. Z následné analýzy sensitivity jednotlivých parametrů i jejich interakcí (obr.20-21) rovněž vyplynulo, že některé prvky svým vlivem na ovladatelnost vozidla neodpovídají konstrukčním záměrům nebo teoretickým předpokladům, což znamená další rozbor získaných dat, případně dodatečné testy k ověření hlubších souvislostí. Souhrnným hodnocením všech experimentů pak dále bylo zjištěno, že

korektní provedení testu DOE vyžaduje pečlivou kontrolu všech podmínek (teplota trati, správná funkce jednotlivých komponent apod.), stejně tak důležité jsou osobní připomínky jezdce k výkonnosti vozu. Kromě celkové analýzy a závěrů týkajících se sensitivity jednotlivých parametrů dospěl testovací tým také k praktickému poznatku o nutnosti budoucího využití pouze plného nebo 1/2 faktorového plánu. Aplikace nižších řádů významně snižuje přesnost a proto je lépe při větším počtu parametrů vhodnější jejich rozdělení do více experimentů podle plného faktorového plánu. Doporučení se týká rovněž zahájení testů s parametry jejichž srozumitelnost je nejnižší (např. útlumy) a kombinovat navzájem ty, jejichž interakce je velmi vysoká.

### Hodnocení článku

- Na praktickém příkladu byla úspěšně demonstrována aplikace procesu DOE při hledání optimálního nastavení vozu. Zvolený experimentální přístup se ukázal být jako vhodným alternativním postupem pro hledání a analýzu rezerv ve výkonnosti závodního vozidla. To, že tento přístup není výjimkou ukazuje podobný experiment popsáný Rendonem [19].
- DOE proces pro nastavení a analýzu výkonnosti vozu FSAE byl zvolen především z důvodu nižších nároků na čas, materiál a počet jízd v porovnání s klasickými metodami testů [14].
- Pro korektní závěry testu je vhodnější aplikovat více plných faktoriálních plánů, s menším počtem parametrů. Tento fakt může významně zvýšit časovou a finanční náročnost testu, resp. omezit počet zkoumaných parametrů.
- Důležitým požadavkem pro tento typ testu je konzistence okolních podmínek. Pokud dochází např. ke změně povrchu tratě, teploty pneumatik apod. může být výsledná analýza a rozhodnutí o nastavení vozu zatíženo chybou. V reálném prostředí je obtížné tyto podmínky regulovat, takže výsledky testu musí být konfrontovány se závěry jiných (nezávislých) analýz.
- Výsledky a závěry DOE testu nemohly být aplikovány na jiného jezdce než toho, se kterým byl test prováděn. Důvodem je zejména vliv jeho individuální váhy, výška a délky, které mohou výrazně ovlivnit dynamiku vozidla Formule Student, jehož hlavní charakteristikou jsou malé rozměry a nízká hmotnost.
- Závěry získané pomocí DOE (nalezení nejvýhodnějšího nastavení) do jisté míry suplují výsledky numerických simulací, resp. jejich optimalizačních nástrojů. Toto může být přínosem pro týmy, které potřebnými simulačními nástroji nedisponují, v opačném případě je DOE přínosný pouze jako doplňkový postup pro ověření teoretických výpočtů.

THEANDER A. "Design of a Suspension for a Formula Student Race Car", MSc. Thesis, Dept. of Aeronautical and Vehicle Engineering, KTH, Stockholm, 2004, s. 46-61

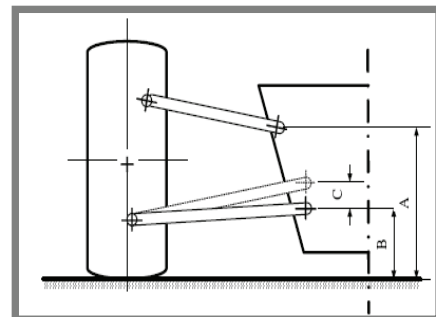
Součástí rozsáhlejší práce zabývající se návrhem optimální kinematiky zavěšení vozu Formule SAE je také pasáž věnovaná studii vlivu změny několika základních

parametrů jejichž vzájemná interakce může významně ovlivnit tvar (průběh) klíčových kinematických charakteristik. Výstupem je pak soubor studií vycházejících z Taguchiho metody pomocí nichž je analyzována míra vzájemné interakce jednotlivých parametrů. Přestože se tato studie zabývá využitím tohoto typu DOE pouze pro nalezení nejvhodnější kinematiky náprav ve fázi CAD návrhu, může být aplikován rovněž i na postupy při hledání nastavení a citlivosti jednotlivých parametrů u reálného závodního vozu.

## Výsledky

Při návrhu zavěšení závodního vozidla je důležité věnovat pozornost některým důležitým parametrům, mezi něž patří také příklon / záklon rejdového čepu a vzdálenost středu klopení rámu od vozovky. Analýzu jejich vlivu na charakteristiku zavěšení včetně vlivu jejich vzájemné interakce je nutno provést tak, aby nedošlo ke ztrátě některé důležité informace, což je významný nedostatek postupů založených na změně jediného parametru v každém kroku. Protože existuje mnoho rozdílných parametrů ovlivňujících dynamiku zavěšení, jako nejvhodnější postup pro analýzu jejich vzájemného působení byla zvolena Taguchiho metoda. Její hlavní výhodou jsou především informace o vzájemné interakci těchto jednotlivých parametrů. Principem je využití sady speciálních tabulek (tzv. ortogonální soustavy), podle kterých lze provádět pouze malou část z celkového počtu možných experimentů. Pomocí těchto soustav lze provést nejmenší možný počet experimentů s maximálním množstvím informací. I zde však platí, že redukování počtu prováděných experimentů je na úkor úplnosti výstupních informací. Pro vlastní experiment týkající se optimalizace zavěšení pak byly zvoleny u každé studie tři parametry jejichž změna může ovlivnit kinematické charakteristiky a které jsou zároveň nastavitelné i na vozidle. Experiment byl sestaven podle ortogonální soustavy úrovně V. (obr.22).

Trial no.	Parameters					
	A	B	AxB	C	AxC	BxC
1	-1	-1	1	-1	1	1
2	1	-1	-1	-1	-1	1
3	-1	1	-1	-1	1	-1
4	1	1	1	-1	-1	-1
5	-1	-1	1	1	-1	-1
6	1	1	-1	1	1	-1
7	-1	1	-1	1	-1	1
8	1	1	1	1	1	1

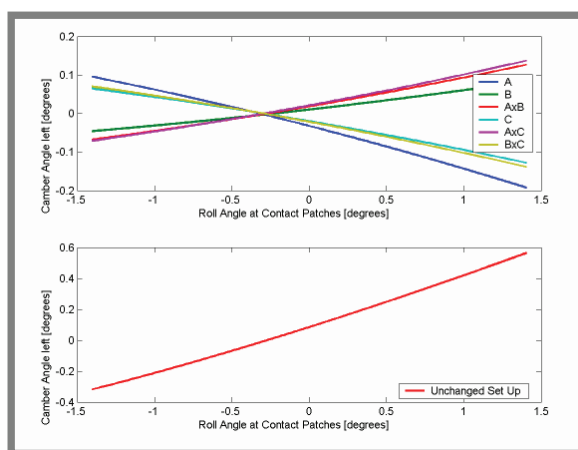


Obr. 22 L8 ortogonální soustava úrovně V. [20]

Obr. 23 Parametry zavěšení přední nápravy použité pro studii [20]

Pro analýzu přední nápravy byly vybrány body zavěšení kola (obr.23), jejichž posun ovlivňuje velikost změny příklonu kola, „anti-dive“ parametru a polohu středu klopení rámu. Studie parametrů geometrie řízení zahrnovala polohu vnitřního kloubu řídicí tyče ve směru X-Z souřadného systému a polohu kloubu vnějšího ve směru Y.souřadného systému Cílem bylo analyzovat vliv na Ackermanovu geometrii a

změnu sbíhavosti při propružení. Poslední studie byla zaměřena na geometrii zadní nápravy a sledovala stejné parametry jako u nápravy přední. Výstup experimentu pak tvořila sada grafů citlivosti kinematických charakteristik v závislosti na změnách a interakci výše uvedených parametrů (obr.24). Jednotlivé grafy byly v každém kroku analyzovány a na základě dílčích závěrů následovala úprava bodů zavěšení pro optimalizaci jeho funkce zaměřené na celkovou výkonnost vozidla.



**Obr. 24** Příklad studie vlivů změny parametrů a jejich vzájemné interakce (nahore) na základní charakteristiku změny příklonu kola přední nápravy při naklápění vozu (dole) [20]

## Hodnocení článku

- Na praktickém příkladu optimalizace návrhu zavěšení závodního vozu byla demonstrována aplikace experimentální Taguchiho metody. Přestože se článek nezabývá zpracováním a vyhodnocováním dat z reálných jízdních zkoušek, lze konstatovat že tento typ DOE je pro tyto účely za jistých podmínek dobře využitelná. Platí to zejména při vyhodnocování vzájemné interakce jednotlivých parametrů, kterou dokáže oddělit od jejich individuálního vlivu. Podobné závěry prezentuje ve své práci týkající se nalezení optimálního nastavení vozu Formule 3 také Khan [22].
- Stejně jako ostatní DOE přístupy i Taguchiho metoda vyžaduje přípravu a dodržení experimentálního plánu. Pro větší počet zkoumaných parametrů tak narůstá časová náročnost celé operace. Ačkoliv systém tabulek dovoluje navržení procesu pro testování maximálního počtu efektů s minimálním potřebným počtem pokusů, rovněž zde existuje riziko nesprávných závěrů resp. ztráty informace dané neúplností experimentu
- Ani v případě využití Taguchiho metody neposkytují výsledky experimentu možnost detailní analýzy výkonnosti vozidla, kterou je tedy nutno provádět separátně.

**STEVENS G., PETERSON D., EICHHORN U.** "Optimization of Vehicle Dynamics Through Statistically Designed Experiments on Analytical Vehicle Models", 1997 European ADAMS Users' Conference (12th), Dostupné z URL: <[http://www.mscsoftware.com/support/library/conf/adams/uc97\\_papers.cfm](http://www.mscsoftware.com/support/library/conf/adams/uc97_papers.cfm)> , [cit. 2011-05-04]

Článek představuje metodiku využívanou společností Ford Motor Company pro optimalizaci charakteristik ovladatelnosti vozidla za pomoci procesu CAE a DOE. Přestože je obsah článku tématicky zaměřen především na využití počítačového návrhu postaveného na technologii „ADAMS Multibody System“, postup analýzy navrženého modelu prostřednictvím DOE lze považovat za metodu využitelnou i pro hodnocení vlivu vybraných parametrů na výkonnosti reálného závodního vozidla.

## Výsledky

Hodnocení ovladatelnosti je velmi důležitým prvkem procesu vývoje každého nového vozidla. V článku se proto autoři zaměřují na vybrané manévry vyznačující se nízkou frekvencí (typicky je hodnota pod 5 Hz) jejichž typickým příkladem je zatáčení na konstantním poloměru, jízda se střídavou změnou směru ve tvaru sinusoidy nebo vyhýbací manévr. Tyto manévry lze úspěšně modelovat pomocí CAE a poznatky aplikovat při výrobě prototypů. Úvod pojednání se věnuje přípravě počítačového modelu vozidla, popisu zajištění kvalitních vstupů tohoto modelu (např. charakteristika pneumatik) a jeho korelaci tak aby reprezentoval realitu. Takto vytvořený model je připraven pro následnou analýzu jejíž cílem je ověření zda vozidlo (resp. konstrukční řešení komponent) bude splňovat stanovené požadavky na výstupy tj. definovanou jízdní dynamiku. Z hlediska dosažení maximální efektivnosti tohoto procesu byl zvolen postup DOE, jehož vstupy byly rozděleny do třech základních skupin :

- Kontrolovatelné faktory – konstrukční parametry vozidla
- Nekontrolovatelné faktory – např. tření, vlhkost, výrobní nepřesnosti na něž konstrukční řešení, resp. výstupy nesmí být příliš citlivé
- Vstupy – např. úhel natočení volantu, síla na pedál apod.

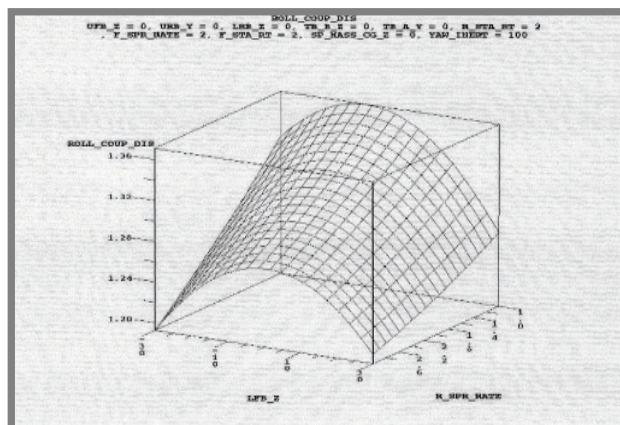
Pro vytvoření empirického modelu systému prostřednictvím DOE byla zvolena Metoda plochy odezvy (Response Surface Method – RSM), kdy odezvu systému lze vyjádřit následujícím obecným vztahem

$$R = G(f_1, f_2, f_3, \dots, f_n) \quad (2)$$

Vztah mezi jednotlivými faktory a odezvou je možno předpokládat v obecném polynomickém tvaru

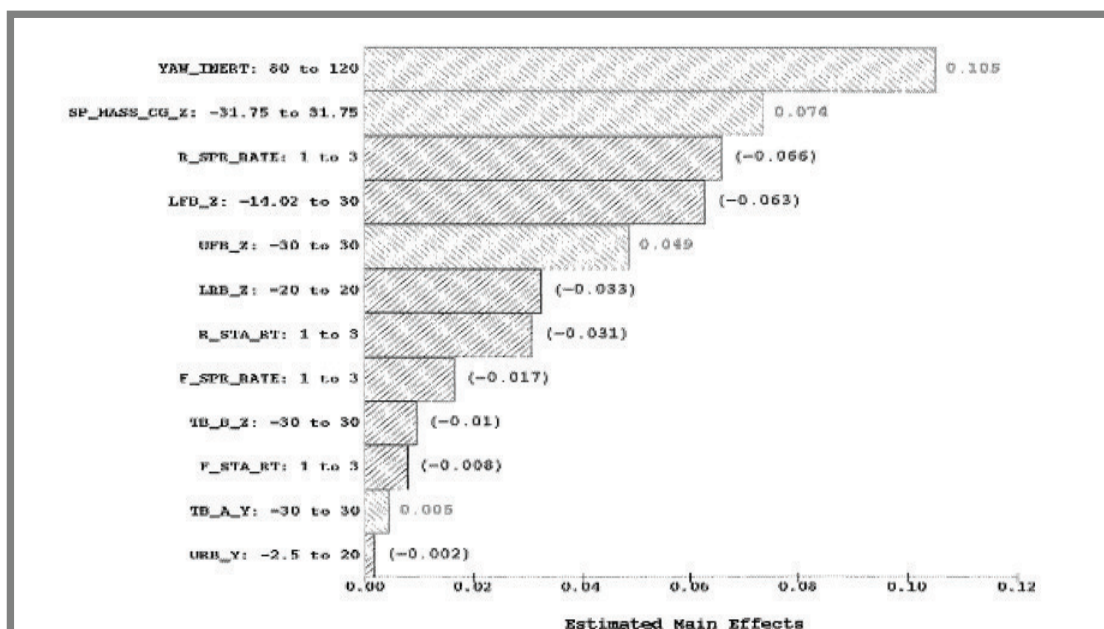
$$R = a_0 + a_1 f_1 + a_2 f_1^2 + a_3 f_1 f_2 + \dots \quad (3)$$

Vypočtenou plochu odezvy pak lze graficky vyjádřit (obr.25), což přináší vývojovému inženýrovi možnost mnohem efektivněji porozumět citlivosti celého systému včetně vzájemných interakcí.



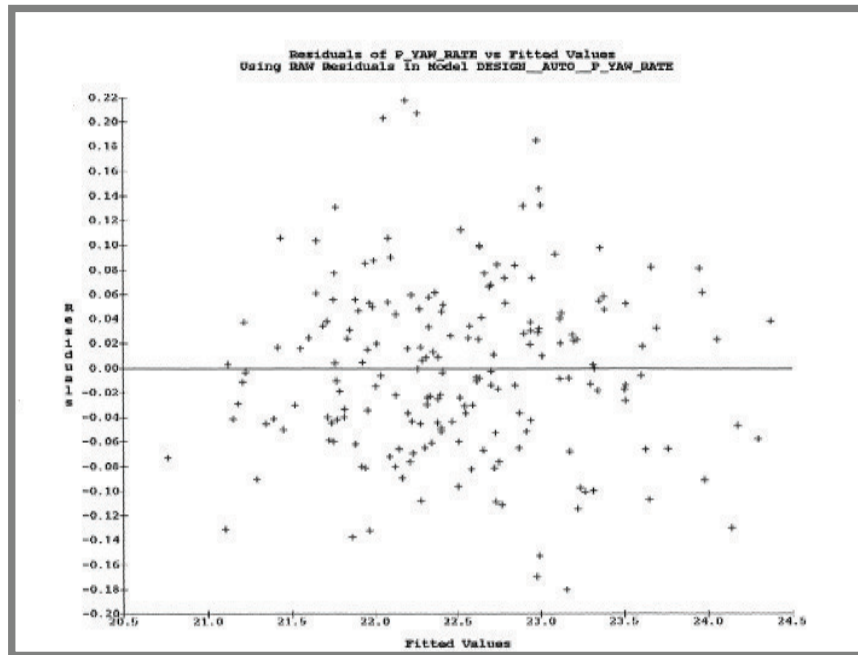
Obr. 25 Příklad plochy odezvy (naklopení vozu) pro dva faktory (tuhost pružiny, poloha uchycení spodního ramene nápravy) [23]

Případová studie se pak na konkrétním příkladu lehkého nákladního vozu zabývá procesem analýzy vlivu jednotlivých konstrukčních prvků resp. charakteristik na ovladatelnost vozidla (gradient nedotáčivosti při ustáleném zatáčení) a jejich následnou optimalizací. Z původních 33 faktorů pozmeněných díky novému konstrukčnímu řešení se dvěma screening testy (kinematické charakteristiky a odezva vozidla) podle neúplného faktorového plánu podařilo odstranit 12 faktorů z nízkým stupněm důležitosti (obr.26).



Obr. 26 Pareto graf pro DOE screening zaměřený na odezvu vozidla [23]

Pro charakteristiku odezvy parametrů zadní nápravy pak byl proveden Box-Behkin experiment se 188 kombinacemi nejdůležitějších faktorů prvního screening testu a pro dynamickou odezvu vozidla stejný typ experimentu s 204 kombinacemi nejdůležitějších faktorů druhého screening testu. Výsledné hodnoty experimentu byly použity jako vstupy pro stanovení aproximace závislosti odezvy na faktorech. Správnost vytvořeného modelu se na závěr ověřuje vhodným způsobem, např. stanovením střední kvadratické odchylky a rozložením reziduí (obr.27). Závěrečnou operací pak byla optimalizace konstrukčního řešení nápravy vycházející z analýz tvarů ploch odezvy pro jednotlivé kombinace faktorů.



Obr. 27 Graf reziduí pro RSM experiment. Rovnoměrný rozptyl je charakteristický pro správně navržený experiment i model plochy odezvy [23]

### Hodnocení článku

- V článku bylo prezentováno na příkladu analýzy a optimalizace vybraných charakteristik jízdní dynamiky vozidla využití Metody plochy odezvy (Response Surface Metod – RSM) Ta je jedním z často využívaných a účinných postupů DOE při hodnocení vlastností nebo optimalizaci technických systémů. Možnost aplikace této metody v motosportu pak dokladuje firma MSC Software ve své novější prezentaci [24] zaměřené na využití produktu ADAMS/Motosport pro simulaci a vývoj závodního vozidla (resp. jízdní dynamiky) série NASCAR.
- RSM nabízí mnohem komplexnější možnost posouzení vzájemné interakce jednotlivých nejdůležitějších faktorů (lokální minima/maxima). S ohledem na větší časovou náročnost RSM experimentu pak probíhá v případě většího počtu parametrů výběr hlavních faktorů pomocí úvodního screening testu. Správnost jeho výstupů pak určuje kvalitu hlavního experimentu.

- Grafický výstup RSM (plocha odezvy) dává v porovnání s ostatními DOE metodami lepší vizuální náhled na vzájemnou interakci faktorů. Přesto i zde nelze provádět analýzu více než dvou faktorů a jedné odezvy.
- Nevýhodou aplikace RSM pro reálné jízdní zkoušky vozidla je relativně vysoká náročnost provedení celého procesu. Uváděný příklad vyžadoval velký počet experimentů s vybranými faktory, takže pouze výrazná redukce jejich počtu by mohla v reálu zkrátit délku celého procesu na přijatelnou hodnotu. V případě vozidla s velkým počtem seřizovacích prvků nemusí být tento postup vždy nejvhodnější.
- Stejně jako ostatní DOE metody, ani princip RSM nedovoluje využití pro detailní analýzu výkonnosti vozidla v jednotlivých úsecích tratě, což snižuje univerzálnost jejího využití.

### 3.3 Využití prvků umělé inteligence

I přes značné benefity, jež přináší systémy pro datalogging svojí schopností poskytovat uživateli velké množství dat, nelze mnohdy na jejich základě plně definovat skutečnou jízdní dynamiku vozidla či jeho výkonnost. Standardní metodiky pro analýzu dat velmi obtížně vyhodnocují neurčité informace a postrádají rovněž procesy vedoucí k tvorbě doporučení o změnách v nastavení vozidla směřovaných k žádoucímu výsledku. Tyto závěry resp. rozhodnutí jsou pak silně závislé na zkušenostech a inteligenci závodního inženýra. Ne vždy jsou však tito odborníci k dispozici a proto celkem logicky vznikla myšlenka aplikace systému umělé inteligence pro analýzu dat a hodnocení výkonnosti závodního vozidla nebo jezdce. Správně navržené systémy by mohly přinést jistou výhodu v komplexním zpracování a vyhodnocení vstupních informací především s ohledem na vzájemnou provázanost mnoha prvků celého systému (závodního vozu). Využití jiných než tradičních algoritmických postupů také skýtá možnosti zpracování nenumerických a nepřesně formulovaných informací jako např. subjektivní názor jezdce na ovladatelnost vozidla, definice vnějších podmínek (kvalita povrchu tratě) apod. Výstupem z těchto systémů, resp. procesů by pak v ideálním případě mohl být soubor informací pokrývající daleko širší spektrum požadavků kladených na datovou analýzu ze strany i méně zkušeného závodního inženýra. Implementace systémů umělé inteligence však sebou nese mnohé úskalí.

- Komplikovanost systému může převážit jeho výhody
- V mnoha případech jsou nezbytné znalostní báze. Naplnění těchto bází vyžaduje buď hluboké odborné znalosti nebo stabilní prostředí ve kterém by mohl proběhnout proces učení (např. u neuronových sítí).
- Je-li součástí tvorby systému také návrh vazeb jednotlivých prvků, může v případě velkého počtu vstupních parametrů vznikat riziko značné nepřehlednosti při následném procesu odlaďování tohoto systému.

Přes některé nedostatky lze využití systémů umělé inteligence považovat za zajímavou alternativu pro postupy využitelné k analýze výkonnosti vozidla. Inspirací pak mohou být také aplikace i z jiných oblastí technické diagnostiky [25-26] nebo kontroly dynamické stability vozidla [27].

**ANTONINI P., CORRADINI M.L., IPPOLITI G., LONGHI S., STRONATI C.,**  
"Race car performance evaluation by a Neuro-Fuzzy Inference System", American Control Conference 2006, 6 pp., ISBN: 1-4244-0209-3, E-ISBN: 1-4244-0210-7

Hlavním tématem článku je návrh metodiky resp. nástroje využitelného nejen v konstrukci, ale současně i v procesu hledání optimálního nastavení závodního vozu. Pro tento účel byl zvolen Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS), pomocí něhož byla modelována výkonnost vozidla jako funkce vybraných seřiditelných parametrů. Analýza výstupů pak dovoluje volbu požadovaného nastavení těchto prvků tak, aby byla dosažena požadovaná úroveň výkonnosti vozidla.

### Výsledky

Konkurenceschopnost závodního vozidla je daná nejen konstrukčním řešením, ale také řadou kompromisů při jeho seřízení pro danou závodní trať, počasí a preference jezdce. Z velkého množství prvků ovlivňující výkonnost vozidla autoři článku zaměřují pozornost pouze na pružiny a klopnou tuhost na které demonstrují navrhovanou metodiku. Tyto dva prvky významně ovlivňují přenos váhy na jednotlivé kola při zatáčení čímž určují charakter stability vozidla. Pro hodnocení tohoto stavu byl zaveden koeficient nedotáčivosti

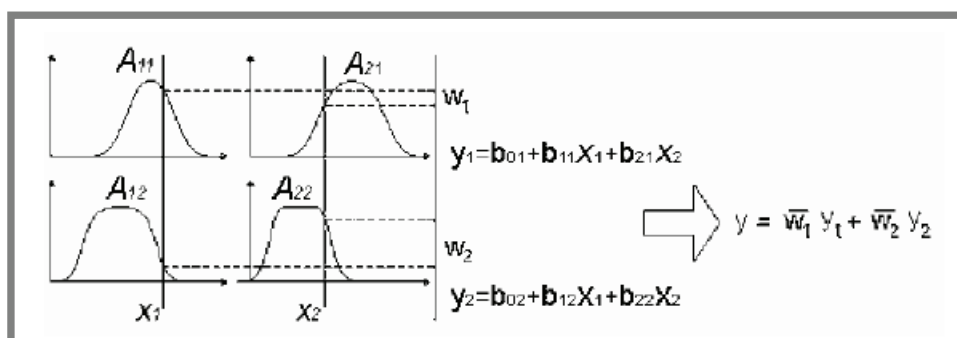
$$K_{us} = \frac{a_y}{v^2} \frac{1}{\delta} \quad (3)$$

Stabilitu vozidla při zatáčení pak lze charakterizovat třemi základními úrovněmi

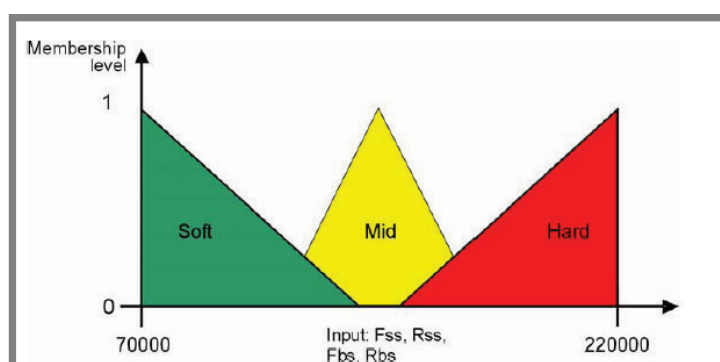
$$\begin{aligned} K_{us} > 1 & \text{ přetáčivé chování} \\ K_{us} = 1 & \text{ neutrální chování} \\ K_{us} < 1 & \text{ nedotáčivé chování} \end{aligned} \quad (4)$$

Jako hlavní záměr prováděného experimentu definovali autoři ověření možnosti identifikace chování systému, který simuluje výkonnost vozidla při reálném testu v závislosti na změnách nastavovacích parametrů s přihlédnutím na výstup reprezentovaný maximální hodnotou  $K_{us}$ . Tato maximum charakterizuje odezvu vozidla bezprostředně po natočení volantu jako indikátor jeho dynamické agility. Pro referenční měření byla vybrána druhá část šikany Castrol na okruhu Nürburgring. Cílem bylo rovněž ověřit, zda je možno predikovat výkonnost vozidla v závislosti na jeho nastavení bez nutnosti provádět další simulace a jízdní zkoušky.

Pro modelování vstupních / výstupních vztahů závislostí mezi tuhosti a  $K_{us}$  během korekce řízení byla zvolena Neuro-Fuzzy struktura spojující výhody Fuzzy logiky a samoučící schopnosti neuronové sítě (ANFIS). Fuzzy model je založen na architektuře Takagi-Sugeno-Kang (TSK) prvního řádu (obr.28). Vstupy do fuzzy modelu tvoří tuhosti pružin a stabilizátorů, konsekvem pak je koeficient nedotáčivosti ( $K_{us}$ ). Funkce příslušnosti je definována mírou tuhosti pružin a stabilizátorů a výstup modelu jako výsledek váženého součtu.



Obr. 28 Takagi-Sugeno-Kang Fuzzy Inference System [28]

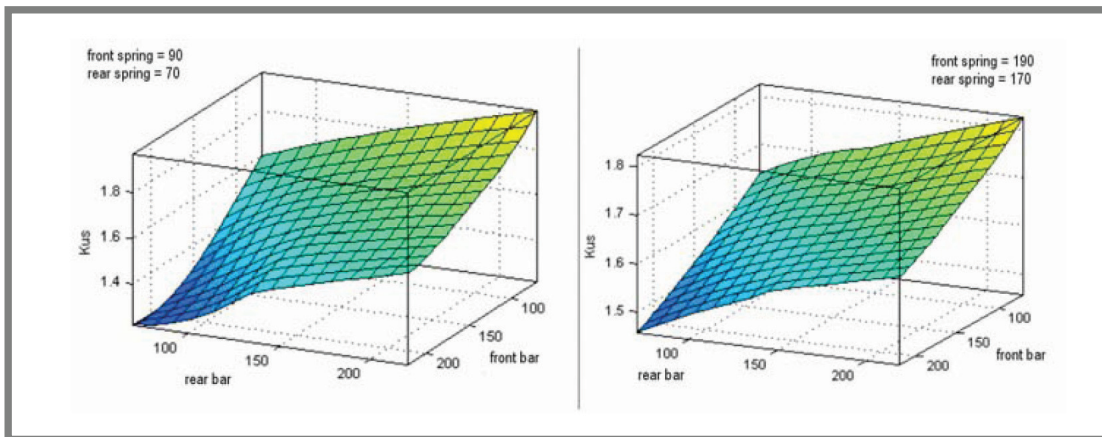


Obr. 29 Trojúhelníkové funkce příslušnosti definované tuhostí pružin a stabilizátorů [28]

K tréninku TSK modelu (tj. parametrů funkce příslušnosti a koeficientů jednotlivých pravidel) byla provedeny výpočty  $Kus$  pomocí simulací průjezdu šikanou Castrol, které naplnily matici s 1296 kombinacemi tuhostí stabilizátorů a pružin přední i zadní nápravy. Pro definici Neuro-Fuzzy pravidel byly dále zvoleny tři trojúhelníkové členské funkce pro každý vstup (obr.28), což vytvořilo dohromady 81 pravidel. Výslednou struktura FIS pak tvořilo 193 uzlů, 405 lineárních parametrů a 36 nelineárních parametrů. Po vyhodnocení chyb z průběhu procesu učení (tréninku) byla konstatována velmi dobrá míra korelace a systém mohl být použit pro odhad koeficientu nedotáčivosti ( $Kus$ ) u různých kombinací tuhosti pružin a stabilizátorů.

Výsledky učení lze znázornit pomocí 3D grafu na jehož svislé ose je uvedena hodnota  $Kus$  a modifikaci nastavení tuhosti zavěšení reprezentuje rovina x-y (obr.30). Každý graf je pak vytvořen pro dvě fixní hodnoty zbývajících parametrů tuhosti. Pomocí těchto grafů je možno vyhodnotit jaké změny v kombinaci nastavení tuhosti stabilizátorů a pružin povedou k žádoucí změně v rychlosti odezvy vozidla (změně směru jízdy) po natočení volantu. Na příkladu je uvedena situace, kdy jezdec hodnotí reakci vozidla na impuls v řízení jako nepřiměřeně rychlou a je tedy nutno nalézt řešení, které tento nedostatek eliminuje. V několika krocích při kterých byly analyzovány grafy pro možné změny nastavení se ukázalo jako vhodné řešení

modifikovat parametry tuhosti stabilizátorů. Podobným postupem pak lze řešit i situaci, kdy odezva vozidla na natočení volantu je naopak příliš dlouhá.



**Obr. 30** Snížení tuhosti vzadu (vlevo) nebo naopak zvýšení tuhosti pružin vpředu (vpravo) o 100 N/m oproti původnímu nastavení dovoluje zkracovat odezvu vozidla na natočení volantu pomocí tuhostí stabilizátorů [28]

### Hodnocení článku

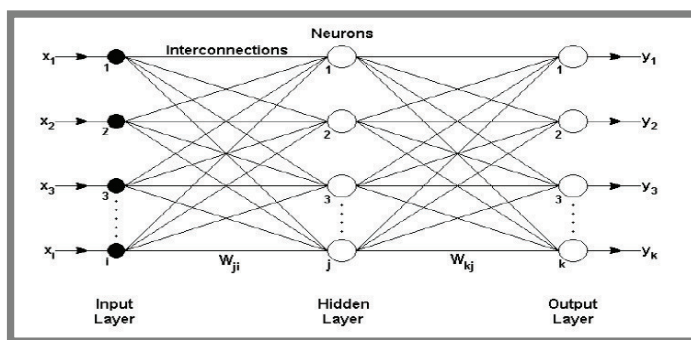
- Článek představil aplikaci Neuro-Fuzzy Inference Systému (ANFIS) pro identifikaci a analýzu závislosti ovladatelnosti vozu (koeficientu nedotáčivosti) na parametrech (tuhostech) pružin a stabilizátoru. Poznatky pak byly diskutovány na konkrétním případě s ohledem na zlepšení výkonnosti vozidla. Metodiku lze využít také i na další seřizovací prvky závodního vozidla.
- Identifikace interakcí vybraných parametrů na dynamiku vozidla (obr.30) poskytuje závodnímu inženýrovi dobrý nástroj při intuitivním rozhodování o změnách v nastavení vozidla. Výsledný typ informace je pak velmi podobný výstupům jímž disponuje „Metoda plochy odezvy“ - DOE [23]
- Správná identifikace systému, resp. proces učení neuronové sítě vyžaduje odpovídající počet vstupů (výsledků testů) s různou kombinací nastavení. Při provádění počítačových simulací je tento proces omezen pouze výpočetním časem, počty reálných testů jsou však většinou výrazně limitované.
- Analýza závislosti nastavení vozidla a jeho dynamiky byla stanovena pouze pro jednu zatáčku. Přestože by získané poznatky měly mít obecnou platnost, autoři se ve své práci nezmiňují zda tento předpoklad byl ověřen i v dalších úsecích závodního okruhu. Tento fakt také poukazuje na další nedostatek, kdy výstupem je pouze celkové hodnocení vlastností vozu a tudíž nelze analyzovat případné kolísání sledovaných atributů na časové ose.
- Proces hledání nejvhodnější kombinace tuhosti pružin a stabilizátorů pro dosažení žádoucí odezvy vozidla vyžaduje posloupnost kroků s analýzou grafů pro jednotlivé varianty. Při rozhodování o nastavení vozu zahrnující větší počet seřizovacích prvků je tedy nutno vygenerovat velké množství kombinací grafů, což může výrazně ztížit nalezení klíčových informací.

**BUTTLER V., KARRI V.** "Race Car Chassis Tuning Using Artificial Neural Networks", AI 2003: Advances in Artificial Intelligence, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003, s. 866-877, ISBN 3-540-20646-9

Nalezení optimálního nastavení závodního vozu je otázkou mnoha kompromisů. Determinovat toto optimum pro specifické podmínky jednotlivých tratí vyžaduje velké množství testovacích jízd a proto existuje tendence o nahrazení tohoto časově a finančně náročného způsobu alternativními způsoby. Tradiční počítačové modelování založené na zjednodušené jízdě dynamice naráží na mnoho praktických omezení, jedinou možností je tedy aplikace inteligentnějších systémů. Článek se pak zabývá právě touto možností, resp. využitím umělých neuronových sítí (ANN) pro identifikaci dynamických vlastností vozidla jako podkladu pro predikci k nalezení ideálního nastavení.

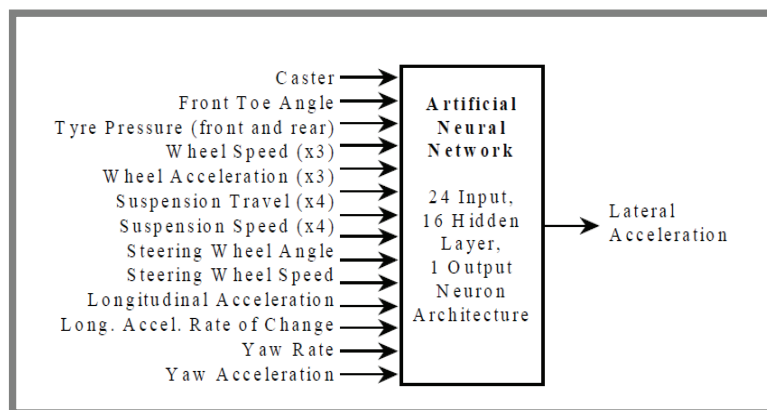
## Výsledky

Pro vytvoření systému byla zvolena vícevrstvá dopředná umělá neuronová síť (ANN) jejichž architektura (obr.31) je často využívána u kontrolních systémů průmyslových aplikací. Pro zjednodušení procesu sestavení a ověření ANN byl zvolen proces optimalizace závodního vozu FSAE v podmínkách ustáleného zatáčení. Vlastní experiment se sestával z absolvování jízd pro šest kombinací nastavení prvků jejichž vliv na ustálené zatáčení byl považován za nejvýznamnější (záklon rejdrového čepu, sbíhavost na přední nápravě, tlak předních a zadních pneumatik)

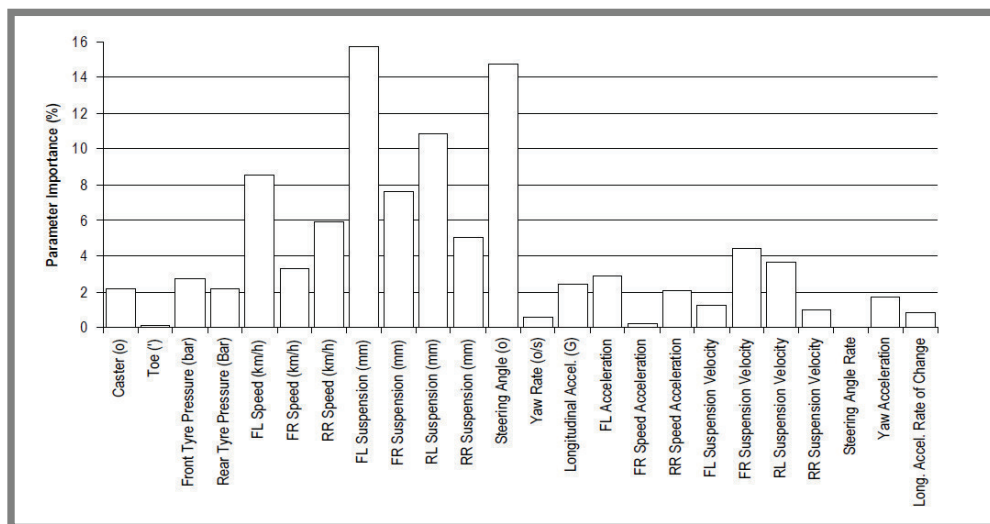


Obr. 31 Architektura vícevrstvé dopředné ANN [29]

Pro odhad příčného zrychlení vozidla při zatáčení byly jako vstupy neuronové sítě vybrány parametry charakterizující dynamické chování vozidla spolu s hodnotami nastavení výše uvedených prvků podvozku vozidla (obr.32). Následné testování a trénink neuronové sítě přineslo finální formu, která obsahovala 24 vstupů, 16 skrytých vrstev a jeden výstup. Analýza chyb mezi odhadovanou a naměřenou velikostí příčného zrychlení pak prokázala velmi dobrou úroveň schopnosti systému učit se jízdě dynamiku vozidla. Porovnáním vah jednotlivých parametrů v modelu bylo také možno provést vyhodnocení vlivu jednotlivých vstupů na hodnotu výstupu tj. velikost příčného zrychlení (obr.33).



Obr. 32 ANN model použitý pro analýzu [29]



Obr. 33 Analýza důležitosti vstupních parametrů pro ANN [29]

Tréninkové data pro reálné ověření systému byly nasbírány během testů zaměřených na přípravu vozidla k jedné ze sotěžných disciplín - jízdě po kruhové dráze. Vlastní proces pomocí něhož ANN měla napomoci k nalezení nastavení vozidla schopného dosáhnout největšího příčného zrychlení resp. rychlosti proběhl jako výpočet a následný ranking pro 480 možných kombinací nastavení hlavních parametrů (záklon rejdového čepu, sbíhavost, tlak předních a zadních pneumatik). Pro každou tuto kombinaci byly testovány různé hodnoty vstupů ostatních parametrů (obr.32) omezené předpokladem dosažitelnosti na reálném vozidle. Z nich byla vybrána pouze jedna varianta vykazující se největší hodnotou příčného zrychlení. Srovnání kombinací nastavení hlavních parametrů identifikovaných pomocí ANN jako nejrychlejší a kombinací dosahujících nejlepší výsledky v reálném testu pak ukázalo vysokou míru korelace. Kombinace ohodnocena nejlépe pomocí ANN byla shodná s kombinací jež byla s minimálním rozdílem jako druhá nejrychlejší při skutečném testu, což potvrdilo korektnost navržené metodiky

## Hodnocení článku

- Využití ANN k procesu hledání optimálního nastavení závodního vozu se jeví jako vhodná alternativa ke klasickému přístupu využití matematických simulací. Výhodou je především skutečnost, že správně sestavený model zahrnuje i vliv mnoha nelinearit systému (závodního vozu), které jsou jinými postupy mnohdy velmi obtížně reprodukovatelné. Pro úplnost je třeba dodat, že podobnou myšlenkou identifikace dynamického chování vozidla pomocí ANN se zabýval ve své práci také Abdulrahim [30]
- Článek se věnuje především využití ANN k identifikaci nejlepší kombinace nastavovacích prvků z hlediska dosažitelnosti maximální výkonnosti vozidla. Princip navrhovaných postupů (zejména proces tvorby a tréninku ANN) by však bylo možno po úpravách využít i jako základní modul specializované metodiky určené výhradně k analýze dat ze závodního vozu.
- Nedostatkem ANN pro tyto aplikace je závislost na procesu učení. Využití systému ve výrazně odlišných podmínkách než pro které byl trénovaný (např. povrch tratě) tedy může přinést chybné výstupy a tím i závěry týkající se skutečné výkonnosti vozidla.
- Nastavení vozidla v prováděném experimentu (ustálené zatáčení) nevyžadovalo žádný kompromis. Autor však neuvádí, zda lze stejně dobré výstupy ze systému (tj. predikce výkonnosti) očekávat také v případech, kdy bude vozidlo testováno v komplexních jízdních režimech zahrnujících i přechodové stavy..
- Přestože navrhovaný postup založený na ANN dokáže poskytnout také informaci o citlivosti výstupu na vstupní parametry (obr.33), princip celé metody je určen primárně (podobně jako simulace) pouze k nalezení optima. Definování míry interakce jednotlivých parametrů (podobně jako DOE) nebo analýza výkonnosti na časové ose pak tedy vyžaduje dodatečnou analýzu dat.

### 3.4 Multivariační analýza dat

Jak již bylo několikrát zmíněno, moderní systémy pro datalogging díky své kapacitě dávají závodnímu inženýrovi velké možnosti posuzování nejrůznější interakcí či závislostí množství naměřených dat. Jednou z hlavních charakteristik těchto dat zaznamenaných během testovacích jízd resp. závodu je jejich vícerozměrnost. Ta znesnadňuje jejich statistickou i průzkumovou analýzu. [31], jejíž cílem je ve většině případů posouzení výkonnosti vozidla. Tuto výkonnost pak lze vyjádřit jednoduchým vztahem.

$$T = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (5)$$

Cílem analýzy je nalezení takového stavu resp. nastavení jednotlivých seřizovacích prvků tak aby funkce  $T$  tj. hodnota času v měřeném úseku dosáhla minima. Vliv jednotlivých parametrů seřízení pak nemusí být vyjádřen pouze úrovní jejich nastavení, ale také některou z dynamických charakteristik (např. stabilita vozidla). Uvedený problém lze pochopitelně řešit optimalizací, nicméně závodní inženýr potřebuje k rozhodnutím o dalších možných úpravách na konkrétní podmínky také možnost danou funkcí detailněji interpretovat. Většina současných

metodik podporuje tyto analýzy pouze na úrovni dvou až tří parametrů současně, což je mnohdy nedostačující. Některé z důležitých souvislostí tak nemusí být identifikovány. Progresivnějším přístupem se zdá využití některého z typů multivariační analýzy dat, jejíž aplikaci lze v současnosti nalézt v mnoha experimentálních oborech, např. v chemii, neurobiologii [32] apod. Ačkoliv se aplikace tohoto typu analýzy jeví jako vhodný způsob pro komplexnější popis výkonnosti závodního vozidla, problematika v této oblasti je v současnosti poměrně málo popsána. Je možné se domnívat, že důvodem tohoto stavu mohou být některé z následujících skutečností.

- Vytvoření odpovídajícího způsobu zpracování a zobrazení dat do vícedimenzionálních charakteristik může být poměrně komplikovanou záležitostí.
- V mnoha případech je i ve zdánlivě jednoduchých situacích nutno používat poměrně speciální postupy.
- V porovnání s 2-D a 3-D charakteristikami (tj. závislostmi 2-3 parametrů) může být mnohem obtížnější správně interpretovat poskytovanou informaci složenou z více vrstev. Toto omezení je dáno obecnou vlastností lidské psychiky. Tento nedostatek lze eliminovat např. vhodnou vizualizací [33]. Obecná problematika vizualizace závislosti velkého objemu vícerozměrných dat na časové ose je však nyní stále součástí aktivního výzkumu.
- Konzervativní přístup ze strany zkušených závodních/datových inženýrů. Ti dokáží základní výkonnost vozidla analyzovat na dobré úrovni pomocí několika vhodně zvolených jednoduchých závislostí a k řešení složitějších problémů využívají empirických znalostí nebo zaběhnutých rutin. Tato filozofie je ekvivalentní např. postupům zkušených analytiků na finančních trzích.

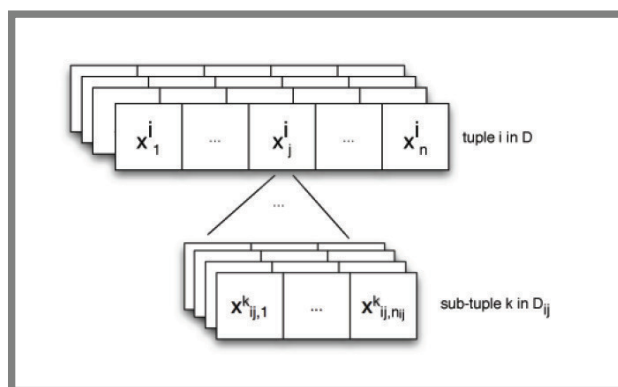
Přes uvedené problémy však multivariační analýzy skrývají významný potenciál jako přístup pomocí kterého lze detailněji identifikovat vzájemnou interakci a vliv seřizovacích prvků na výkonnost vozidla v omezeném počtu kroků. Tuto výhodu pak lze ocenit zejména v případech velkého počtu seřizovacích prvků a omezeného času určeného na optimalizaci vozidla.

**MATKOVIC K., GRAČANIN D., SPLECHTNA R., HAUSER H.** " *Interactive Visual Analysis of Families of Surfaces: An Application to Car Race and Car Setup*", Proceedings of EuroVAST 2010, pp. 1-7.

Tématem článku je popis využití interaktivních vizuálních analýz napomáhajících uživateli k hlubšímu proniknutí do souvislostí komplexních dat. Případová studie je prezentována na analýze dat ze simulátoru závodního vozu TORCS 3D, kdy posouzení parametrů vozidla a výkonnosti jezdce během závodu napomáhá k dalšímu vylepšení výkonnosti. Ačkoliv je metoda prezentována jako podpora zpracování dat z počítačových simulací, její využití je bez omezení možné i v případě dat získaných během testů či závodů v reálném prostředí.

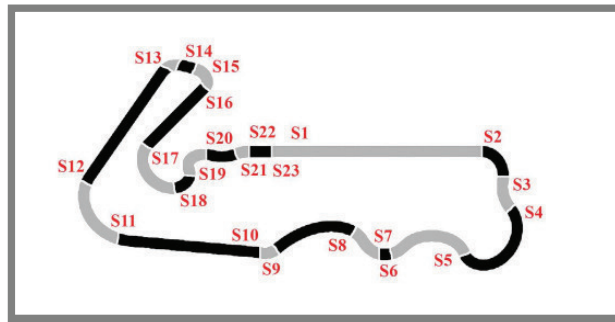
## Výsledky

Základem uváděné metodiky jsou obecné postupy pro analýzu většího počtu časově orientovaných datových sad, jejichž souhrn publikoval ve svém článku např. Aigner a kol. [35]. Časový faktor vyžaduje zvláštní zacházení během procesu vizualizace dat a je potřeba rozlišovat mezi časově závislými (dynamickými) a časově nezávislými (statickými) reprezentacemi. První skupina tj. časově závislá vizualizace dat obvykle využívá každou dimenzi jako skalární hodnotu a zachází s těmito daty jako s izolovanými případy nebo je agreguje do skalárních hodnot. Problém, jak vyjádřit komplexní vnitřní strukturu dat, může být vyřešen pomocí interaktivní vizuální analýzy příbuzných křivek. Tento přístup podporuje propojení násobných náhledů, které mohou být vytvořeny s využitím nejrůznějších kombinačních schémat a díky možnosti interakce umožňuje uživateli lépe data pochopit. Vícedimenzionální data lze vyjádřit pomocí sady uspořádaných  $n$ -tic s vlastními atributy (obr.34), nicméně uvedená případová studie se omezuje pouze na uspořádané dvojice v případě křivek a uspořádané trojice, je-li nutno vyjádřit plochu.



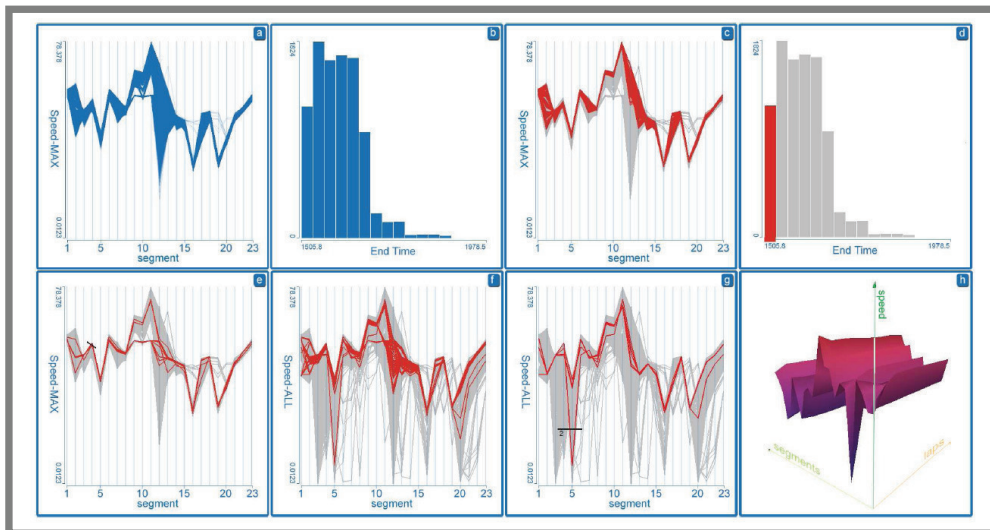
**Obr. 34** Generická uspořádaná  $n$ -tice. Každá položka může být skalár, ale také charakteristika. Datová sada s atributy obsahuje několik uspořádaných sub- $n$ -tic, jejíž součástí je skupina nebo skupiny křivek či povrchů [34]

Příklad, na němž byla metodika prezentována, vychází ze simulace jízdy na závodním okruhu, při které absolvoval stejný jezdec vždy 20 kol. Pro každou jízdu byla pozměněno nastavení některého z prvků (úhel křídla, balanc brzd, max. brzdový tlak, převodové poměry, přední a zadní pružiny), což s ohledem na počet úrovní nastavení jednotlivých prvků tvořilo 9720 kombinací. Trať byla rozdělena na jednotlivé kontrolní body (obr.35), ve kterých byla zaznamenávána rychlost, otáčky motoru, aktuální čas, rychlostní stupeň a maximální rychlost. Dále byl zaznamenán čas nejlepšího kola, celkový čas a úroveň poškození vozu (výstup simulátoru). Datový prostor tedy obsahoval sedm seřizovacích parametrů, tři číselné výstupní parametry a pět výstupních parametrů ve formě funkce  $f=(kolo, segment)$ . Výsledky simulace pak byly podle uvedené funkce zorganizovány do souboru skupiny ploch (obr.36 h). Každá z těchto skupin obsahovala 9720 ploch.



Obr. 35 Zobrazení jednotlivých segmentů závodního okruhu [34]

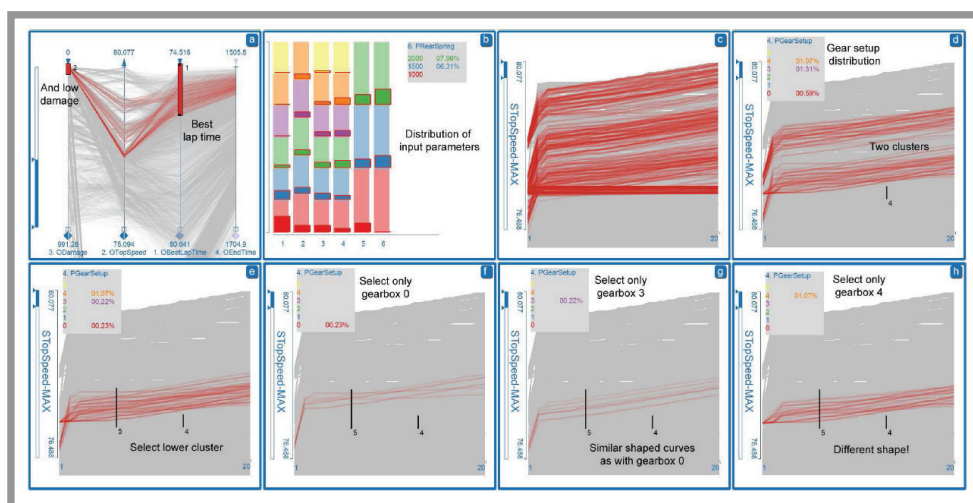
Běžné náhledy dovolují analýzu pouze jednodušších závislostí. Autoři proto k vizualizaci výsledků zvolili metodu paralelních souřadnic, která může napomoci odhalit hlubší souvislosti. Jejím principem je seřazení ortogonálních náhledů jednotlivých ploch do zvolené roviny, takže plochu reprezentuje křivka kopírující zvolené kritéria. V uváděném příkladu byla prvním sledovaným atributem rychlost v jednotlivých sektorech. V tomto případě křivka nahrazující plochu znázorňovala maximální rychlosti dosažené v jednotlivých sektorech během 20 kol. Výsledkem je skupina příbuzných křivek (obr.36 a), kdy pro další analýzu byla vybrána pouze část reprezentující nastavení vozidla s nejkratším celkovým dosaženým časem (obr.36 b - d).



Obr. 36 Interaktivní vizuální analýza příbuzných povrchů prostřednictvím násobných křivek (metoda paralelních souřadnic) [34]

Další analýza byla věnována rozboru maximální rychlosti pro všechny kombinace nastavení v segmentu 4 a hledání možných příčin pro pokles rychlosti v segmentu 5 (obr. 36 e-g). Bylo shledáno, že příliš rychlý průjezd prvním úsekem (4) má za

následek nežádoucí pokles rychlosti v úseku následujícím (5). Jezdec tuto chybu posléze eliminoval změnou způsobu průjezdu touto pasáží.



Obr. 37 Interaktivní vizuální analýza : vyhledávání vozidla jehož nastavení umožňuje dobrý čas na jedno kolo a nízkou úroveň poškození [34]

Poslední analýza pak byla věnována vyhledání nejvhodnějšího nastavení vozidla (převodové poměry, úhel křídla), které dovoluje absolvování jednoho rychlého kola s minimálním poškozením. Postupnými kroky (obr.37) na grafu jehož křivky reprezentovaly kumulativním způsobem max. rychlost v jednotlivých kolech bylo zjištěno, že pozitivní vliv na rychlý čas má vyšší stupeň nastavení křídla a použití převodovky číslo 0&3 (obr. 37 f-g). Převodovka číslo 4 neumožňovala jezdcům výraznější progres v nárůstu rychlosti, což odhalil odlišný tvar křivek (obr.37 h) charakterizující jeho schopnost zrychlovat v jednotlivých kolech.

## Hodnocení článku

- Metodika nabízí poměrně vhodný přístup ke zpracování, analýze a zejména zobrazení vzájemně souvisejících dat. Přínosem je především fakt, že mnohé atributy lze jednoduše vizualizovat, např. výkonost vozidla (rychlost) a provést jejich přímé srovnání.
- Výhodou této metody je možnost zobrazení dat jak pro časovou závislost, tak i pro statistické vyjádření. Její využitelnost je tedy stejná jako u standardní analýzy dat (3.1), kterou takto rozšiřuje o několik dalších benefitů.
- Nevhodná projekce ploch do křivek může přinést ztrátu některých informací nebo zanechat chyby. Vyhodnocení výsledků tedy vyžaduje pečlivé posouzení všech detailů.
- Případová studie je zaměřena pouze na jednoduchou demonstraci možností vizualizačních metod pro analýzu dat v motosportu. Skutečně praktické využití by však vyžadovalo detailní posouzení možností jednotlivých postupů a způsobů vizualizace, tj. zda by dokázali sofistikovaněji definovat

- aktuální výkonnost (jízdni dynamiku) vozu nebo jezdce a poskytnout zpětnou vazbu.
- Autoři v práci uvádí možnost zpracování dat obecného  $n$ -rozměrného pole, nicméně díky komplikovanosti zde příklad neuvádí. Otázkou tedy zůstává zda tento postup bude reálně využitelný a tento problém by tedy vyžadoval rovněž další ověření.

#### 4 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ

Obecné výhody a nevýhody současně používaných způsobů pro analýzu dat a výkonnosti vozu již byly naznačeny v předcházejících kapitolách shrnujících stav poznání v této problematice (3.1, 3.2, 3.3, 3.4). Každá ze zkoumaných metodik se pak vykazuje jistou mírou užitečnosti a nenahraditelnosti v procesu komplexního hodnocení (resp. analýzy dat) výkonnosti závodního vozu či jezdce. Obecně se však dá konstatovat, že inovace v této oblasti která je nepostradatelnou součástí činnosti každého závodního inženýra, zaostává významně za pokrokem jež učinily v posledních letech např. numerické simulace a její deriváty. Lze se domnívat, že důvodem tohoto stavu je především skutečnost související s mohutným rozvojem výkonnosti výpočetní techniky, která dovoluje provádění složitých optimalizací u sofistikovaných matematických modelů závodního vozidla s cennou časovou i finanční úsporou. Výsledkem těchto simulací by měly být výstupy definující ideální „set-up“ vozidla pro konkrétní podmínky závodní tratě, nicméně praxe ukazuje, že v reálném světě má tato idea své nedostatky. Toto je způsobenou značnou variabilitou některých důležitých vstupních parametrů, jejichž hodnoty jsou v matematických modelech mnohdy považovány za konstantní nebo vyjádřeny odhadovanou závislostí resp. zjednodušeným popisem. Příkladem může být chování pneumatik v závislosti na okolních podmínkách (včetně způsobu zatěžování), schopnosti jezdce udržovat nejvhodnější způsob ovládání vozidla, charakteristika tratě resp. povrchu apod. Uvedené problémy jsou pochopitelně obecně velmi dobře známé a během rešeršní činnosti toto zjištění pak také dokumentoval fakt, kdy odborný výzkum a publikační činnost jsou z těchto důvodů výrazně zaměřeny zejména na zdokonalování metod právě těchto numerických simulací (resp. zkvalitnění jejich vstupů), např. [36]. Méně pozornosti je pak už kladeno na procesy vytváření rozsáhlejších funkčních syntéz mezi těmito simulacemi a datovou analýzou. Sofistikovanější analytické metody zpracování reálných dat se proto navrhují především s ohledem na využití při validaci a provozování již vytvořených matematických modelů, což pochopitelně omezuje jejich možnosti při aplikaci u alternativních procesů hodnocení výkonnosti vozidla. Významný vliv má v tomto trendu také využívání CAD a CAE přístupů při prvotním návrhu konceptu vozidla, kde možnost okamžité dosažitelnosti výstupů ze simulací jízdní dynamiky, resp. vzájemné sdílení dat, slouží k rychlejšímu nasměrování procesu vývoje žádoucím směrem. Z uvedených skutečností vyplývá, že samostatná analýza dat s cílem takto posoudit výkonnost vozidla či jezdce přímo na závodní dráze není v současnosti kromě výjimek (např. týmy Formule 1) považována za primární nástroj a její funkce má tedy spíše podpůrný charakter. Také proto zde pravděpodobně existuje jistý konzervativnější přístup při využití množství cenných informací, které jsou výkonné systémy pro datalogging schopné poskytovat. Celkovým zhodnocením poznatků z rešeršní činnosti lze pak tyto skutečnosti shrnout do několika závěrů.

- Postupy, které dokáží komplexněji charakterizovat výkonnost vozidla i jezdce [11] jsou mnohdy velmi těžkopádné a nepraktické pro jednoduchou realizaci. Obecně vyžadují velké časové nároky při zpracování dat a mnohdy samostatné dodatekové měření, které by definovali některou ze specifických charakteristik vozidla. Tento přístup má opodstatnění např. během vývojových testů, kdy existuje dostatečný časový prostor i jasné cíle jaké parametry a v jakém rozsahu je nutno analyzovat. Zjištěné charakteristiky lze

sice mnohdy použít jako klíčovou výchozí informaci pro hodnocení vozidla nebo jezdce i v dalších procesech (jako je například optimalizace výkonnosti pro konkrétní trať resp. podmínky), jejich nevýhodou je však závislost na dané technické konfiguraci vozidla. Při změně některého důležitého prvku kterým mohou být například typ pneumatiky, kinematika zavěšení, rozložení hmotnosti apod. je tedy nutno nadefinovat nové charakteristiky reflektující tuto skutečnost, což vyžaduje opakování procesu základních měření. Řešením pak může být např. vytvoření sady charakteristik pro různé technické konfigurace vozidla jejichž využití připadá v úvahu pro reálnou aplikaci na závodní dráze. Tyto sady již hotových charakteristik mohou v konfrontaci s daty získanými z dataloggeru např. během tréninkových jízd napomoci pochopit závodnímu inženýrovi chování vozidla nebo úroveň výkonnosti jezdce a určit směr dalších úprav pro dosažení požadovaného optima. Nevýhodou tohoto řešení je ale velká časová i finanční náročnost v přípravné fázi, tj. zjištění všech potřebných charakteristik, která odsouvá tento přístup spíše do roviny teoretických úvah. Dalším nedostatkem pak zůstává vliv doplňkových faktorů jako například změna podmínek na trati které nelze dopředu zakalkulovat a na jejichž odchylky nelze s uvedeným přístupem možno dostatečně pružně reagovat. Samotná komplexnost charakteristik navíc může komplikovat proces identifikace detailnějších příčin obtíží se kterými se závodní inženýr setkává při návrhu optimálního nastavení vozidla. Hledání souvislostí proč výkonnost vozidla neodpovídá teoretickým předpokladům tak může vyžadovat opět časově náročnou detailní analýzu dat s dalšími riziky plynoucími z chyb při jejich vyhodnocení.

- Experimentální metody (DOE) [14 -16,20,23] jsou vhodným alternativním přístupem k analýze výkonnosti vozidla pro typy vývojových testů, které je možno absolvovat podle předem připraveného plánu. Protože tyto plány jsou nezbytnou součástí metodiky, není přístup DOE příliš vhodný pro analýzu aktuálních dat získaných např. během časově omezeného tréninku nebo vlastního závodu, kde je organizace experimentu vyloučena. Ačkoliv samotná myšlenka organizovaného testu, resp. přístupu DOE může napomoci lépe zvládnout a vyhodnotit výkonnost vozidla i v limitovaném čase, požadavek na jasné výstupy ve formě přesných a konkrétních informací takto splňovat nedokáže. Jak již bylo zmíněno v rešeršní části, tento handicap lze částečně eliminovat kombinací DOE z některou ze sofistikovanějších metod analýzy dat. To může přinést silný nástroj pro organizaci průběhu a samotné vyhodnocování dat z testů. Nedostatek DOE jež vyplývá z principu statistického vyhodnocování výsledků lze tedy redukovat poznatky z detailnější analýzy, což v konečném důsledku může díky přesnějším informacím udávat operativněji směr dalšího postupu a přinést tímto časovou úsporu. Ta je pak tvořena možností vynechání některého z nadbytečných ověřovacích kroků v původním plánu experimentu. Trvalou nevýhodou však stále zůstává samotná experimentální podstata metody tj. nutnost absolvování alespoň omezeného počtu jízd. Pro případy, kdy je z nejrůznějších důvodů hodnocení výkonnosti vozidla možné pouze z dat resp. měření provedených v jediné samostatné jízdě tak nezbyvá než volba některého z alternativních přístupů.

- Využití metodik analýzy výkonnosti s prvky umělé inteligence [28,29] výrazně omezuje komplikovanost související s návrhem funkčního systému jež pracuje s větším množstvím vstupních parametrů. V reálu lze závodní vůz nastavit pomocí řady seřizovacích prvků a současně je také nutno monitorovat značný počet charakteristik/závislostí definujících jízdní dynamiku vozidla. Náročnost tvorby a provozování takového komplexního systému s ohledem na korektnost výstupů pak může dosahovat úrovně běžných nástrojů pro simulaci. Tento fakt sebou nese nutnost verifikace celého systému s ohledem na jeho dostatečnou robustnost, která by zaručila že výstupní informace nebudou zatíženy chybou. Časové požadavky tohoto procesu jsou úměrné složitosti systému a z tohoto důvodu nemusí být metodika analýz s užitím prvků umělé inteligence dostatečně flexibilním řešením při častých změnách struktury systému. Tyto změny mohou vzniknout jako důsledek konstrukčních úprav na vozidle nebo variability v počtu resp. typu vstupních či sledovaných parametrů. Zvláště druhá varianta je velmi častým případem, kdy například vzhledem k pravidlům existují omezení v počtu senzorů jimiž může být vozidlo osazeno v závodě. Tímto je pochopitelně redukován i počet parametrů které lze takto zaznamenat a dále využít jako vstup pro tvorbu např. rozhodovacích pravidel. Toto je možno vyřešit tvorbou dílčího systému ke každé specifické konfiguraci, čímž se však opět nároky na jejich provozování znásobují. Dostupné studie zabývající se využitím prvků umělé inteligence v procesu analýzy výkonnosti vozidla však bohužel problematiku optimalizace rozsáhlejších aplikací neřeší. Jejich zaměření je cíleno vesměs pouze na návrhy a otestování jednodušších modelů jakožto demonstrativního příkladu správné funkce metodiky, nebo jako identifikace vlivu vstupních parametrů na jednotlivé charakteristiky vozidla za relativně konstantních podmínek. Přínosný by tak v tomto směru nepochybně mohl být další výzkum týkající se možností rozšiřování již publikovaných metodik. S ohledem na časovou náročnost a složitost tohoto tématu je to však otázkou nikoliv pro tuto disertaci, ale pro některou z navazujících prací.
- Využití standardních analytických metod (3.1) je obecně nejrozšířenějším přístupem v praxi. Multivariační analýzy dat [34], které by pak mohly být přirozeným doplňkem těchto základních postupů jsou však podporovány jen ve velmi omezené míře, což se projevuje na nízkém počtu vhodně zpracovaných metodik. Důvodem může být již dříve zmíněný konzervativní přístup ze strany datových analytiků či závodních inženýrů podpořený standardní strukturou komerčně nabízených software pro vyhodnocování dat. Ty jsou navrženy tak, aby jejich výstupy byly srozumitelné i pro laické uživatele, kteří nedokáží plně využít všech výhod jako např. funkce matematických kanálů a preferují jednoduché grafické závislosti několika základních parametrů. Nadměrná komplikovanost se nepříznivě projevuje nejen v pořizovací ceně software, ale také v přehlednosti či uživatelské přívětivosti, což je rovněž jedno z důležitých rozhodovacích kritérií při pořizování produktu. Standardní metody mají taktéž velmi dobrou základnu v dostupné literatuře (např. [1-4]) i odborných kurzech, čímž dále upevňují svoji pozici jako nejpoužívanější přístup k analýze dat zaměřenou na

sportovní vozidla. Protože však lze multivariační analýzu považovat za logické rozšíření standardních metod jež skýtá daleko širší možnosti v hodnocení výkonnosti vozidla nebo jezdce, existuje v této oblasti s ohledem na výše uvedené fakta významný potenciál k vytvoření nové či rozšíření některé ze stávajících metodik. Analytický nástroj s uživatelskými atributy podobnými standardním metodám by tak mohl být velmi vhodným směrem, při zpracování tématu disertace.

- Značná část navrhovaných postupů se vykazuje výraznou mírou nekomplexností, tj. získání úplné informace o výkonnosti vozu/jezdce může buď vyžadovat velký počet analytických kroků nebo aplikace dodatečné analýzy jiného typu. Obojí výrazně prodlužuje čas nutný ke stanovení závěrů. Principem těchto metod je sledovat pouze některé z vybraných parametrů považované jako klíčové pro hodnocení dynamiky vozidla a na jejich základě odhalit možné rezervy v této oblasti. V případě nedostatečných zkušeností závodního inženýra však tento proces nemusí být vždy úspěšný, protože klíčovým faktorem je zde znalost vzájemných vazeb jednotlivých hlavních charakteristik a schopnost na jejich základě určit směr dalšího postupu analýzy. Jako vhodnou analogií z jiné oblasti lze uvést příklad hodnocení výkonnosti akciových trhů pomocí technické analýzy, kdy zkušený finanční analytik dokáže identifikovat možný trend vývoje na základě průběhu pouze omezeného počtu vybraných indikátorů. Laika, jež je nucen opírat své odhady o další analýzy aniž by znal jejich hlubší souvislosti, tak v konečném důsledku může paradoxně vést nadbytek informací k naprosté dezorientaci s vysokým rizikem nesprávných závěrů.
- Některé z postupů (zejména ANN) neslouží primárně k analýze dat a jejich cílem je především identifikace systému tj. závodního vozu, využitelné pro predikci dalšího nastavení. Výstupy těchto metodik proto mohou mít omezenou schopnost poskytovat detailnější informace z hlediska potřeb datové analýzy. Zmíněný nedostatek je daný komplexností informace v důsledku tendence těchto metodik částečně suplovat numerické simulace nebo naopak sloužit přímo jako zdroj jejich vstupů. Řešením by pak mohlo být využití poznatků z již identifikovaného systému k vytvoření vhodných parciálních charakteristik, jež by napomohli odhalit vliv vzájemných vazeb mezi jednotlivými parametry vozidla. Nevýhodou však zůstává nutnost vytvoření charakteristik (resp. provedení nové identifikace systému) při každé zásadnější změně v konstrukci vozidla nebo záměně některé z významných komponent jakým může být např. typ pneumatiky.
- Velmi důležitým prvkem všech analýz je vhodná forma jejich grafického výstupu s ohledem na přirozené a velmi silně rozvinuté vizuálně-kognitivní schopnosti člověka – příjemce informace. Grafy napomáhají odhalit význačné vzory v datech, čímž lze porozumět i velmi komplexním problémům a to zejména u víceparametrických analýz výkonnosti sportovního vozidla. Výsledky rešerše také ukazují, že nutnost vizualizace výsledků respektují prakticky všechny zkoumané analytické přístupy. Při návrhu jakékoliv další metodiky pro analýzu výkonnosti vozidla je tedy na správný způsob grafické interpretace nutno klást velký důraz. Možnost inovace v této oblasti lze hledat zejména ve způsobech vizualizace dat i výsledků. Současná úroveň výpočetní techniky a dostupnost vhodných softwarových produktů pak také

- významně podporuje tento trend praktických aplikací vizualizačních metod v reálném čase včetně efektivních metod jež jsou zpravidla založeny na poměrně náročné kombinatorické optimalizaci.

Na závěr hodnocení je nutno poznamenat, že metody prezentované v hlavní části řešerše nejsou jediné a existuje i mnoho dalších odborných materiálů zaměřených svým obsahem na návrh postupů k obecné analýze technických systémů. Jedná se např. o studie sensitivity [37] nebo stochastické metody [38], které by po drobných úpravách bylo možno aplikovat také pro účely vyhodnocování dat v motosportu. Po prozkoumání všech těchto metodik však bylo konstatováno, že se svým principem (tj.výhody a nevýhody) přibližují nebo jsou již v modifikované formě zahrnuty v některé z hlavních skupin metod jichž se řešerše týkala a dále jim proto nebyla v této práci věnována pozornost.

## 5 VYMEZENÍ CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

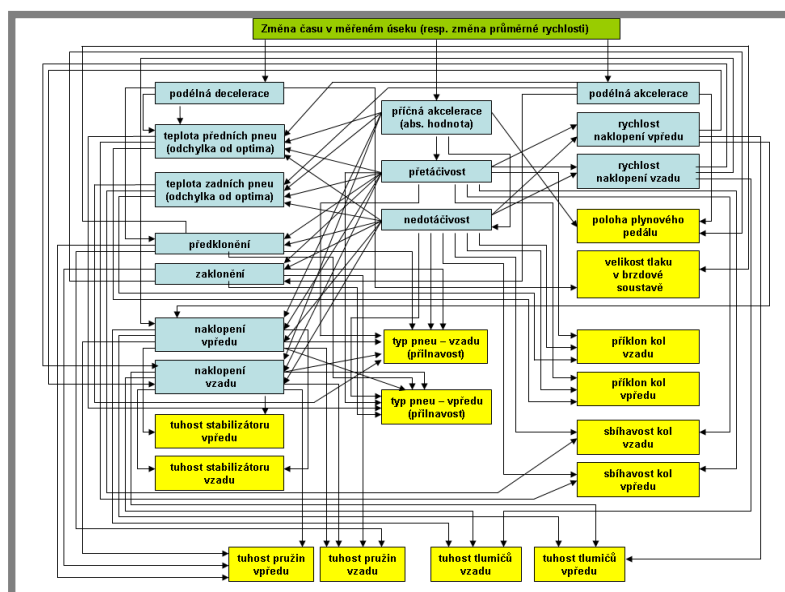
Hlavním tématem disertační práce je návrh vhodné metodiky pro analýzu velkého množství dat ze závodního vozu jejichž charakteristickým prvkem je významná míra jejich vzájemné korelace. Tato analýza by měla sloužit jako pomůcka závodního inženýra v procesu optimalizace výkonnosti vozidla i jezdce v reálném prostředí. Na základě rešeršní činnosti i dalších poznatků získaných z praktických činností při zpracování nebo vyhodnocování dat jízdních zkoušek automobilů i sportovních vozů v uplynulém období pak bylo dále upřesněno původní zaměření práce. Důležitá kritéria resp. cíle navrhované analytické metody lze tedy nyní shrnout do následujících bodů

1. Identifikace hlubších souvislostí vzájemné interakce i individuálního vlivu seřizovacích prvků vozidla s ohledem na definovanou výkonnost vozidla.
2. Analyzovat systém (závodní vůz) a jeho vlastností (výkonnosti) bez nutnosti přesně organizovaných testů, tj. získání přiměřeně kvalitních závěrů i z limitovaného objemu dat.
3. Dosažení časové úspory při provádění analýzy minimalizací počtu nezbytných kroků. Tomuto požadavku by pak nejlépe mohla vyhovovat aplikace některé z metod multivariační analýzy dat, která bude dále rozpracována.
4. Metodika by měla být dostatečně robustní tak, aby se minimalizovaly vlivy nestability prostředí (např. výkonnost jezdce) na dosažené závěry.
5. Jednoznačná vizualizace výstupů usnadňující stanovení závěrů a závislostí při velkém počtu současně analyzovaných parametrů. Toto kritérium je důležitým prvkem celého návrhu.

Na rozdíl od obecně preferovaných požadavků podporovaných filozofií přístupu pomocí numerických simulací, tj. rychlého nalezení optimálního nastavení vozidla, by navrhovaná metodika měla poskytnout uživateli co nejdetailnější informace o funkci a výkonnosti jednotlivých komponentů vozidla ve vztahu k celku. Tato znalost pak může napomoci při budování znalostní databáze, která by mohla eliminovat nezkušenost v důsledku kratší praxe či redukovat čas nutný k rozhodnutí v případě zkušenějšího inženýra.

## 6 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DIZERTAČNÍ PRÁCE

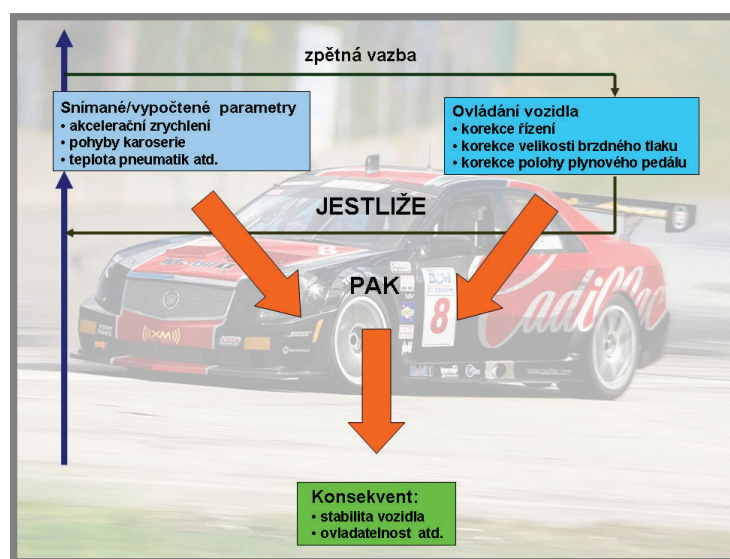
Největší část úsilí byla do současné doby věnována především rešeršní činnosti, jejíž cílem bylo zmapovat co nejrozsáhleji současnou úroveň řešení problematiky a nalezení vhodných způsobů, resp. postupů které by se daly aplikovat při návrhu progresivnější metodiky vyhodnocování dat a výkonnosti sportovních vozidel. Metodiky a postupy které výsledky rešerše zahrnují byly rozděleny do několika základních skupin (3. Shrnutí současného stavu poznání) z nichž každou reprezentují jisté charakteristické atributy. Tyto atributy byly voleny záměrně tak, aby charakterizovali pouze obecně hlavní filozofii přístupu ke zpracování a vyhodnocení dat, což je důležité zejména z důvodů, že mnoho metodik nemá jednoznačný charakter. Srovnávací analýzou byly dále definovány výhody a nevýhody vybraných postupů, včetně posouzení možností jejich kombinace či rozšíření tak, aby zvolené řešení splňovalo předpoklad úspěšného naplnění větší část požadavků, které jsou na ně kladeny. Na základě závěrů těchto srovnání byly dále vytipovány některé hlavní směry ve kterých existuje prostor pro inovativní způsob řešení dané problematiky a následně detailněji specifikovány cíle disertační práce v porovnání s obecně formulovaným zadáním. Důvodem byl mimo jiné fakt, že původním cílem nebylo pouze rozvinutí některé ze stávajících metodik, ale rovněž snaha o navržení kvalitativně odlišného procesu.



Obr. 38 Vyjádření vazeb mezi dynamikou vozidla a prvky seřízení vozidla pomocí síťového grafu.

Součástí rešerše bylo také vytvoření několika obecných studií aplikace síťových grafů (obr.38). Na těchto studiích byla zkoumána opodstatněnost některých přístupů jejichž princip se zdál vhodnými k možnému využití pro komplexní analýzu dat. V této fázi nebylo záměrem vytvoření jednoúčelového funkčního nástroje, nýbrž hlouběji prozkoumat problematiku, možné související obtíže a ověření reálných možností tyto postupy implementovat do konečné metodiky. Důležitým zjištěním

v této souvislosti byl fakt, že i relativně nízký počet seřizovacích prvků vozidla může vytvořit rozsáhlou síť závislostí, což je zřejmé z uvedeného ilustračního obrázku. Její zpracování (systém ohodnocení vazeb) a otestování je pak poměrně hodně časově náročné. Z tohoto důvodu proto bylo v dalším postupu upuštěno od myšlenky rozsáhlejší aplikace síťových grafů resp. jednoduchých forem ANN jako takových. Rozvinutí těchto přístupů však lze považovat za další zajímavou možnost, jež by mohla být vhodným tématem navazujícím na tuto disertační práci. Některé z důležitých poznatků v této oblasti však přesto mohou být rozpracovány již nyní, jako podklad k tvorbě výchozího modelu pro analýzu dat. Jako příklad lze uvést zejména strukturu vazeb základních prvků šasi vozidla (tlumiče, pružiny, pneumatiky) v návaznosti na parametry popisující jízdní dynamiku resp. výkonnost vozidla.

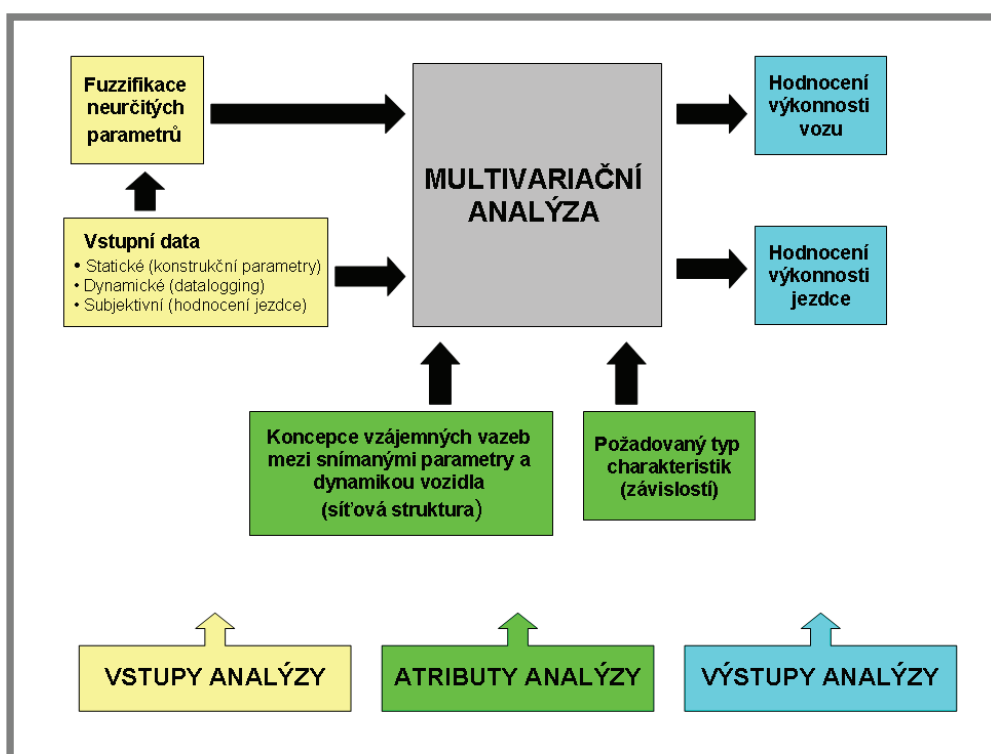


Obr. 39 Znázornění procesu implikace pro posouzení dynamické stability vozidla

Další oblastí ve které byla provedena studie je možnost využití fuzzy logiky (obr.39). Již z rešeršní části [5], [28] vyplývá, že možnost vytvoření charakteristik jež budou vyjadřovat parametry jejichž definice je do značné míry vágní má v analýze jízdní dynamiky vozidla své opodstatnění. Těchto parametrů lze najít nebo vytvořit celou řadu, zejména pokud do procesu evaluace výkonnosti vozu zahrnujeme také hodnocení ze strany jezdce. Další z výhod tohoto přístupu je rovněž fakt, že kombinaci fuzzy charakteristik zahrnujících více vstupů a dalších objektivně měřitelných parametrů vyjadřujících funkci některé z důležitých komponent (např. zdvihy tlumičů) lze považovat za jistý způsob vícedimenzionální analýzy. Sdružením dynamických parametrů jakými mohou být např. příčná a podélná akcelerace, stáčivé zrychlení spolu s parametry ovládání vozidla (korekce řízení, poloha plynového a brzdového pedálu apod.) lze takto vytvořit např. charakteristiku popisující stabilitu vozidla jako jednoho z klíčových prvků hodnocení výkonnosti. Tato charakteristika pak může být součástí dalších funkcí resp. závislostí jejichž cílem je nalezení např. vlivu nastavení některého ze seřizovacích prvků na celkovou

výkonnost vozidla. Uvedené poznatky však bude nutno dále detailněji rozpracovat a výsledky ověřit experimentálním měřením.

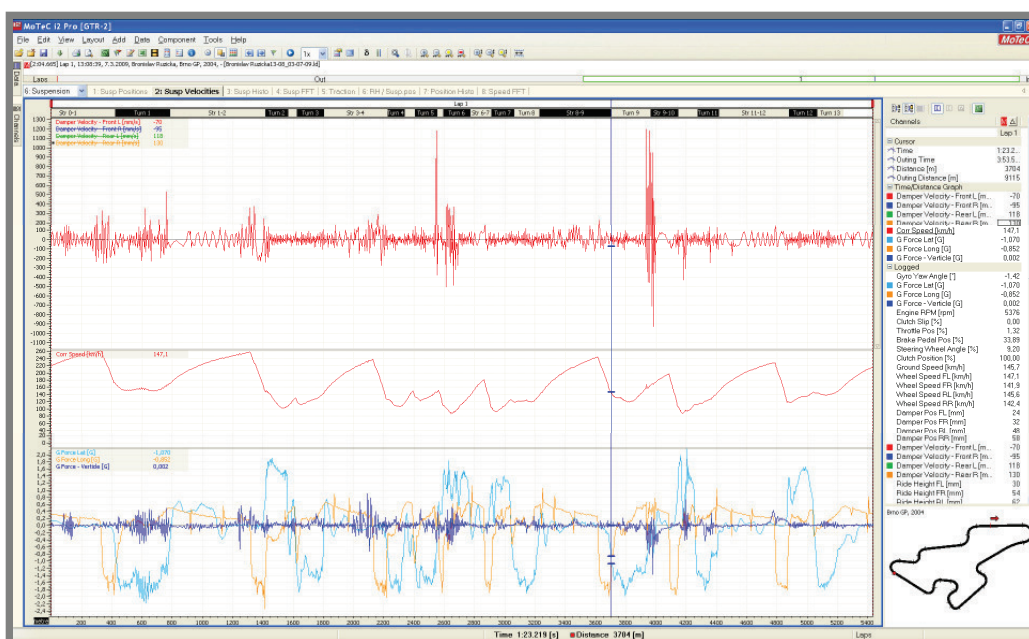
Jak již bylo zmíněno v analytické části tohoto pojednání (4.) , žádný ze současných postupů prozatím nenabízí pokrytí celého spektra výstupů definovaných cílem této práce. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto využít jako základ pro vytvoření komplexnějšího přístupu při zpracování dat právě kombinací výše uvedených přístupů a zahrnout jejich specifické výhody do jedné nejvhodnější metodiky. S ohledem na všechny dosavadní poznatky byla jako integrační prvek vytipována oblast multivariačních analýz, na niž by měly být aplikovány a ověřeny hlavní funkce nebo indikátory charakterizující jízdní dynamiku vozidla. Tuto metodiku pak lze relativně snadno dále rozvíjet vhodnou implementací dalších již zmíněných přístupů (obr.40). Důvodem této volby byla také skutečnost, že využití multivariační analýzy dat v motosportu je zatím relativně málo aplikovaným postupem, což nabízí velmi dobrou příležitost tuto tematiku hlouběji rozpracovat.



Obr. 40 Blokové schéma konceptu rozšířené multivariační analýzy

Optimalizace funkčnosti navrhované metodiky však vyžaduje rovněž provedení celé řady experimentálních měření. Přestože je k dispozici dostatečné množství dat z testů i závodů v reálném prostředí, často není z těchto zdrojů bohužel možné ověřit správnost závěrů analýz aniž by byla provedena následná ověřovací jízda např. s pozměněným nastavením vozidla. S ohledem na skutečnost, že tento interaktivní přístup nezbytně vyžaduje testovací vozidlo, jehož dostupnost se ukázala velmi

problematickou, bylo rozhodnuto v návrhové fázi metodiky využít jako alternativní zdroj dat některý z dostupných závodních simulátorů. Nevýhodnějším se v tomto směru ukázal simulátor *rFactor* vyvinutý společností ISI a jako alternativa byl zvolen simulátor *GTR2* od společnosti SimBin. Důvodem je zejména fakt, že oba závodní simulátory disponují kvalitním fyzikálním modelem, jež poměrně realisticky reprezentuje skutečné vozidlo a zároveň mají integrovanou možnost dataloggingu všech potřebných parametrů. Tato dostupnost záznamu prakticky všech myslitelných charakteristik je ve fázi návrhu metodiky navíc značnou výhodou oproti reálným podmínkám, kdy pořízení senzorů pro pokrytí podobného počtu parametrů vyžaduje nemalé finanční investice.



**Obr. 41** Příklad okna šablony v prostředí *MoTeC i2 Pro* určené k úvodnímu zpracování dat a standardní analýze. Zdroj zobrazených dat – simulátor *GTR2*

V návaznosti na potřeby základního vyhodnocení a zpracování dat z těchto simulátorů pak byl v úvodních krocích v prostředí *MoTeC i2 Pro* také vytvořen a otestován analytický nástroj zahrnující většinu standardních funkcí. Kromě kompatibility se zvolenými simulátory je nezanedbatelnou výhodou prostředí *MoTeC* rovněž schopnost vytvářet a exportovat standardní formáty dat z různých typů kanálů, včetně matematických. Ty budou dále použity jako vstupy do dalších softwarových platform určených pro náročnější analýzy (např. *MATLAB*) resp. sofistikovanější vizualizaci dat. Uvedený nástroj bude dále dle potřeb průběžně rozvíjen a doplňován, kdy hlavní využití je zamýšleno především jako základní platforma k přípravě koncepčních řešení pro nejrozličnější typy multivariačních analýz. Záměrem je rovněž to, aby posloužil k ověřování možností zda některé z navržených typů analytických přístupů lze zpětně implementovat i do stávajících komerčních produktů např. prostřednictvím vytvoření speciálních matematických funkcí.

## **7 ZÁVĚR**

---

**7**

Pojednání ke státní doktorské zkoušce se zabývalo kritickým zhodnocením současného stavu v oblasti metodik a postupů pro analýzu výkonnosti vozidla i jezdce v motoristickém sportu. Ze získaných poznatků byly dále upřesněny cíle disertační práce tak, aby výsledkem byla vhodná metodika aplikovatelná nejen pro specifické účely motorsportu, ale také pro posuzování funkce nebo výkonnosti i dalších technických systémů. S ohledem na potřeby vyhodnocovat především úroveň a míru vzájemné interakce mnoha parametrů ovlivňujících jízdní dynamiku pak byl z širšího spektra možností zvolen postup využití technik multivariační analýzy. Z provedených srovnání vyplývá, že principy těchto technik splňují nejlépe většinu požadavků a při zvažované kombinaci s dalšími metodikami jejich aplikace dává předpoklad úspěšného splnění cílů disertační práce.

**8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

- [1] SEGERS J., „*Analysis Techniques for Racecar Data Acquisition*“, SAE International, 2008, 198 pp, ISBN: 978-0-7680-1655-0
- [2] McBEATH S., „*Competition Car Data Logging*“, Haynes Publishing, 2002, 160 pp., ISBN: 185960 6539
- [3] FEY B., „*Data Power: Using Racecar Data Acquisition*“, Towery Publishing, Inc., 1997, 176pp, ISBN: 1881096017
- [4] TEMPLEMAN G., „*The Competition Car Data Logging Manual*“, Veloce Publishing Plc, 2008, 128 pp, ISBN-13: 9781845841621
- [5] VADURI S, J. „*Development of Computer Tools for Analysis of Track Test Data and for Prediction of Dynamic Handling Response for Winston Cup Cars*“, Ph.D. Dissertation, Dept. Of Mechanical Engineering, Clemson University, Clemson, 1999
- [6] VADURI S., LAW E.H., „*Development of an Expert System for the Analysis of Track Test Data*“, SAE Transactions, 2000, vol. 109, n<sup>o</sup>6, pp. 2086-209, ISSN 0096-736X
- [7] MARTIN B.T, LAW E.H., „*Development of an Expert System for Race Car Driver & Chassis Diagnostic*“, SAE 2002 Automotive Dynamics & Stability Conference and Exhibition , Paper Number: 2002-01-1574, DOI: 10.4271/2002-01-1574
- [8] GULLEY. N, JANG J.S.R., „*Fuzzy Logic Toolbox User's Guide*“, The Math Works, Inc., Natick, MA, 1995
- [9] MITCHELL C., UNGER M., SCHROER R.,GRISEZ D.B.,„*Training Test Drivers with Data Acquisition*“, SAE 2000 Motorsports Engineering Conference & Exposition, Paper Number: 2000-01-3568, DOI: 10.4271/2000-01-3568
- [10] REPLOGLE D.L.,„*A Model Driven Approach to Racecar Data Acquisition*“, SAE 1994 Motorsports Engineering Conference & Exposition, Paper Number: 942483, DOI: 10.4271/942483
- [11] MILLIKEN W.F., WRIGHT P., MILLIKEN D.L.,„*Moment Method – A Comprehensive Tool for Race Car Development*“, SAE 1994 Motorsports Engineering Conference & Exposition, Paper Number: 942538, DOI: 10.4271/942538
- [12] MILLIKEN W.F., MILLIKEN D.L.,„*Race Car Vehicle Dynamics*“, SAE International, 1995, 892 pp, ISBN: 1-56091-526-9
- [13] MONTGOMERY D.C.,„*Design and Analysis of Experiment*“, John Wiley & Sons, New York, NY, 2005, 638 pp, ISBN: 0-471-48735-X
- [14] HILL J., „*Design of Experiment - Test of Time*“, Racecar Engineering, October 2001, vol. 11, no. 10, s. 57-62.
- [15] HILL J., „*Design of Experiment - Mind Games*“, Racecar Engineering, November 2001, vol. 11, no. 11, s. 74-80.
- [16] HILL J., „*Design of Experiment – Learning curve*“, Racecar Engineering, December 2001, vol. 11, no. 12, s. 65-70.
- [17] KOWALSKI S.,LANDMAN D., SIMPSON J., „*Design of Experiments Enhances Race Car Performance*“, Scientific Computing & Instrumentation, June 2003, vol. 4, no. 6, s. 21-22.

- [18] BYAM B., COPPENS G., DISSETE M., JANSON K., McCLAIN J., RUEDIGER J., ZETTEL B. „*Formula SAE Design, Test, Tune, and Setup: A Design of Experiment Approach*“, SAE 2003 World Congress & Exhibition, Paper Number: 2003-01-1320, DOI: 10.4271/2003-01-1320
- [19] RENDON C. "Design of Experiments in Racing“, Dostupné z URL: <<http://www.statease.com/pubs/doiinracing.pdf>> , [cit. 2011-05-04]
- [20] THEANDER A. "Design of a Suspension for a Formula Student Race Car” MSc. Thesis, Dept. of Aeronautical and Vehicle Engineering, KTH, Stockholm, 2004, s. 46-61
- [21] ANDERSON M., "Design of Experiments.” The Industrial Physicist. Sept. 1997, vol. 3, no. 3, s. 24-26
- [22] KHAN S.S., „*Analysis of Simulation Techniques & Taguchi Methods as Applied to Optimise the Setup of a Formula 3 Race Car*”, MSc. Thesis, School of Applied Sciences, Cranfield University, Cranfield, 2007
- [23] STEVENS G., PETERSON D., EICHHORN U. "Optimization of Vehicle Dynamics Through Statistically Designed Experiments on Analytical Vehicle Models“, 1997 European ADAMS Users' Conference (12th), Dostupné z URL: <[http://www.mscsoftware.com/support/library/conf/adams/uc97\\_papers.cfm](http://www.mscsoftware.com/support/library/conf/adams/uc97_papers.cfm)> , [cit. 2011-05-04]
- [24] BISHOP L., FREDRIKSSON D. "Response Surface Methodology (RSM) and Design of Experiments (DOE) Applied to Racecar Vehicle Dynamics Simulation and Development“, 2000 North America ADAMS Users' Conference , Dostupné z URL: <[http://www.mscsoftware.com/support/library/conf/adams/na/2000/na00\\_day2.cfm](http://www.mscsoftware.com/support/library/conf/adams/na/2000/na00_day2.cfm)> , [cit. 2011-05-04]
- [25] AL-TAANI A.T. "An Expert System for Car Failure Diagnosis“, Transaction on Engineering, Computing and Technology V7, August 2005, s 457-460, ISSN 1305-5313
- [26] SUCHAR R., SCHALLING B., CIOCOIU I., BREZULIANU A., BONCIU C. "Noise Analysis and Modeling with Neural Network and Genetic“, Proceedings of 2000 FISITA - World Automotive Congress. Seoul: Korea Society of Automotive Engineers 2000. 5 s. ISBN 89-85000-00-4 [CD-ROM]
- [27] ANDERSON J.R. „*Fuzzy Logic Approach to Vehicle Stability Control*“, MSc Thesis, Dept. Of Mechanical Engineering, Clemson University, Clemson, 2010
- [28] ANTONINI P., CORRADINI M.L., IPPOLITI G., LONGHI S., STRONATI C., "Race car performance evaluation by a Neuro-Fuzzy Inference System“, American Control Conference 2006, 6 pp., ISBN: 1-4244-0209-3, E-ISBN: 1-4244-0210-7
- [29] BUTTLER V., KARRI V. "Race Car Chassis Tuning Using Artificial Neural Networks“, AI 2003: Advances in Artificial Intelligence, Springer-Verlag Berlin Heidelberg , 2003, s. 866-877, ISBN 3-540-20646-9
- [30] ABDULRAHIN M., „*On the Dynamics of Automobile Drifting*“, SAE 2006 World Congress & Exhibition, Paper Number: 2006-01-1019, DOI: 10.4271/2006-01-1019
- [31] MILITKÝ J., MELOUN M. "Analýza vícerozměrných dat“, Sborník přednášek z konference Zajištění kvality analytických výsledků, 2004, s.19-28, ISBN 80-86380-22-X

- [32] PEREDA E, QUIROGA R.Q.,BHATTACHARIA J. "*Nonlinear multivariate analysis of neurophysiological signals*", Progress in Neurobiology, 2005, vol. 77, no. 1-2, s. 1-37, ISSN: 0301-0082
- [33] PLAŠIL M., VLACH P. "J.,MELOUN M. "*Grafická analýza vícerozměrných dat* ", Acta Oeconomica Pragensia, 2007, roč. 15, č. 1, s. 97-113. ISSN 0572-3043
- [34] MATKOVIC K., GRAČANIN D., SPLECHTNA R., HAUSER H. " *Interactive Visual Analysis of Families of Surfaces: An Application to Car Race and Car Setup* ", Proceedings of EuroVAST 2010, pp. 1-7.
- [35] AIGNER W., MIKSCH S., MÜLLER W., SCHUMANN H., TOMINSKI C. „*Visual methods for analyzing timeoriented Data*“, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics ,2008, vol. 14, no. 1, p. 47–60.
- [36] BLUNDEL M.V., HARTY D. „*The Multibody Systems Approach to Vehicle Dynamics*“, ELSEVIER Butterworth-Heinemann, 2004, pp. 550, ISBN 10: 0-7506-5112-1
- [37] HEE G.L.,CHONG J.W., JUNG W.K.,„*Design Sensitivity Analysis and Optimization of McPherson Suspension Systems*“, Proceedings of the WCE, 2009 ,Vol II, p. 1532-1537, ISBN:978-988-18210-1-0
- [38] AVALLE M.,BELINGARDI A.I., KAYVANTASH K.,DELCROIX F. „*Stochastic Crash Analysis of Vehicle Models for Sensitivity Analysis and Optimization* “, In Proceedings of the 20th ESV Conference , 2008, p. 7-10, Paper No. 07-0335

## SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

<b>Obr.1</b> Optimalizační přístupy v praxi .....	7
<b>Obr.2</b> Příklad grafického uspořádání pro vizualizaci a vyhodnocení dat u analytického software MoTec (rychlost vozidla – nahoře, poloha akceleračního pedálu – uprostřed, ..... příčné a podélné zrychlení – dole).....	9
<b>Obr.3</b> Příklad vstupní (korekce řízení, pokles příčného zrychlení) a výstupní (míra přetáčivosti) členské funkce – MF [5].....	11
<b>Obr.4</b> Indikátory přetáčivého chování vozidla v datech získaných na závodní trati [6] .....	11
<b>Obr.5</b> Vývojový diagram logiky pro identifikaci případu nedotáčivého chování vozidla [6].....	12
<b>Obr.6</b> Profil podélného zrychlení pro optimální (nahore) a nesprávnou volbu řadících otáček [7] .....	13
<b>Obr.7</b> Zobrazení indikátoru „excess steer angle“ pro dvě navazující zatáčky. Vyznačeny jsou moment ukazující na přetáčivost vozidla při výjezdu ze zatáčky (F) a přílišná sensitivita na drobnou korekci řízení (E) v přímém směru [10].....	15
<b>Obr.8</b> Modifikovaný „stability index“ dokáže identifikovat drobný pokles v rovnováze vozidla (G) v zatáčce 1 a přetáčivé chování (H) na výjezdu ze zatáčky 2 [10] .....	16
<b>Obr. 9</b> Základní silově-momentový diagram vyjadřující závislost příčného zrychlení vozidla ( $A_y$ ), stáčivého momentu (N) pro různé hodnoty směrové úchylnosti vozidla ( $\beta$ ) a úhlu natočení volantu ( $\delta$ ) pro normální zatížení a rychlost vozidla 225 kph [11] .....	18
<b>Obr.10</b> Grafické znázornění využití potenciálu jednotlivých pneumatik při zatáčení v rychlosti 160 kph [11] .....	18
<b>Obr.11</b> „Diagram g-g“ pro zobrazení skutečné hodnoty příčného zrychlení ( $A_y$ ) současně s podélným zrychlením ( $A_x$ ) při průjezdu šikanou rychlostí 220 kph (vlevo) a zatáčkou rychlostí 200 kph. Kroužek v grafu označuje limitní hranici stanovenou pomocí MMM [11].....	19
<b>Obr.12</b> Silově momentový diagram pro průjezd zatáčkou s nerovností rychlostí 200 kph. Změna svislého zatížení kol způsobené nedostatkem aerodynamického prvku při poklesnutí příďe (vlevo) způsobuje větší ztrátu ovladatelnosti než je tomu v případě nazvednuté příďe (vpravo). Skutečné příčné zrychlení vozidla získané z dat je označeno v grafu kroužkem [11] .....	20
<b>Obr.13</b> Obecný model procesu nebo systému [13].....	21
<b>Obr.14</b> Úroveň nastavení faktoru vs. čas měřeného kola [13] .....	23
<b>Obr.15</b> Procesní mapa pro přípravu experimentu k nalezení optimálního nastavení vozidla pro kvalifikační jízdy [14] .....	24
<b>Obr.16</b> $2^{8-4}$ neúplný faktorový plán pro osm nastavovacích parametrů podvozku ve dvou úrovních – maximum (+) a minimum (-) [15].....	25
<b>Obr.17</b> Grafické znázornění individuálního vlivu jednotlivých faktorů [15].....	25
<b>Obr.18</b> Citlivost na velikost útlumu pro stlačení tlumičů přední nápravy při akceleračním testu (minimální vliv) [18] .....	27

<b>Obr.19</b> Citlivost na velikost tlaku pneumatik zadní nápravy při akceleračním testu (maximální vliv) [18].....	27
<b>Obr.20</b> Hodnocení citlivosti interakce předního a zadního stabilizátoru [18].....	28
<b>Obr.21</b> Hodnocení citlivosti interakce záklonu rejdového čepu a příklonu předního kola [18].....	28
<b>Obr.22</b> L8 ortogonální soustava úrovně V. [20].....	30
<b>Obr.23</b> Parametry zavěšení přední nápravy použité pro studii [20].....	30
<b>Obr.24</b> Příklad studie vlivů změny parametrů a jejich vzájemné interakce (nahore) na základní charakteristiku změny příklonu kola přední nápravy při naklápění vozu (dole) [20].....	31
<b>Obr.25</b> Příklad plochy odezvy (naklopení vozu) pro dva faktory (tuhost pružiny, poloha uchycení spodního ramene nápravy) [23].....	33
<b>Obr.26</b> Pareto graf pro DOE screening zaměřený na odezvu vozidla [23].....	33
<b>Obr.27</b> Graf reziduí pro RSM experiment. Rovnoměrný rozptyl je charakteristický pro správně navržený experiment i model plochy odezvy [23].....	34
<b>Obr.28</b> Takagi-Sugeno-Kang Fuzzy Inference System [28].....	37
<b>Obr.29</b> Trojúhelníkové funkce příslušnosti definované tuhostí pružin a stabilizátorů [28].....	37
<b>Obr.30</b> Snížení tuhosti vzadu (vlevo) nebo naopak zvýšení tuhosti pružin vpředu (vpravo) o 100 N/m oproti původnímu nastavení dovoluje zkracovat odezvu vozidla na natočení volantu pomocí tuhostí stabilizátorů [28].....	38
<b>Obr.31</b> Architektura vícevrstvé dopředné ANN [29].....	39
<b>Obr.32</b> ANN model použitý pro analýzu [29].....	40
<b>Obr.33</b> Analýza důležitosti vstupních parametrů pro ANN [29].....	40
<b>Obr.34</b> Generická uspořádaná n-tice. Každá položka může být skalár, ale také charakteristika. Datová sada s atributy obsahuje několik uspořádaných sub n-tic jejíž součástí je skupina nebo skupiny křivek či povrchů [34].....	43
<b>Obr.35</b> Zobrazení jednotlivých segmentů závodního okruhu [34].....	44
<b>Obr.36</b> Interaktivní vizuální analýza příbuzných povrchů prostřednictvím násobných křivek (metoda paralelních souřadnic) [34].....	44
<b>Obr.37</b> Interaktivní vizuální analýza : vyhledávání vozidla jehož nastavení umožňuje dobrý čas na jedno kolo a nízkou úroveň poškození [34].....	45
<b>Obr.38</b> Vyjádření vazeb mezi dynamikou vozidla a prvky seřízení vozidla pomocí síťového grafu.....	53
<b>Obr.39</b> Znázornění procesu implikace pro posouzení dynamické stability vozidla	54
<b>Obr.40</b> Blokové schéma konceptu rozšířené multivariační analýzy.....	55
<b>Obr.41</b> Příklad okna šablony v prostředí <i>MoTeC i2 Pro</i> určené k úvodnímu zpracování dat a standardní analýze. Zdroj zobrazených dat – simulátor <i>GTR2</i> ....	56

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

---

$a_x$ [m.s <sup>-2</sup> ]	- příčné zrychlení vozidla
$\alpha_F$ [rad]	- směrová úchylka přední nápravy
$\alpha_R$ [rad]	- směrová úchylka zadní nápravy
$\beta$ [rad]	- směrová úchylka těžiště vozidla
$\delta$ [rad]	- úhel natočení volantu
$CG$	- těžiště vozidla
$f_n$	- faktor (DOE)
$g$ [m.s <sup>-2</sup> ]	- tíhové zrychlení
$N$ [N.m]	- stáčivý moment vozidla
$K_{us}$	- koeficient neotáčivosti
$l$ [m]	- rozvor vozidla
$R$	- odezva systému (DOE)
$T$ [s]	- čas dosažený v měřeném úseku
$x_n$	- nastavení seřizovatelného prvku vozidla
$v$ [m.s <sup>-1</sup> ]	- rychlost vozidla





