

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 742

ISSN 1213-4198

thesis
IS

Ing. Bronislav Růžička

**Analytické metody
v motorsportu**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

Ing. Bronislav Růžička

ANALYTICKÉ METODY V MOTORSPORTU

ANALYTICAL METHODS IN MOTORSPORT

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Konstrukční a procesní inženýrství
Školitel: doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.
Oponenti: Ing. Aleš Dočkal, Ph.D.
Ing. Václav Čejka, Ph.D.
doc. Ing. Zdeněk Karpíšek, CSc.
Datum obhajoby: 12. listopadu 2013

Klíčová slova:

Vícedimenzionální analýza dat, obecný regresní model, motorsport, jízdní dynamika vozidla, nastavení vozidla.

Keywords

Multidimensional data analyze, general regression model, motorsport, vehicle dynamics, car setup.

Místo uložení práce:

Oddělení pro vědu a výzkum FSI VUT v Brně.

© Bronislav Růžička, 2013

ISBN 978-80-214-4969-5

ISSN 1213-4198

OBSAH

1 ÚVOD.....	5
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	6
2.1 Standartní datové analýzy.....	6
2.1.1 <i>Expertní systémy</i>	6
2.1.2 <i>Analytické modely</i>	7
2.1.3 <i>Speciální metody</i>	8
2.2 Metody řízeného experimentu.....	9
2.2.1 <i>Plné a částečné faktorové plány</i>	9
2.2.2 <i>Taguchiho metoda</i>	10
2.2.3 <i>Metoda plochy odezvy (RSM)</i>	11
2.3 Využití prvků umělé inteligence.....	11
2.3.1 <i>Neuro-Fuzzy Interference Systém (ANFIS)</i>	12
2.3.2 <i>Aplikace neuronových sítí (ANN)</i>	13
2.4 Vícerozměrná analýza dat.....	14
3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	16
4 METODICKÝ PŘÍSTUP K ŘEŠENÍ.....	17
4.1 Analýza a výběr vhodného typu metody.....	17
4.2 Aplikace regresního modelu.....	18
4.3 Transformace parametrů nastavení.....	19
4.3.1 <i>Nastavení svornosti diferenciálu</i>	20
4.3.2 <i>Změna světlé výšky</i>	20
4.3.3 <i>Změna tuhosti stabilizátoru</i>	21
4.3.4 <i>Změna tuhosti pružin</i>	22
4.4 Příprava a zpracování naměřených dat.....	23
5 ANALÝZA A INTERPRETACE VÝSLEDKŮ.....	24
5.1 Test okruh Zeltweg & Sport car.....	24
5.2 Test okruh Zandvoort & Sport car.....	25
5.3 Test okruh Zelweg & ETCC car.....	26
6 ZÁVĚR.....	27
LITERATURA.....	28
CURRICULUM VITAE.....	30
ABSTRACT.....	31

1 ÚVOD

Jednou z hlavních charakteristik motoristického sportu je jeho výrazný technický aspekt, který se nezanedbatelně promítá do celkového výsledku. Značná závislost mezi dosaženým výsledkem a výkonností 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 souhrnu kvalit zajišťujících absolvování měřeného úseku v co nejkratším čase je výchozím bodem pro další efektivní úpravy nastavení a trvalou 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 složitější. A to zejména 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 neexistuje univerzální postup, který by zaručil správnost analýzy získaných výstupů, je velmi obtížné navrhovat vhodnou komplexní metodiku. Jedním z možných řešení je proces vytváření syntézy aplikací již osvědčených přístupů (užívaných nejen v motosportu) tak, aby narostla efektivnost v procesu získávání klíčových informací za současného snížení nároku na celkový čas řešení.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Každý z postupů či metodik analýz používaných v současnosti má jiný stupeň vypovídací schopnosti a její kvalitativní úroveň tak do značné míry závisí právě na této vlastnosti. S obecných požadavků kladených na analýzu chování závodního vozidla vyplývá, že její výstupy nemohou být pouhým konstatováním momentálního stavu, nýbrž musí přinášet také konstruktivní závěr ve smyslu konkrétních informací definujících další směr pro úpravy vedoucích ke zvýšení výkonnosti. To vede k využívání nejrůznějších postupů, jejichž volba je na uvážení a zkušenostech (případně technologickém vybavení) jednotlivých vývojových inženýrů. Přestože zde existují individuální rozdíly, lze tyto přístupy však ve většině případů obecně shrnout a zařadit pak do několika základních skupin.

2.1 STANDARTNÍ DATOVÉ ANALÝZY

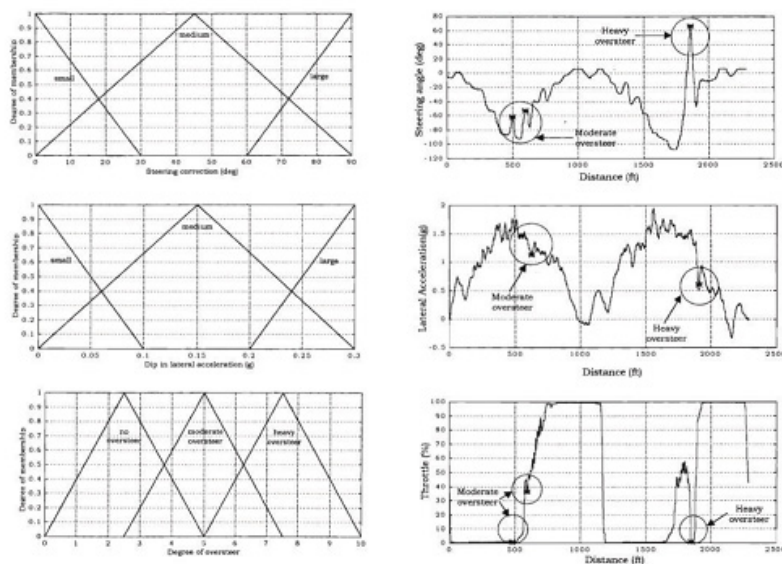
Nejběžnější a nejrozšířenější metodou analýzy výkonnosti závodního vozu je zobrazení a vyhodnocení průběhu sledovaných parametrů v daném časovém úseku. Většina uvedených standardních technik a postupů takovéto analýzy dat je popsáno v odborné literatuře [1], [2], [3], [4] a jejich využití lze najít také jako podpurný prvek sofistikovanějších metodik. Přestože se jedná o velmi rozšířený přístup, existují zde jisté nevýhody.

- Limitujícím faktorem pro vizualizaci závislostí mezi jednotlivými parametry je omezení na dvě nezávislé proměnné tj. $z = f(x,y)$ v jednom analytickém kroku.
- Zobrazené data nezahrnují 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 nízké výkonnosti.
- Časová náročnost při základním zpracování odpovídajících výstupu z dat.

Z uvedených důvodů se tedy tyto metodiky často kombinují s dalšími postupy tak, aby bylo dosaženo maximální efektivity při posouzení aktuální výkonnosti.

2.1.1 Expertní systémy

Sofistikovanější identifikací některých hlavních charakteristik popisujících výkonnost, resp. ovladatelnost závodního vozu na základě definovaných vstupů, kterými jsou příčné zrychlení vozidla, úhel natočení volantů a poloha akceleračního pedálu se ve svých studiích zabývají Vaduri, Law a Martin [5], [6], [7]. Hodnoty jsou zaznamenány pro oblast nájezdu, střední části a výjezdu ze zatáčky za účelem hodnocení nedotáčivosti vozidla. Uvedené signály pak prochází sérií konvenčních logických rozhodovacích kroků, které napomáhají identifikovat specifické vzory,



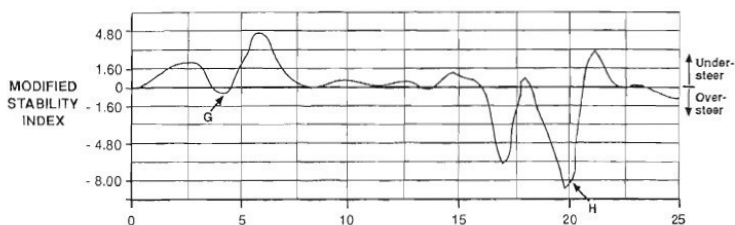
Obr. 2.1 Aplikace fuzzy logiky (vlevo) pro indikaci přetáčivého chování vozidla (vpravo)

odpovídající jednotlivým situacím souvisejícími s ovladatelností vozidla. Součástí tohoto procesu je i využití fuzzy logiky. Pro hodnocení stability vozidla při jízdě v zatáčce je považován limitní stav nazývaný jako finální přetáčivost či nedotáčivost, kdy dochází k překročení nejvyšší dosažitelné příčné síly, kterou jsou pneumatiky odpovídající nápravy schopny přenášet. Na příkladu přetáčivého chování jsou u reálných dat (obr. 2.1) demonstrovány charakteristické indikátory naznačující překročení hranice mezi ustáleným stavem zatáčení a nestabilitou vozidla. Tyto upravené signály slouží pro vytvoření členských funkcí jako vstupních hodnot pro fuzzy logiku reprezentovanou Fuzzy Inference Systémem (FIS). Výstupní hodnotou je pak stupeň míry přetáčivosti. Pro hodnocení nedotáčivosti se používá podobný proces resp. struktura algoritmu jako v případě hodnocení přetáčivosti vozidla. Výše uvedený postup zaměřený především na klíčové parametry charakterizující výkonnost resp. stabilitu vozidla pak Martin a Law ve své další práci [8] rozšiřují i o některé aspekty analýzy výkonnosti jezdce.

2.1.2 Analytické modely

Skupinu témat týkajících se návrhu jednoduchých rozhodovacích modelů pro zpracování dat z dataloggeru při rozboru jízdní dynamiky závodního vozidla reprezentuje svojí práci např. Replogle [8]. Jsou zde diskutovány postupy pro hodnocení stability vozidla v zatáčce (přetáčivost / nedotáčivost) a jako první možný přístup je zde navrhován indikátor nazvaný *steering per g*, který vyjadřuje podíl úhlu natočení a příčného zrychlení. Nedostatkem tohoto indikátoru je však 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* jejímž principem je rozdíl mezi skutečnou hodnotou natočení volantu a hodnotou která odpovídá poloměru zatáčky za předpokladu nulového skluzu řízené nápravy.

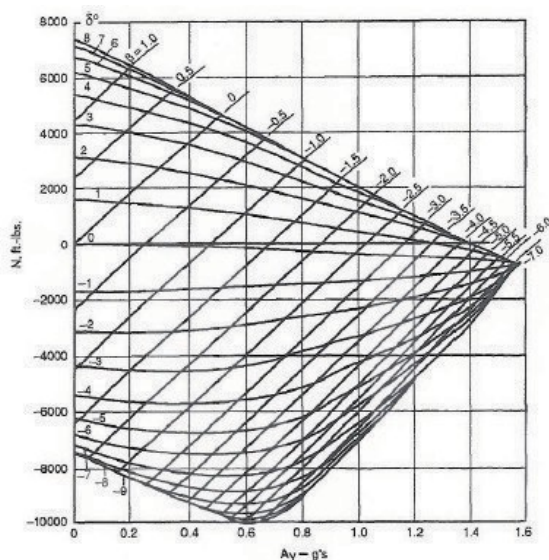


Obr. 2.2 Modifikovaný „stability index“ vyjádřený na časové ose

Jako alternativní přístup je pak navržen algoritmus porovnávající derivace směrových úchylek přední a zadní nápravy ve vztahu k příčnému zrychlení vozidla pojmenovaný jako *stability index*. Správná interpretace jednotlivých hodnotících kritérií u těchto typů analýz však vyžaduje jisté zkušenosti s analýzou jízdní dynamiky závodního vozidla a využití je tedy omezeno tímto faktorem.

2.1.3 Speciální metody

Při analýze výkonnosti vozidla je možno v praxi narazit i na některé specifické přístupy, do kterých lze jako příklad zařadit *MRA Moment Method (MMM)*, jejímž autorem je Milliken [9].



Obr. 2.3 Základní silově-momentový diagram

Jedná se o techniku pro analýzu a grafické zobrazení stability a ovladatelnosti vozidla principiálně analogickou postupu využívaného v leteckém průmyslu. 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. Výstupem výše uvedeného testu je tzv. silově-momentový diagram (obr 2.3), jenž je podkladem pro pozdější analýzy prováděné s daty získaných během jízdni zkoušky vozidla. Metodika jako taková i přesto, že ji nelze považovat za úplně klasický postup pro analýzu dat, však ukazuje poměrně vysokou účinnost pro hodnocení stability vozidla i výkonnosti jezdce přímo na závodní dráze. Zásadní nevýhodou je ovšem relativně vysoká komplikovanost při zajišťování vstupních dat a nutnost modifikovat silově-momentový diagram pro každou změnu podmínek. Vlastní operativní využití je tedy tímto faktem významně limitováno.

2.2 METODY ŘÍZENÉHO EXPERIMENTU

Jedním z významných 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, které nemusí mít jednotnou metodiku, významnou roli v tomto směru hraje především proces známý jako *Design of Experiment (DOE)* [10]. Důvodem je zejména fakt, že se jedná o velmi propracovaný přístup relativně snadno aplikovatelný a to nejen v oblasti automobilového průmyslu. Reálné testy ale mnohdy naráží na časová (a finanční) omezení, čímž je nutno proces DOE dále zjednodušovat a při malých zkušenostech s engineeringem závodního vozu může výběr nevhodných faktorů způsobit značný pokles účinnosti metody. Snižování počtu regulovatelných faktorů přináší rovněž praktický problém s vlastní interpretací výstupů tak, aby nedocházelo k mylným závěrům a následně chybným rozhodnutím při nastavení vozidla. Trvalou nevýhodou zůstává i charakter metody, u které chybí jistá návaznost výstupů na detailní analýzu v časové ose a přímé srovnání vlastností (trendů) vybraných parametrů, jež může přinést další důležité poznatky. Pro komplexní hodnocení je tedy nutno často kombinovat experimentální postupy se separátně prováděnými výše uvedenými metodami standardních analýz, což v konečném důsledku zvyšuje časovou i kapacitní náročnost procesu. V reálných aplikacích je možno setkat se některými z následujících postupů.

2.2.1 Plné a částečné faktorové plány

Během přípravy testu je nutno pro tento typ experimentu vytvořit matici, kterou představuje kombinace vybraných nastavovacích prvků, u nichž byl předpoklad významnějšího vlivu na výkonnost vozidla. Každému prvku (faktoriálu) bývají běžně přiřazeny dvě hladiny úrovně nastavení. (min/max). S ohledem na maximální přesnost výsledku je ideální využití 2^k úplného faktorového plánu,

nicméně s ohledem na časovou náročnost (počet jízd) při větším počtu prvků nastavení bývá spíše preferován neúplný faktorový plán. Jeho hlavní nevýhodou je však možnost ztráty některých důležitých informací. Na příkladu (obr. 2.4) je pak demonstrován 2^{8-4} neúplný faktorový plán, který zahrnuje osm nastavovacích prvků závodního vozu s předpokladem, čtyřech neoddělitelných (aliases) efektů.

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

Obr. 2.4 Nastavení faktorů ovlivňujících dosažený čas pro dvě úrovně – maximum (+) a minimum (-) [11]

Ze zkušeností [11], [12] vyplývá, že pro dosažení co nejobjektivnějších závěrů by celková analýza výsledku experimentu měla proběhnout na třech úrovních - praktický, grafický a analytický. Každý z těchto, přístupů má své opodstatnění a jejich kombinací by měly být eliminovány nedostatky způsobené nedokonalostí experimentálního plánu. Aplikace nižších řádu významně snižuje přesnost a proto je lépe při větším počtu parametru vhodnější jejich rozdělení do více experimentu podle plného faktorového plánu. Doporučení se týká rovněž zahájení testů s parametry, jejichž srozumitelnost je nejnižší a kombinovat navzájem ty, jejichž interakce je velmi vysoká.

2.2.2 Taguchiho metoda

Jednou z poměrně často používaných experimentálních metod je i tzv. *Taguchiho metoda*. Výstupem z ní je soubor studií pomocí nichž je analyzována míra vzájemné interakce jednotlivých parametru. Její aplikací se ve své práci zabývá také Theander [13] v pasáži věnované studii vlivu změny několika základních parametru, jejichž vzájemná interakce může významně ovlivnit tvar (průběh) klíčových kinematických charakteristik zavěšení vozu Formule SAE, nebo Khan [14] v tématu týkajícího se optimalizace nastavení vozu Formule 3. Celý postup ukazuje, že systém tabulek dovoluje navrzení poměrně efektivního procesu pro testování maximálního počtu efektu s minimálním potřebným počtem pokusů. Nicméně i tady existuje riziko nesprávných závěru resp. ztráty informace dané

neúplnosti experimentu. Zůstává zde rovněž i další nevýhoda společná pro všechny metody DOE a to nutnost poměrně pečlivé přípravy testovacího plánu.

2.2.3 Metoda plochy odezvy (RSM)

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

$$R = G(f_1, f_2, f_3, \dots, f_n) \quad (2.1)$$

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

$$R = a_0 + a_1 f_1 + a_2 f_1^2 + a_3 f_1 f_2 + \dots \quad (2.2)$$

Vypočtenou plochu odezvy pak lze graficky vyjádřit, což přináší vývojovému inženýrovi možnost mnohem efektivněji porozumět citlivosti celého systému včetně vzájemných interakcí. Tento přístup ve svém článku pak prezentuje např. Stevens a kol. [15] jako postup používaný firmou Ford Motor Company při optimalizaci charakteristik ovladatelnosti vozidla za pomoci procesu CAE.

2.3 VYUŽITÍ PRVKŮ UMĚLÉ INTELIGENCE

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 znalostech 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. Využití jiných než tradičních algoritmických postupu také skýtá možnosti zpracování nenumerných a nepřesně formulovaných informací jako např. subjektivní názor jezdce na ovladatelnost vozidla, definice vnějších podmínek (kvalita povrchu tratě) apod. Výstupem z těchto systému, resp. procesu 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 systému umělé inteligence však sebou nese mnohé úskalí.

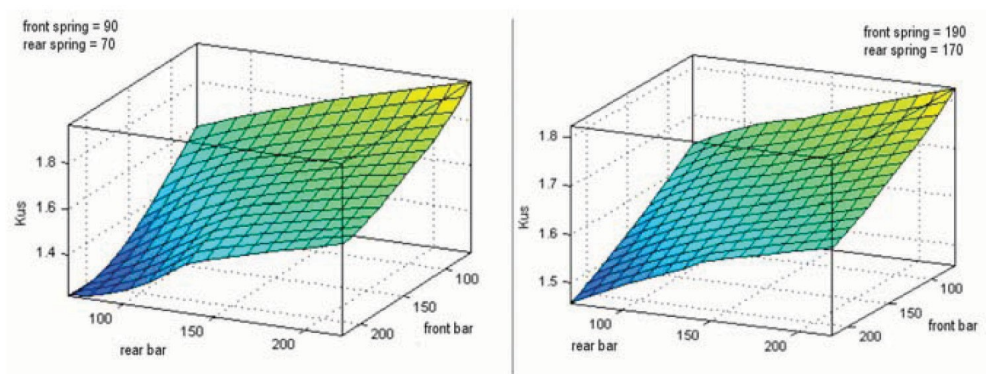
- Komplikovanost systému může převážit jeho výhody
- V mnoha případech jsou nezbytné znalostní báze. Naplnění těchto bází vyžaduje buď hluboké odborné znalosti nebo stabilní prostředí ve kterém by mohl proběhnout proces učení.

- Je-li součástí tvorby systému také návrh vazeb jednotlivých prvků, může v případě velkého počtu vstupních parametru vznikat riziko značné nepřehlednosti při následném procesu odladování tohoto systému.

I přes některé nedostatky však lze využití systému umělé inteligence považovat za zajímavou alternativu pro postupy využitelné k analýze výkonnosti vozidla.

2.3.1 Neuro-Fuzzy Interference Systém (ANFIS)

Návrh metodiky resp. nástroje využitelného nejen v konstrukci, ale současně i v procesu hledání optimálního nastavení závodního vozu je předmětem studie zveřejněné Antoninim a kol. [16]. Pro tento účel byl zvolen „Neuro-Fuzzy Inference Systém“ (ANFIS), pomocí něhož je modelována výkonnost vozidla jako funkce vybraných seřaditelných parametru. Z velkého množství prvků ovlivňujících tuto výkonnost 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 pak byl zaveden „koeficient nedotáčivosti“ K_{us} . Jako hlavní záměr prováděného experimentu definovali autoři ověření možnosti identifikace chování systému, který simuluje výkonnost vozidla při reálném testu v závislosti na změnách nastavovacích parametru s přihlédnutím na výstup reprezentovaný maximální hodnotou K_{us} . Pro modelování vstupních / výstupních vztahu závislostí 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. Vstupy do fuzzy modelu tvoří tuhosti pružin a stabilizátoru, konsekventem pak je koeficient nedotáčivosti (K_{us}). Funkce příslušnosti je definována mírou tuhosti pružin a stabilizátoru a výstup modelu jako výsledek váženého součtu.

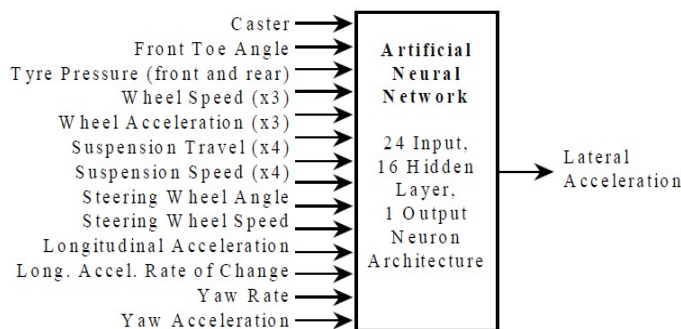


Obr. 2.5 Odhad koeficientu nedotáčivosti (K_{us}) u různých kombinací tuhosti pružin a stabilizátoru

Rezultát z procesu učení lze znázornit pomocí 3D grafu na jehož svislé ose je uvedena hodnota Kus a modifikaci nastavení tuhosti zavěšení reprezentuje rovina $x-y$ (obr.2.5) . Každý graf je pak vytvořen pro dvě fixní hodnoty zbývajících parametru tuhosti. Pomocí těchto grafu je možno vyhodnotit jaké změny v kombinaci nastavení tuhosti stabilizátoru a pružin povedou k žádoucí změně v rychlosti odezvy vozidla po natočení volantu. Při provádění počítačových simulací je tento proces omezen pouze výpočetním časem, počty reálných testu jsou však většinou v tomto směru výrazně limitované. Proces hledání nejvhodnější kombinace tuhosti pružin a stabilizátoru pro dosažení žádoucí odezvy vozidla navíc vyžaduje posloupnost kroků s analýzou grafu pro jednotlivé varianty. Při rozhodování o nastavení vozu zahrnující větší počet seřizovacích prvku je tedy nutno vygenerovat velké množství kombinací grafu, což může výrazně ztížit nalezení klíčových informací.

2.3.2 Aplikace neuronových sítí (ANN)

Tradiční počítačové modelování založené na zjednodušené jízdě dynamice naráží na mnoho praktických omezení, kde jedinou možností řešení je aplikace inteligentnějších systému. Těmito možnostmi se ve své práci zabývaly Buttler a Karri [17], jejímž tématem je využití umělých neuronových sítí (ANN) pro identifikaci dynamických vlastností vozidla jako podkladu pro predikci k nalezení ideálního nastavení. Pro vytvoření systému byla zvolena vícevrstvá dopředná umělá neuronová síť (ANN), jejichž architektura je často využívána u kontrolních systému průmyslových aplikací. Pro zjednodušení procesu sestavení a ověření ANN byl zvolen proces optimalizace závodního vozu FSAE v podmínkách ustáleného zatáčení. Pro odhad příčného zrychlení vozidla při zatáčení byly jako vstupy neuronová síť vybrány parametry charakterizující dynamické chování vozidla spolu s hodnotami nastavení výše uvedených prvku podvozku vozidla (obr.2.6). Následné testování a analýza chyb mezi odhadovanou a naměřenou velikostí příčného zrychlení pak prokázala velmi dobrou úroveň schopnosti systému učit se jízdě dynamiku vozidla. Porovnáním vah jednotlivých parametru v modelu bylo také možno provést vyhodnocení vlivu jednotlivých vstupu na hodnotu výstupu tj. velikost příčného zrychlení.



Obr. 2.6 ANN model použitý pro analýzu

Tréninkové data pro reálné ověření systému byly nasbírány během testu zaměřených na přípravu vozidla. Srovnání kombinací nastavení hlavních parametru identifikovaných pomocí ANN jako nejrychlejší a kombinací dosahujících nejlepší výsledky v reálném testu pak ukázala 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. Na základě prezentovaných výsledků lze konstatovat, že využití ANN k procesu hledání optimálního nastavení závodního vozu se jeví jako vcelku vhodná alternativa. Výhodou je především skutečnost, že správně sestavený model zahrnuje i vliv mnoha nelinearit systému (závodního vozu), které jsou pak jinými postupy mnohdy velmi obtížně reprodukovatelné.

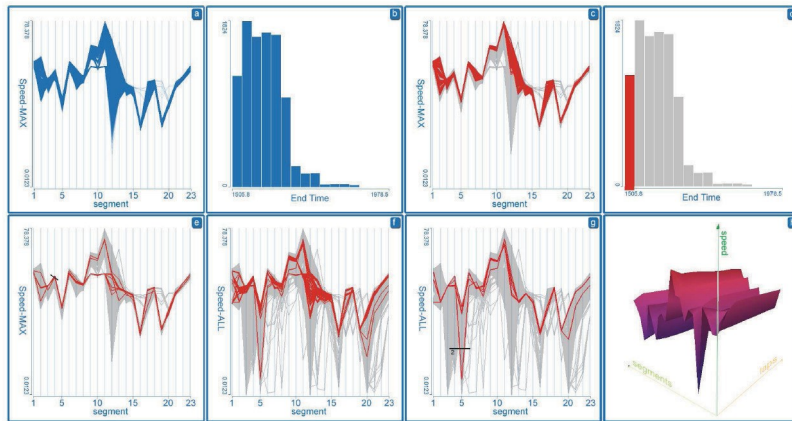
2.4 VÍCEROZMĚRNÁ ANALÝZA DAT

Většina současných přístupů podporuje analýzy pouze na úrovni dvou až tří parametru současně, což je mnohdy ale nedostačující, protože některé z důležitých souvislostí tak nemusí být identifikovány. Progresivnějším přístupem se v tomto případě zdá být využití některého z typu vícerozměrné analýzy dat, jejíž aplikace lze v současnosti nalézt v mnoha experimentálních oborech, např. v chemii, neurobiologii. Jejich poměrně malé rozšíření při analýze výkonnosti sportovních vozidel pak může být způsobeno několika důvody.

- Vytvoření odpovídajícího způsobu zpracování a zobrazení dat do vícedimenzionálních charakteristik bývá 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 může být obtížnější správně interpretovat poskytovanou informaci složenou z více vrstev. Obecná problematika vizualizace závislosti velkých objemu vícerozměrných dat na časové ose je však nyní stále součástí aktivního výzkumu.
- Konzervativní přístup ze strany uživatelů

Přes uvedené problémy však vícerozměrné 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 těchto seřizovacích prvků a omezeného času určeného na optimalizaci vozidla. Příkladem jednoho z alternativních progresivnějších přístupů analýzy vícerozměrných dat pak může být použití tzv. „interaktivní vizuální analýzy příbuzných křivek“, jejíž aplikací demonstrované na analýze výkonnosti závodního vozu se věnuje Matkovič a kol. [18]. K vizualizaci výsledku zvolili metodu „paralelních souřadnic“, která může napomoci odhalit hlubší souvislosti. Jejím principem je seřazení

ortogonálních náhledu jednotlivých ploch do zvolené roviny (obr.2.7), takže plochu reprezentuje křivka kopírující zvolené kritéria Přínosem je především fakt, že mnohé atributy lze jednoduše vizualizovat, např. výkonnost vozidla (rychlost) a provést jejich přímé srovnání pro časovou závislost, tak i pro statistické vyjádření. Nevýhodou je však riziko nesprávné projekce ploch do křivek což může přinést ztrátu některých informací nebo zanechat chyby.



Obr. 2.7 Interaktivní analýza příbuzných povrchů prostřednictvím násobných křivek

3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Rozborem problematiky, jejímž tématem se zabývá tato dizertační práce byly stanoveny hlavní body s cílem vytvořit základní strukturu pro metodiku sloužící k analýze dat charakterizujících jízdní dynamiku sportovního vozidla a k predikci významu vlivu změn nastavení vybraných parametrů. Vlastní realizace disertační práce se týká splnění následujících hlavních cílů:

- Výběr a aplikace metody vhodné pro účely vícedimensionální analýzy dat ze sportovního vozu
- Navržení metodiky pro přípravu a vyhodnocení dat
- Vytvoření jednoduché softwarové aplikace pro pre-processing dat (implementace metodiky)
- Ověření metodiky v interaktivním režimu na testovacích datech

Vedle těchto hlavních cílů vznikla ještě potřeba splnit některé vedlejší cíle jako kroky nezbytné ke zpracování této disertační práce

- Volba softwarové platformy poskytující dostatečnou flexibilitu vhodnou k procesu návrhu metodiky
- Provedení definovaných experimentů (jízdních testů) za účelem získání dat potřebných k ověřování funkce navrhované metodiky.

4 METODICKÝ PŘÍSTUP K ŘEŠENÍ

4.1 ANALÝZA A VÝBĚR VHODNÉHO TYPU METODY

Při procesu výběru vhodné metody vícerozměrné analýzy dat jízdní dynamiky sportovního vozidla bylo již v počáteční fázi jako první krok nutno obecně definovat existující strukturu vazeb mezi jednotlivými vstupy a výstupy, se kterými je potřeba pracovat. Vstupy (pomineme-li pevně dané konstrukční parametry) jsou pak v tomto případě myšleny jednotlivé seřizovací prvky vozidla, mezi které patří např. komponenty podvozku (pružiny, stabilizátory, tlumiče), aerodynamické prvky, transmise apod. Mezi výstupy, tj. veličiny, jejichž průběhy nebo velikost je ovlivněna úrovní vstupů, lze zahrnout většinu parametrů, které lze naměřit nebo jinak získat pomocí systému sběru dat – čas v měřeném úseku, dynamické charakteristiky vozidla, polohy jednotlivých prvků (zdvihy kol, natočení volantu apod.), teploty a tlaky jednotlivých systémů atd. Z tohoto lze odhadnout, že vytvoření komplexního nástroje není triviální záležitostí. Vystává zde totiž potřeba navrhnout otevřený systém, který lze podle potřeb modifikovat a doplňovat jednotlivými parametry tak aby nedocházelo k narušení funkce již vytvořené struktury. S tímto faktem pak souvisí i požadavek na jednoduchost a interaktivnost vlastní výpočtové metody. Z možných variant zvažovaných v úvodní fázi se pak postupně definovaným kritériím nejvíce přiblížily následující metody, které byly zvoleny pro další rozvahu

- Aplikace neuronových sítí (Artificial Neural Network)
- Strukturální rovnice (Structural Equation Modeling)
- Lineární regresní model (LRM)

Následnou analýzou a praktickým ověřením reálných možností vybraných přístupů pak bylo nakonec rozhodnuto využít v souladu se záměrem disertační práce pro návrh metodiky pouze aplikaci „Lineárního regresního modelu“ (LRM) přičemž tato volba se opírá o následující skutečnosti.

- Metoda je ověřená aplikacemi napříč spektrem nejrůznějších oborů, což dovoluje sdílet cenné poznatky v procesu tvorby a validace modelu. Toto ovlivňuje další důležitý fakt, kterým je dostupnost modulu lineární regrese ve většině komerčních softwarových produktů určených ke statistickému zpracování experimentálních dat
- Potenciální riziko vyplývající z možnosti většího vlivu chyby měření nebo modelu je vyváženo relativně jednodušším procesem tvorby, modifikace a vyhodnocení výstupů modelu což je velmi významný faktor zejména v procesu vytváření a ověřování vlastního konceptu navrhované metodiky
- Použití lineární regrese je v souladu s cílem práce ověřit funkčnost principů při zpracování vícerozměrných dat na zjednodušeném modelu využitelným i

v reálném prostředí motorsportu charakteristickém svým omezením v čase i zdrojích určených pro zpracování analýz

4.2 APLIKACE REGRESNÍHO MODELU

Regresní analýza je statistická metoda pro modelování vztahu jedné nebo několika náhodných vysvětlovaných veličin (závisle proměnných) y_1, y_2, \dots, y_k na jedné nebo několika nenáhodně vysvětlujících veličinách (nezávisle proměnných) x_1, x_2, \dots, x_k . Tento vztah se dá také jednoduše vyjádřit v maticovém zápisu

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (4.1)$$

Z geometrického hlediska sloupce x_j matice \mathbf{X} definují m -rozměrný souřadnicový systém tj. nadrovinu L v n -rozměrném Euklidovském prostoru E^n . V této nadrovině pak leží všechny vektory $\mathbf{X}\boldsymbol{\beta}$, přičemž parametry $\boldsymbol{\beta}$ je možno chápat jako koeficienty úměrnosti jednotlivých složek x_j souřadnicového systému jejichž lineární kombinace tvoří regresní model.

Při vytváření regresních lineárních modelů se běžně využívá metody nejmenších čtverců. Existují sice i robustnější metody (např. M-odhad), které dokáží udržet přesnost modelu i v případech výskytu chybných měření, nicméně v případě navrhované metodiky předpokládáme úpravu dat před vlastním zpracováním (tj. použití filtrů apod), takže z tohoto pohledu využití metody nejmenších čtverců v této aplikaci může být považována za dostačující. Principiálně pak metoda vychází z nalezení minima součtu odchylek od regresní přímky (resp. nadroviny v případě vícenásobné regrese), což lze vyjádřit následujícím vztahem.

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 \cdot x_i)^2 = \min \quad (4.2)$$

Přestože reálná charakteristika parametrů vstupujících do modelu nemusí být pro data získané během experimentu vždy pouze lineární a kromě chyby měření zde bude existovat i jistá chyba modelu, budeme předpokládat, že je splněna většina požadovaných podmínek a lineární regresní model lze tedy aplikovat. Důvodem tohoto přístupu je také skutečnost, že výstupem analýzy může být pouze predikce vlivu jednotlivých parametrů a nikoliv jejich exaktní funkce. Při každé jednotlivé analýze je pochopitelně nutno také provést test kvality navrženého lineárního modelu s ohledem na výstupní data, tj. potvrdit správnost odhadu regresních koeficientů. Obecně se jedná o poměrně rozsáhlou problematiku [19], [20] a pro účely metodiky tedy byly vybrány pouze nejvýznamnější hodnotící kritéria.

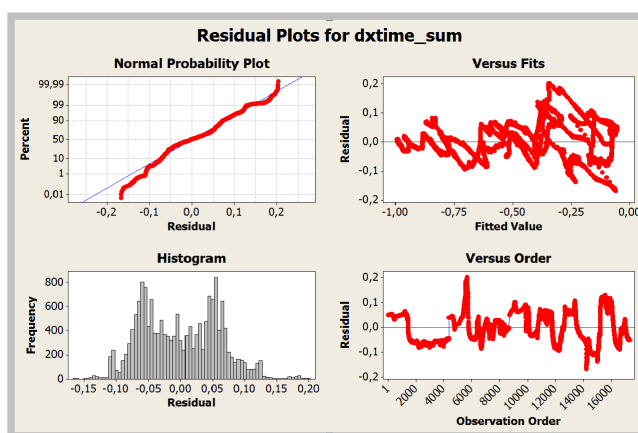
- p-value
- Studentův t-test

- Směrodatná odchylka reziduí

Vícenásobnou regresní funkci lze také dále otestovat pomocí parametrů analýzy rozptylu (ANOVA), vycházející z porovnání součtu čtverců celkových odchylek S_S s regresním součtem čtverců S_R a reziduálním součtem čtverců S_E z nichž vychází i další kritéria hodnocení

- Koeficient determinace R^2
- Celkový F-test

Vlastnosti modelu byly rovněž vždy testovány přímým posouzením vlastností reziduí (obr.4.1)



Obr. 4.1 Graf reziduí pro hodnocení kvality proložení modelu (Minitab)

Protože mezi jednotlivými prvky nastavení vozidla existuje reálně významné množství vzájemných interakcí, bylo nutno hodnotit model, tj. jeho výstupy i s ohledem na možnou přítomnost multikolinearity, které nejsou příznivé s ohledem na interpretaci významu jednotlivých regresních koeficientů resp. hodnocení významu vlivu jednotlivých nastavovacích prvků. Z tohoto důvodu byly tedy do hodnocení kvality modelu zahrnuty další dva parametry hodnotící míru vzájemných korelací.

- Pearsonův korelační parametr
- Faktor změny variability (VIF)

4.3 TRANSFORMACE PARAMETRŮ NASTAVENÍ

Očekávanou vysokou úroveň korelace mezi jednotlivými parametry lze řešit především vhodně sestaveným plánem testů. Toto v praxi není vždy reálné ať z důvodů časového limitu a potřeby otestování většího počtu prvků, nebo např. při zpětném zpracování dat určených pro analýzy jiných parametrů. Jedním

z náhradních způsobů jak částečně redukovat tento problém může být analýza vybraných parametrů jízdní dynamiky, které do určité míry reprezentují vliv resp. změnu konkrétních nastavovacích prvků vozidla. Za předpokladu jistého zjednodušení lze takto zvolené a dle potřeby modifikované parametry jízdní dynamiky vázané ke konkrétnímu prvku nastavení nazývat jako „transformované“. Pro vlastní experiment, pomocí kterého byla metodika navrhována a dále testována pak byly zvoleny následující prvky nastavení vozidla, pro něž jsou navrženy i jednotlivé „transformované parametry“.

- Tuhost předních a zadních pružin
- Tuhost předního a zadního stabilizátoru
- Svornost diferenciálu
- Světlná výška vozidla identická vpředu i vzadu

4.3.1 Nastavení svornosti diferenciálu

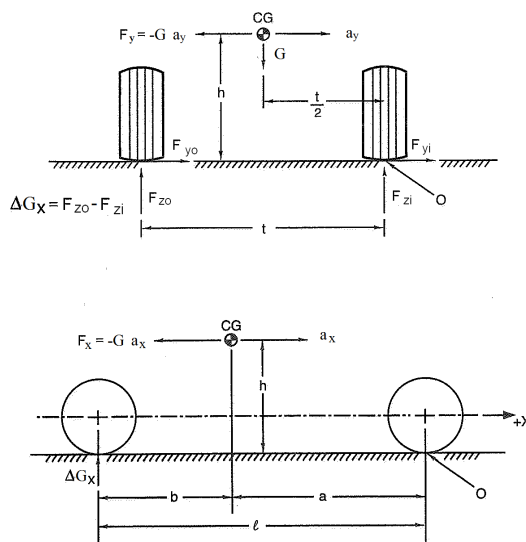
U sportovních vozidel je významným faktorem při průjezdu zatáčkou mimo jiné také správná funkce diferenciálu se zvýšenou svorností. Tato definovaná svornost omezující míru prokluzu vnitřního kola způsobenou jeho odlehčením v zatáčce v důsledku příčného přenosu váhy pak zvyšuje schopnost akcelerace vozidla (platí obecně i při prokluzu v důsledku ztráty adheze u jednoho hnaného kola). Při nastavení 0% svornosti diferenciálu lze říct, že rozdíl otáček vnitřního a vnějšího kola je maximální (tedy $v_o \neq v_l$), přičemž pro nastavení 100% svornosti diferenciálu naopak platí, že $v_o = v_l$. Z uvedeného vyplývá, že za předpokladu přijetí této zjednodušené úvahy pro účely analýzy můžeme tedy uvažovat $(v_o - v_l) = f(\text{míra svornosti diferenciálu})$ pro poloměr zatáčky $R_{ave} = \text{konst.}$ Jelikož skutečná velikost rozdílu rychlostí otáček kol porovnávána vždy ve stejném úseku trati závisí také na absolutní rychlosti vozidla, transformovaný parametr by tento vliv měl rovněž zahrnovat. Pro účely regresní analýzy vlivu nastavení diferenciálu jej tedy nazveme „relativní rozdíl rychlostí kol“ a jeho výpočet pak bude následující.

$$\Delta v_{rel} = \frac{v_o - v_l}{v} \cdot 100 \quad (4.3)$$

4.3.2 Změna světlné výšky

Při všech dynamických změnách tj. průjezd zatáčkou, akcelerace i brzdění dochází v důsledku působení příčných a podélných zrychlení ke změně zatížení jednotlivých kol v porovnání se statickým zatížením. Velikost této změny je dána především velikostí výslednice dynamické síly s působností v těžišti vozidla

vyvolávající silový moment na nápravě vozidla. Z obr. 4.2 vyplývá, že velikost tohoto momentu resp. změny zatížení kola kromě dynamické síly definuje také



Obr. 4.2 Celkový přenos váhy při zatačení (nahore) a brzdění resp. zrychlení (dole) [9]

poměr mezi rozchodem resp. rozvorem a výškou těžiště. Protože při změně světlé výšky dochází také ke změně výšky těžiště, je výhodné s ohledem na následující vztahy tuto skutečnost využít. V případě průjezdu zatáčkou lze z momentové rovnováhy dle obrázku odvodit následující vztah, který definuje velikost přírůstku (resp. poklesu) zatížení ΔG_y na kolech přední / zadní nápravy způsobenou příčným zrychlením a velikost přírůstku (resp. poklesu) zatížení ΔG_x způsobenou podélným zrychlením.

$$\Delta G_x = \frac{G \cdot a_x \cdot h}{l}, \quad \Delta G_y = \frac{G \cdot a_y \cdot h}{t} \quad (4.4)$$

Jelikož hodnoty rozvoru, rozchodu a hmotnosti vozidla zůstávají konstantní, je možno nadefinovat parametr „ukazatel vlivu světlé výšky“

$$RHI = a_T \cdot h_{sv} \quad \text{kde} \quad a_T = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} \quad (4.5)$$

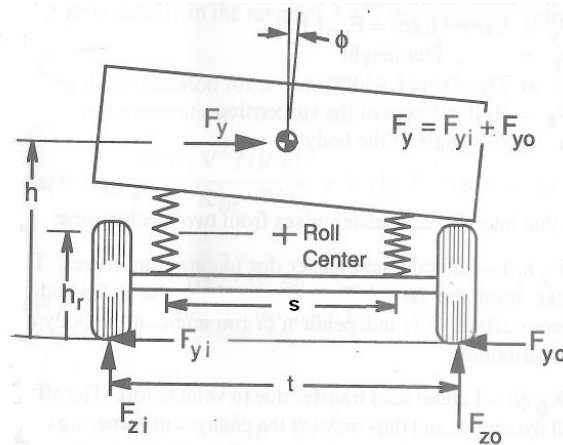
4.3.3 Změna tuhosti stabilizátoru

Stejně jako v případě řešení vlivu světlé výšky i zde (obr.4.3) je možné provést pro následující vztah výrazné zjednodušení.

$$\frac{F_{zo} - F_{zi}}{2} = \Delta G_{yR} + \Delta G_{yC} = K_{\phi} \cdot \frac{\phi}{t} + \frac{F_y \cdot h_r}{t} \quad \text{kde} \quad F_y = G a_y \quad (4.6)$$

Protože změnu zatížení ΔG_{yC} způsobenou pouze velikostí síly, jež je reakcí na sílu dostředivou lze považovat za funkci rychlosti průjezdu zatáčkou a současně geometrické parametry t, s za konstantní, jedinou nezávislou proměnou tedy zůstává tuhost stabilizátoru (a pružiny) K_s . Jelikož stlačení odpružení při naklonění Δx_y jakožto jedna z měřených veličin je funkcí úhlu naklonění vozidla Φ , můžeme považovat $\Delta x_y \approx \Phi$ a definovat transformovaný parametr „ukazatel vlivu klopné tuhosti“, který by měl charakterizovat modifikace klopné tuhosti a to především s ohledem na změnu tuhosti stabilizátoru resp. jeho ekvivalentu.

$$RI = K_s \cdot \Delta x_y \quad \text{kde} \quad \Delta x_y = (x_o - x_i) / 2 \quad (4.7)$$



Obr. 4.3 Analýza sil a naklonění odpružených hmot kolem středu klopení (Roll Center) při průjezdu vozidla zatáčkou [21]

4.3.4 Změna tuhosti pružin

Budeme-li v daném případě považovat vliv kinematických charakteristik anti-squat, anti-dive a anti-lift za konstantní, nabízí se k popisu vlastnosti pružin (tj. tuhosti) hodnota jejich stlačení /roztážení na přední /zadní nápravě při akceleraci a deceleraci. Podíl změny svislého zatížení přední nápravy dané předkloněním vozidla při brzdění nebo akceleraci je možno řešit podobným způsobem jako v případě klopení a definovat ukazatel vlivu „klonivé tuhosti přední/zadní nápravy“.

$$PFI = K_{FSS} \cdot \Delta x_{xF} \quad \text{kde} \quad \Delta x_{xF} = x_F - x_{FS} \quad (4.8)$$

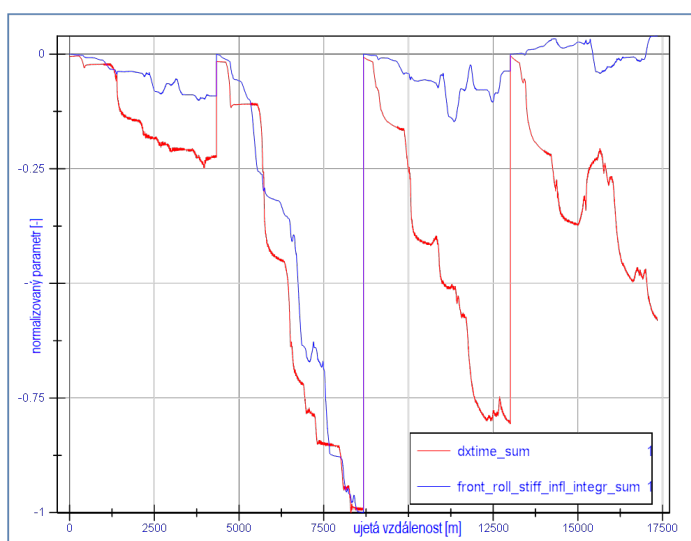
$$PRI = K_{RSS} \cdot \Delta x_{xR} \quad \text{kde} \quad \Delta x_{xR} = x_R - x_{RS} \quad (4.9)$$

4.4 PŘIPRAVA A ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Pro vytvoření vlastního regresního modelu bylo nutno připravit data z provedených experimentálních testů (simulací) takovým způsobem, aby jejich formát a vzájemná porovnatelnost minimalizovala riziko nesprávné interpretace výsledků. S ohledem na skutečnost, že celý proces návrhu metodiky probíhal interaktivně s požadavkem na provádění častých změn, byl pro tyto účely vybrán jako nejvhodnější program NI DIAdem 2012. Vlastní zpracování dat je s ohledem na požadovaný výstup možno rozdělit do následujících kroků, jež byly implementovány do navrženého skriptu.

- Výpočet základních parametrů a interpolace dat
- Výpočet transformovaných parametrů
- Integrace parametrů a výpočet diferencí pro vlastní porovnání
- Sumarizace a normalizace výstupních dat

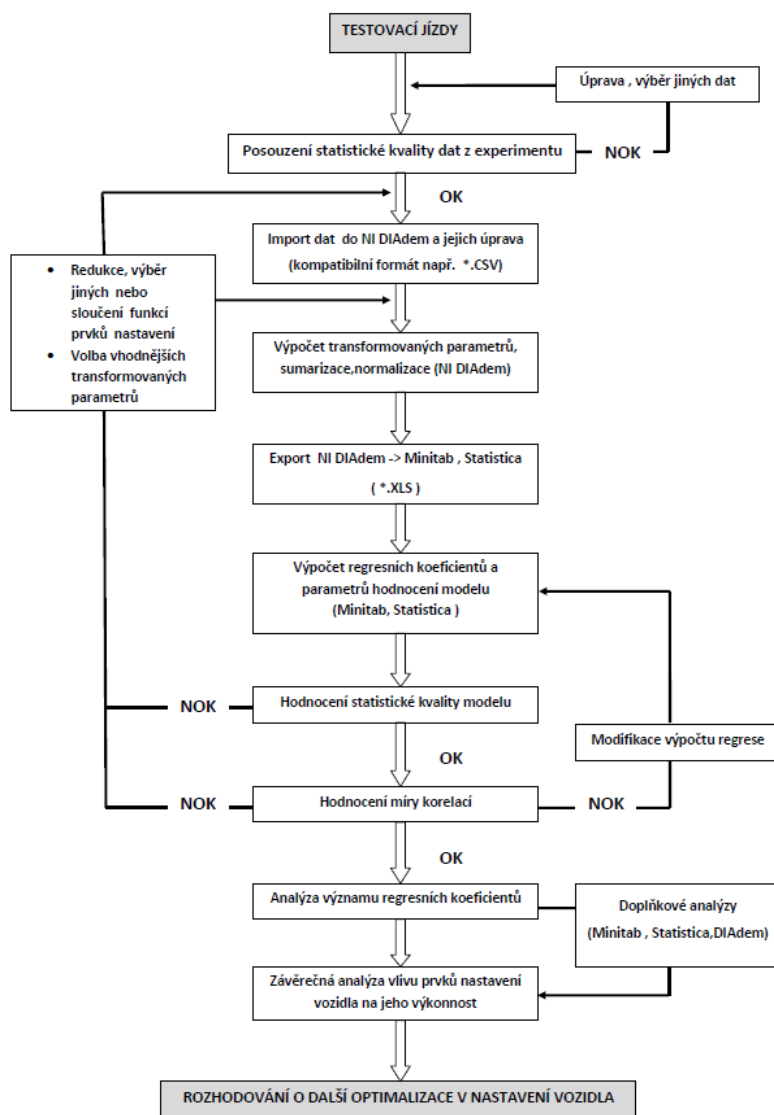
Jednotlivé kroky reflektovaly nutnost nejen vhodně vypočítat především difference u jednotlivých parametrů resp. času pro jednotlivé testovací jízdy, ale také vyřešit některé další problémy. K nim patří např. možné dopravní zpoždění na časové ose mezi změnou v hodnotě časové difference a její příčinou (tj. působení vlivu rozdílného nastavení), které tuto změnu vyvolalo nebo nežádoucí vliv špiček vzniklých např. v důsledku změny nastavení některého z dalších prvků. K minimalizaci negativního dopadu na výslednou analýzu tedy byla v těchto případech výhodně použita integrace transformovaných parametrů. Finální normalizace výstupních dat pak navíc dovoluje mnohem přehlednější interpretaci významu jednotlivých regresních koeficientů. Tyto data v sumarizovaném formátu (obr.4.4) je pak rovněž dle potřeby možno využít k případným dalším detailnějším analýzám vzájemných korelací a interakcí jednotlivých parametrů nastavení.



Obr.4.4 Příklad vizualizace datové řady po sumarizaci a normalizaci

5 ANALÝZA A INTERPRETACE VÝSLEDKŮ

Vlastní metodika (obr.5.1) byla na závěr otestována pomocí simulačního programu BOSCH LapSim V2003.6 na virtuálních závodních okruzích Zeltweg a Zandvoort pro dva různé koncepty vozidel (Sport Car a ETCC Car) tak, aby byla ověřena funkce při rozdílných podmínkách.

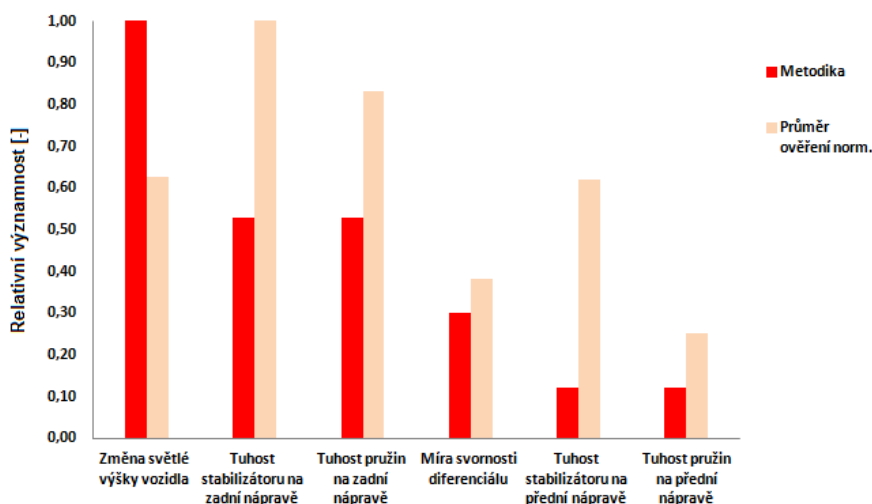


Obr. 5.1 Vývojový diagram metodiky

5.1 TEST OKRUH ZELTWEG & SPORT CAR

Tento test, který současně sloužil, jako vývojový pro návrh metodiky představoval proces naprosto náhodných a souběžných změn jednotlivých nastavovacích prvků v pěti testovacích jízdách tak, aby bylo možno ověřit, nakolik bude metodika se svými výsledky korektní. Pro ověření vlastních charakteristik jednotlivých prvků nastavení byly provedeny virtuální jízdy, které hodnotily jednak

jejich vliv na dosažený čas při single změně v celém rozsahu a také jako kombinaci změn dvou prvků. Tyto výsledky spolu s parametrem, který definoval nakolik jsou rezistentní vůči interakcím, byly zprůměrovány a srovnány z výsledkem vlivu jednotlivých transformovaných parametrů tak, jak je predikoval regresní model. (obr.5.2)



Obr. 5.2 Porovnání normalizovaných hodnot koeficientů vícerozměrného regresního modelu (Metodika) a normalizovaného průměru zahrnující hodnoty z jednotlivých ověřovacích testů a ukazatele síly parametru – Zeltweg & Sport Car

Analýzou rozdílů obou výsledků bylo konstatováno, že tyto jsou způsobeny mírně odlišnými podmínkami, ve kterých byly parametry testovány (rozsahy nastavení) včetně vlivu nelinearit z toho vyplývajících. Změna v nastavení vozu vycházející z predikce pak dovolila zlepšení času na jedno kolo o 1.04 sec v porovnání s nejrychlejším kolem experimentálního testu.

5.2 TEST OKRUH ZANDVOORT & SPORT CAR

Primárním cílem tohoto testu bylo provést sérii empirických úprav během pěti jízd, které by směřovaly ke zrychlení vozu a tyto pak analyzovat. Výstupy z regresního modelu pak ukázaly zejména důležitost vysoké míry opačné korelace mezi klopnou tuhostí přední a zadní nápravy, která ztěžovala interpretaci výsledků. Tento vliv korelace pak byl brán v úvahu při rozhodování o změně nastavení, s nímž bylo nakonec zajeto jedno virtuální kolo o 0.18 sec rychleji v porovnání s nejlepším kolem úvodního testu. Relativně malé zlepšení je pak pravděpodobně dáno již téměř optimálně zvoleným defaultním nastavením simulátoru. Tento test rovněž potvrdil důležitost správné analýzy jednotlivých korelací, které jsou důležitým vodítkem v případech, kdy se projevuje interakce jednotlivých prvků resp. transformovaných parametrů.

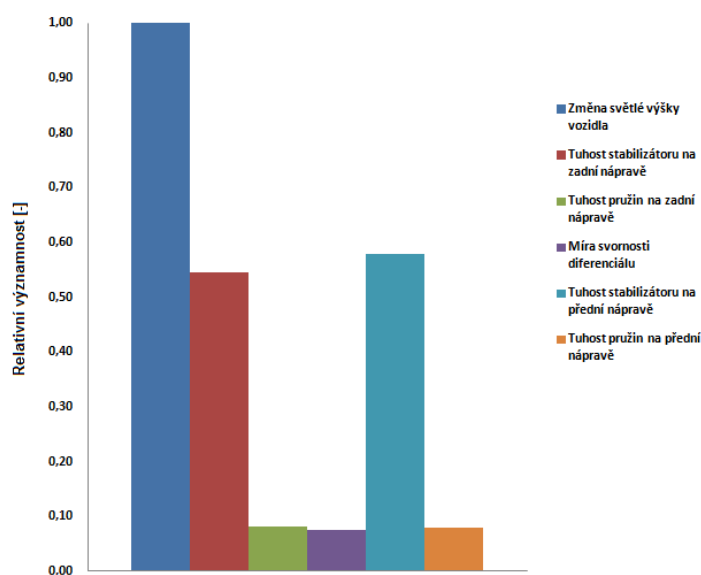
	dktime_sum	Diff_Speed_integ	weight_trans_inf	front_roll_stiff	rear_roll_stiff	front_pitch_infl
Diff_Speed_integ	0,079 0					
weight_trans_inf	0,16 0	0,437 0				
front_roll_stiff	-0,44 0	-0,186 0	0,639 0			
rear_roll_stiff	0,555 0	0,384 0	-0,425 0	-0,966 0		
front_pitch_infl	0,013 0	0,41 0	0,983 0	0,726 0	-0,532 0	
rear_pitch_infl	0,206 0	0,26 0	0,965 0	0,702 0	-0,512 0	0,958 0

Cell Contents: Pearson correlation
P-Value

Obr. 5.3 Hodnota Pearsonových korelačních koeficientů s vyznačenými nadlimitními hodnotami

5.3 TEST OKRUH ZELTWEG & ETCC CAR

Poslední test probíhal s podobnou filozofií jako test předchozí a výsledky regresní analýzy (obr.5.4) byly srovnány tentokrát se závěry provedeného experimentu DOE navrženého pro úplný faktorový plán.



Obr. 5.4. Porovnání relativní významnosti predikované regresním modelem Zelweg & ETCC Car

Drobné rozdíly v predikcích lze u tohoto případu vysvětlit silnou nelinearitou v charakteru chování jednotlivých prvků danou faktem, že změny nastavení i tady probíhaly prakticky v oblasti optima. Přesto také zde došlo k mírnému zlepšení (0.01sec) po provedení změn uskutečněných na základě predikce navrženým regresním modelem a to i vůči alternativnímu nastavení dané výstupem s DOE.

6 ZÁVĚR

Shrnutí týkající se návrhu a ověření funkčnosti metodiky pro vícedimenzionální analýzu vlivu nastavení sportovního vozidla na jeho výkonnost (dynamiku) je stručně zformulován v následujících bodech.

- Byla vytvořena metodika využívající vícerozměrnou lineární regresi pro hodnocení vlivu změn vybraných parametrů nastavení vozidla na výkonnost vozidla reprezentovanou časem dosaženým v měřeném úseku. Zvolená aplikace lineární regrese se jeví vhodná k těmto účelům především díky své relativní jednoduchosti a při dodržení některých základních podmínek i přijatelné robustnosti. Podobné způsoby aplikace vícerozměrné regrese na tuto problematiku zatím ještě nebyly publikovány.
- Navržená metodika v souladu s požadavkem dovoluje v uspokojivém rozsahu provádět analýzu vlivu souběžných změn více parametrů. Díky hodnocení vybraných veličin jízdní dynamiky resp. transformovaných parametrů reprezentujících vlastnosti jednotlivých prvků nastavení a současně zaručujících míru vzájemné korelace $\rho < 1$, lze provádět analýzu i v případech, kdy změna dvou a více nastavovacích parametrů sebou nese výrazné rysy multikolinearity.
- Implementací korelační analýzy do navržené metodiky lze provést odhad vlivu kombinací nastavovacích prvků. Korelační matice v grafické podobě je rovněž užitečným nástrojem při odhalování možné přítomnosti nelinearit, které je pak nutno zohlednit při hodnocení skutečného významu regresního koeficientu resp. vlivu nastavovacího prvku v prováděném testu.
- Hodnocení vlivu změny v nastavení vozidla na jeho výkonnost lze provádět jednak komplexně tj. na základě statistických analýz (primární evaluace), rovněž však také dle potřeb s využitím vypočtených vstupních parametrů i jako standardní analýzu na časové ose (sekundární evaluace). Ta dovoluje vizuální hodnocení výhodné zejména jako pomocný nástroj v případech upřesňování primárních výsledků (regrese) nebo při identifikaci klíčových úseků na testovací/závodní dráze.
- Metodika vytvořená na základě poznatků z interaktivního procesu analýz a ověřovacích procedur u dat z experimentálního testu byla aplikována i na dalších příkladech zahrnujících odlišné podmínky (vozidlo a trať). Výsledky ukázali dostatečnou schopnost metodiky vytvořit predikci vlivu jednotlivých parametrů nastavení v souladu se záměrem této práce.

LITERATURA

- [1] McBEATH, S. *Competition Car Data Logging*. Haynes Publishing, 2002, 160 pp., ISBN: 185960 6539
- [2] SEGERS, J. *Analysis Techniques for Racecar Data Acquisition*. SAE International, 2008, 198 pp, ISBN: 978-0-7680-1655-0
- [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, no 6, pp. 2086-2090, 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] REPLOGLE, D.L. *A Model Driven Approach to Racecar Data Acquisition*. SAE 1994 Motorsports Engineering Conference & Exposition, Paper Number: 942483, DOI: 10.4271/942483
- [9] MILLIKEN, W.F., MILLIKEN, D.L. *Race Car Vehicle Dynamics* . SAE International, 1995, 892 pp, ISBN: 1-56091-526-9
- [10] MONTGOMERY, D.C. *Design and Analysis of Experiment* . John Wiley & Sons, New York, NY, 2005, 638 pp, ISBN: 0-471-48735-X
- [11] HILL, J., *Design of Experiment - Mind Games*. Racecar Engineering, November 2001, vol. 11, no. 11, s. 74-80.
- [12] 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
- [13] 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
- [14] 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
- [15] 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>, [cit. 2011-05-04]
- [16] ANTONINI P., CORRADINI M.L., IPPOLITI G.,LONGHI S., STRONATIC., *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

- [17] 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
- [18] MATKOVIC, K., GRACANIN, 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.
- [19] MELOUN,M. MILITKÝ J. *Statistická analýza experimentálních data*. Praha: Academia, 2004. 954 s. ISBN: 80-200-1254-0
- [20] HEBÁK,P. HUSTOPECKÝ, J. MALÁ,I. *Vícerozměrné statistické metody (2)* Praha: Informatorium, 2005. 240 s. ISBN: 80-7333-036-9
- [21] GILLESPIE,T. *Fundamental of Vehicle Dynamics*.SAE International, 1992, 315 s. ISBN-13: 978-1560911999

CURRICULUM VITAE

Bronislav Růžička, Ing.

nar. 19.7.1970, Valašské Meziříčí

- 2006– nyní TRW Automotive Czech Republic
- *Engineering Project Manager*
 - *vývoj brzd a systémů jízdní stability vozidel*
 - *zákaznické aplikace, vývojové a jízdní testy*
- 2004– 2005 ŠKODA Motorsport - World Rally Championship Team
- *datové analýzy výkonnosti vozu*
 - *simulace jízdní dynamiky*
 - *technická dokumentace vozu*
- 1995 - 2006 Odborný konzultant (Motorsport & Automotive]

DOSAŽENÉ VZDĚLÁNÍ

- 2006 - 2013 VUT Brno - Strojní Fakulta
- *doktorské studium – UK FSI*
 - *disertační práce na téma - “Analytické metody v motorsportu“*
- 1988 - 1993 VUT Brno - Strojní Fakulta
- *inženýrské studium – specializace: Spalovací motory*
 - *diplomová práce na téma - “Analýza vyplachovacího procesu dvoudobého závodního motoru Cagiva 500 GP“*
- 1984 - 1988 SPŠ Strojnická Vsetín
- *obor Strojírenská konstrukce*

PROFESNÍ ČLENSTVÍ

Motorsport Engineering Association

JAZYKOVÉ ZNALOSTI

Angličtina	<i>plynule</i>
Ruština	<i>pasivně</i>
Němčina	<i>pasivně</i>

ABSTRACT

This dissertation is focused on proposal for simplified data analyze approach for sport-car vehicle dynamic evaluation with relationship to possibility for qualified estimation of set-up parameters influence for overall vehicle performance. In common practice can be usual overlapping effect caused by concurrent changes of car setup elements if performed in the same moment with resulting in not correct or hardly definable process determination for evaluation and decision about next steps in car development. For analyze of these multidimensional data is then chosen process with approach by Linear Regression Model (LRM). In dissertation is proposed basic philosophy with concern on specificity of car vehicle dynamics, performed experiment with defined inputs including analyze and interpretation method of obtained outputs. This methodic take into account also possibility for general application of multidimensional data analyses not only in motorsport, but as well for dynamic behavior diagnostics of technical systems where finding of optimal running condition depends on multi-parametric setup whose combination must reflect often changes of outer conditions too.