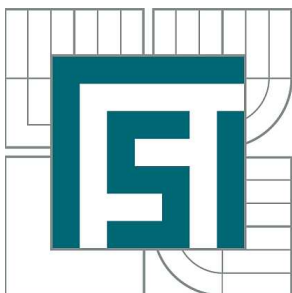


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ AERODYNAMICKÝCH SILOVÝCH ÚČINKŮ

EXPERIMENTAL MEASUREMENTS OF AERODYNAMIC FORCES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ŠTEFAN JOB

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR PORTEŠ, Dr.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Štefan Job

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Automobilní a dopravní inženýrství (2301T038)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Experimentální měření aerodynamických silových účinků

v anglickém jazyce:

Experimental measurements of aerodynamic forces

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Proved'te jízdní testy vozidla a na základě měřených signálů určete aerodynamické silové účinky působící na vozidlo.

Cíle diplomové práce:

Vypracovat a ověřit metodu pro měření aerodynamických sil působících na vozidlo.

Za tímto účelem navrhnete měřicí systém, postup zkoušky, způsob vyhodnocení měřených dat. Proved'te měření. Analyzujte výsledky z hlediska přesnosti a opakovatelnosti měření.

Seznam odborné literatury:

Gillespie, T.D. Fundamentals of Vehicle Dynamics, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, 1992. ISBN 1-56091-199-9.

ČSN 30 0554 – Dojezdová zkouška silničních motorových vozidel.

Vlk, F. Zkoušení a diagnostika motorových vozidel. Nakladatelství a zasilatelství vlk, Brno 2001.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Porteš, Dr.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 7.2.2011

L.S.

prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty



ABSTRAKT

Tato práce se zabývá vlivem aerodynamických silových účinků na vozidlo. Její součástí je provedení jízdní zkoušky vozidla, návrh optimálního postupu pro zpracování naměřených signálů, jejich samotné zpracování a závěrečné vyhodnocení výsledků z hlediska přesnosti a opakovatelnosti měření. Dále tato práce obsahuje porovnání vlivu jednotlivých aerodynamických prvků na závodní vozidlo.

KLÍČOVÁ SLOVA

Aerodynamika, odpory, vozidlo, přítlak, dojezdová zkouška

ABSTRACT

This thesis deals with the effect of the aerodynamic forces on a vehicle. It contains the description of the test run of the vehicle, the proposal on how to process the measurements, the processing of the measurements themselves, and the final assessment of the results as to their accuracy and the possibility of repeating the experiment. Furthermore, this thesis contains the comparison of the effect of the individual aerodynamic features on the race car.

KEYWORDS

Aerodynamics, aerodynamic drag, vehicle, downforce, coastdown test



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JOB, Š. *Experimentální měření aerodynamických silových účinků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 77 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Porteš, Dr..



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Petra Porteše, Dr. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 23. května 2012

.....

Štefan Job



PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Petru Portešovi, Dr. za odborné vedení a cenné rady, dále závodnímu týmu Chabr Motorsport za možnost uskutečnit měření a v neposlední řadě své rodině a blízkým za vydatnou podporu a trpělivost.



OBSAH

Úvod	10
1 Aerodynamika	11
1.1 Typy proudění	11
1.1.1 Mezní vrstva	12
1.2 Vlastnosti tekutin	13
1.2.1 Bernoulliho rovnice	13
1.3 Aerodynamické síly a momenty	14
1.4 Vliv Aerodynamických účinků na vozidlo	16
1.4.1 Nejčastěji používané aerodynamické prvky u závodních vozů	16
1.4.2 Obtékání kol	17
1.5 Možnosti měření aerodynamických vlastností vozidel	19
1.5.1 Aerodynamický tunel	20
2 Jízdní odpory	23
2.1 Valivý odpor	23
2.1.1 Odpory „podobné“ valivým	25
2.2 Odpor vzdušný	25
2.3 Odpor stoupání	26
2.4 Odpor zrychlení	27
2.5 Odpor přívěsu	28
3 Teoretická východiska metod měření	29
3.1 Měření odporů - Dojezdová zkouška	29
3.2 Měření vztlaků – Test za konstantní rychlosti	30
4 Praktické měření	31
4.1 Návrh zkoušek	31
4.2 Provedení zkoušek	32
4.2.1 Zkušební vůz	32
4.2.2 Metodika měření	33
4.2.3 Nastavení vozu	34
5 Zpracování a porovnání naměřených dat	37
5.1 Dojezdová zkouška	37
5.1.1 Metoda přímé derivace	38
5.1.2 Metoda derivace polynomu čtvrtého stupně	43
5.1.3 Porovnání metod a nastavení vozu	46
5.2 Zkouška za konstantní rychlosti	56
5.2.1 Korekce výsledků pomocí GPS	61



5.2.2	Porovnání jednotlivých nastavení.....	63
6	Vyhodnocení průběhu a výsledků měření	68
6.1	Nastavení vozu.....	71
6.2	Zpracování dat, přesnost a opakovatelnost měření	72
	Závěr	73
	Seznam použitých zkratek a symbolů	76



ÚVOD

V dnešní době je v automobilovém průmyslu kladen stále větší důraz na aerodynamiku vozidel. A proč tomu tak je? Aerodynamika je velmi mocným nástrojem v boji o potenciální zákazníky dané značky. Komu by se nelíbily krásné tvary navržené pro co nejmenší odpor vzduchu, kdo by nechtěl vlastnit automobil, který využívá maximálního výkonu motoru a vypouští méně emisí, a kdo by nechtěl mít řízení svého vozu pevně v rukou téměř v každé situaci? Toto vše dokáže ovlivnit aerodynamika, a proto všechny automobilky vynakládají obrovské finanční obnosy na její zkoumání. Neméně tomu tak je na závodních oválech, kde každé, byť minimální aerodynamické vylepšení závodního vozu, dokáže ubrat cenné setiny ze soutěžních časů, a jak je léty dokázáno, tyto setiny vyhrávají závody.

Zkoumání aerodynamiky u vozidel se dá provádět různými způsoby. V dnešní době je již naprosto běžnou praxí počítačová simulace, která šetří čas i peníze automobilových konstruktérů. Poněkud finančně náročnější je testování automobilů v aerodynamických tunelech. Zřejmě nejjednodušší variantou, jak vyzkoušet působení vzduchu na své vozidlo, je silniční zkouška, kterou se bude zabývat tato diplomová práce.

Cílem této práce je navrhnout postup silniční zkoušky, následně tuto zkoušku zrealizovat a naměřená data co nejefektivnějším způsobem zpracovat. Tato práce mohla dostat svoji podobu díky závodní stáji Chabr Motorsport, která poskytla pro měření svůj závodní vůz, a tím také přibyla nová možnost - porovnat vliv jednotlivých aerodynamických prvků na celkové aerodynamické vlastnosti vozu.



1 AERODYNAMIKA

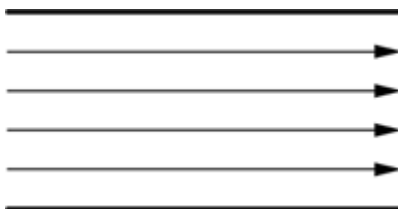
Aerodynamika je obor zabývající se silovým působením proudícího vzduchu na těleso. Velmi důležitou úlohu hraje především v letectví a automobilovém průmyslu.

Na těleso působí stále stejné síly, pokud se těleso pohybuje, nebo pokud je pouze obtékáno proudícím vzduchem, proto můžeme říci, že proudění vzduchu je relativní.

Při obtékání tělesa vzduchem vzniká díky různému stlačování vzduchu nerovnoměrné tlakové pole, které následně způsobuje silovou nerovnováhu. Existují tři základní druhy tlaku působící na těleso – tlak dynamický, statický a celkový.

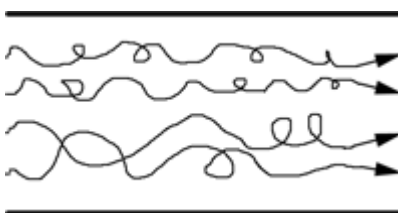
1.1 TYPY PROUDĚNÍ

Částice proudícího vzduchu jsou spojeny do jednotlivých proudnic. Pokud jsou tyto proudnice rovnoběžné a neprotínají se, hovoříme o laminárním neboli ustáleném proudění.



Obr. 1.1 Laminární proudění [15]

Druhým typem proudění je proudění turbulentní neboli vířivé. Vzniká při roztáčení a následném křížení proudnic. Při tomto druhu proudění vznikají víry. Rychlost částic proudu je v různých místech různá, proto hovoříme o nestacionárním proudění.



Obr. 1.2 Turbulentní proudění [15]

Přechod mezi laminárním a turbulentním prouděním je dán hodnotou Reynoldsova čísla - Re

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (1)$$

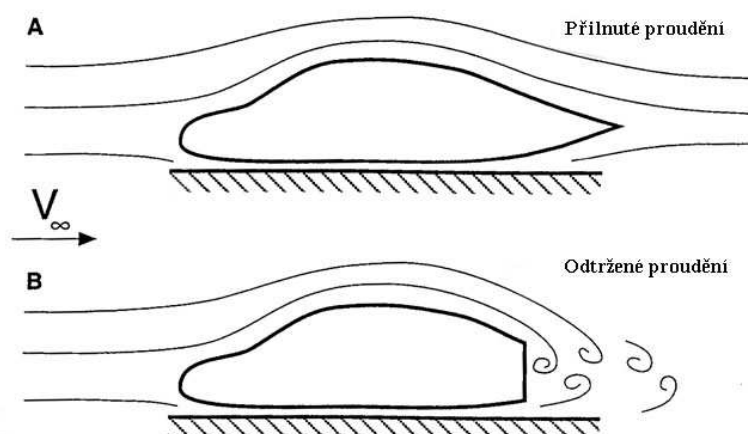
kde: v rychlost proudění

d charakteristický rozměr

ν kinematická viskozita

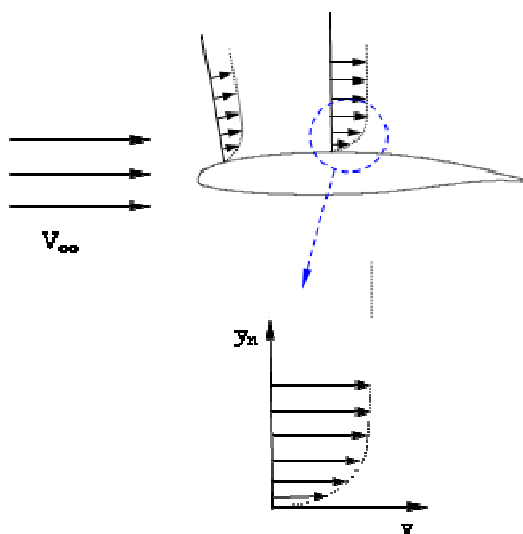
Charakteristický rozměr d je u vozidel velký, proto při obtékání dochází vždy k turbulentnímu proudění.

Proudění můžeme dále rozdělit podle způsobu obtékání vozidla. Jestliže proudnice přesně opisují tvar vozidla, můžeme říci, že se jedná o proudění přilnuté. V opačném případě se proudění nazývá odtržené. Toto proudění vzniká nejčastěji v zadní části vozu v místě odtržení mezní vrstvy.



1.1.1 MEZNÍ VRSTVA

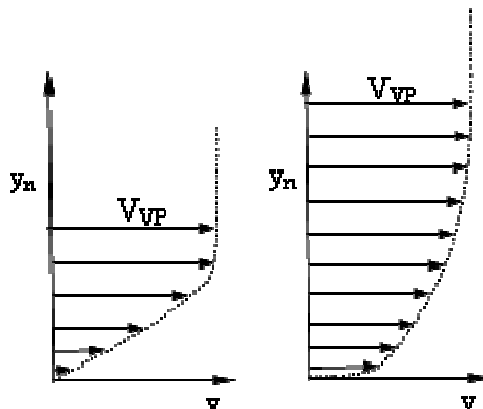
Mezní vrstva je tvořena několika proudnicemi, které bezprostředně obtékají povrch vozidla. Vlivem ulpívání částic kapaliny na povrchu je rychlost proudění na tomto povrchu nulová. Rychlost proudění se díky tření mezi jednotlivými vrstvami vzduchu parabolicky zvětšuje s rostoucí vzdáleností od povrchu.



obr. 1.4 Rychlostní profil v mezní vrstvě [11]



Mezní vrstva se vyvíjí ve směru proudu podél tělesa. Roste její tloušťka a rovněž její neuspořádanost, která je charakterizována tzv. turbulencí. Rozeznáváme dva základní druhy mezní vrstvy charakteristické svými vlastnostmi. Mezní vrstvu laminární a turbulentní.



1

Zatímco v laminární mezní vrstvě jednotlivé vrstvy tekutiny kloužou uspořádaně po sobě a typická je malá výměna hmoty i energie mezi jednotlivými vrstvami, tak u turbulentní mezní vrstvy jsou evidentní známky silně náhodného pohybu v podobě rychlostních fluktuací, spojených s nezanedbatelnou výměnou energie a hmoty ve vertikálním směru mezi jednotlivými vrstvami tekutiny. Laminární mezní vrstva je několikanásobně tenčí než turbulentní.

1.2 VLASTNOSTI TEKUTIN

Síla potřebná k pohybu vozidla v okolní tekutině je velmi těsně spjata s fyzikálními vlastnostmi této tekutiny, a to především na viskozitě, teplotě, hustotě a tlaku.

Viskozita představuje poměr smykového napětí mezi přilehlými vrstvami vzduchu k rychlostnímu gradientu mezi těmito přilehlými vrstvami. Zjednodušeně řečeno, viskozita udává, podobně jako tření, míru odolnosti proti pohybu. Je dána především přitažlivými silami mezi jednotlivými částicemi. Tekutiny s většími přitažlivými silami mají větší viskozitu.

1.2.1 BERNOULLIHO ROVNICE

Rychlost proudění vzduchu kolem vozidla silně ovlivňuje velikost aerodynamických sil působících na vozidlo. Tato rychlost souvisí s velikostí tlaku na povrchu. Bernoulliho rovnice popisuje vztah mezi rychlostí proudění v a tlakem na povrchu tělesa p pro ideální podmínky (ustálené proudění bez ztrát).

$$\frac{p}{\rho} + \frac{1}{2}v^2 = konst. \quad (2)$$

Bernoulliho rovnici lze použít pro porovnání rychlostí a tlaků ve dvou různých bodech spojitého proudění s konstantní hustotou proudící tekutiny.

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2}v_1^2 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2}v_2^2 \quad (3)$$

Bernoulliho rovnice popisující celkový tlak p_c zmíněný v kapitole 2 má tvar:

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + p + h\rho g = p_c \quad (4)$$

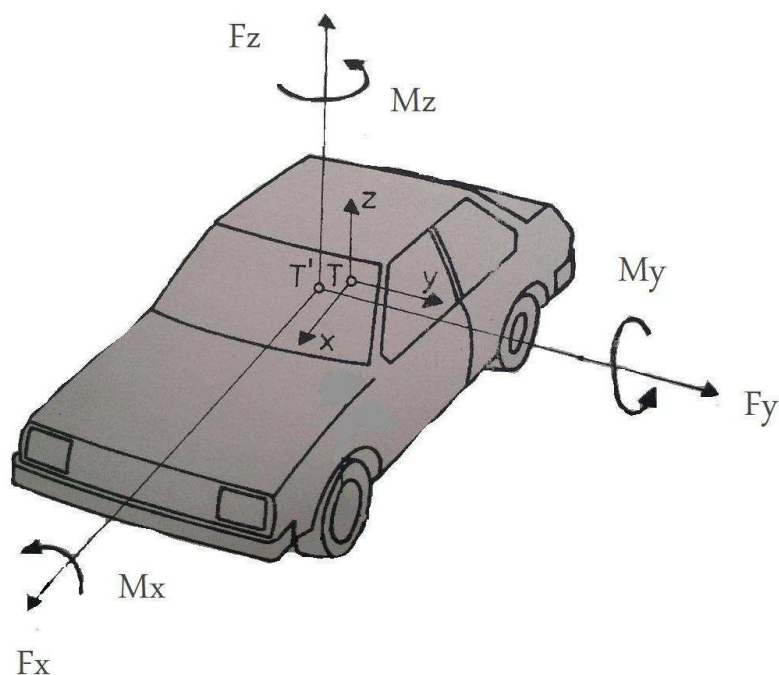
kde: $\frac{1}{2}\rho v^2$ dynamický tlak

p statický tlak

$h\rho g$ hydrostatický tlak

1.3 AERODYNAMICKÉ SÍLY A MOMENTY

Celková aerodynamická síla má obecnou velikost a směr, proto je nutné ji vhodně rozložit do jednotlivých složek. Pro souřadný systém s počátkem v těžišti vozidla platí, že odporová síla působí v ose x proti směru jízdy, aerodynamická vztlaková síla působí ve směru osy z a boční síla ve směru osy y .



Obr. 1.6 Soustava aerodynamických sil a momentů [1]

Velikosti jednotlivých složek se vypočítají podle následujících vztahů.

Odporová síla se řídí podle vztahu (4), tedy:

$$O_v = F_x = c_x \frac{\rho}{2} S_x v_r^2 \quad (4)$$



Vztlaková síla:

$$F_z = c_z \frac{\rho}{2} S_x v_r^2 \quad (5)$$

Boční síla:

$$F_y = c_y \frac{\rho}{2} S_x v_r^2 \quad (6)$$

Po úpravě rovnic (4) resp. (6) dostaneme

koeficient odporu vzduchu

$$c_x = \frac{F_x}{\frac{\rho}{2} S_x v_r^2} \quad (7)$$

resp. koeficient vztlaku

$$c_z = \frac{F_z}{\frac{\rho}{2} S_x v_r^2} \quad (8)$$

Velikosti jednotlivých složek aerodynamických momentů se vypočítají podle následujících vztahů.

Moment klopení:

$$M_x = c_{mx} \frac{\rho}{2} S_x v_r^2 r \quad (9)$$

Moment klonění:

$$M_y = c_{my} \frac{\rho}{2} S_x v_r^2 l \quad (10)$$

Moment stáčení:

$$M_z = c_{mz} \frac{\rho}{2} S_x v_r^2 l \quad (11)$$

kde: l rozvor kol

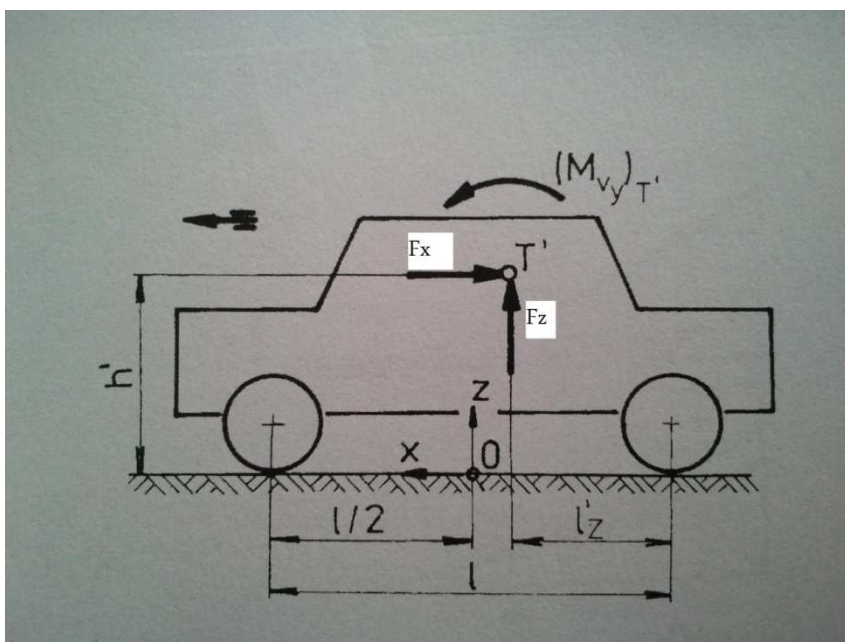
r rozchod kol

Podstatnou roli hraje také vztlaková síla přepočtená na přední a zadní nápravu. Výsledné vzorce (12) pro přední nápravu a (13) pro zadní nápravu jsme získali po úpravě výše uvedených vztahů a zavedení veličin podle obrázku 1.7.

$$F_{vzp} = F_z \frac{l_z'}{l} + F_x \frac{h'}{l} - \frac{(M_y)_{T'}}{l} \quad (12)$$



$$F_{vzz} = F_z \frac{l - l_{z'}}{l} + F_x \frac{h'}{l} - \frac{(M_y)_{T'}}{l} \quad (13)$$



Obr. 1.7 Určení vztlaku na nápravách [1]

1.4 VLIV AERODYNAMICKÝCH ÚČINKŮ NA VOZIDLO

Jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, je vzduch, který obklopuje automobil, jednou z nejpodstatnějších veličin vzhledem k jízdním výkonům a ovladatelnosti vozidla. Pokud se automobil pohybuje, musí překonávat, kromě jiných, i odpor vzduchu. S rostoucím odporem narůstá také výkon potřebný k jeho překonání a tím pádem i dnes velmi sledované veličiny, spotřeba paliva a emise výfukových plynů.

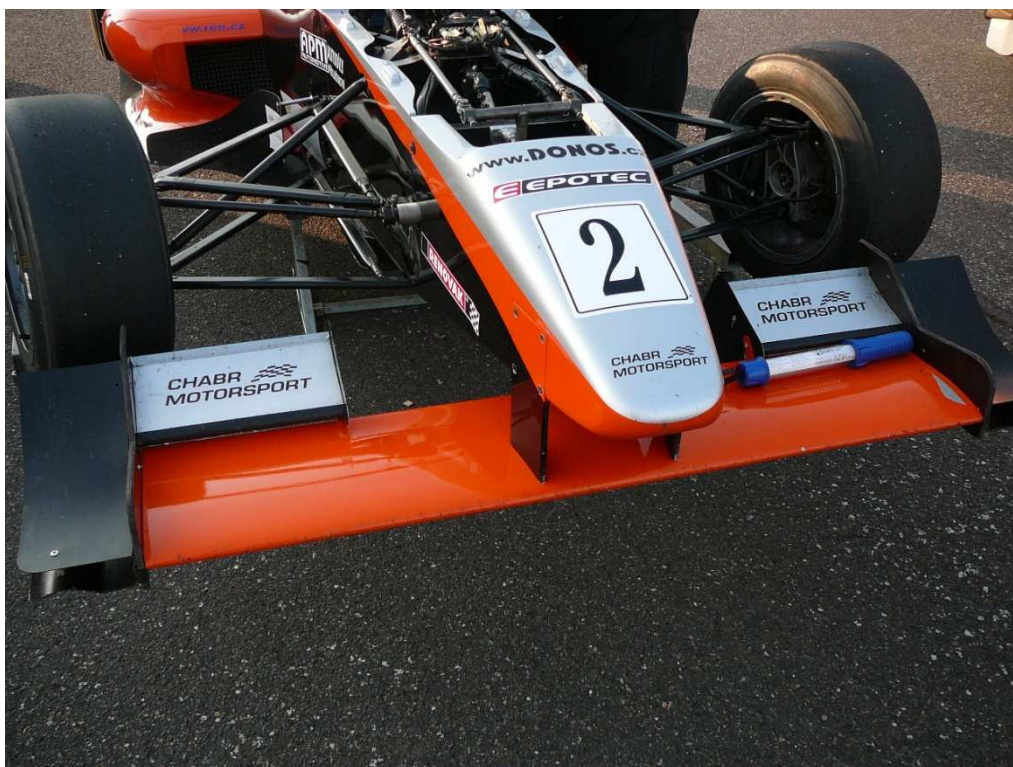
Dalším neméně důležitým faktorem, který ovlivňuje vzduch, je ovladatelnost vozidla. Především u závodních vozů jsou vynakládány nemalé prostředky k vývoji aerodynamických prvků, které by udělaly vůz co nejovladatelnější, to znamená, co nejvíce zatížily jeho nápravy, ovšem za cenu většího odporu.

Boční vítr může také v určitých situacích značně ovlivnit aerodynamiku vozidla, není ovšem předmětem zkoumání této práce. Podrobněji se touto problematikou zabývá například F. Vlk ve své knize Dynamika motorových vozidel [1].

1.4.1 NEJČASTĚJI POUŽÍVANÉ AERODYNAMICKÉ PRVKY U ZÁVODNÍCH VOZŮ

PŘEDNÍ PŘÍTLAČNÉ KŘÍDLO

Přední přítláčné křídlo musí být konstruováno tak, aby co nejsnadněji pronikalo okolním vzduchem. Jeho vodorovné plochy zajišťují až čtvrtinu přítláčné síly vozidla a svislé plochy usměrňují proudění vzduchu kolem kol. Konstrukci předního přítláčného křídla ukazuje obrázek 1.8.



Obr. 1.8 Přední přítlačné křídlo

ZADNÍ PŘÍTLAČNÉ KŘÍDLO

Podobně jako přední přítlačné křídlo zajišťuje vozidlu přitlak, u vozů formule 1 se jedná o přítlačnou sílu odpovídající až tíze vozu. Často svojí konstrukcí navazuje na difuzor umístěný pod ním.

DIFUZOR

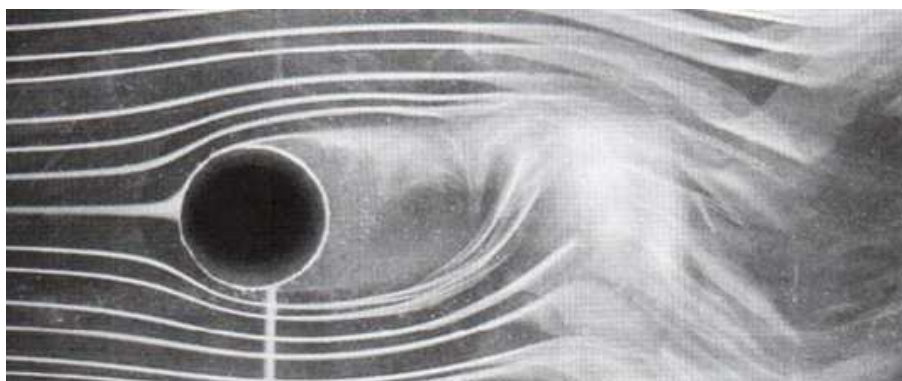
Difuzor hraje významnou roli v proudění vzduchu pod vozidlem. Je umístěn v zadní části vozu a jeho funkcí je vytvořit podtlak, čímž se vyvine přítlačná síla na zadní část vozu.

DALŠÍ KONSTRUKČNÍ PRVKY

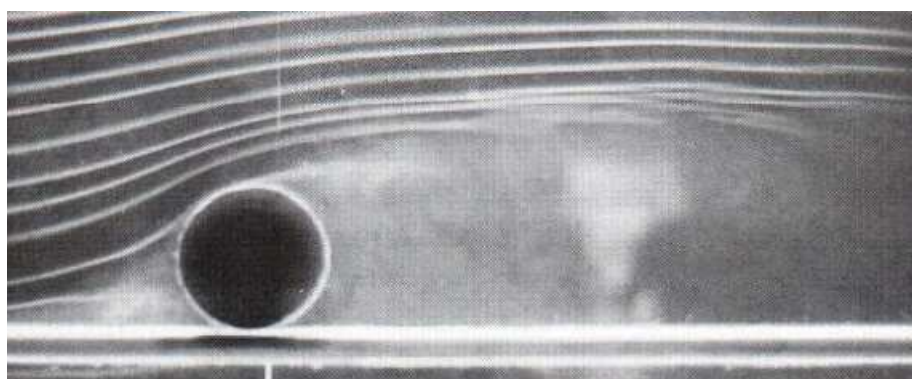
Mezi ostatní konstrukční prvky používané u závodních vozů můžeme zařadit nejrůznější deflektory, malá křídla nebo průduchy. Jejich funkce spočívá ve zvýšení přitlaku popřípadě navedení vzduchu do „správných“ míst. Konstrukce je vždy omezena předpisy platícími pro danou kategorii.

1.4.2 OBTÉKÁNÍ KOL

Velmi důležitou součástí aerodynamiky, především u závodních automobilů, jsou kola. Relativně přesně se dá obtékání kol popsat pomocí válce umístěného ve volném prostoru. Největší rozdíl oproti tomuto idealizovanému případu a reálné pneumatice je v přítomnosti vozovky, která působí na protékající tekutinu, jak je vidět na obrázku 1.9 a 1.10.

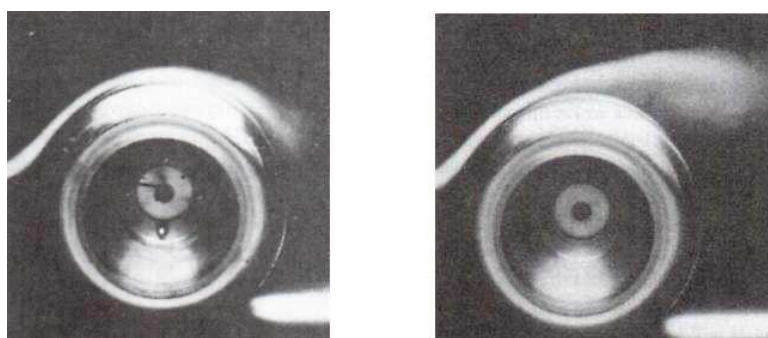


Obr. 1.9 Obtékání válce ve volném prostoru [4]



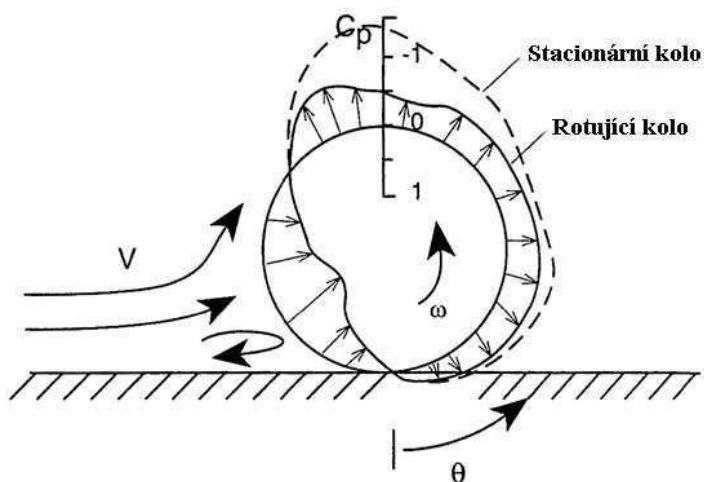
Obr. 1.10 Obtékání válce s vozovkou [4]

Dalším důležitým faktorem ovlivňujícím proudění kapaliny je rotace kol. U stacionárního kola dochází k odtržení proudu vzduchu přibližně v úhlu 160° . Na rozdíl od toho u rotujícího kola je tento úhel menší, a tedy proud vzduchu se odtrhne dříve. Porovnání proudění okolo rotujícího resp. stacionárního kola je vidět na obrázku 1.11.



Obr. 1.11 Obtékání stacionárního (vlevo) a rotujícího (vpravo) kola [4]

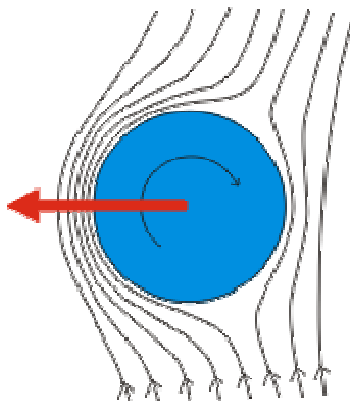
Rozložení tlaku obtékajícího vzduchu na kole charakterizuje koeficient c_p . Pokud má u stacionárního kola tento koeficient zápornou hodnotu na horní straně kola, vzniká vztlak a pokud na zadní straně kola, zvyšuje se odpor. Pokud kolo rotuje, může koeficient tlaku dosáhnout na horní straně až kladných hodnot, což se projeví jako přítlak. Tento jev se nazývá Magnusův jev.



Obr. 1.12 Rozložení tlaku na povrchu kola [4]

MAGNUSŮV JEV

Podstata Magnusova jevu je vysvětlena na obrázku 1.13. Pokud budeme uvažovat proudění vzduchu vzhledem k těžišti válce, na levé straně se sčítá rychlost obtékání a rychlost vzduchu v mezní vrstvě, na pravé straně naopak mezní vrstva „brzdí“ obtékající vzduch v blízkosti válce. Tlak vzduchu je proto menší na levé straně, a válec se odchyluje vlivem tlakové síly směrem doleva od svislého směru.



Obr. 1.13 Vznik Magnusova jevu [16]

Magnusův jev se velmi často využívá v balistice nebo v mnoha sportovních odvětvích, například stolním tenise nebo basebalu.

1.5 MOŽNOSTI MĚŘENÍ AERODYNAMICKÝCH VLASTNOSTÍ VOZIDEL

Cenově nejvýhodnější a nejjednodušší možností jak měřit aerodynamické vlastnosti vozidla jsou bezpochyby silniční zkoušky.

Asi nejběžnější silniční zkouškou je dojezdová zkouška, která slouží k určení odporu vzduchu působícího na jedoucí vozidlo. Podrobněji je popsána v dalších kapitolách.



Další silniční zkouškou může být straight-line test, nebo také zkouška za konstantní rychlosti, sloužící k určení jízdních vztlaků, tato zkouška je rovněž popsána v dalších kapitolách.

Finančně nejnáročnější, avšak zřejmě nejpřesnější variantou testování je použití aerodynamického tunelu.

1.5.1 AERODYNAMICKÝ TUNEL

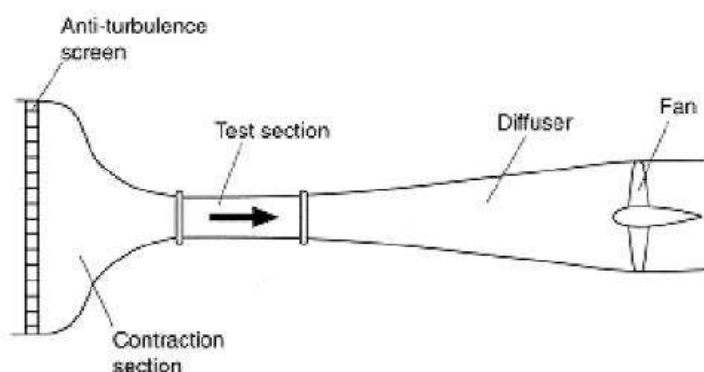
Aerodynamický tunel je výzkumné zařízení, které umožňuje vytvářet ovladatelný vzdušný proud sloužící ke zkoumání aerodynamických vlastností těles. Využívá se například v leteckém a automobilovém průmyslu.



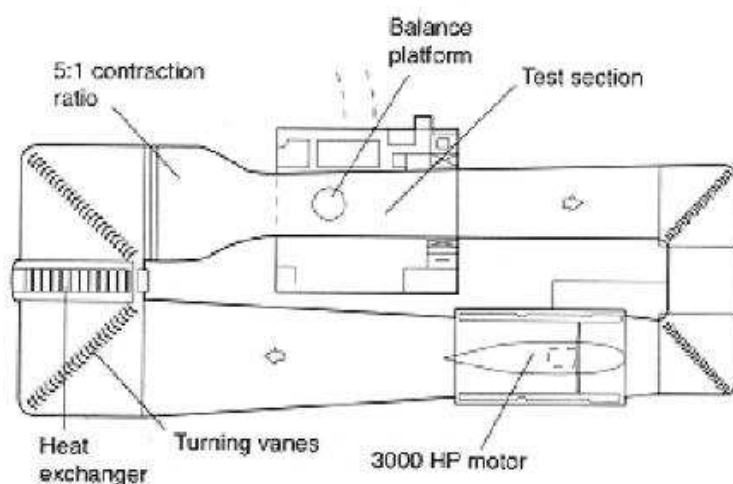
Obr. 1.14 Aerodynamický tunel Ferrari [14]

Aerodynamické tunely se dají rozdělit podle několika kritérií. Jedním z nich je například druh konstrukce a to na s otevřeným okruhem nebo s uzavřeným okruhem.

Pro konstrukci s otevřeným okruhem je typické, že proud vzduchu není po průchodu tunelem veden zpět do jeho okruhu. Naopak vzduch v uzavřeném okruhu proudí bez velkých ztrát tlaku a kinetické energie.



Obr. 1.15 Aerodynamický tunel s otevřeným okruhem [17]



Obr. 1.16 Aerodynamický tunel s uzavřeným okruhem [17]

Dalším parametrem, podle kterého můžeme rozdělit aerodynamické tunely, je rychlost proudění vzduchu. Jedná se o tunely nízkorychlostní nebo vysokorychlostní. V nízkorychlostních tunelech proudí vzduch natolik pomalu, že se neprojeví jeho stlačení. Ve vysokorychlostních tunelech je tomu právě naopak, tedy lze pozorovat vlivy stlačení proudícího vzduchu.

Princip funkce aerodynamického tunelu spočívá v obtékání vzduchu kolem automobilu, popřípadě jeho modelu. Proud vzduchu je vytvářen velkým ventilátorem a je ve většině případů vizualizován zbarveným kouřem s vlastnostmi co nejvíce podobnými jako vzduch.



Obr. 1.17 Vizualizace proudnic na modelu vozu Pagani Zonda [18]

Při testování vozidel v aerodynamickém tunelu by docházelo k nepřesným výsledkům v důsledku nehybnosti kol (na rozdíl od reálné situace). Proto moderní tunely nabízejí systémy, které tyto chyby minimalizují.

Nejčastěji se používá usazení kol na rotující válce (náboj kola rotačně připevněn k pevné části) nebo pohybující se pás pod vozem (vyžaduje pevné uchycení vozu).



2 JÍZDNÍ ODPORY

Jízdní odpory jsou síly, které působí proti pohybu vozidla. Při jízdě vždy působí odpor valivý a odpor vzdušný, při zrychlování překonává vozidlo odpor zrychlení, při jízdě do svahu odpor stoupání, a je-li za vozidlem připojen přívěs, hovoříme o odporu přívěsu. Celkový jízdní odpor dostaneme jako součet všech zmíněných odporů [1].

$$F_k = O_f + O_v + O_s + O_z, \quad (14)$$

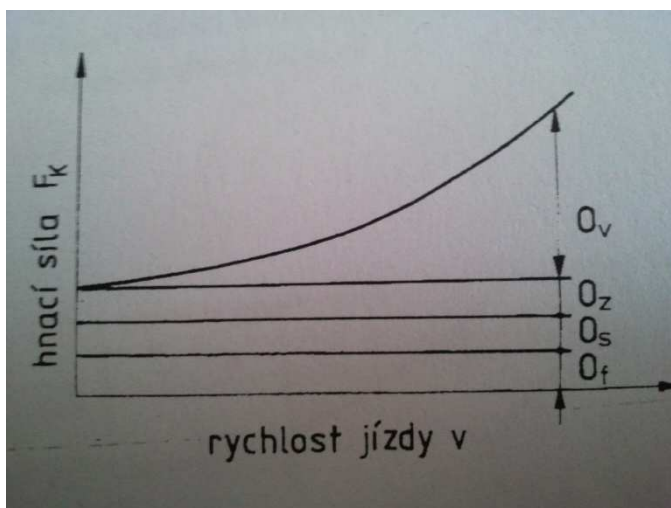
kde: F_k hnací síla vozidla potřebná k překonání jízdních odporů

O_f odpor valivý

O_v odpor vzdušný

O_s odpor stoupání

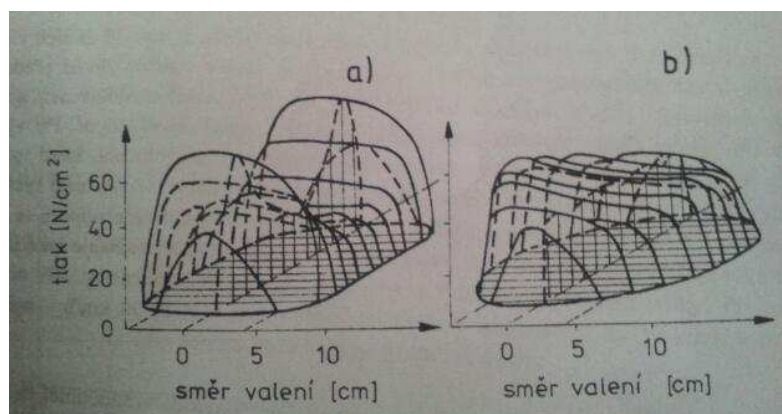
O_z odpor zrychlení



obr.2.1 Hnací síla potřebná na překonání jízdních odporů [1]

2.1 VALIVÝ ODPOR

Valivý odpor vzniká deformací vozovky a pneumatiky. Styčnou plochu mezi pneumatikou a vozovkou nazýváme stopou. V přední části stopy dochází ke stlačování pneumatiky do roviny vozovky a v zadní části stopy k jejímu opětovnému vyrovnavání do kruhového tvaru. Rozložení tlaků je zobrazeno na obr. 2.2.

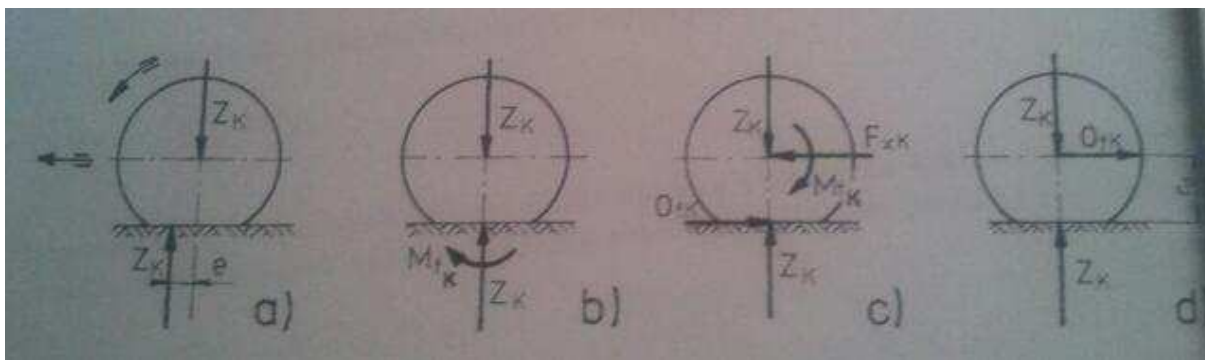


Obr. 2.2 Deformace a) diagonální a b) radiální pneumatiky [1]

Síly způsobující stlačení pneumatiky jsou vlivem tepelných ztrát větší než síly při navrácení pneumatiky do původního stavu, proto i tlaky jsou v přední části stopy vyšší a to způsobuje předstunutí celkové výslednice elementárních sil Z_k před svislou osu kola o vzdálenost e , obr. 2.3 a). Tuto výslednici můžeme posunout do svislé osy kola, obr. 2.3 b), zavedeme-li moment M_{fk} působící z vozovky na kolo. Moment M_{fk} vyvolá reakci O_{fk} , obr. 2.3 c), směřující proti pohybu kola. Tato reakce se nazývá valivý odpor kola.

$$O_{fk} = Z_k \frac{e}{r_d} = Z_k \cdot f_k, \quad (15)$$

kde: $f_k = \frac{e}{r_d}$ součinitel valivého odporu kola



Obr.2.3 Valivý odpor kola [1]

Valivý odpor vozidla je dán součtem valivých odporů jednotlivých kol.

$$O_f = \sum_i O_{fki} = \sum_i Z_{ki} \cdot f_{ki} \quad (16)$$



Z dalších faktorů ovlivňujících valivý odpor, jsou nejdůležitější vliv deformace pneumatiky a vliv rychlosti kola. Při menším tlaku v pneumatice vzrůstá deformační práce a tím i tlumící práce, která zvětšuje valivý odpor. Také při vyšších rychlostech stoupá valivý odpor v důsledku snižování měrného tlaku v zadní části stopy.

2.1.1 ODPORY „PODOBNÉ“ VALIVÝM

Odporem „podobným“ k valivému odporu je například odpor vlivem sbíhavosti předních kol, který se většinou v praktických výpočtech zanedbává. Další zvyšování jízdních odporů nastává při přejezdu nerovností, kdy v pneumatice vznikají přídavné deformace. Podobně je tomu i u tlumičů, kde se mechanická energie mění v teplo a motor tyto ztráty musí překonávat. Kola vozidla se při pohybu dostávají do kontaktu se vzduchem, a vzniká další odpor (často řazený k vzdušnému odporu celého vozidla).

2.2 ODPOR VZDUŠNÝ

Vzdušný odpor O_v vzniká v důsledku neuzavření proudnic protékajícího vzduchu za jedoucím vozidlem. Velikost tohoto odporu je dána výslednicí normálových tlaků na povrch vozidla a třecích sil působících v tečném směru proudění vzduchu. V důsledku velkého podtlaku na povrchu jedoucího vozidla a přetlaku pod pohybujícím se vozidlem vzniká indukovaný vzdušný odpor, který je další složkou celkového vzdušného odporu. Uvažovat musíme též odpory při průchodu vzduchu větracím a chladicím systémem a již zmíněný vliv kol vozidla.

Celkový vzdušný odpor určíme jako:

$$O_v = c_x \frac{\rho}{2} S_x v_r^2, \quad (17)$$

kde: c_x součinitel vzdušného odporu

ρ měrná hmotnost vzduchu

S_x čelní plocha vozidla

v_r výsledná rychlost proudění vzduchu kolem vozidla

Rychlost proudění vzduchu v_r se skládá z rychlosti pohybu a vozidla v a z rychlosti větru v_v .

$$\bar{v}_r = \bar{v} + \bar{v}_v \quad (18)$$

Měrná hmotnost vzduchu je závislá na teplotě a tlaku podle vzorce

$$\rho = \rho_0 \frac{P(t_0 + 273)}{P_0(t + 273)} \quad (19)$$

Hodnota čelní plochy vozidla S_x se získá čelní projekcí vozidla.



Obr. 2.4 Projekce čelní plochy vozidla [1]

Hodnoty součinitele odporu c_x závisí především na tvaru vozidla a měří se buď na modelech, nebo přímo na reálných vozidlech v aerodynamickém tunelu.

2.3 ODPOR STOUPÁNÍ

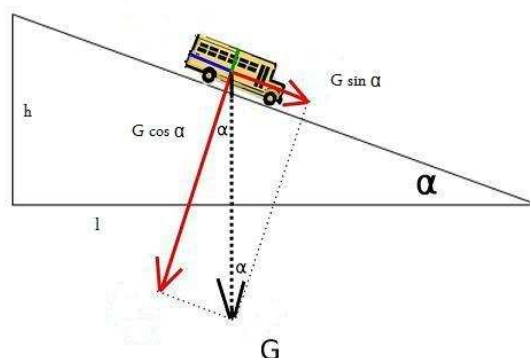
Odpor stoupání je dán složkou tíhy vozidla rovnoběžnou s povrchem vozovky, proto platí

$$O_s = \pm G \sin \alpha, \quad (20)$$

kde: G celková tíha vozidla

α úhel mezi vodorovnou rovinou a rovinou vozovky

Znaménko plus v rovnici znamená stoupání a znaménko minus klesání. Odpor stoupání působí vždy v těžišti vozidla.



Obr. 2.5 Určení odporu stoupání



2.4 ODPOR ZRYCHLENÍ

Při zrychlení působí na vozidlo setrvačná síla v opačném směru než samotné zrychlení, tuto sílu nazýváme odpor zrychlení a je určena vztahem

$$O_z = O_{zp} + O_{zr}, \quad (21)$$

kde: O_{zp} odpor zrychlení posuvné části

O_{zr} odpor zrychlení otáčejících se částí

Pro odpor zrychlení posuvné části o hmotnosti m můžeme psát

$$O_{zp} = m\ddot{x} \quad (22)$$

a pro odpor zrychlení otáčejících se částí

$$O_{zr} = \frac{M_r}{r_d} \quad (23)$$

kde: M_r setrvačný moment rotujících částí vozidla

r_d dynamický poloměr kola

Moment potřebný k překonání odporu rotačních částí můžeme spočítat jako

$$M_r = M_{rm} + M_{rp} + M_{rk} \quad (24)$$

kde: M_{rm} moment potřebný k zrychlení rotujících částí motoru

M_{rp} moment potřebný k zrychlení rotujících částí převodových ústrojí

M_{rk} moment potřebný k zrychlení kol

Výsledný odpor zrychlení posuvných a rotačních částí můžeme psát v konečném tvaru

$$O_z = \left[1 + \frac{(J_m i_c^2 + J_p i_r^2) \eta + \sum J_{ki}}{m r_d^2} \right] m \ddot{x} = \vartheta m \ddot{x} \quad (25)$$

kde: J_m moment setrvačnosti rotujících částí motoru

i_c celkový převod mezi motorem a hnacími koly

J_p moment setrvačnosti rotujících částí převodového

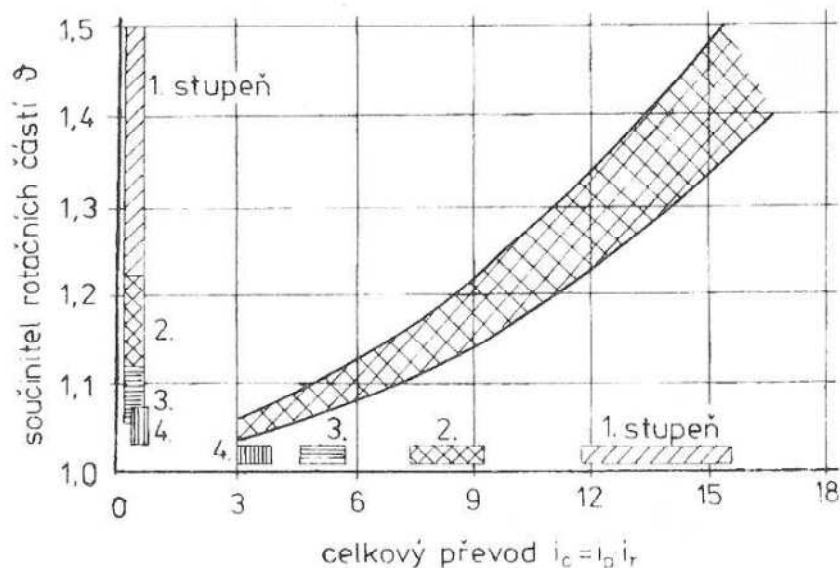
i_r převod rozvodovky

η mechanická účinnost

J_{ki} moment setrvačnosti kol vozidla



ϑ je výraz v hranaté závorce a má označení součinitele vlivu rotačních částí. Hodnota součinitele vlivu rotačních hmot je v důsledku jeho závislosti na převodovém poměru proměnná. Následující graf ukazuje rozmezí hodnot součinitele ϑ v závislosti na celkovém převodu. Celkový převod je součin převodového poměru stálého převodu a převodového poměru zařazeného převodového stupně. Z toho vyplývá, že součinitel vlivu rotačních částí závisí na zařazeném převodovém stupni.



Obr. 2.6 Vliv celkového převodu na součinitel rotačních částí [13]

2.5 ODPOR PŘÍVĚSU

Odpor přívěsu je síla, která působí v ose spojovacího mechanismu při tažení přívěsu. Odpor valivý, stoupání i zrychlení se počítají pro přívěs zvlášť, avšak odpor vzdušný se určuje pro vozidlo i přívěs dohromady. Určování odporu přívěsu je velmi důležité, neboť značně zvyšuje potřebnou hnací sílu vozidla.



3 TEORETICKÁ VÝCHODISKA METOD MĚŘENÍ

V následující kapitole budou uvedena východiska, které vedla od návrhu jízdních zkoušek až po zpracování jejich výsledků.

3.1 MĚŘENÍ ODPORŮ - DOJEZDOVÁ ZKOUŠKA

Prvním vztahem, z kterého vycházíme při návrhu dojezdové zkoušky je rovnice (1) uvedená v kapitole 2, tedy

$$F_k = O_f + O_v + O_s + O_z \quad (1)$$

F_k , tedy hnací síla vozidla, je v případě dojezdové zkoušky z důvodu zařazeného neutrálu rovna nule.

O_s , odpor stoupání, můžeme díky provedení zkoušek v obou směrech považovat za rovný nule.

Odpor zrychlení je podle vzorce (25)

$$O_z = \vartheta ma \quad (25)$$

ϑ , tedy součinitel rotačních hmot, můžeme díky zařazenému neutrálu považovat za rovný jedné, hmotnost vozidla známe a zrychlení je výsledkem měření.

Odpor vzduchu O_v se řídí podle vzorce (4) uvedeného v kapitole 2, tedy

$$O_v = c_x \frac{\rho}{2} S_x v_r^2 \quad (4)$$

Celou část $c_x \frac{\rho}{2} S_x$ můžeme položit rovnu konstantě C_x , ta je opět výsledkem měření.

Valivý odpor je možné, vzhledem ke vztahu (16), považovat za nezávislý na rychlosti. (Někdy se připouští lineární závislost na rychlosti)

Po aplikaci všech předchozích úvah do vzorce (1) dostaneme vztah (26)

$$0 = O_f(v) + O_v(v) + ma \quad (26)$$

Po další jednoduché úpravě

$$a(v) = \frac{1}{m} (O_f(v) + O_v(v)) \quad (27)$$

Po závěrečné úpravě dostaneme vztah (28)

$$a(v) = O_f(v) + C_x v^2 \quad (28)$$

Pokud tento vztah porovnáme s rovnicí polynomu druhého stupně (36), kterým můžeme proložit závislost zrychlení na rychlosti, dostaneme



$$O_f = a + bv$$

$$C_x v^2 = cv^2$$

Z tohoto závěru vyplývá, že pro vyhodnocení výsledků z měření odporu vzduchu potřebujeme vytvořit pro každou jízdu závislost zrychlení na rychlosti. K této závislosti jsme dospěli, jak je vidět v následujících kapitolách, pomocí dvou metod, které jsou následně porovnávány. Obě metody využívají vztahu (29).

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} \quad (29)$$

V první metodě následuje po přímé derivaci rychlosti proložení závislosti výsledného zrychlení na rychlosti polynomem druhého stupně (pro vyhlazení). V druhé metodě je nejprve závislost rychlosti na čase proložena polynomem druhého stupně (zkušebně i jiného, opět se jedná o lepší vyhlazení závislosti) a poté je tento polynom zderivován. Z tohoto postupu vznikne námi požadovaná závislost zrychlení na rychlosti. Zpracování obou metod je podrobněji popsáno v kapitole 5.

3.2 MĚŘENÍ VZTLAKŮ – TEST ZA KONSTANTNÍ RYCHLOSTI

Základním vztahem, z kterého vycházíme pro úvahy o zpracování údajů z testu za konstantní rychlosti, je rovnice (30) pro vztakovou sílu působící na vozidlo.

$$F_L(v) = c_z \frac{\rho}{2} S_x v^2 + F_{stat} \quad (30)$$

Část $c_z \frac{\rho}{2} S_x$ chceme při praktických zkouškách změřit, proto jí můžeme označit jako C_z . Statická síla F_{stat} se při testovacích jízdách nemění.

Změna vztakové síly ΔF_L se projevuje jako reakce vozovky na povrch pneumatiky F_{zk} . Tato reakce se dále projevuje jako změna délky pružin S , kterou jsme schopni změřit pomocí potenciometrů. Platí vztah (31)

$$F_{zk} = F_z(S) \quad (31)$$

Pro vztakovou sílu potom platí

$$F_L(v) = C_z v^2 + F_{stat} = F_z(S) \quad (32)$$

Pokud chceme zjistit, jak se vozidlo chová z hlediska vztlaků při určitých rychlostech, musíme zákonitě měřit tyto rychlosti a projevy zatížení vozidla, tedy změny na tlumičích. Následně hodnoty naměřené na tlumičích přepočítáme podle zvoleného matematického postupu na již zmíněné zatížení a výsledek vyneseme do grafu jako závislost zatížení vozidla na rychlosti, následně proložíme polynomem druhého stupně.

$$F_L(v) = C_z v^2 = a + bv + cv^2 \quad (33)$$

Zpracování naměřených výsledků je podrobněji popsáno v kapitole 5.



4 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ

Při samotném měření jsem spolupracoval se závodním týmem pana Tomáše Chabry, Chabr Motorsport, který dodal svoji formuli kategorie E2 – 1400. Cílem dále popsaných měření bylo zjistit rozdíly mezi jednotlivými aerodynamickými nastaveními vozu a změřit aerodynamické odpory a vzlaky na nápravách.



Obr. 4.1 Formule týmu Chabr Motorsport

4.1 NÁVRH ZKOUŠEK

Hlavními nástroji pro zjištění námi hledaných závislostí byly zvoleny dojezdová zkouška a zkouška za konstantní rychlosti.

Průběh dojezdové zkoušky určuje norma ČSN 30 0554 – Dojezdová zkouška silničních motorových vozidel, která platí pro zjišťování závislosti jízdního odporu vozidla na rychlosti jízdy u osobních automobilů, nákladních automobilů, autobusů a vozidel s návěsem i přívěsem.

Dojezdová zkouška je dle této normy zkouška, při které se vozidlo pohybuje po dosažení určité rychlosti pouze vlivem setrvačnosti (zařazený neutráل) a je zpomalováno pouze jízdními odpory. Zkušební dráha musí být dostatečně dlouhá pro rozjezd na potřebnou zkušební rychlost a bezpečné zastavení vozidla. Samotný měřicí úsek musí být dlouhý minimálně 1000m, s kvalitním pevným povrchem, podélným sklonem maximálně 1% a příčným sklonem 1,5%.

Zkušební vozidlo musí odpovídat technickým podkladům, pneumatiky musí mít alespoň 2/3 původní výšky, musí být plně zatížené a zahřáté nepřetržitou jízdou trvající alespoň 1 hodinu. Zkušební rychlost potřebná k provedení zkoušky je 90% maximální rychlosti vozidla, maximálně však 150 km/h. Teplota vzduchu během zkoušky musí být v rozmezí 5 až 25 °C, síla větru nejvýše 1,5 m/s a tlak vzduchu mezi 97,33 a 101,25 kPa.



Druhou námi prováděnou zkouškou bude takzvaný „straight-line test“ – zkouška za konstantní rychlosti pro zjištění zatížení na jednotlivých nápravách. Při tomto testu se řidič rozjede s vozidlem v přímém směru na maximální (popřípadě jinou hodnotu) rychlost a setrvá na této hodnotě rychlosti po předem stanovenou dobu. Požadavkem na řidiče v této zkoušce je opakovaně dosáhnout dané rychlosti přibližně ve stejném místě trati a udržet po dostatečně dlouhou dobu rychlost a směr konstantní. Během jízdy se bude kromě rychlosti snímat změna výšky vozidla přes tenzometry umístěné na pružinách vozu.

4.2 PROVEDENÍ ZKOUŠEK

Požadavky na zkušební dráhu se řídí normou ČSN 30 0554 a jsou uvedeny v předchozí kapitole. Bohužel se nepodařilo najít místo, které by naprosto přesně vyhovovalo našim požadavkům, proto jsme pro realizaci měření zvolili letiště v Panenském Týnci, přesněji řečeno jeho 1,5 kilometru dlouhou obslužnou cestu. Tato dráha není díky svým parametrům nejvhodnější pro měření podobného typu, proto muselo být učiněno v postupu měření několik úprav uvedených níže.



Obr. 4.2 Letiště Panenský Týnec (červeně vyznačená obslužná cesta) [19]

4.2.1 ZKUŠEBNÍ VŮZ

Zkušebním vozidlem byla formule třídy E2 – 1400 závodního týmu Chabr Motorsport. Vozidlo je postaveno na trubkovém rámu, osazeno 4 - válcovým, 16 - ti ventilovým motorem Kawasaki o výkonu 200 HP při 9000 ot/min a maximálním točivým momentem 155 Nm při 9000 ot/min. Nastavovat bylo možné sklon předního i zadního přitlačného křídla, výšku vozu vpředu i vzadu a tuhost tlumičů (tato možnost nebyla při testování využita). Automobil byl vybaven difuzorem o hmotnosti 6 kg. Statické zatížení vozu s řidičem bylo 121,5 kg na přední nápravě a 149 kg na zadní nápravě.

Pro určení rychlosti byl použit klasický Hallův snímač otáček kol s hustotou záznamu 50 Hz. Dále byl na každém tlumiči nainstalován jeden potenciometr k určení výchylek jednotlivých kol a to s frekvencí 100 Hz. Záznam jednotlivých jízd, především profilu dráhy, byl snímán pomocí GPS zařízení. K ukládání všech naměřených hodnot bylo ve voze použito záznamové zařízení AIM EVO 4.



Obr. 4.3 Dataloger AIM EVO 4 [12]

4.2.2 METODIKA MĚŘENÍ

Na počátku měření byla zkušební dráha osazena kužely, které označují začátek a konec měřeného úseku, a podobně byly rozmístěny „beacon’s“ (časové závory) pro spuštění a ukončení záznamu dat. Jelikož zkušební dráha svojí charakteristikou, především častou změnou sklonu, neodpovídala normě ČSN 30 0554, musely být všechny jízdy prováděny v obou směrech, s cílem dosáhnout eliminace těchto nepřesností vzhledem k normě. Dojezdové zkoušky byly pro větší množství údajů prováděny dvakrát („tam a zpět“), tedy dohromady čtyři jízdy. Pořadím těchto jízd je dána dále v textu také terminologie a to následujícím způsobem:

První jízda dojezdové zkoušky je označena jako *první úsek trati*, druhá jízda, prováděná opačným směrem, je označena jako *druhý úsek trati*, třetí jízda je *třetí úsek trati* a čtvrtá jízda, opět opačným směrem, je *čtvrtý úsek trati*.

Každá série měření obsahovala 4 testování a byla charakteristická použitým nastavením vozu. Test číslo 1 byla dojezdová zkouška, upravená následujícím způsobem. Rychlost, ze které vozidlo začalo zpomalovat, byla nastavena na maximální rychlost vozu, kterou lze s daným nastavením dosáhnout. Bohužel, kvůli nerovnostem trati a možnému poškození vozu, byla testovací rychlost následně snížena na 200 km/h. Dále byla určena minimální rychlost, pro kterou mají měření smysl, jako 80 km/h, místo úplného zastavení. 80 km/h je přibližně minimální rychlost, kterou se závodní vozidlo běžně pohybuje po závodních okruzích.

Druhý, třetí a čtvrtý test v každé sérii byla jízda za konstantní rychlosti, která je popsána výše s tím rozdílem, že jednotlivé rychlosti byly 200 km/h (druhá jízda), 160 km/h (třetí jízda) a 100 km/h (čtvrtá jízda).

Zkušební vozidlo bylo na začátku testování zahřáté na provozní teplotu, pneumatiky byly dohuštěny na předepsané hodnoty a byly doplněny pohonné hmoty. Závodní formule je jednomístné vozidlo, tudíž dosažení podmínky o plném obsazení vozidla při průběhu zkoušek bylo docíleno osobou řidiče. Před každou zkušební jízdou byla pomocí meteostanice Brondi CK-20 změřena vlhkost, teplota a tlak vzduchu. Dále byla ručním anemometrem změřena síla větru a směrovou ružicí vlastní výroby směr větru. Pomocí bezkontaktního pyrometru byla určena teplota pneumatik ve třech bodech.



Obr. 4.4 Meteostanice Brondi a ruční anemometr

4.2.3 NASTAVENÍ VOZU

Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, každá série měření (4 jízdy) byla charakteristická jiným nastavením vozu. V následující tabulce jsou uvedena nastavení vozu pro jednotlivé série měření.

Tab. 4.1 Přehled nastavení vozu

Série měření	Nastavení	Výška přední náprava	Výška zadní náprava	Přední křídlo	Zadní křídlo
1	1	27	38	23°	5c/1A
	2	27	38	23°	5c/1A
2	3	27	38	23°	9A/3A
3	4	27	38	23°	9A/3A
4	5	27	38	30,5°	9A/3A
5	6	27	38	27°	6B/2A
6	7	30	52	27°	6B/2A
7	8	39	39	27°	6B/2A
8	9	39	59	27°	6B/2A
9	10	27	38	27°	6B/2A

Uvedené číslování sérií jízd se přesně neshoduje s číslováním jednotlivých nastavení vozu, aby bylo dosaženo shody mezi pojmenováním dat v datalogeru a číslováním nastavení.

Nastavení vozu v první sérii měření je nejběžněji používané nastavení na závodních okruzích. Druhá série měření proběhla s nastavením pro maximální přítlak. Třetí série je obdobné nastavení vozu s přidaným zadním dvojitém křídlem vlastní konstrukce stáje Chabr Motorsport. Čtvrtá série má maximální nastavení předního křídla pro jízdu na mokru a opět zadní dvojité křídlo. První 4 série měření slouží k podchycení rozdílu mezi jednotlivými nastaveními předních a zadních křídel, nastavení výšky automobilu proto zůstává při těchto měření nezměněné.



Obr. 4.5 Zadní přitlačné křídlo

Série měření 5 až 8 slouží k podchycení rozdílu mezi jednotlivými nastaveními výšky vozidla, proto nastavení předních a zadních přitlačných křídel zůstávají neměnná. Měření 9 je potom závěrečné měření bez difuzoru, který je standardně umístěn pod zadním přitlačným křídlem.



Obr. 4.6 Zadní difuzor

Pro lepší srozumitelnost a snadnější interpretaci výsledků jsem určil několik dvojic nastavení, které má smysl mezi sebou porovnávat. Tyto dvojice jsou uvedeny v tabulce 4.2.



Tab. 4.2 Dvojice nastavení, která budou dále porovnávána

Nastavení 3	Nastavení 4		Nastavení 7	Nastavení 9
Nastavení 4	Nastavení 5		Nastavení 8	Nastavení 9
Nastavení 3	Nastavení 6		Nastavení 6	Nastavení 10
Nastavení 6	Nastavení 7			
Nastavení 6	Nastavení 8			



Obr. 4.7 Odpružení předních kol s potenciometry



5 ZPRACOVÁNÍ A POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Naměřená data byla nejprve stažena z datalogeru AIM EVO 4 pomocí USB flash disku do osobního počítače a následně zpracována v programu Race Studio Analysis. Další zpracování dat do grafické podoby proběhlo v programu Matlab a výpočty vzorců v programu Mathcad.

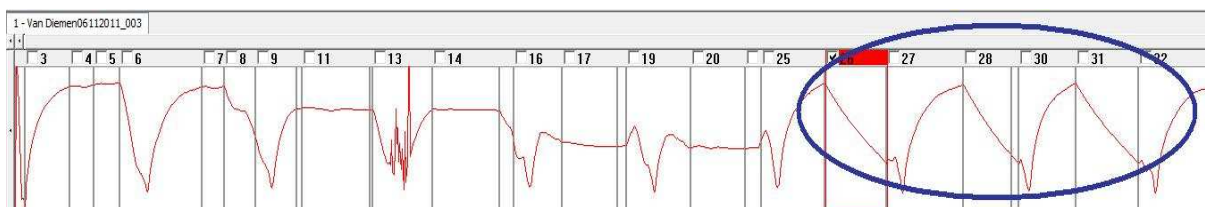
Tests Loaded:		
X	Van Diemen26102011_000	
	2/11 00.02.375	
Measures:		
☐	RPM_Engine [rpm]	6008
☒	Speed_LP [km/h]	126.1
☐	LC1_L [AFR]	11.40
☐	LC2_P [AFR]	12.19
☐	Tlak_olej [bar]	3.83
☒	LP_tlumič [mm]	21.1
☐	PP_tlumič [mm]	20.2
☐	výškové_G [g]	0.94
☐	boční_G [g]	0.02
☐	podélné_G [g]	-0.42
☐	Datalogger_Tem [°C]	16
☐	Battery [V]	14.5
☐	Teplota_voda [°C]	63
☐	Teplota_olej [°C]	74
☐	LZ_tlumič [mm]	20.6
☐	PZ_tlumič [mm]	21.6
☐	GPS_Speed [km/h]	128.3
☐	GPS_Nsat [#]	10
☐	GPS_LatAcc [g]	0.00
☐	GPS_LongAcc [g]	-0.54
☐	GPS_Heading [deg]	86.4
☐	GPS_Gyro [deg/s]	0.1
☐	GPS_PosAccuracy [m]	1.44

Obr. 5.1 Ukázka naměřených dat v programu Race Studio Analysis

5.1 DOJEZDOVÁ ZKOUŠKA

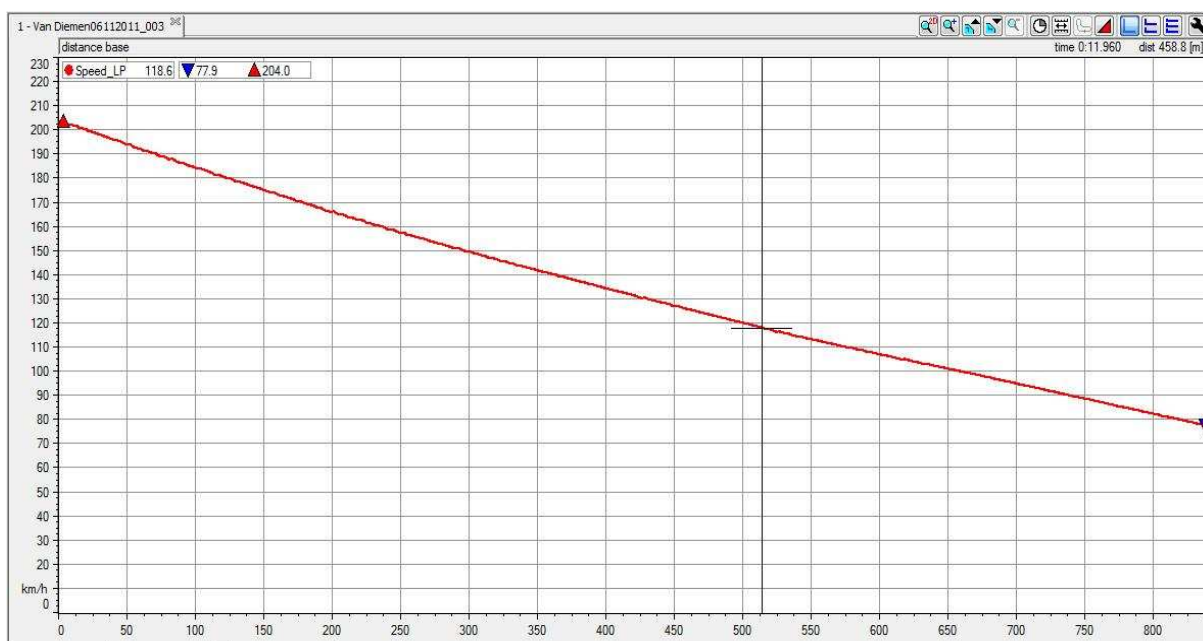
Hlavním cílem při zpracování dat z dojezdové zkoušky bylo získat průběh závislosti zpomalení na rychlosti vozidla.

Prvotní úprava naměřených dat v programu Race Studio Analysis spočívala v rozdělení jednotlivých měřených úseků na námi požadované části obsahující data z dojezdové zkoušky.



Obr. 5.2 Rozdělení naměřených dat na úseky obsahující dojezdovou zkoušku

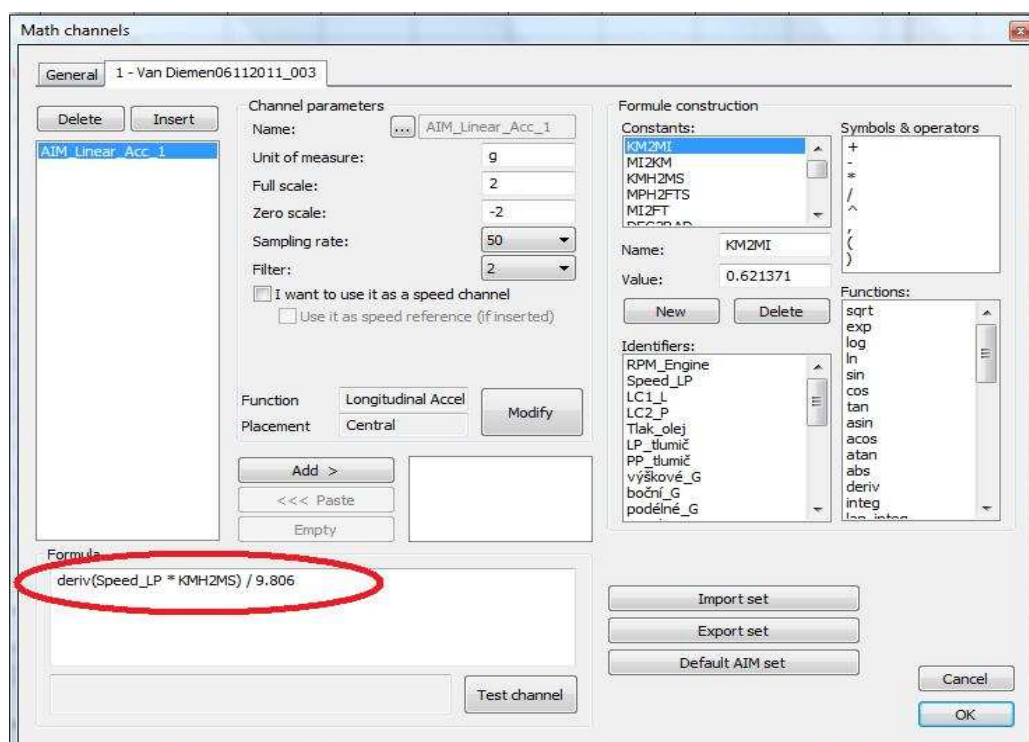
Konkrétní průběh jedné dojezdové zkoušky z obr. 5.2 (úsek 26) je zobrazen na obr. 5.3.



Obr. 5.3 Průběh dojezdové zkoušky udávající závislost rychlosti na ujeté dráze

5.1.1 METODA PŘÍMÉ DERIVACE

První metodou zpracování dat z dojezdové zkoušky byla metoda přímé derivace rychlosti v programu Race Studio Analysis pomocí matematického kanálu. Matematická podoba tohoto kanálu je vidět na obr. 5.4.



Obr. 5.4 Derivace rychlosti pomocí matematického kanálu



Dalším krokem při zpracování dat byl jejich převod do tabulkového procesoru Excel. Jelikož byl čas od začátku do konce dojezdové zkoušky přibližně 20s a záznamová hustota kanálu rychlosti (tím pádem i derivace rychlosti) 50Hz, je tabulka s uloženými hodnotami velmi rozsáhlá, a proto je zde zobrazena pouze její malá část (tab. 5.1).

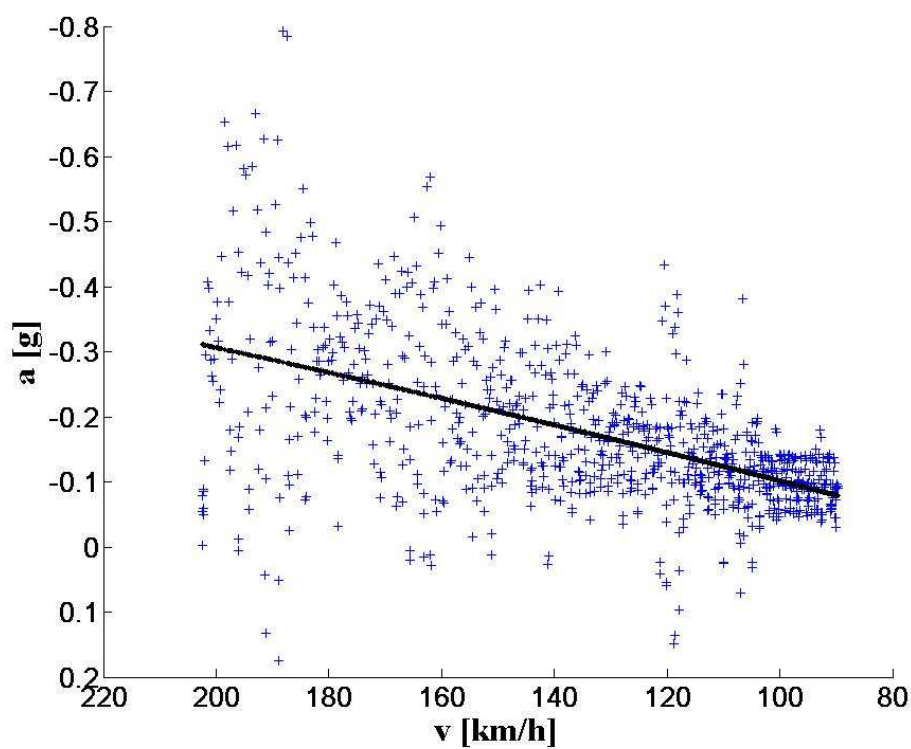
Tab. 5.1 Závislost rychlosti a její derivace na čase

Time (s)	Speed_LP [km/h]	AIM_Linear_Acc_2 [g]
0.000	210.100	-0.639
0.020	209.538	-0.519
0.040	209.688	-0.007
0.060	209.925	0.435
0.080	210.350	0.474
0.100	210.512	0.243
0.120	210.563	0.069
0.140	210.625	0.031
0.160	210.662	-0.022
0.180	210.512	-0.140
0.200	210.387	-0.178
0.220	210.338	-0.056
0.240	210.275	0.021
0.260	210.175	-0.196
0.280	209.850	-0.564
0.300	209.125	-0.622
0.320	209.225	-0.193
0.340	209.425	0.336
0.360	209.838	0.506
0.380	209.988	0.267
0.400	210.013	-0.118
0.420	209.663	-0.407
0.440	209.313	-0.513

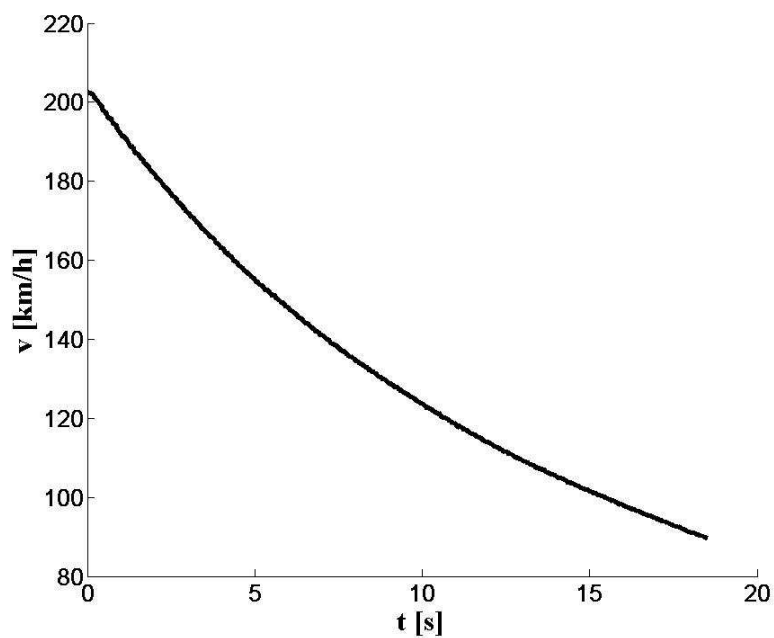
První sloupec určuje čas od začátku zpomalování, druhý aktuální rychlost v daném čase a třetí derivaci rychlosti v každém bodě, tedy zrychlení.

Z takto připravených údajů byly dále pomocí softwaru Matlab vytvořeny grafy odpovídající jednotlivým nastavením vozu.

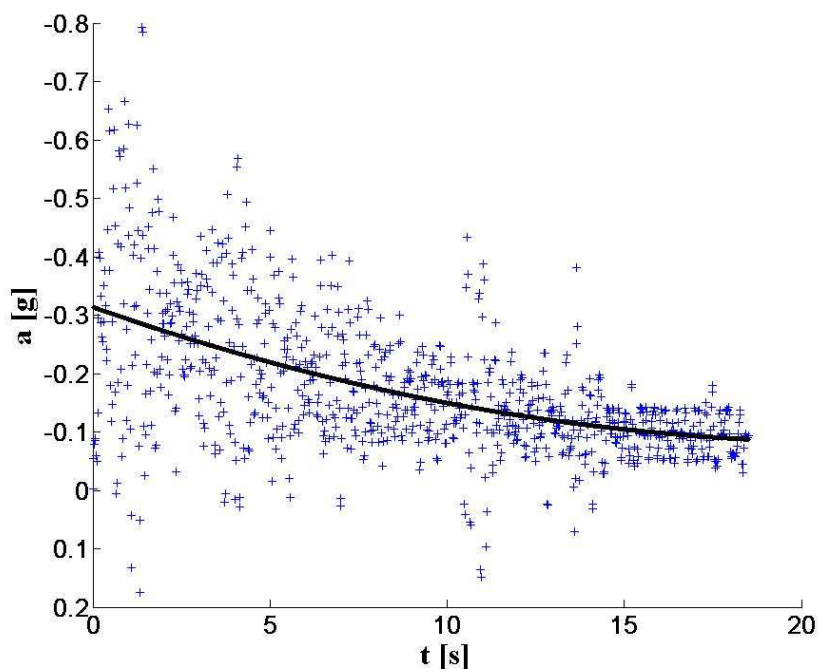
Na obr. 5.5, 5.6 a 5.7 jsou postupně zobrazeny závislosti zrychlení na rychlosti, rychlosti na čase a zrychlení na čase pro jedno vybrané nastavení vozu, v tomto případě se jedná o nastavení číslo 3 v druhém úseku trati. Modré body v grafech 5.5 a 5.7 vyjadřují body zrychlení v čase a křivky grafů vznikly jejich proložením polynomem druhého stupně.



Obr. 5.5 Závislost zrychlení na rychlosti pro nastavení 3 v úseku trati 2



Obr. 5.6 Závislost rychlosti na čase pro nastavení 3 v úseku trati 2



Obr. 5.7 Závislost zrychlení na čase pro nastavení 3 v úseku trati 2

Na obr. 5.8 je zobrazeno porovnání polynomů reprezentujících závislosti zrychlení na rychlosti vozidla pro jednotlivé úseky trati (opět pro třetí nastavení vozu). Křivky reprezentující shodné úseky trati (první se třetím a druhý se čtvrtým) nejsou naprosto shodné. Tato rozdílnost je zřejmě dána nepřesnostmi proložení a tím, že jsme nedokázali opakovat jízdu naprosto identicky několikrát po sobě. Mezera, která vzniká v grafu mezi křivkami pro úseky 1,3 a 2,4, je dána působením větru.

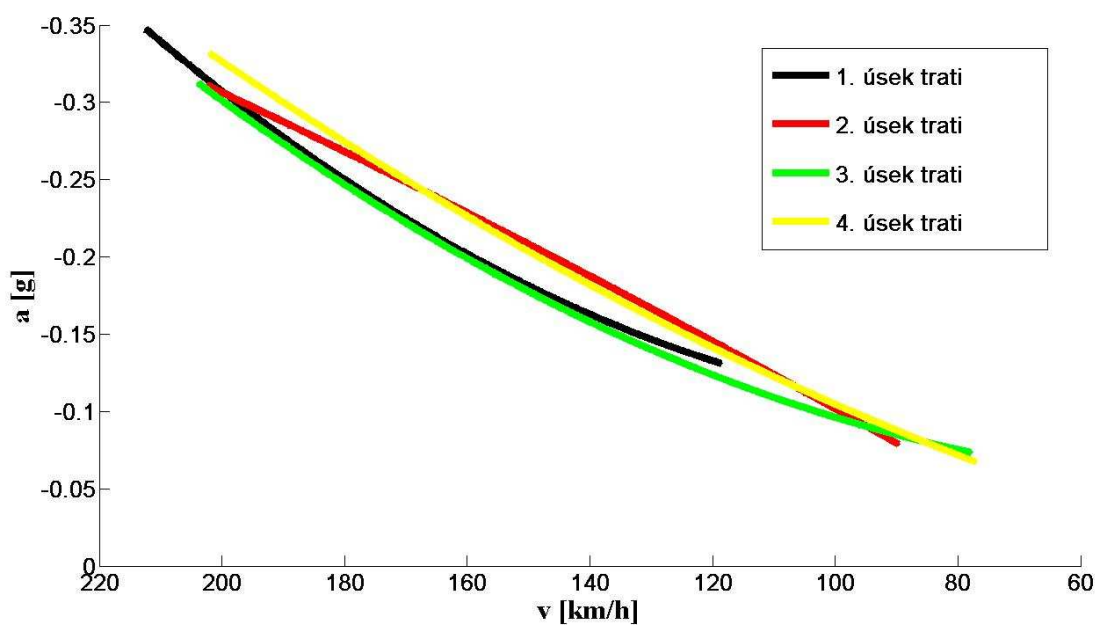
Další možností připadající v úvahu pro vysvětlení mezery mezi jednotlivými křivkami byl vliv rozdílnosti dráhy v obou směrech. Díky pečlivému zapisování údajů o směru a rychlosti větru jsme měli kompletní přehled o povětrnostních podmínkách během jednotlivých jízd. Pomocí jednoduchého vzorce (34) jsem přepočítal rychlost větru do (popřípadě proti) směru pohybu testovaného vozu a následně ji přičetl k jeho rychlosti. Výsledky jsou opět zobrazeny jako závislost zrychlení na rychlosti vozidla pro nastavení 3 na obr. 5.9. Je zde dobře vidět, že mezera mezi jednotlivými dvojicemi jízd zmizela a vytvořila se nová, proto lze o rozdílech v křivkách uvažovat v souvislosti s působením větru. Nově vytvořená mezera mezi křivkami by tím pádem měla ukazovat rozdílnost dráhy v obou směrech.

$$v = \cos \alpha \cdot w \quad (34)$$

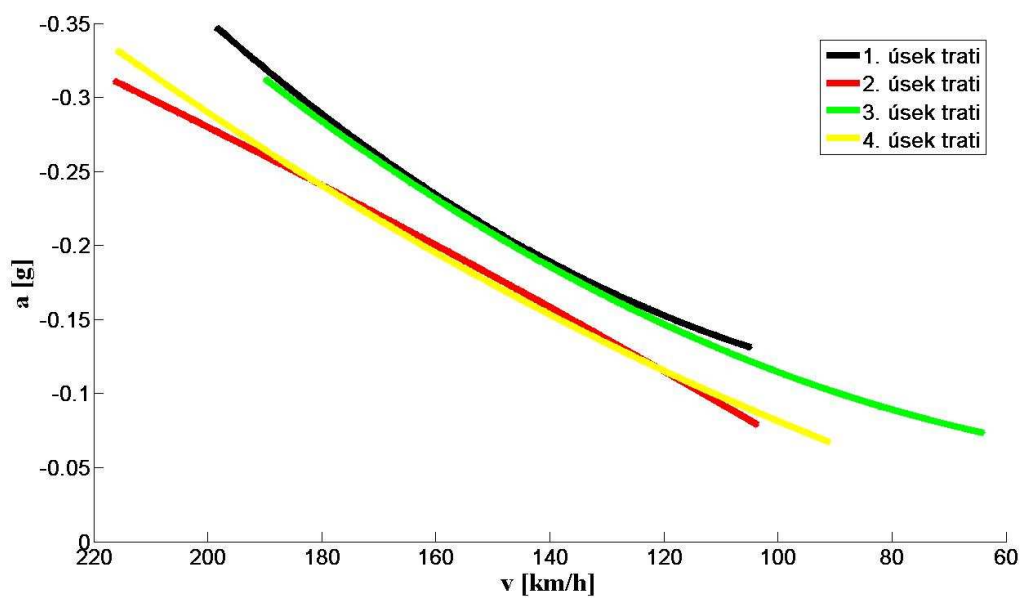
kde: v rychlost větru ve směru jízdy vozu

w rychlost větru naměřená anemometrem

α úhel, který svírá směr vanutí větru se směrem jízdy vozu



Obr. 5.8 Porovnání úseků trati pro nastavení vozu 3

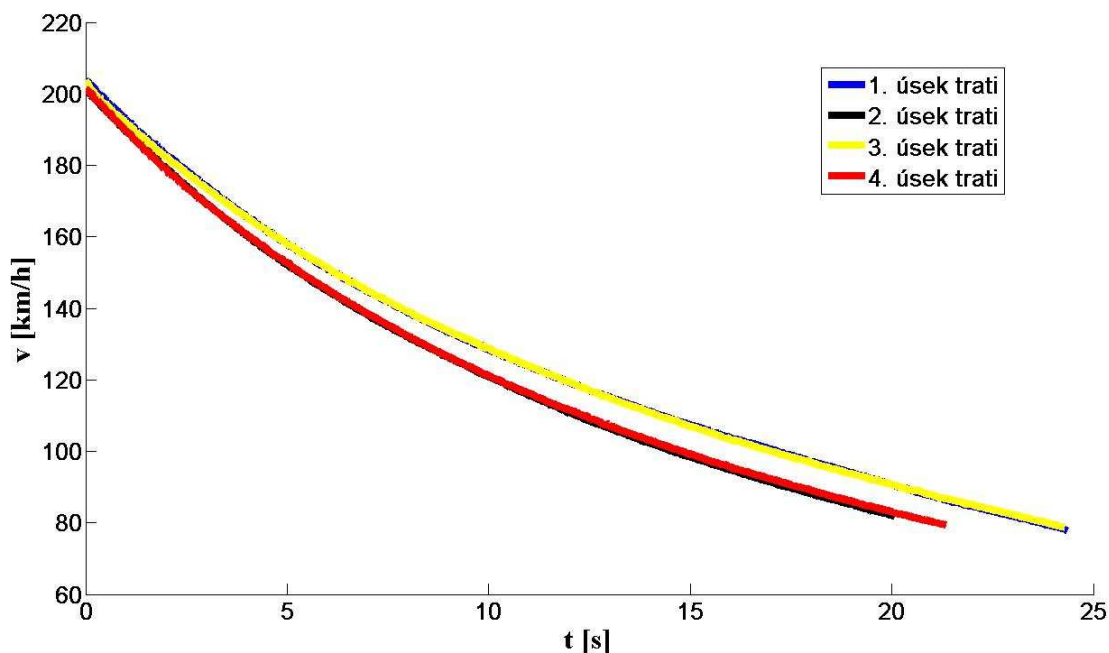


Obr. 5.9 Porovnání úseků trati pro nastavení vozu 3 s připočítanou rychlostí větru



5.1.2 METODA DERIVACE POLYNOMU ČTVRTÉHO STUPNĚ

Druhou metodou pro vyhodnocení naměřených údajů z dojezdové zkoušky byla derivace polynomu čtvrtého stupně. Opět použijeme tabulku 5.1 jako v předchozím případě s tím rozdílem, že údaje, které nás budou zajímat, jsou ve druhém sloupci, tedy údaje o rychlosti vozidla naměřené přímo z rotace kol. Závislost této rychlosti na čase pro nastavení vozidla 5 je uvedena na obr. 5.10, pro porovnání jsou zobrazeny všechny úseky trati.



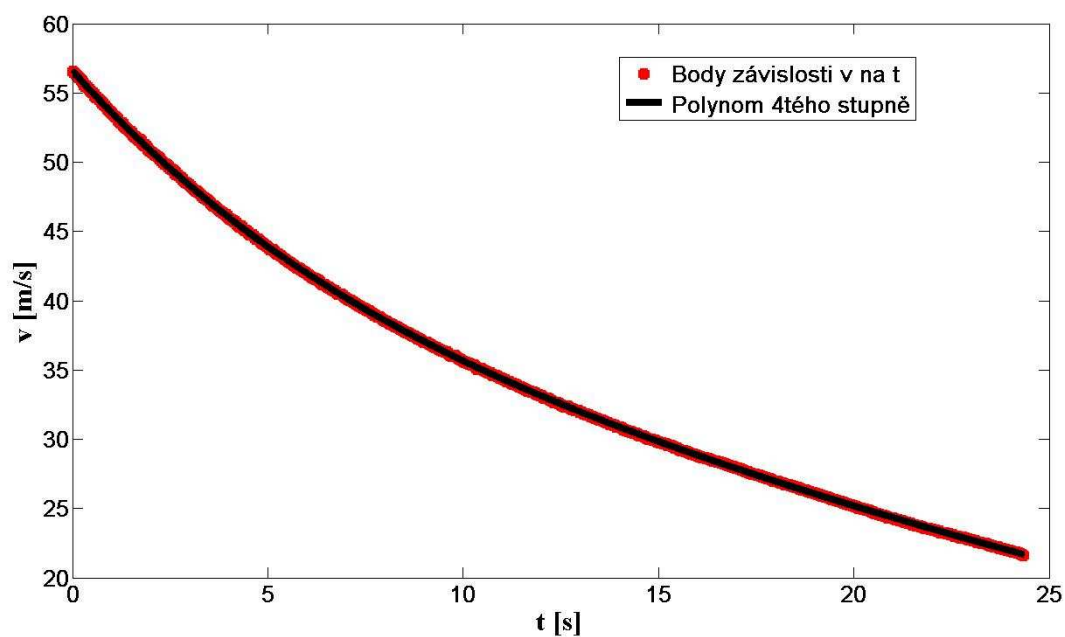
Obr. 5.10 Porovnání závislosti rychlosti na čase pro všechny úseky trati (nastavení vozu 5)

Dalším krokem bylo proložení křivek závislosti rychlosti na čase polynomem čtvrtého stupně (35).

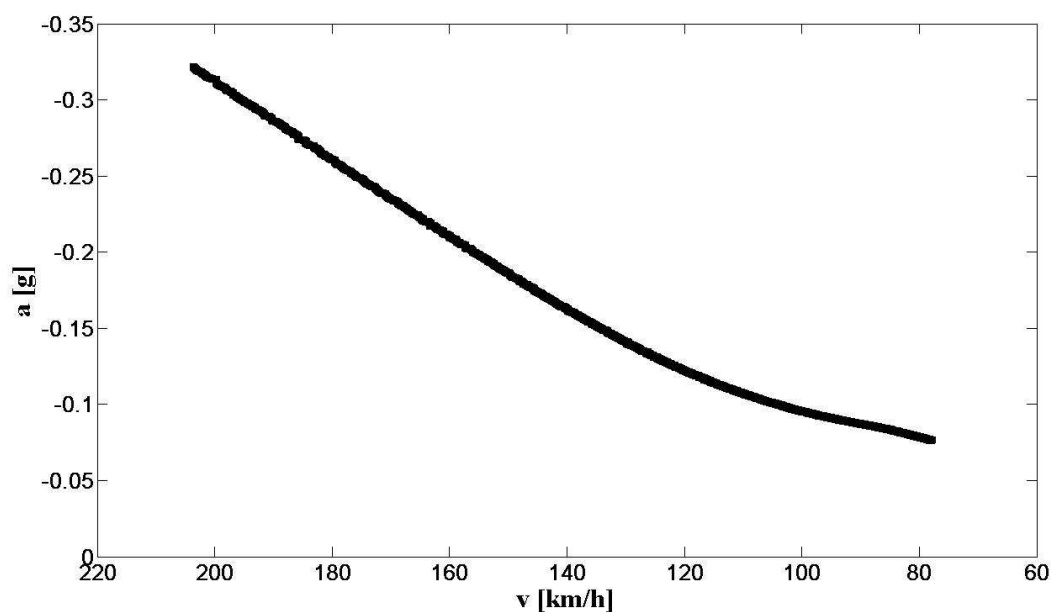
$$f(x) = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e \quad (35)$$

Výsledek tohoto proložení je patrný z obr. 5.11. Vzhledem k následné další práci s křivkami bylo nutné jako jednotky rychlosti použít metry za sekundu.

Posledním krokem ve zpracování těchto dat byla derivace polynomu, čímž jsme získali námi požadovaný průběh zrychlení. Závislost tohoto zrychlení na rychlosti je na obr. 5.12 pro první úsek trati a nastavení vozu číslo 5.

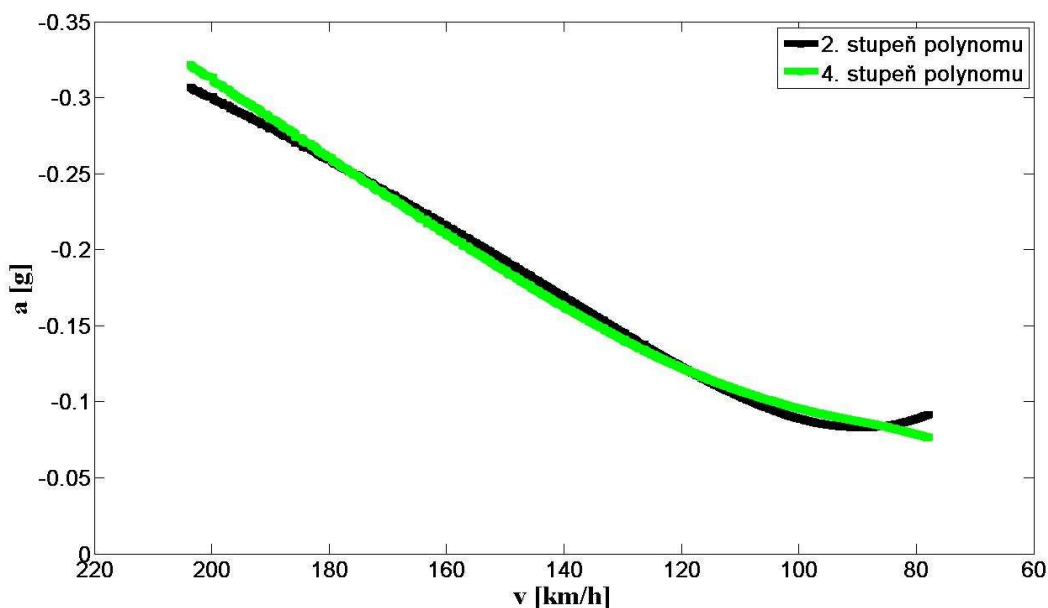


Obr. 5.11 Proložení závislosti rychlosti na čase polynomem čtvrtého stupně (úsek 1, nastavení 5)



Obr. 5.12 Závislost zrychlení na rychlosti pro nastavení 5 v prvním úseku

Pokud by se závislost z obrázku 5.12 proložila polynomem druhého, respektive čtvrtého stupně, vznikl by obrázek 5.13.

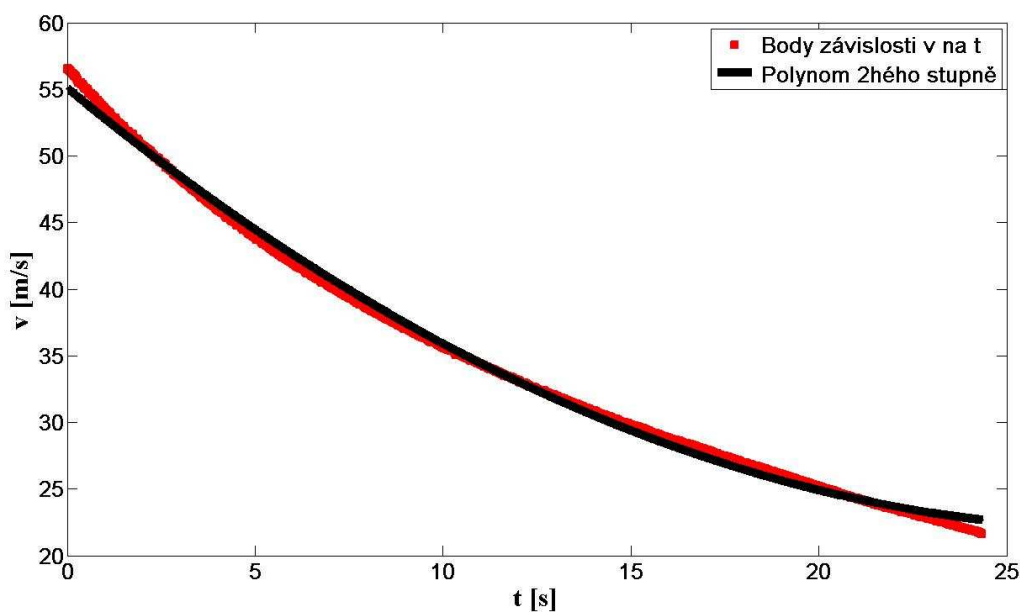


Obr. 5.13 Porovnání proložení závislosti a na v polynomech druhého a čtvrtého stupně

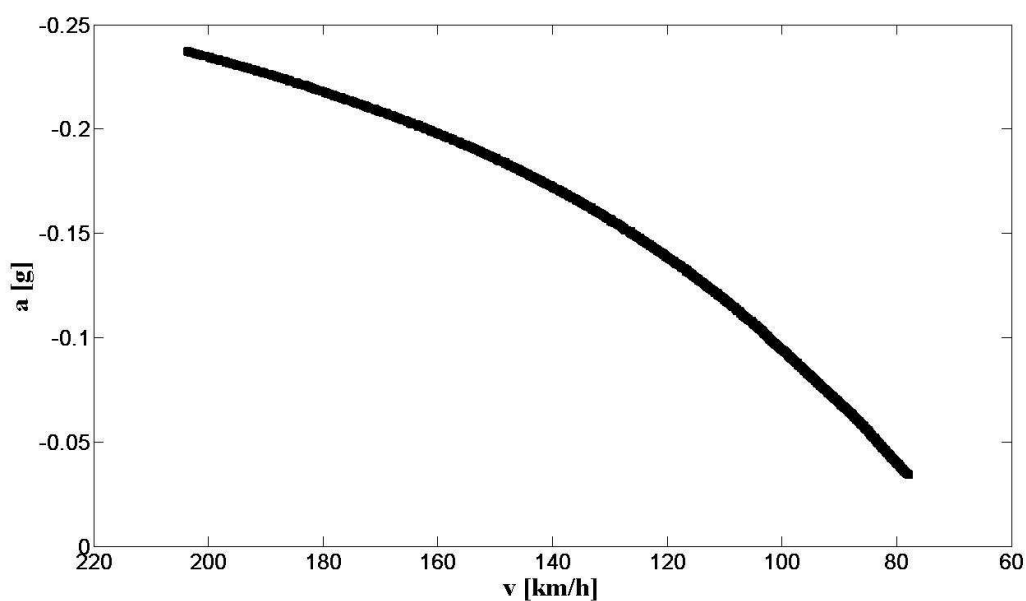
DERIVACE POLYNOMU DRUHÉHO STUPNĚ

Pokusem o vylepšení předchozí metody pro vyhodnocení dojezdové zkoušky byla derivace polynomu druhého stupně. Postup je totožný s předchozím s tím rozdílem, že se závislost rychlosti na čase prokládá polynome nižšího stupně (36), proto ho zde již nebudu znovu popisovat a rovnou přejdu k výsledkům proložení, obr. 5.14.

$$f(x) = ax^2 + bx + c \quad (36)$$



Obr. 5.14 Proložení závislosti rychlosti na čase polynomem druhého stupně (úsek 1, nastavení 5)



Obr. 5.15 Závislost zrychlení na rychlosti pro nastavení 5 v prvním úseku

Na obr. 5.15 je závislost zrychlení na rychlosti pro nastavení číslo 5 v prvním úseku trati. Na tomto grafu je patrné, že se celá křivka zrychlení posunula přibližně o 0,1 g proti směru osy y a tím se zcela zkreslily výsledky, proto je dále v porovnávání nebudeme uvažovat.

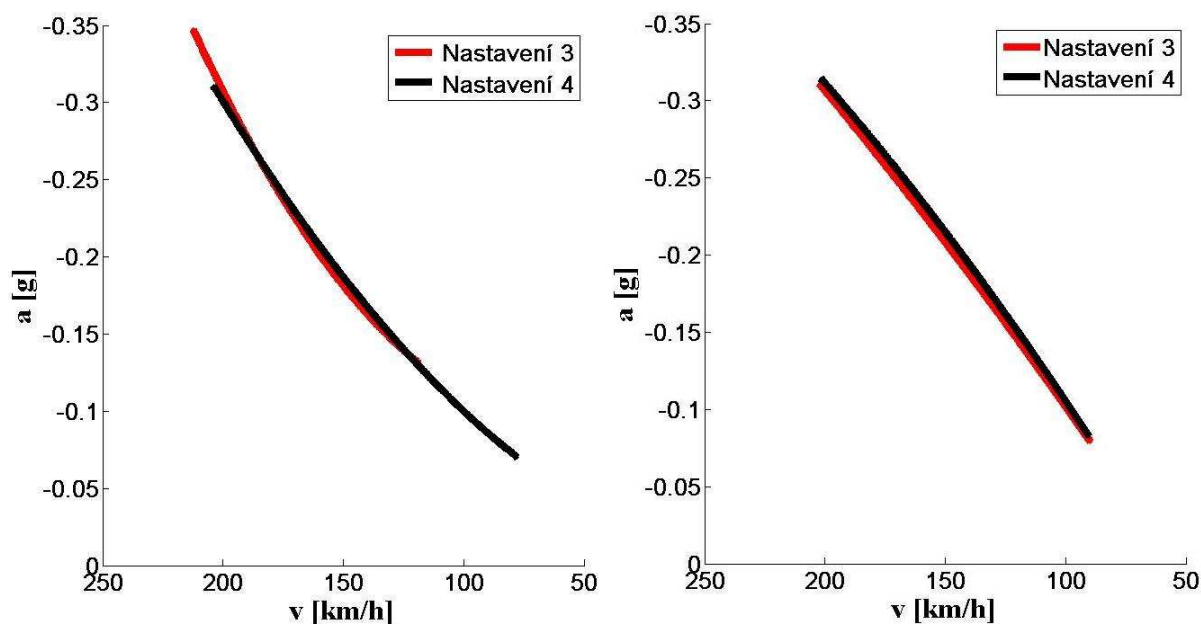
5.1.3 POROVNÁNÍ METOD A NASTAVENÍ VOZU

Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.2.3, pro snadnější porovnání jednotlivých nastavení vozu i metod zpracování výsledků dojezdové zkoušky byly vybrány dvojice nastavení, které má smysl mezi sebou porovnávat, viz tab. 4.2. Tato kapitola je věnována právě tomuto porovnání.



Díky kompletnosti všech výsledků měření byly jako reprezentativní vzorek vybrány úseky trati 1 a 2. Díky nedostatku času při měření nebyly změřeny některé úseky trati 3 a 4 a díky nedodržení metodického postupu chybí celé měření dojezdové zkoušky s nastavením 2.

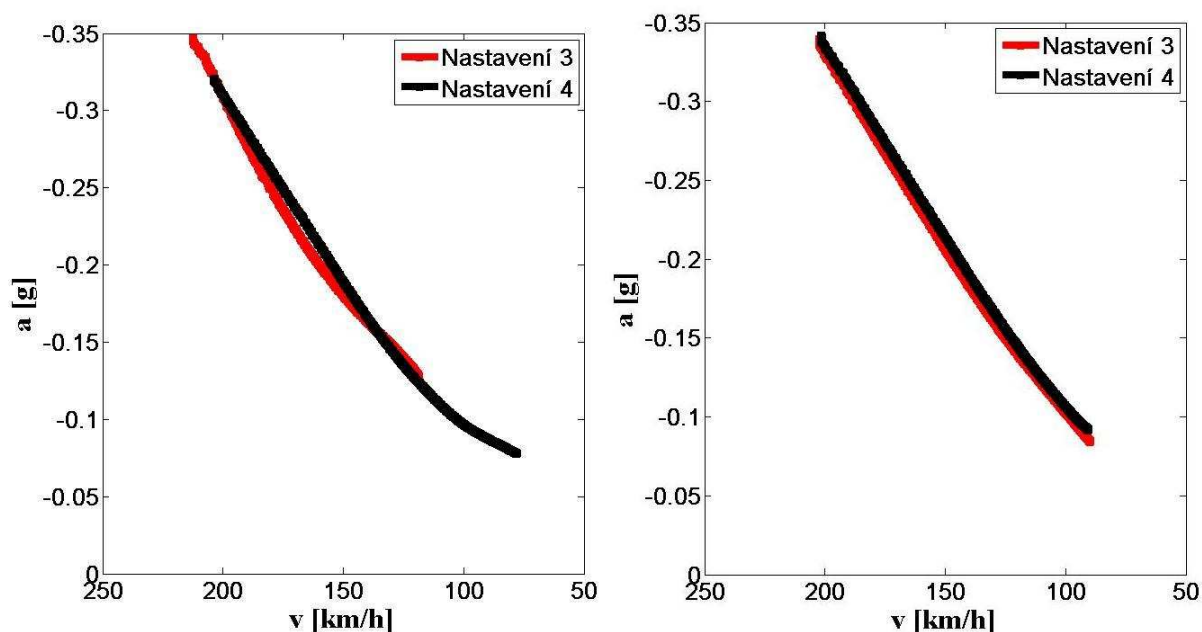
První dvojice pro porovnání je nastavení 3 a nastavení 4, obr. 5.16 a 5.17. Tato dvě nastavení se liší pouze přítomností zadního dvojitého křídla v případě 4.



Obr. 5.16 Porovnání nastavení 3 a 4 metodou přímé derivace (vlevo první úsek, vpravo druhý úsek)

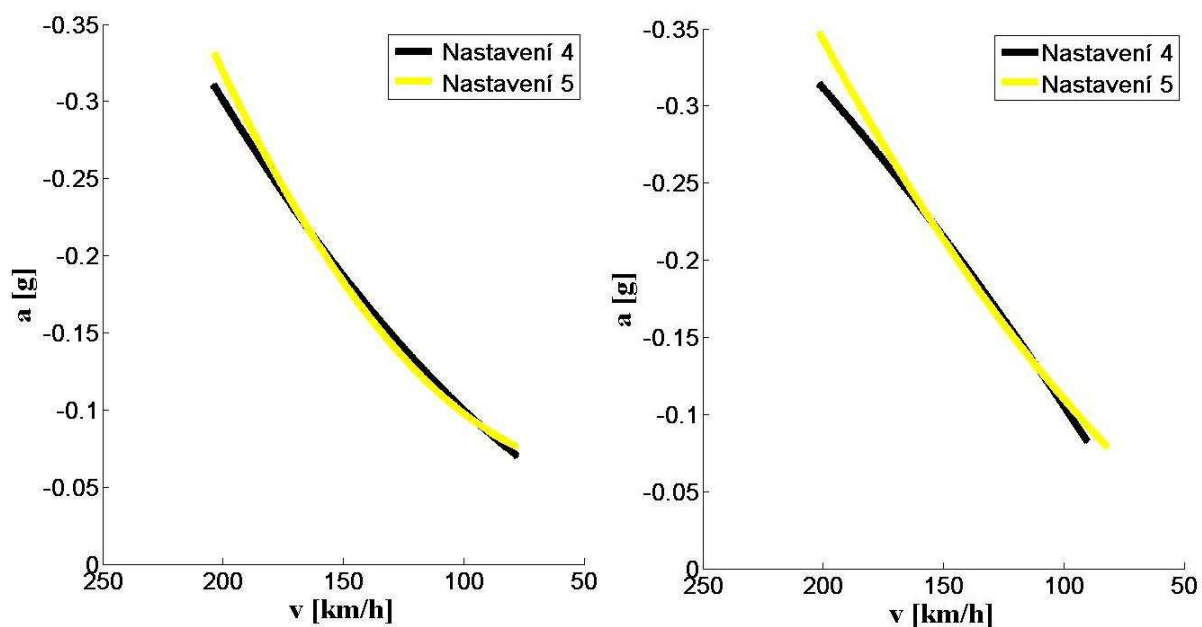
Z grafu pro první úsek trati je patrné, že se jezdec při nastavení číslo 3 rozjel na vyšší rychlost než v druhém případě, a proto je porovnání obou proložených křivek mírně nepřesné. Ve druhém úseku je již jasně patrné, že vyšší odpor má vozidlo s nastavením 4.

Pro druhou metodu, obr 5.17, vychází velmi podobné výsledky, tedy větší odpor vozidla s nastavením 4, což je pravděpodobně dáno umístěním dvojitého zadního přitlačného křídla.

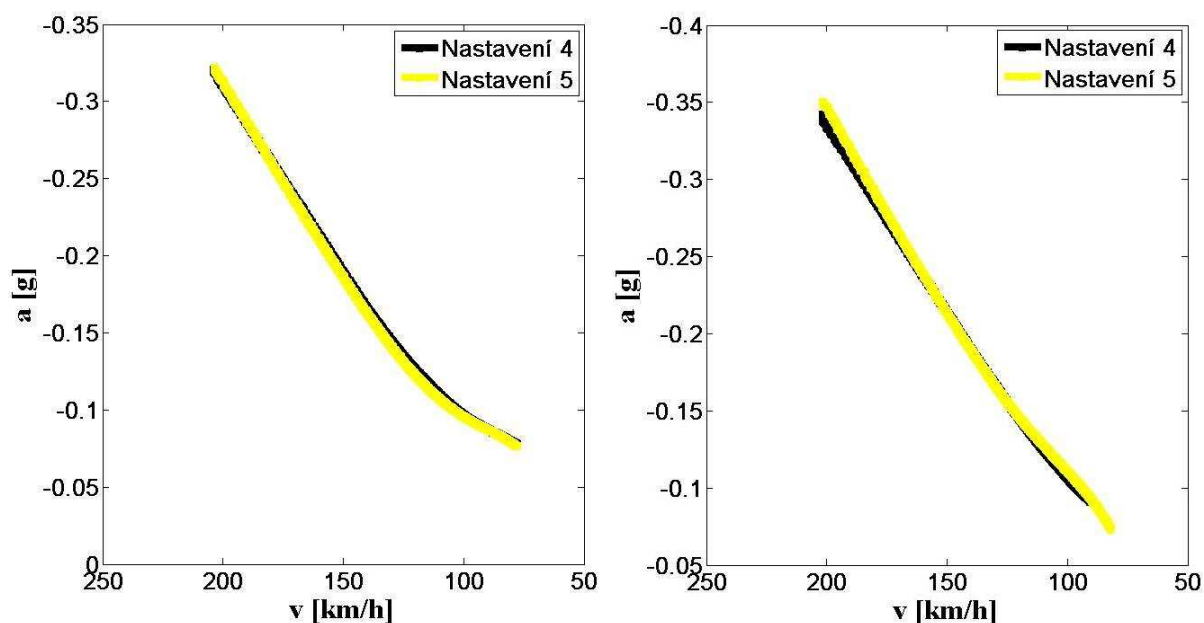


Obr. 5.17 Porovnání nastavení 3 a 4 metodou derivace polynomu (vlevo první úsek, vpravo druhý úsek)

Další porovnávanou dvojicí jsou nastavení vozu 4 a 5, obr. 5.18 a 5.19. Tato dvě nastavení se liší jiným sklonem předního přítláčného křídla (nastavení 4 $23,5^\circ$ a nastavení 5 $30,5^\circ$).



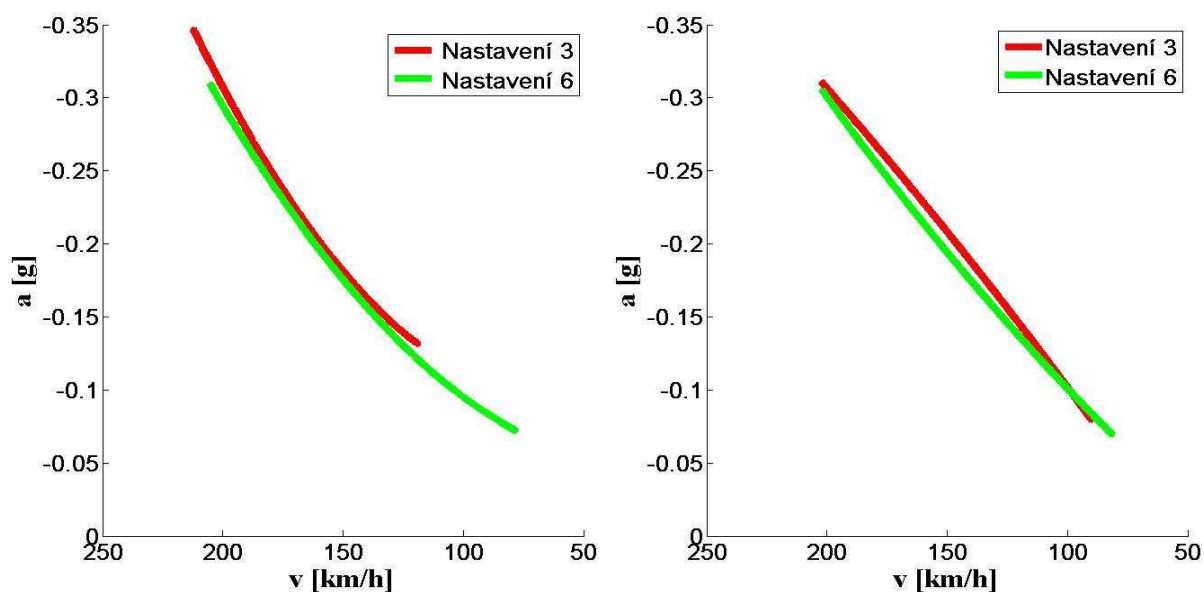
Obr. 5.18 Porovnání nastavení 4 a 5 metodou přímé derivace (vlevo první úsek, vpravo druhý úsek)



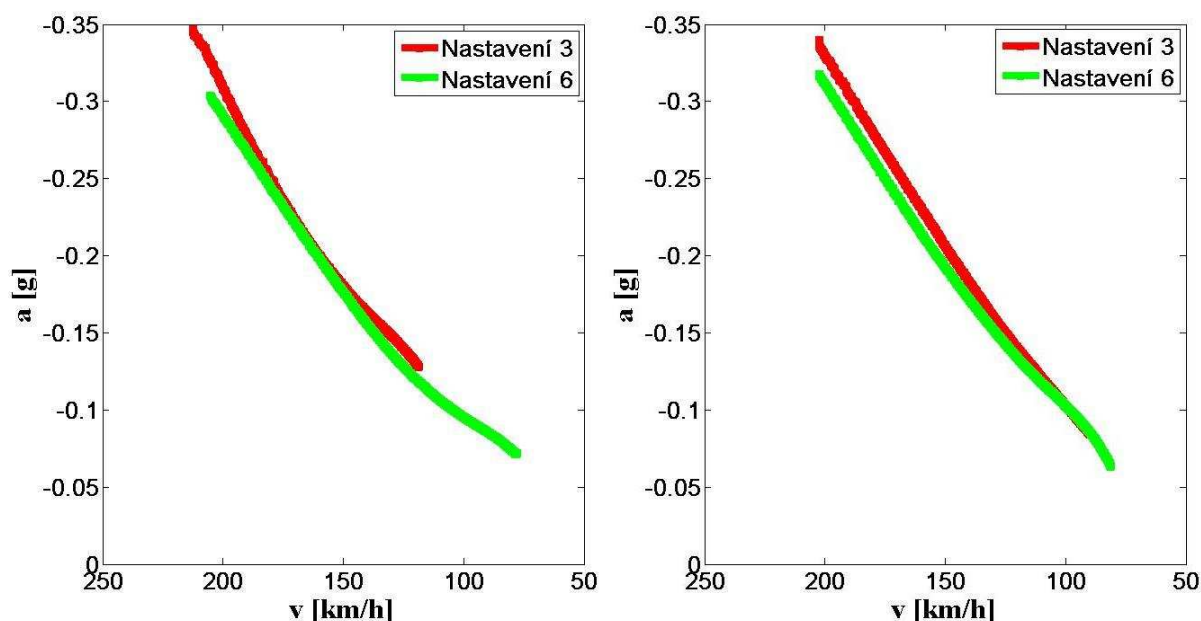
Obr. 5.19 Porovnání nastavení 4 a 5 metodou derivace polynomu (vlevo první úsek, vpravo druhý úsek)

Na všech grafech je patrná tendence žluté křivky, tedy nastavení číslo 5 (větší sklon předního křídla), mít ve vyšších rychlostech, přibližně od 180 km/h , větší zpomalení, tedy i odpor. Naopak při nižších rychlostech se křivky vyrovnávají a mírně větší odpor vykazuje nastavení vozu číslo 4.

Další porovnávanou dvojicí jsou nastavení 3 a 6, obr. 5.20 a obr. 5.21, která se od sebe liší použitým předním i zadním přítláčným křídlem. Nastavení 6 je spíše střední nastavení vozu.



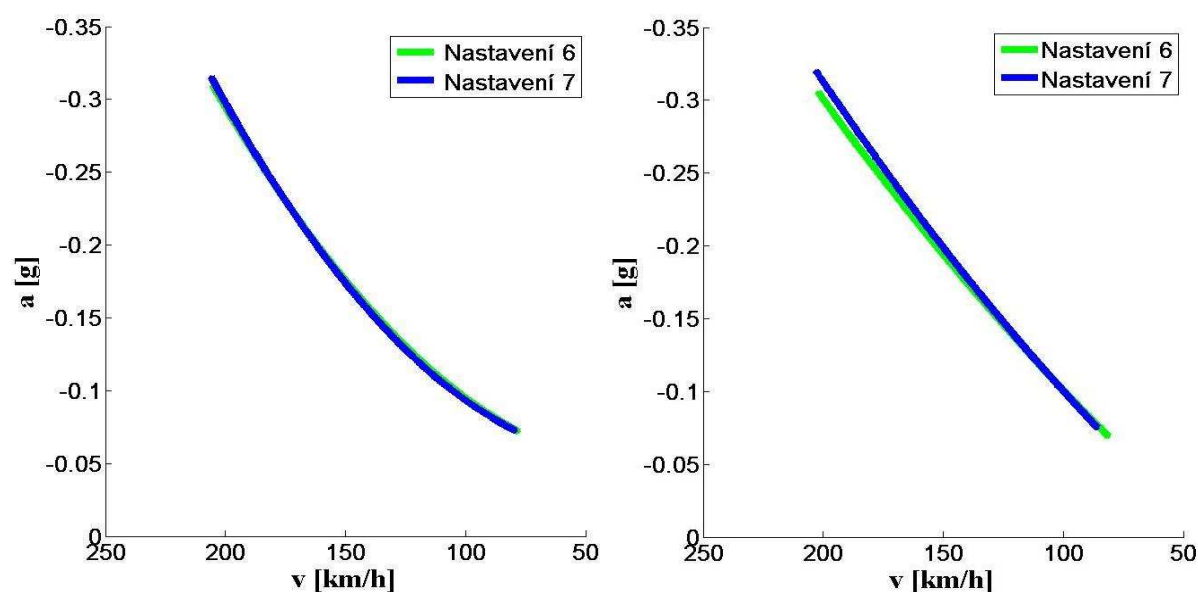
Obr. 5.20 Porovnání nastavení 3 a 6 metodou přímé derivace (vlevo první úsek, vpravo druhý úsek)



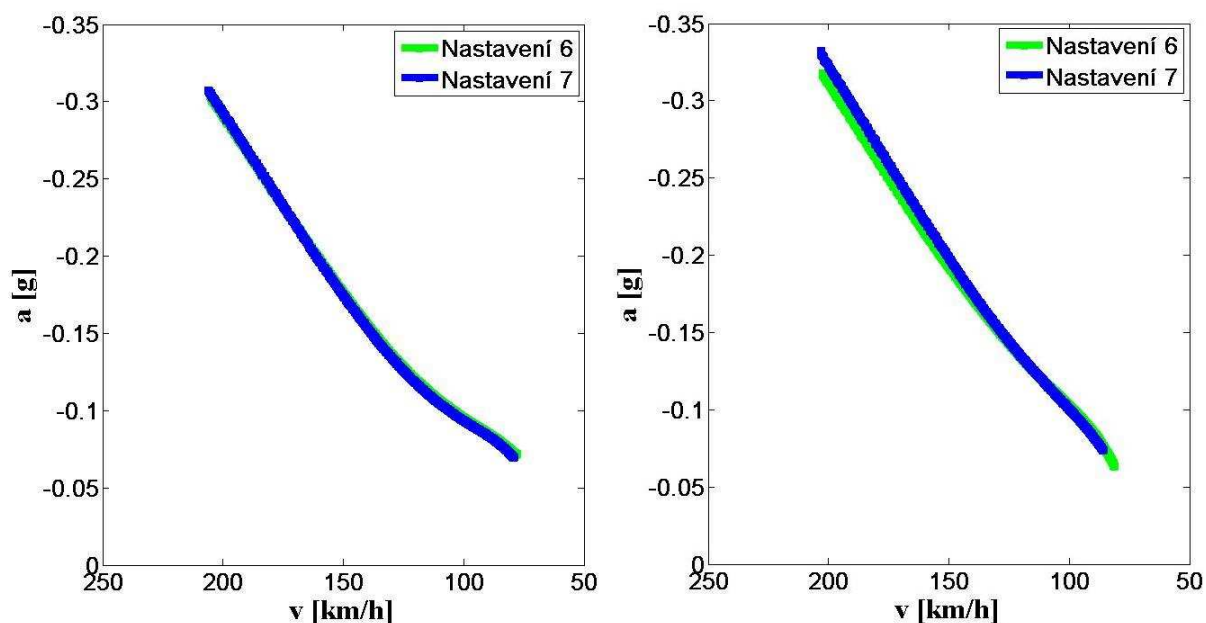
Obr. 5.21 Porovnání nastavení 3 a 6 metodou derivace polynomu (vlevo první úsek, vpravo druhý úsek)

Opět je ze všech grafů dobře vidět, jak je červená křivka příslušná nastavení 3 blíže k většímu odporu prakticky v celém rozsahu měřených rychlostí.

Další dvojicí je nastavení 6 a nastavení 7, obr. 5.22 a obr. 5.23. Tímto porovnáním se začíná zkoumat vliv výšky automobilu na celkový odpor vzduchu. Vůz v případě 6 má standardní výšku (27mm vpředu, 38 mm vzadu), vůz 7 je silně předkloněn (30mm vpředu, 52 mm vzadu).



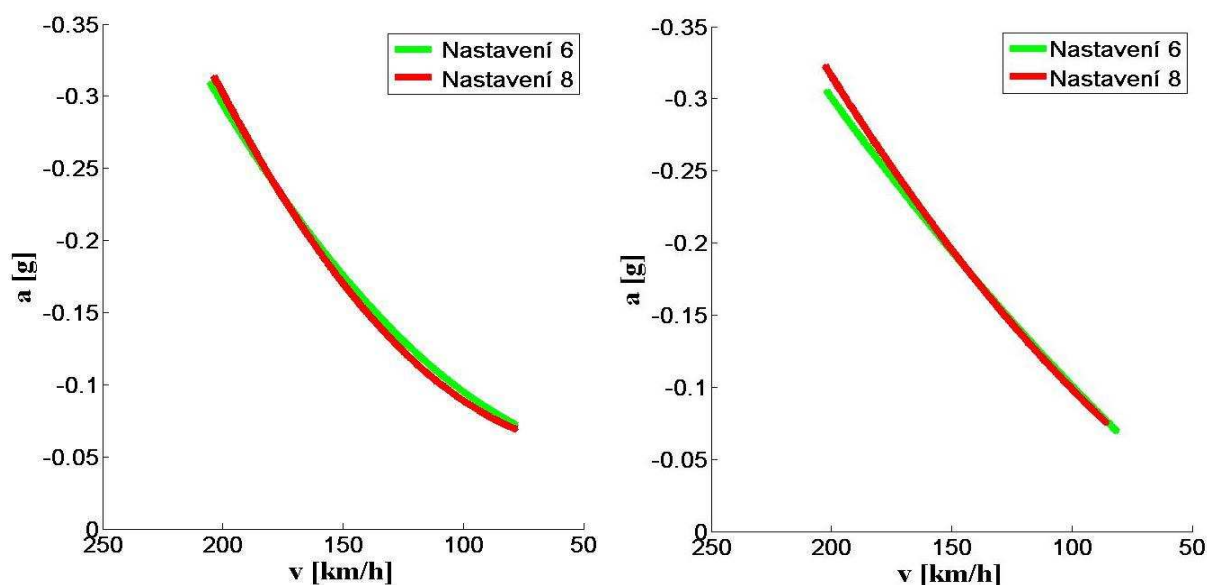
Obr. 5.22 Porovnání nastavení 6 a 7 metodou přímé derivace (vlevo první úsek, vpravo druhý úsek)



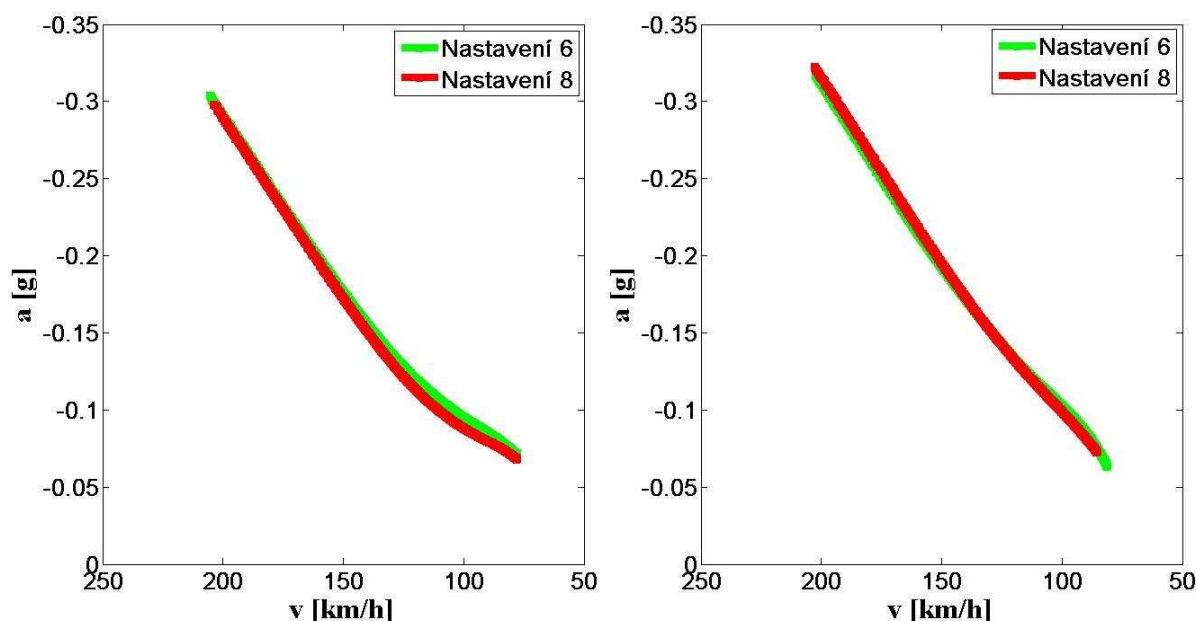
Obr. 5.23 Porovnání nastavení 6 a 7 metodou derivace polynomu (vlevo první úsek, vpravo druhý úsek)

Porovnáním křivek nastavení 6 a 7 zjistíme, že v prvním úseku jsou podle obou metod obě prakticky totožné. V druhém úseku se metody opět shodují, že vůz s nastavením 7 má ve vyšších rychlostech větší odpor vzduchu. Můžeme tedy říct, že změna výšky zadní nápravy má minimální vliv na odpor vozu a ten se projeví až ve vyšších rychlostech.

Další dvojicí jsou nastavení 6 a 8, obr. 5.24 a obr. 5.25. Nastavení 6 je popsáno výše a nastavení 8 je charakteristické vyrovnaním výšky vozidla (39 mm vpředu, 39 mm vzadu).



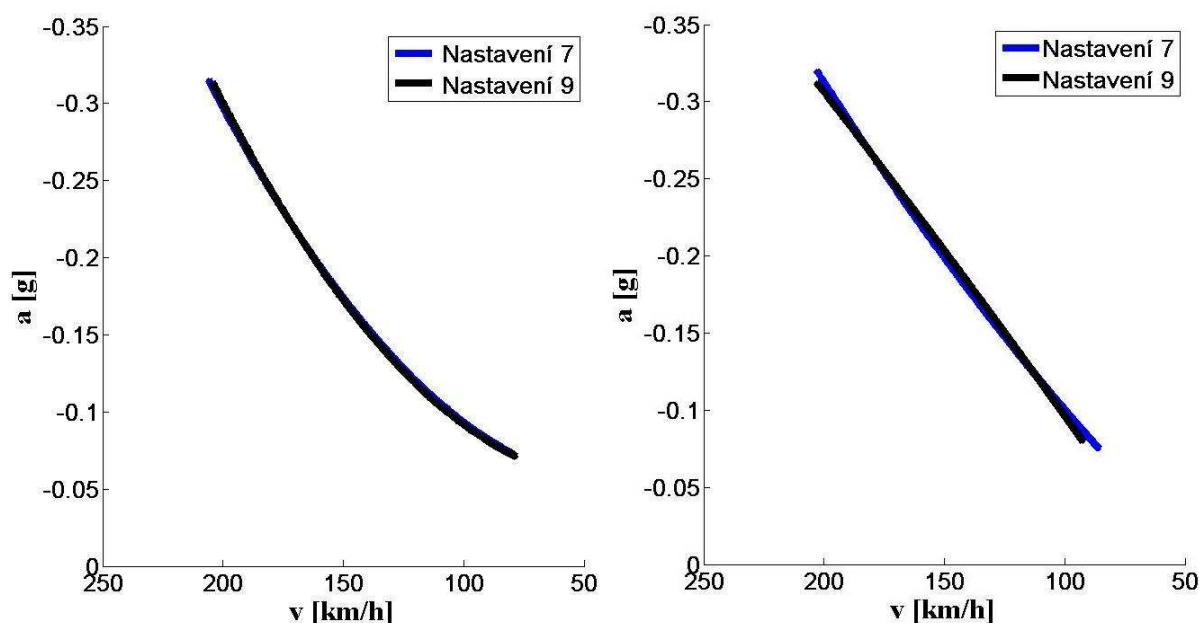
Obr. 5.24 Porovnání nastavení 6 a 8 metodou přímé derivace (vlevo první úsek, vpravo druhý úsek)



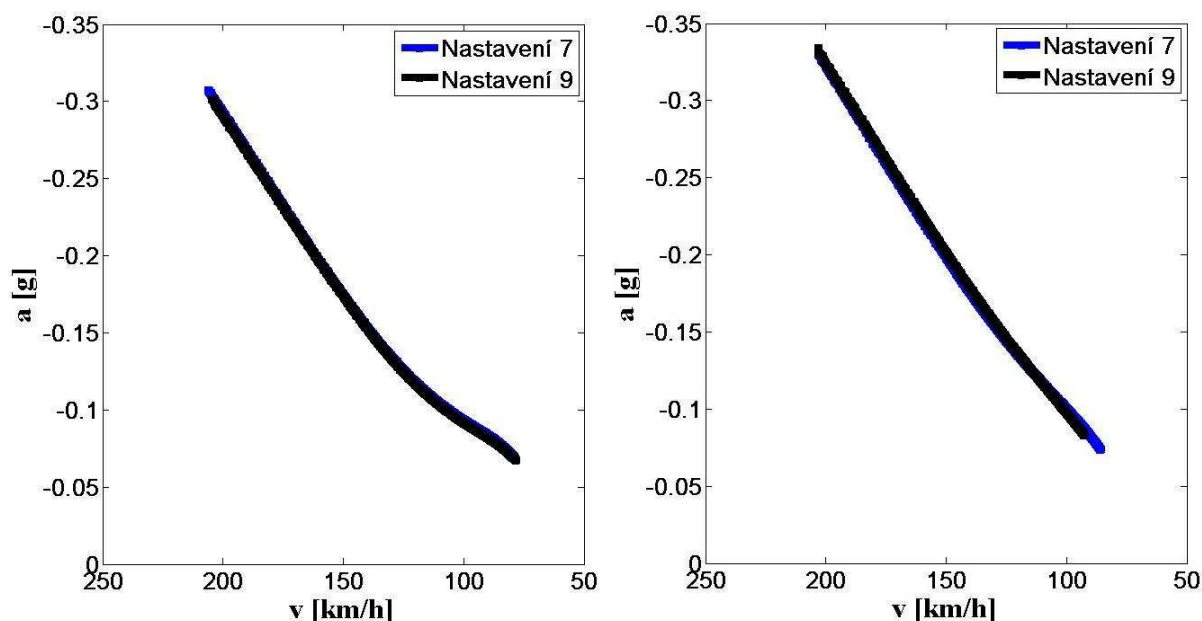
Obr. 5.25 Porovnání nastavení 6 a 8 metodou derivace polynomu (vlevo první úsek, vpravo druhý úsek)

U červené křivky odpovídající nastavení 8 vidíme tendenci přiklánět se k větším odporům pro větší rychlosti, naopak pro nižší rychlosti jsou křivky spíše totožné, u prvního úseku má nastavení 6 nepatrně větší odpor.

Další porovnávanou dvojicí je nastavení 7 a 9, obr. 5.26 a 5.27, tedy předkloněného vozidla (30/52) oproti přibližně stejně předkloněnému vozidlu s větší celkovou výškou (39/59).



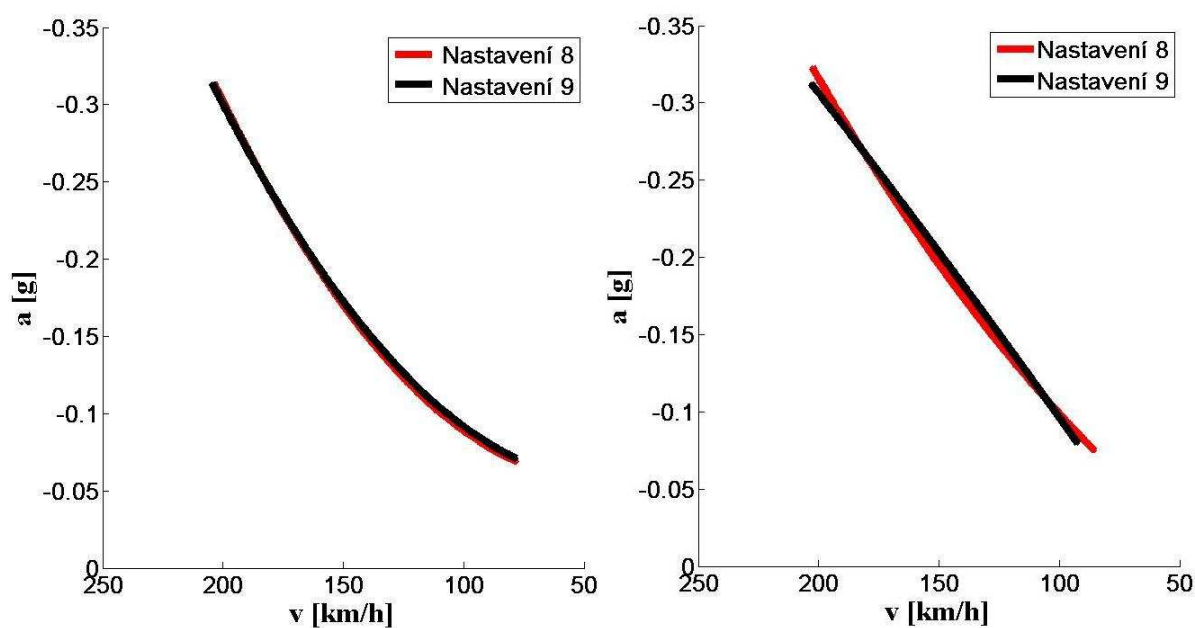
Obr. 5.26 Porovnání nastavení 7 a 9 metodou přímé derivace (vlevo první úsek, vpravo druhý úsek)



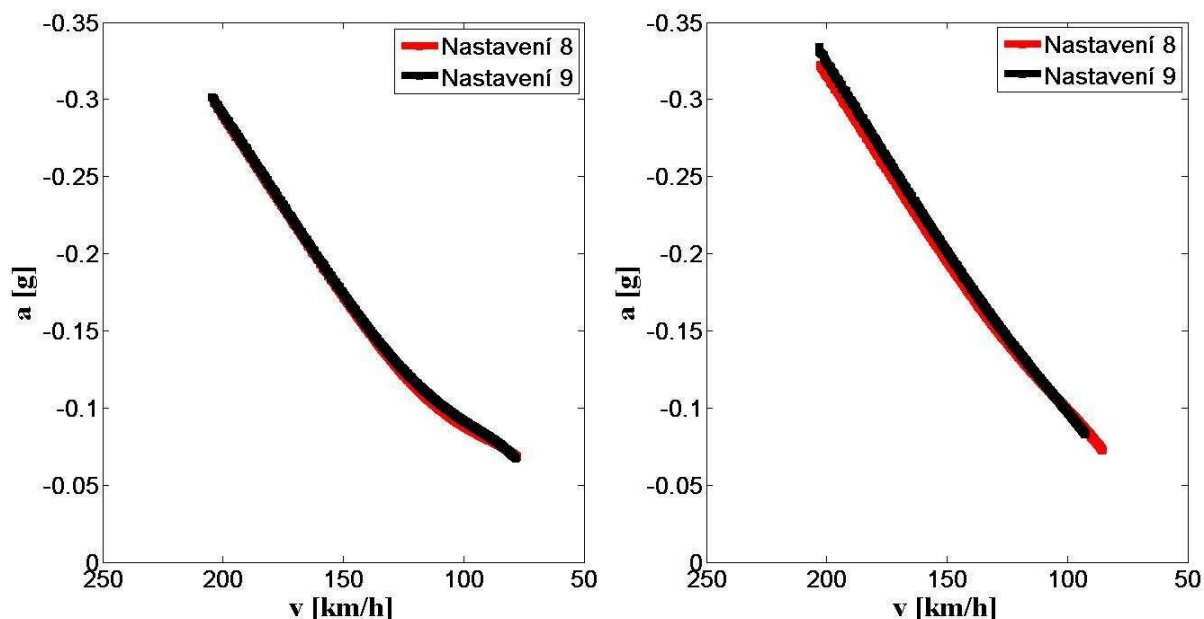
Obr. 5.27 Porovnání nastavení 7 a 9 metodou derivace polynomu (vlevo první úsek, vpravo druhý úsek)

Ze všech grafů je patrné, že rozdíl 7-9 mm ve výšce vozidla nemá žádný podstatnější vliv na celkový vzdušný odpor vozu.

Další porovnávané nastavení 8 a 9, obr. 5.28 a obr. 5.29. Výška přední nápravy vozidla je u obou nastavení stejná, zadní náprava je u varianty 9 o 20 mm výše.



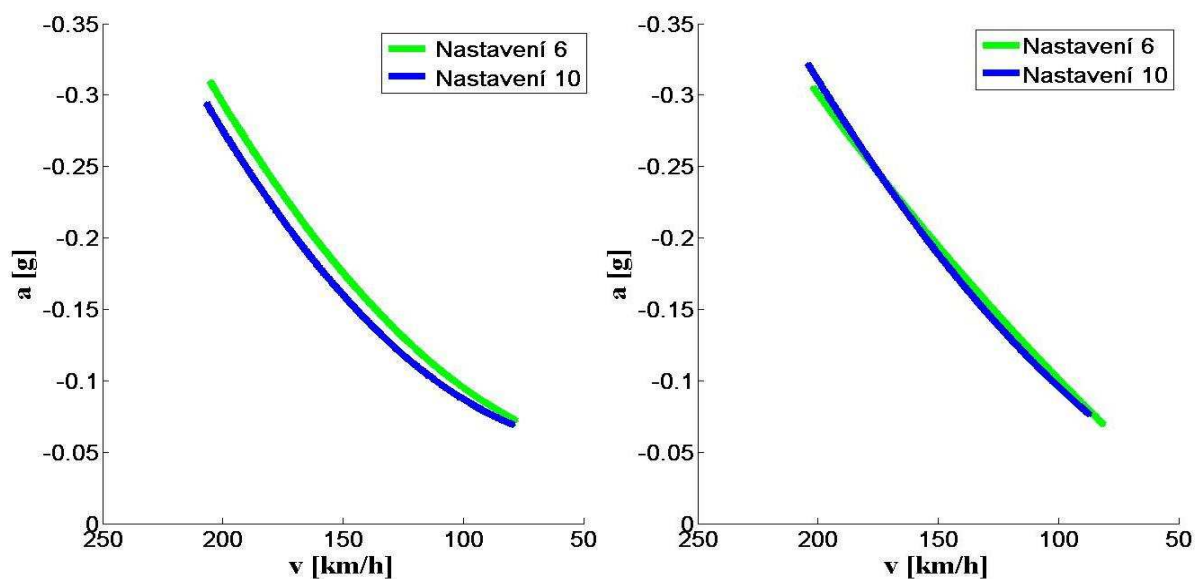
Obr. 5.28 Porovnání nastavení 8 a 9 metodou přímé derivace (vlevo první úsek, vpravo druhý úsek)



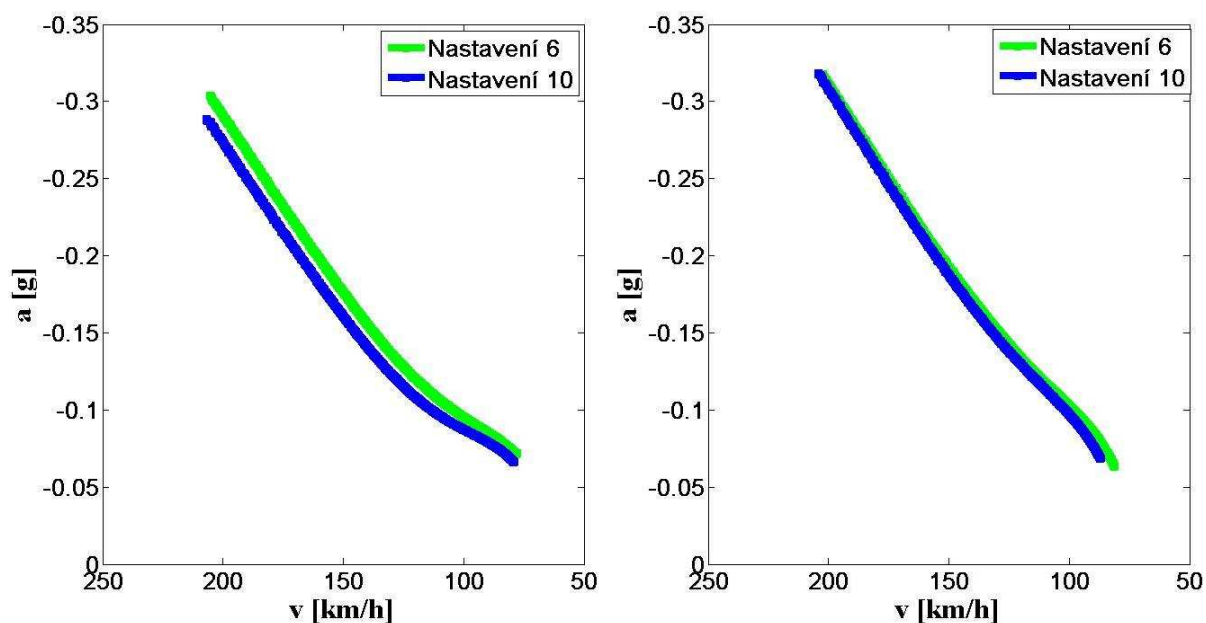
Obr. 5.29 Porovnání nastavení 8 a 9 metodou derivace polynomu (vlevo první úsek, vpravo druhý úsek)

Obě křivky reprezentující jednotlivá nastavení jsou v prvním úseku trati prakticky totožné. Výsledek porovnání v druhém úseku trati není zcela jednoznačný. Dalo by se říci, že nastavení číslo 9 má mírně větší odpor u metody přímé derivace ve středním rozsahu rychlosti a u metody derivace polynomu od rychlosti 150 km/h výše.

Poslední porovnávanou dvojicí nastavení je 6 a 10, obr. 5.30 a 5.31. Toto srovnání slouží k zjištění funkčnosti difuzoru pod zadním křídlem, který byl v nastavení 10 odstraněn.



Obr. 5.30 Porovnání nastavení 8 a 9 metodou přímé derivace (vlevo první úsek, vpravo druhý úsek)



Obr. 5.31 Porovnání nastavení 8 a 9 metodou derivace polynomu (vlevo první úsek, vpravo druhý úsek)

Z obou grafů prvního úseku je jasně vidět, že odpor vozidla bez difuzoru je výrazně nižší v celém rozsahu rychlosti. Pro druhý úsek se dá říci to samé, jen s menšími rozdíly mezi jednotlivými nastaveními.

Obecně platí, že je mnohem jednodušší interpretovat výsledky změn nastavení přítláčných křídel než výsledky změn ve výšce vozidla.



5.2 ZKOUŠKA ZA KONSTANTNÍ RYCHLOSTI

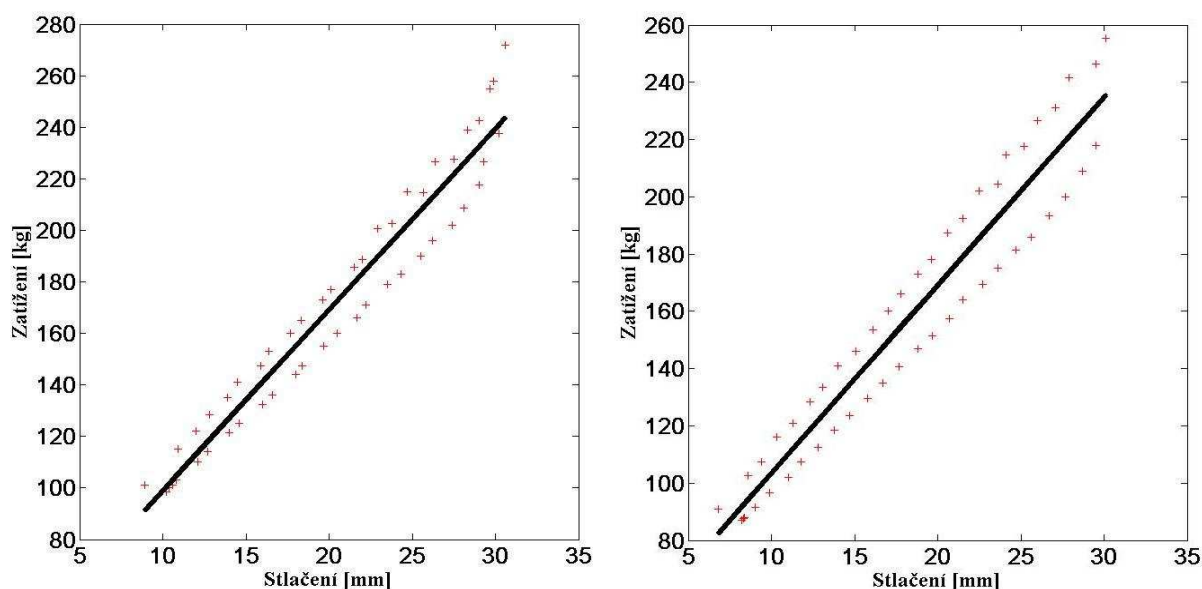
Hlavním cílem při zpracování dat ze zkoušky za konstantní rychlosti bylo získat průběh závislosti zatížení přední a zadní nápravy na rychlosti vozidla.

Před samotným měřením byla týmem Chabr motorsport poskytnuta tabulka závislosti naměřených hodnot na potenciometrech na stlačení vozu. Část této tabulky je vidět v tab. 5.2.

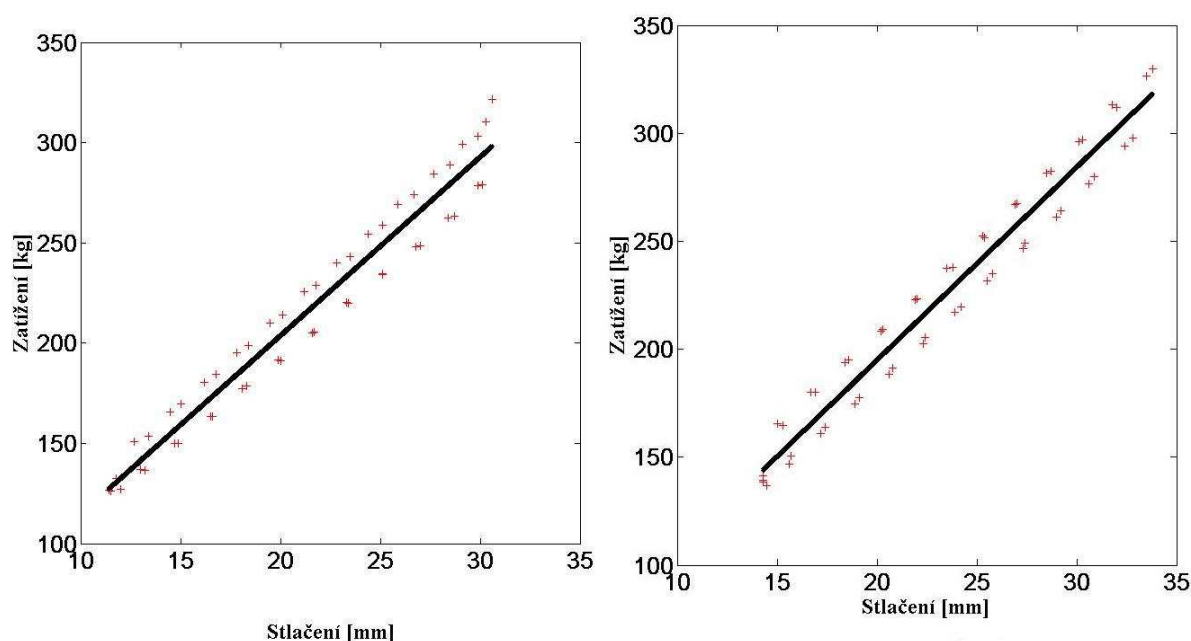
Tab. 5.2 Závislost hodnot odečtených z potenciometru na zatížení vozidla pro jednotlivá kola

PP		LP		PZ		LZ		
Stlačení	Zatížení	Stlačení	Zatížení	Stlačení	Zatížení	Stlačení	Zatížení	Celkové zatížení
8,4mm	88kg	10,6mm	101kg	14,3mm	139,5kg	11,4mm	126,5kg	455kg
9,4mm	107,5kg	12,0mm	122,0kg	15,0mm	165,5kg	12,7mm	151,0kg	545kg
11,3mm	121,0kg	13,9mm	135,0kg	16,7mm	180,0kg	14,5mm	165,5kg	601kg
13,1mm	133,5kg	15,9mm	147,5kg	18,4mm	194,0kg	16,2mm	180,5kg	654kg
15,1mm	146kg	17,7mm	160kg	20,2mm	208,5kg	17,8mm	195,0kg	709kg
17,0mm	160,0kg	19,6mm	173,0kg	21,9mm	223,0kg	19,5mm	210,0kg	765kg
18,8mm	173,0kg	21,5mm	185,5kg	23,5mm	237,5kg	21,2mm	225,5kg	820kg
20,6mm	187,5kg	22,9mm	200,5kg	25,3mm	252,5kg	22,8mm	240,0kg	880kg
22,5mm	202,0kg	24,7mm	215,0kg	26,9mm	267,0kg	24,4mm	254,5kg	937,5kg
24,1mm	214,5kg	26,4mm	226,5kg	28,5mm	281,5kg	25,9mm	269,0kg	990,5kg
26,0mm	226,5kg	28,3mm	239,0kg	30,1mm	296,0kg	27,7mm	284,5kg	1045,5kg
27,9mm	241,5kg	29,7mm	255,0kg	31,8mm	313,0kg	29,1mm	299,0kg	1107,5kg
30,1mm	255,5kg	30,6mm	272,0kg	33,5mm	326,5kg	30,3mm	310,5kg	1164kg

Grafické zobrazení závislostí z tab. 5.2 je na obr. 5.32 a 5.33.



Obr. 5.32 Závislost zatížení na stlačení z tab. 5.2, vlevo levé přední kolo, vpravo pravé přední kolo



Obr. 5.33 Závislost zatížení na stlačení z tab. 5.2, vlevo levé zadní kolo, vpravo pravé zadní kolo

Body získané z tab. 5.2 byly proloženy přímkami, jak je vidět na obr. 5.32, respektive 5.33. Rovnice těchto přímek, 37 pro levé přední kolo, 38 pro pravé přední kolo, 39 pro levé zadní kolo, 40 pro pravé zadní kolo, charakterizují chování jednotlivých odpružení a budou využity v dalším postupu.

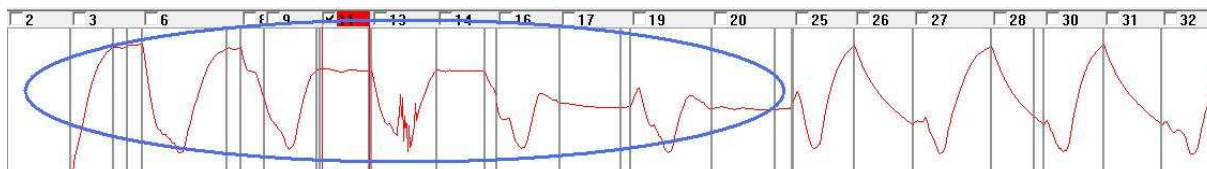
$$y = 7,0156x + 28,9829 \quad (37)$$

$$y = 6,5669x + 37,8355 \quad (38)$$

$$y = 8,9078x + 25,5523 \quad (39)$$

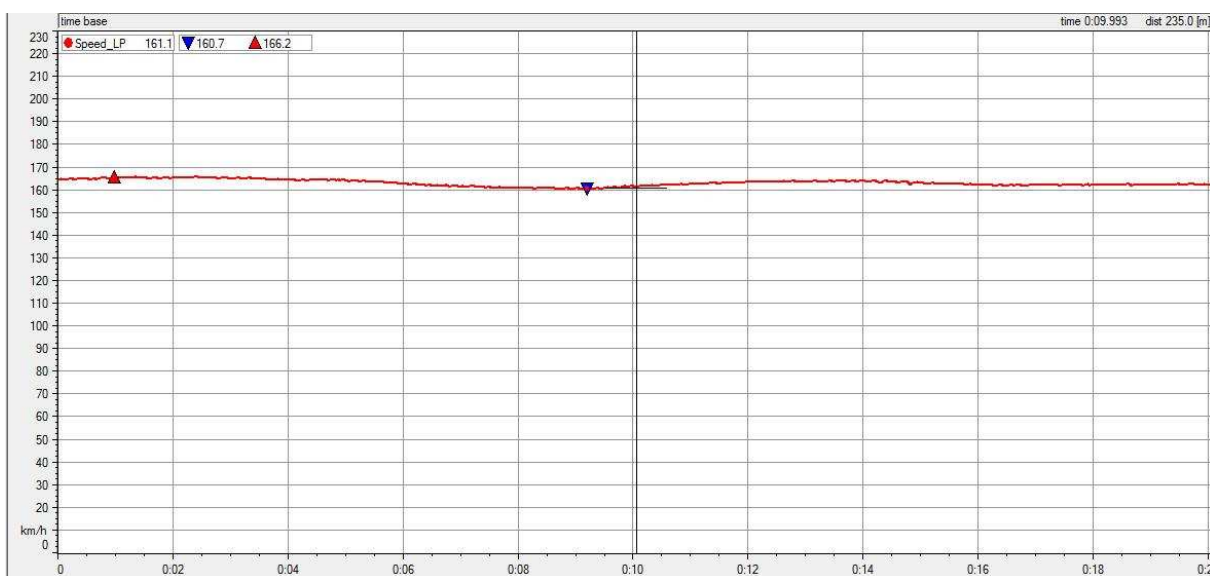
$$y = 8,9371x + 16,1906 \quad (40)$$

Prvotní úprava naměřených dat v programu Race Studio Analysis spočívala v rozdělení jednotlivých měřených úseků na námi požadované části obsahující data ze zkoušky za konstantní rychlosti, obr. 5.34.



Obr. 5.34 Rozdělení naměřených dat na úseky obsahující zkoušku za konstantní rychlosti

Průběh naměřených dat z jednoho konkrétního úseku při rychlosti 160 km/h je zobrazen na obr. 5.35.



Obr. 5.35 Průběh zkoušky za konstantní rychlosti udávající závislost rychlosti na čase

Takto roztržiděná data se opět převedla do tabulkového procesoru Excel, tab. 5.3. Záznam z potenciometrů byl snímán s frekvencí 100 Hz po dobu několika sekund, proto jsou zmíněné tabulky velmi rozsáhlé, a zde je z nich uvedena pouze malá část pro ilustraci.

Tab. 5.3 Tabulka s údaji ze zkoušky za konstantní rychlosti

Time (s)	Speed_LP [km/h]	LP_tlumič [mm]	PP_tlumič [mm]	LZ_tlumič [mm]	PZ_tlumič [mm]
0	160,439	21,028	20,428	17,904	19,271
0,01	160,451	21,695	20,672	17,232	19,176
0,02	160,464	22,272	21,988	17,11	18,98
0,03	160,476	22,885	21,833	17,145	19,054
0,04	160,489	23,11	20,607	17,478	19,824
0,05	160,495	22,888	20,155	17,665	20,854
0,06	160,445	22,427	20,518	18,124	21,247
0,07	160,395	22,495	20,944	19,149	22,603
0,08	160,345	22,901	21,047	20,906	24,702
0,09	160,29	22,961	21,104	21,133	24,767
0,1	160,19	22,145	21,128	23,232	25,279
0,11	160,09	21,768	20,645	23,606	24,623
0,12	159,99	21,207	20,198	23,01	24,694
0,13	159,89	20,906	19,688	22,945	25,125
0,14	159,79	20,201	19,685	23,238	25,271
0,15	159,697	20,456	19,414	23,219	25,263
0,16	159,673	20,529	19,203	22,937	25,092
0,17	159,647	20,301	19,52	21,771	24,024
0,18	159,622	20,312	19,737	20,108	22,158
0,19	159,603	21,131	19,74	18,427	20,632
0,2	159,628	21,73	20,019	17,354	19,631

První sloupec tabulky udává čas od začátku testu, druhý sloupec udává aktuální rychlost v daný okamžik a další sloupce udávají výchylku tlumičů na jednotlivých kolech.



S takto uspořádanými daty se dále pracovalo následujícím způsobem. Pro každou měřenou jízdu byly vypočítány průměrné hodnoty z rychlosti a z výchylek na jednotlivých potenciometrech. Tímto způsobem nám vznikla pětice hodnot charakteristická pro každé nastavení vozu. Hodnoty výchylek byly dále dosazeny do příslušných rovnic 37, 38, 39, 40 a tím bylo pro každé kolo vypočítáno zatížení odpovídající dané rychlosti a samozřejmě danému nastavení.

Posledním krokem byl přepočet zatížení na nápravu a to podle jednoduchého vzorce 41.

$$W_n = (W_l + W_{pr})/2 \quad (41)$$

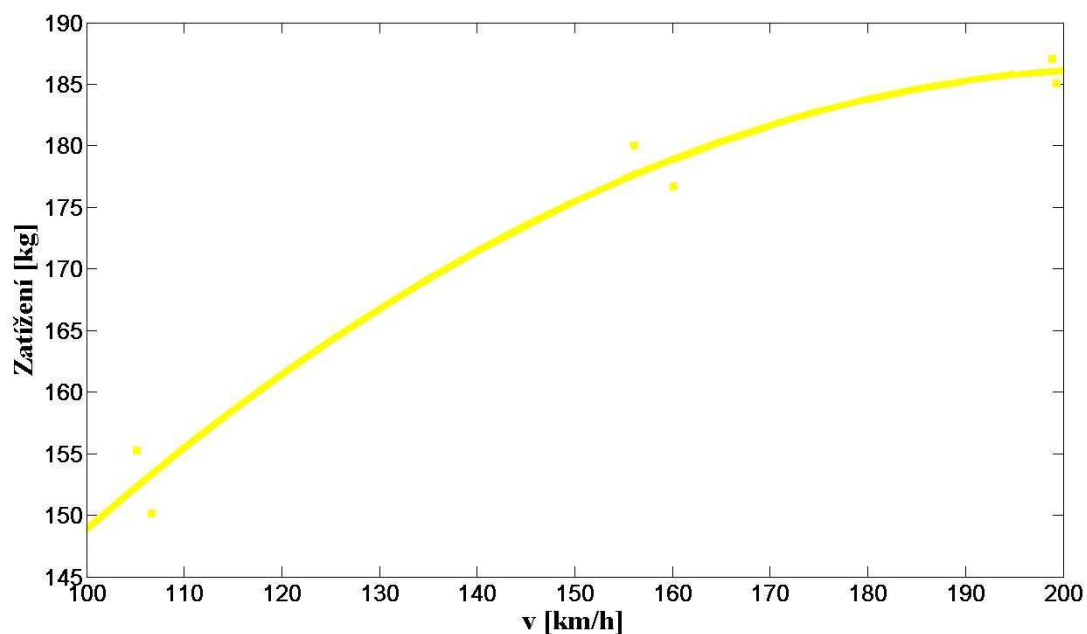
Číselné vyjádření rychlostí a jím příslušných zatížení pro všechny nastavení vozu jsou shrnuty v tabulce tab. 5.4.

Tab. 5.4 Rychlosti a zatížení příslušející jednotlivým nastavením

Nastavení 1			Nastavení 3			Nastavení 4		
Wp [kg]	Wz [kg]	V [km/h]	Wp [kg]	Wz [kg]	V [km/h]	Wp [kg]	Wz [kg]	V [km/h]
149.219	174.788	101.2561	152.404	176.691	103.6119	149.671	180.637	103.0966
144.193	169.338	103.4023	144.546	168.584	104.7018	145.034	173.877	106.9939
178.428	221.697	160.1866	173.584	210.505	161.2795	176.439	231.931	162.605
172.764	214.715	162.3723	177.643	223.563	163.2772	173.699	220.264	163.5284
			184.129	252.278	196.5585	182.952	268.478	197.6104
			182.125	241.743	199.3616	180.962	258.819	201.298
Nastavení 5			Nastavení 6			Nastavení 7		
Wp [kg]	Wz [kg]	V [km/h]	Wp [kg]	Wz [kg]	V [km/h]	Wp [kg]	Wz [kg]	V [km/h]
150.01	179.393	103.3476	151.421	170.3	103.4427	155.233	173.225	105.1099
143.016	169.048	103.8811	147.399	166.342	104.2514	150.129	166.788	106.6408
177.178	230.212	160.4686	178.547	219.2	163.744	179.996	221.707	156.1074
172.145	214.388	161.0431	176.538	213.441	164.1162	176.669	211.451	160.1238
183.998	268.345	197.9628	185.33	253.808	195.8275	187.085	260.314	198.9251
181.236	253.877	199.478	182.838	245.621	202.4595	185.075	248.357	199.3158
Nastavení 8			Nastavení 9			Nastavení 10		
Wp [kg]	Wz [kg]	V [km/h]	Wp [kg]	Wz [kg]	V [km/h]	Wp [kg]	Wz [kg]	V [km/h]
148.012	171.117	100.133	145.301	166.423	101.777	144.45	156.274	101.8772
144.034	164.173	102.0831	152.445	176.126	103.2547	152.068	163.907	102.4843
173.626	217.635	157.9898	178.481	219.895	158.6536	176.498	201.702	155.6207
170.661	210.107	163.3742	173.098	208.576	160.879	173.629	194.517	163.6878
180.412	241.907	200.0906	183.921	235.778	199.0865	185.14	234.597	200.4353
183.622	256.859	200.3641	187.014	246.395	200.4651	183.54	223.648	204.778



A grafické znázornění tabulky 5.4 pro přední nápravu vozu s nastavením 7, obr. 5.37. Body jsou proloženy polynomem druhého stupně.

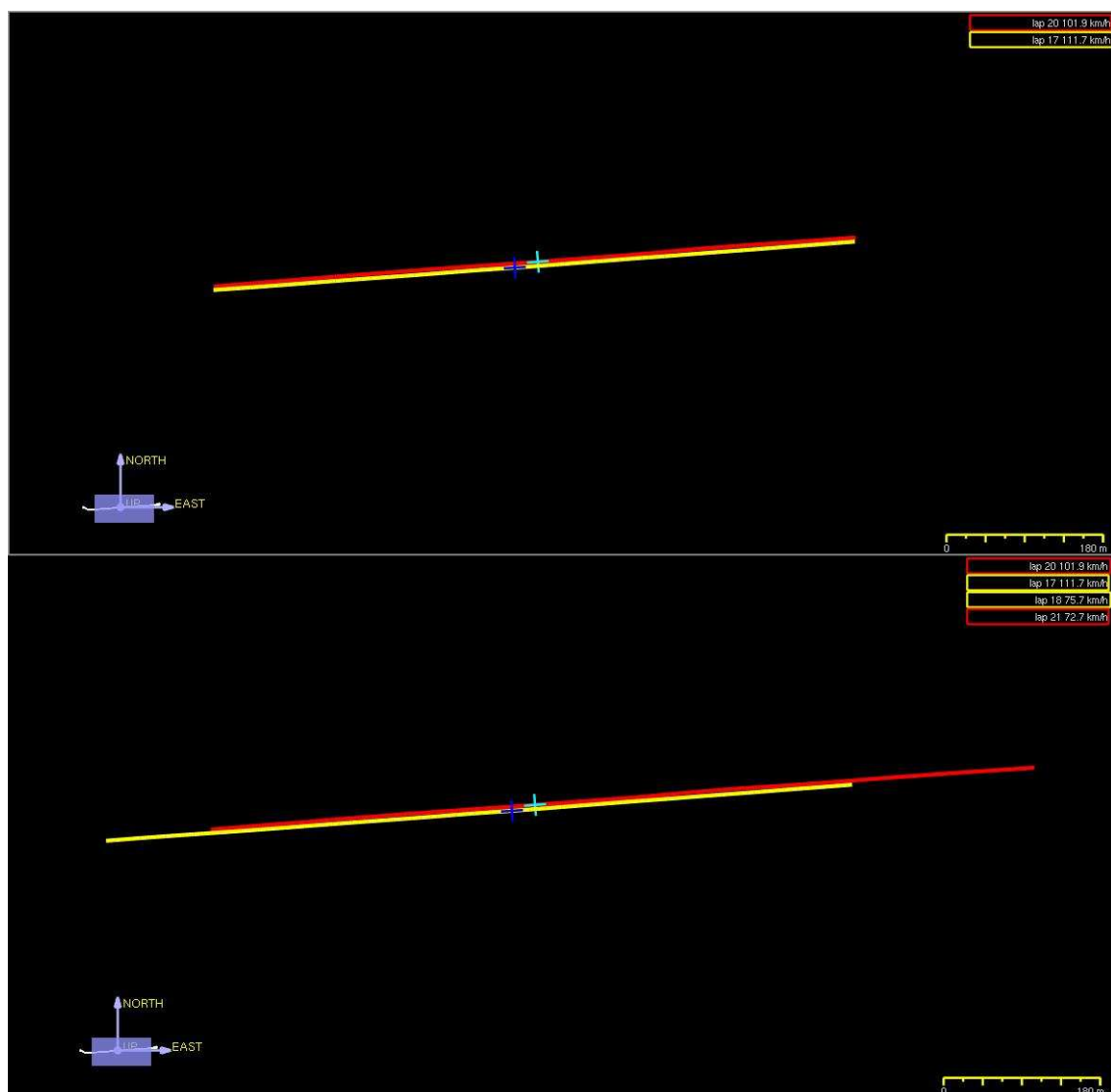


Obr. 5.37 Závislost zatížení přední nápravy na rychlosti vozu s nastavením 7



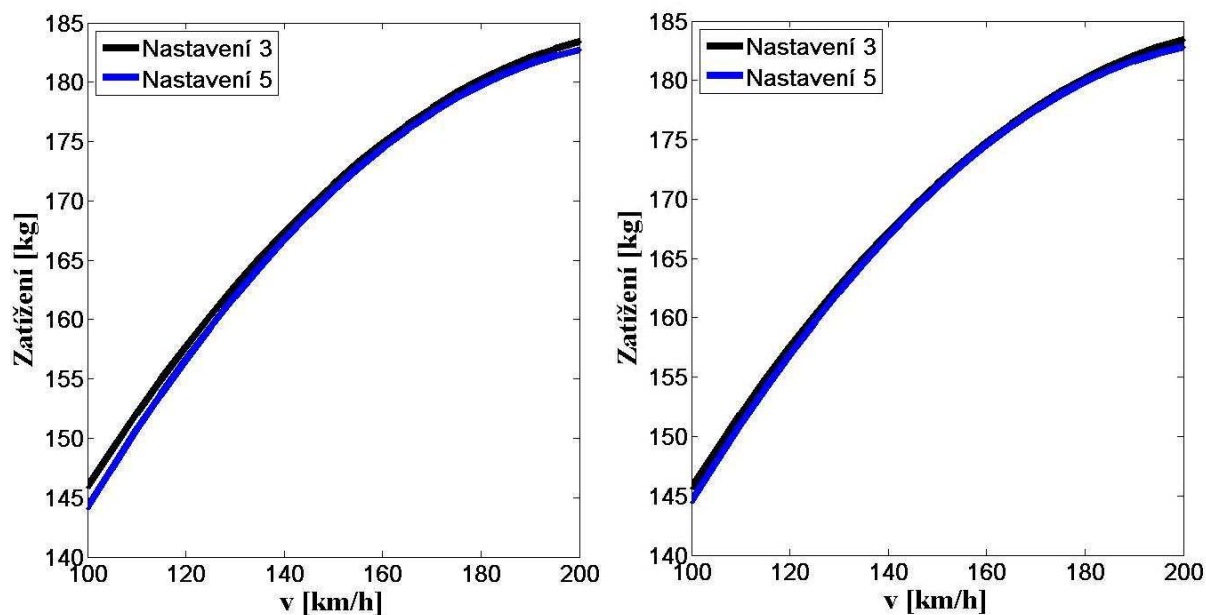
5.2.1 KOREKCE VÝSLEDKŮ POMOCÍ GPS

Jelikož jsme zatím v dosavadním zpracování zkoušky za konstantní rychlosti neuvažovali vliv nestejnorodosti trati, bylo vhodné provést kontrolu pomocí záznamu ze zařízení GPS. Otázka zněla, zda se změní výsledky zkoušky, pokud vezmeme v potaz pouze úsek trati, který jel jezdec předepsaným způsobem oběma směry. Lépe pochopitelné je toto vysvětlení z obr. 5.38, který nabízí porovnání záznamu GPS „neupravené trati“ a trati upravené tak, aby se úseky oběma směry překrývaly.



Obr. 5.38 Nahoře úsek upravený „oříznutím“ dat na stejnou délku, dole neupravená data z GPS

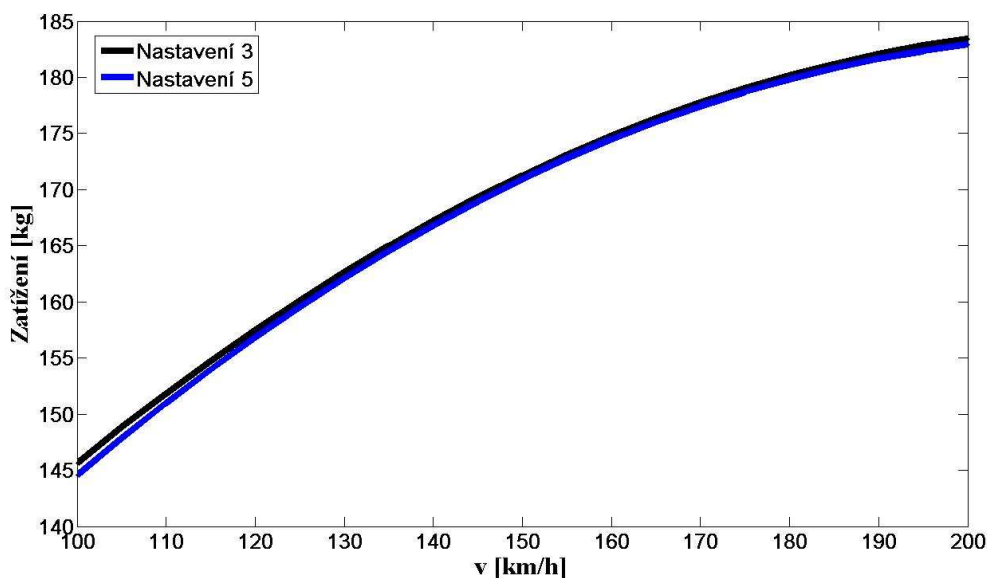
Odpověď na předchozí otázku je nejsnadnější pomocí porovnání grafů dvou nastavení, obr. 5.39.



Obr. 5.39 Porovnání nastavení 3 a 5 vlevo z dat „neoříznutých“, vpravo z dat „oříznutých“

Z obr. 5.39 je vidět, že přesnost „trefení“ stejného úseku trati v obou směrech nemělo nijak zásadní vliv na výsledky zkoušky.

Dalším pokusem, využít GPS k přesnějším závěrům, je již „oříznutá“ data z jednoho i druhého směru zprůměrovat a získat tím pouze jedny výsledky. Tím pádem místo původních šesti bodů, kterými byly původně proloženy křivky, vznikly body pouze tři, následně proložené polynomem druhého stupně. Výsledek je vykreslen na obr. 5.40.



Obr. 5.40 Porovnání nastavení 3 a 5, proložení polynomu třemi body

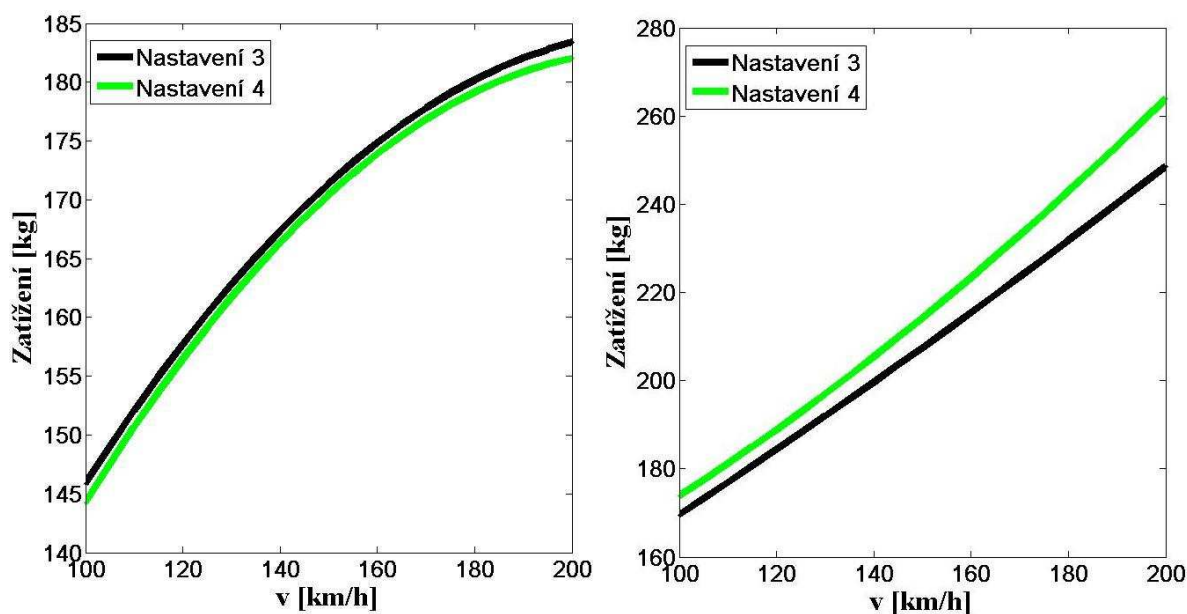


Z porovnání obrázku 5.40 s obrázkem 5.39 je patrné, že pokud jsou data zprůměrovány z obou směrů jízdy, celkový výsledek se prakticky nemění. Proto v další kapitole 5.2.2 byla pro tvorbu grafů použita data ve svém původním rozsahu, bylo tedy určeno šest bodů (dva pro každou rychlost) a ty byly proloženy polynomem druhého stupně.

5.2.2 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH NASTAVENÍ

Podobně jako kapitola 5.1.4 je i tato kapitola věnována porovnání jednotlivých nastavení. I zde vycházím z tabulky 4.2, kde jsou všechny dvojice uvedeny. Opět bohužel nebylo možné kvůli nekompletnosti plnohodnotně zpracovat údaje z nastavení číslo 1.

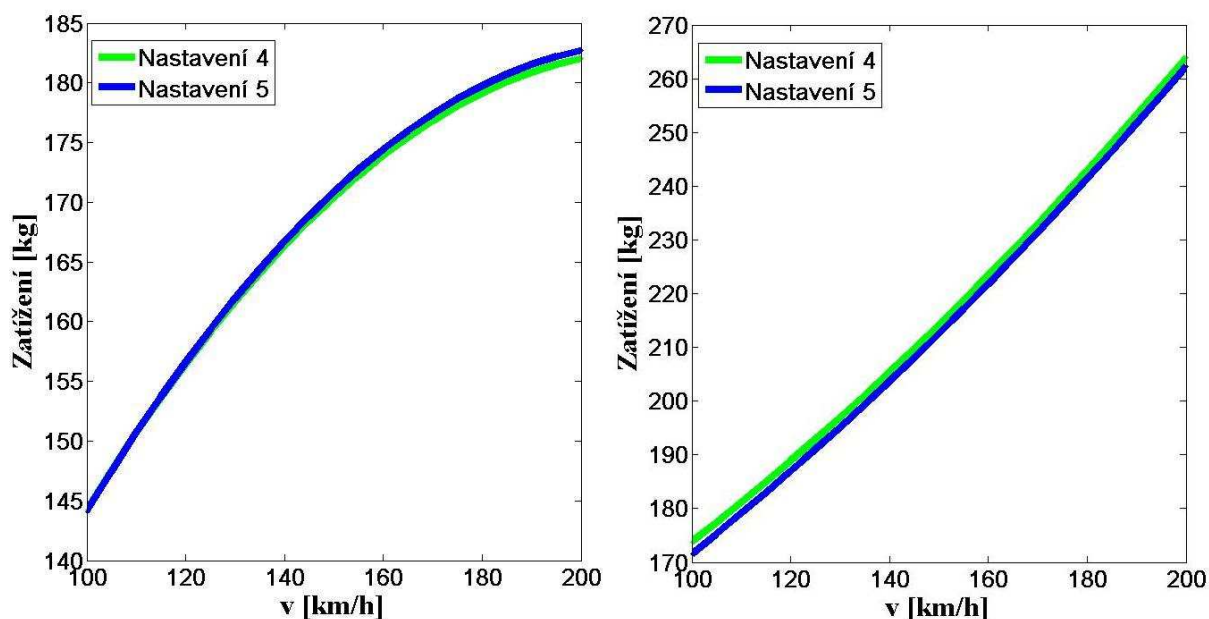
První porovnávanou dvojicí je nastavení 3 a nastavení 4, obr. 5.41. Nastavení 4 je oproti číslu 3 charakteristické dvojitým zadním křídlem.



Obr. 5.41 Porovnání nastavení 3 a 4 (vlevo přední náprava, vpravo zadní náprava)

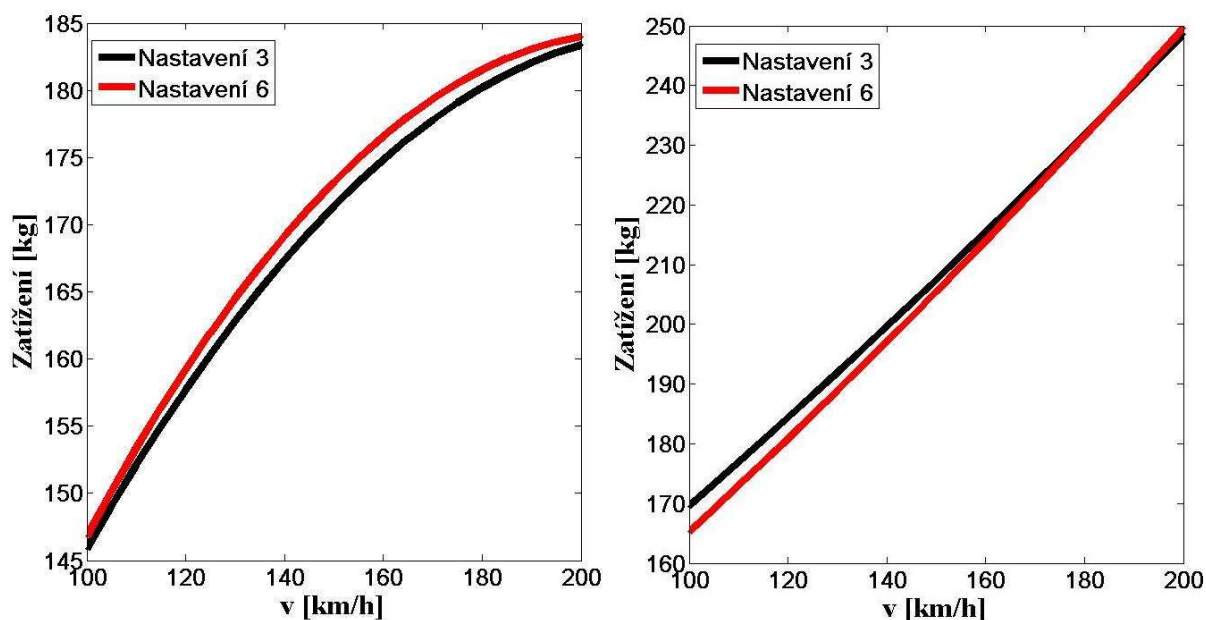
Vůz s nastavením 4 má díky dvojitému zadnímu křídlu výrazně větší přítlak na zadní nápravě, což zároveň odlehčuje přední nápravu, ta je tím pádem přitlačována menší silou přibližně o 15N při rychlosti 200 km/h.

Další dvojicí vhodnou pro porovnání je nastavení 4 a 5. Tato dvě nastavení se liší předním přitlačným křídlem, viz tab. 4.1. Na obr. 5.42 je patrné, že vůz s nastavením 5 má díky rozdílnému přednímu křídlu nepatrně větší přítlak na přední nápravě, naopak na zadní nápravě mírně přítlak ztrácí.



Obr. 5.42 Porovnání nastavení 4 a 5 (vlevo přední náprava, vpravo zadní náprava)

Porovnání dvojice nastavení 3,6 je na obr. 5.43. Odlišnost spočívá jak v předním, tak v zadním křídle, viz tab. 4.1.

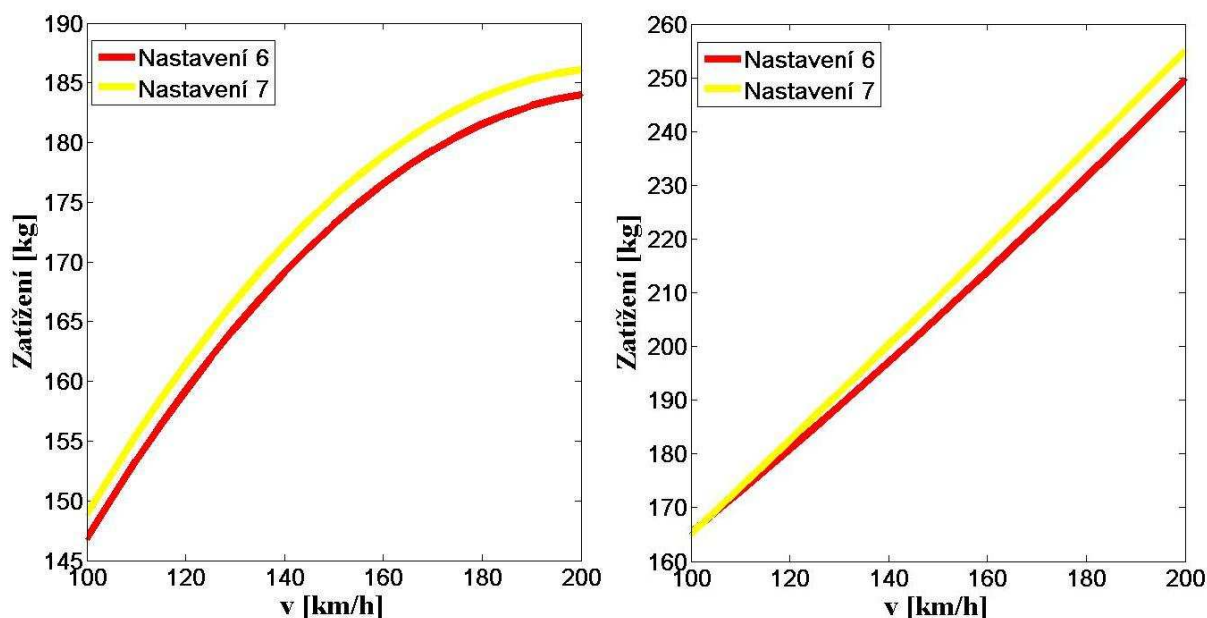


Obr. 5.43 Porovnání nastavení 3 a 6 (vlevo přední náprava, vpravo zadní náprava)

Přesto, že je nastavení 3 označeno jako „maximální přítlak“, má jen nepatrně větší přítlak při nižších rychlostech na zadní nápravě, naopak na přední nápravě má po celém rozsahu rychlosti větší přítlak vůz s nastavením 6.



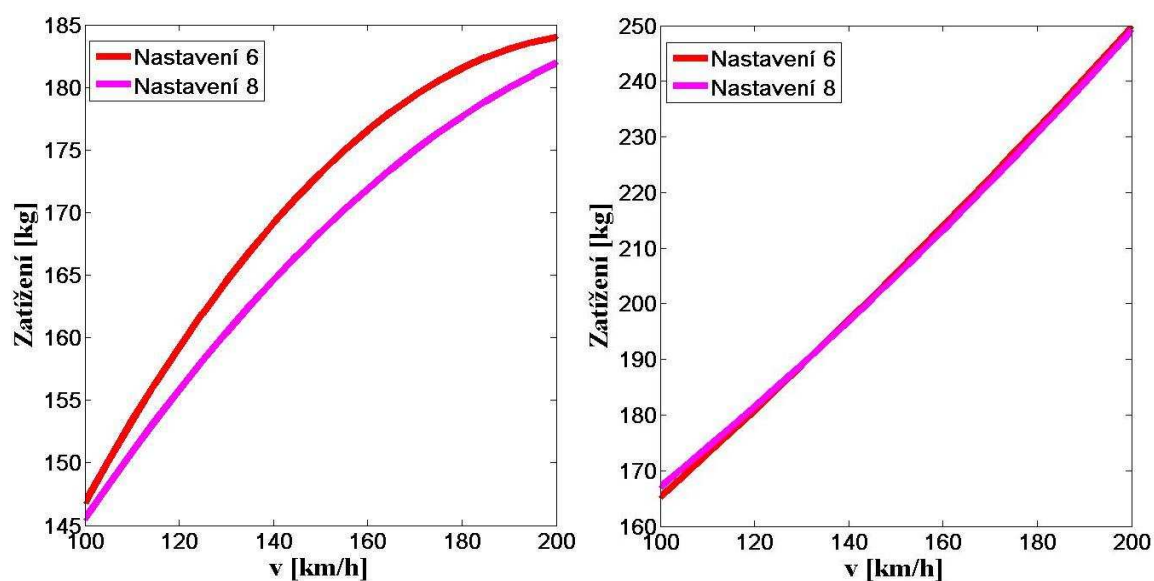
Dalšími nastaveními vozu vhodnými pro porovnání jsou varianty 6 a 7, obr. 5.44. Obě verze mají stejné parametry přítláčných křídel, ale liší se ve výšce vozu, přičemž nastavení 7 znamená výrazný předklon.



Obr. 5.44 Porovnání nastavení 6 a 7 (vlevo přední náprava, vpravo zadní náprava)

Nastavení 7, při kterém je vozidlo více předkloněné než v případě 6, má na obou nápravách zřetelně větší přítlak. Na přední nápravě přibližně o 2 kg a na zadní nápravě o 5 kg.

Dalším porovnáváním přítlaku prošla dvojice nastavení 6 a 8, obr. 5.45, která se opět liší ve výšce vozidla, tentokrát srovnáváme mírně předkloněné vozidlo s „rovným“.

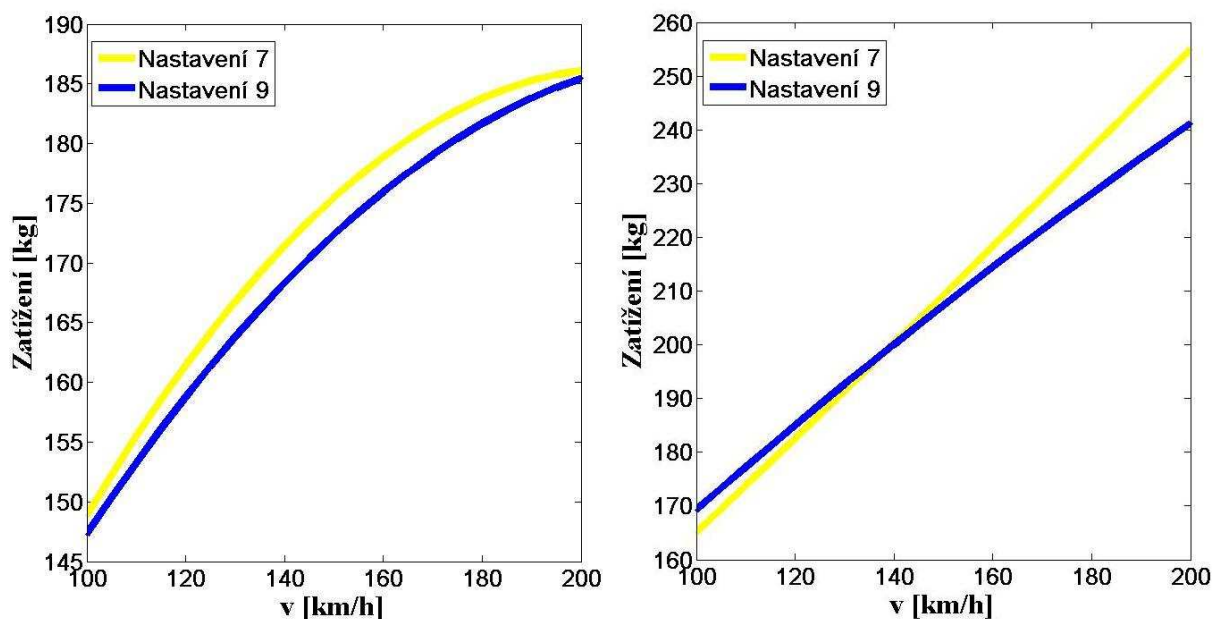


Obr. 5.45 Porovnání nastavení 6 a 8 (vlevo přední náprava, vpravo zadní náprava)



Na zadní nápravě mají obě nastavení přibližně stejný přítlak. Naopak na přední nápravě je naprosto zřetelně větší přítlak u vozu, který má přední přítláčné křídlo blíže k vozovce a to až o přibližně 7 kg.

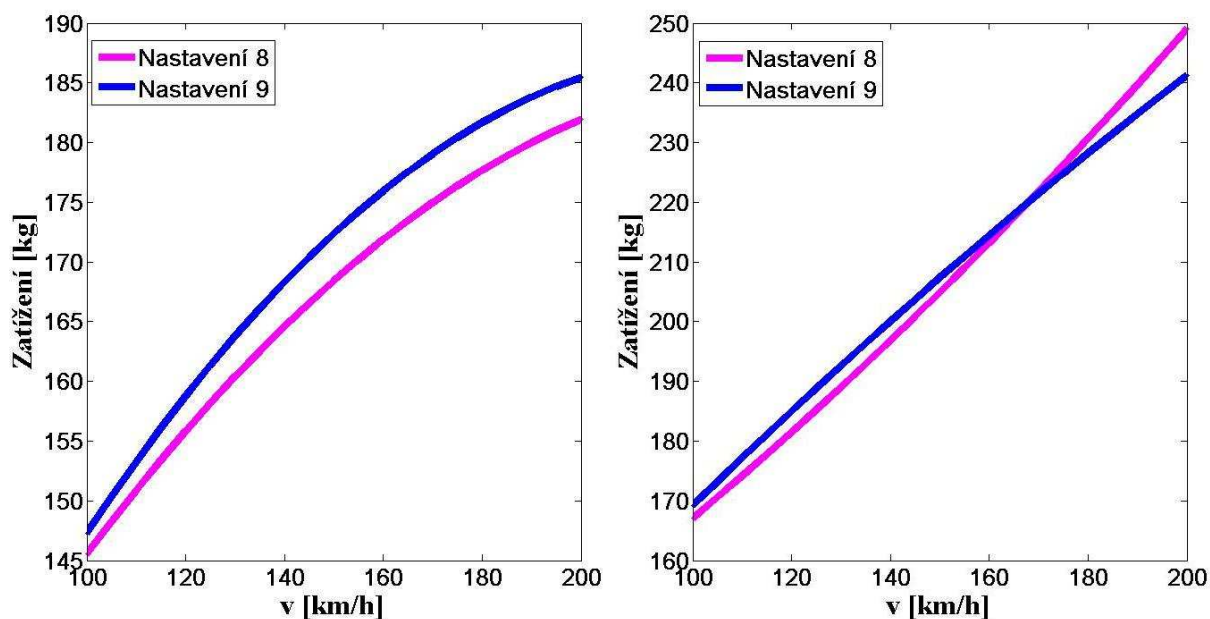
Další porovnávanou dvojicí jsou nastavení 7 a 9, obr. 5.46. Oba vozy mají přibližně stejný úhel sklonu, ale vozidlo s nastavením označeným jako 9 je celkově vyšší.



Obr. 5.46 Porovnání nastavení 7 a 9 (vlevo přední náprava, vpravo zadní náprava)

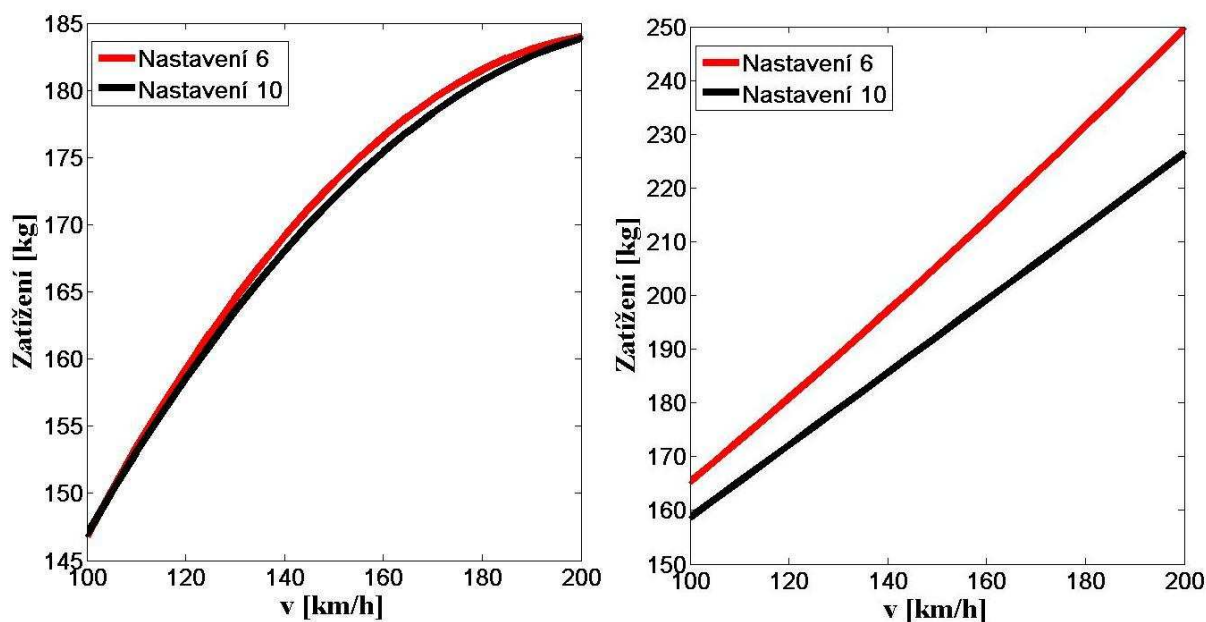
Vozidlo s nižší celkovou výškou má o přibližně 5 kg větší přítlak na přední nápravě a na zadní nápravě v rychlostech nad 150 km/h. V nižších rychlostech má vyšší automobil větší přítlak vzadu.

Předposlední porovnávanou dvojicí jsou nastavení 8 a 9, obr. 5.47. Výška přední nápravy je u obou vozů stejná, nastavení 9 má výše zadní nápravu. A právě vůz s tímto nastavením má až o 5 kg větší přítlak na přední nápravě a až do rychlosti přibližně 170 km/h také přítlak na zadní nápravě, od této rychlosti se větší přítlak na zadní nápravě přesouvá k vozu s nastavením 8.



Obr. 5.47 Porovnání nastavení 8 a 9 (vlevo přední náprava, vpravo zadní náprava)

Poslední srovnávanou dvojicí nastavení je dvojice 6 a 10, obr 5.48. Vozidlo 10 se liší nepřítomností difuzoru v zadní části vozidla.



Obr. 5.48 Porovnání nastavení 6 a 10 (vlevo přední náprava, vpravo zadní náprava)

Jak je vidět z obr. 5.48, nepřítomnost difuzoru se projevila v radikálním úbytku přtlaku na zadní nápravě. Díky této skutečnosti se naopak zvětšil přtlak na přední nápravě a to tak, že se prakticky vyrovnal přtlaku vozu s nastavením 6. (V grafu není počítáno s úbytkem zatížení vlivem odstranění difuzoru, což je přibližně 6 kg)

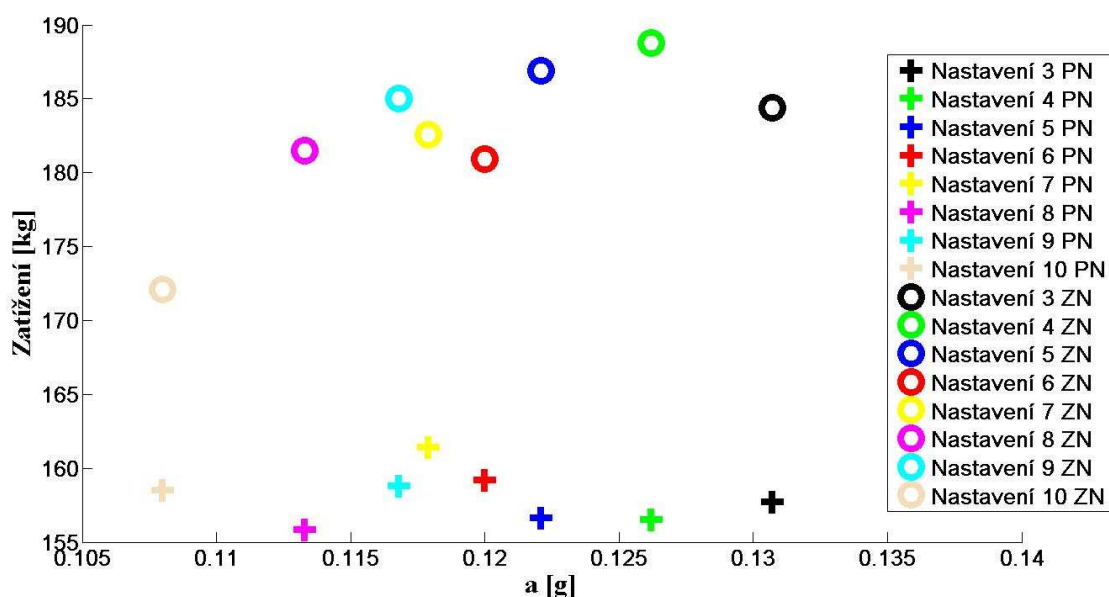


6 VYHODNOCENÍ PRŮBĚHU A VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

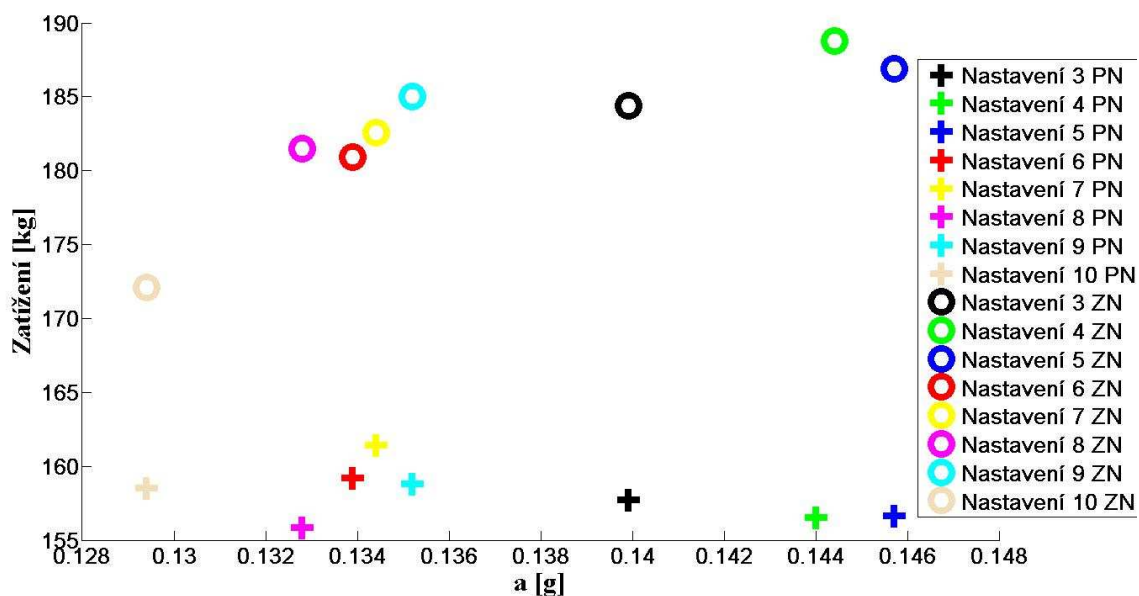
Pro vytvoření lepší představy o funkčnosti jednotlivých aerodynamických prvků a změn výšky vozidla, byly vytvořeny grafy závislosti zatížení na zrychlení, obrázek 6.1 až 6.6. Grafy jsou vytvořeny pro jednotlivé rychlosti, zvlášť pro první a zvlášť pro druhý úsek trati. Kolečkem je vždy označena zadní náprava, křížkem přední náprava a jednotlivá nastavení jsou barevně rozlišena. Tyto grafy mohou přehledněji ukázat, které nastavení má větší přítlak a jak velkou cenu v podobě nárůstu odporu za něj platíme. Dále mohou také více napovědět o přesnosti a opakovatelnosti měření.

Velikost statického zatížení (měřeno s jezdcem) je 121,5 kg na přední nápravě a 149 kg na zadní nápravě.

Obrázky 6.1 a 6.2 odpovídají rychlosti 120 km/h.

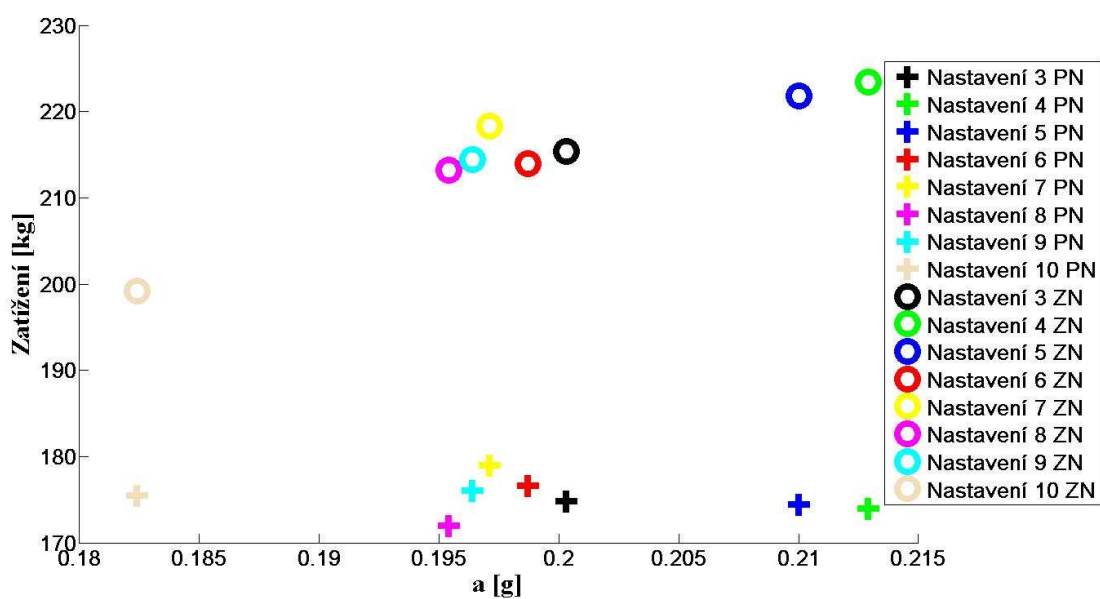


Obr. 6.1 Závislost zatížení na zrychlení pro rychlost 120 km/h (první úsek trati)

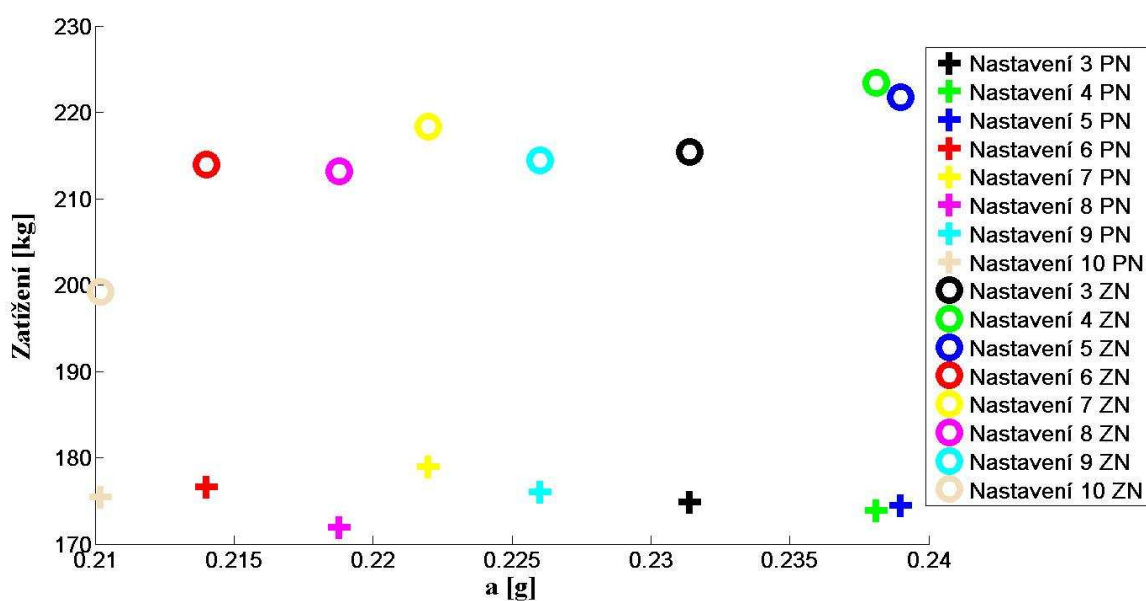


Obr. 6.2 Závislost zatížení na zrychlení pro rychlost 120 km/h (druhý úsek trati)

Obrázky 6.3 a 6.4 odpovídají rychlosti 160 km/h.

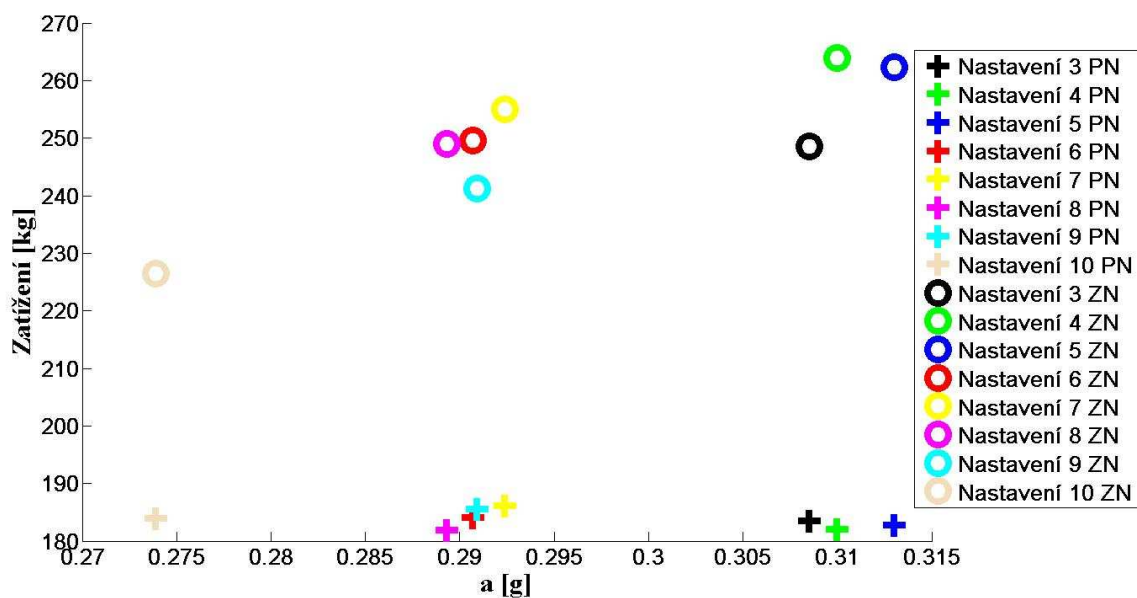


Obr. 6.3 Závislost zatížení na zrychlení pro rychlost 160 km/h (první úsek trati)

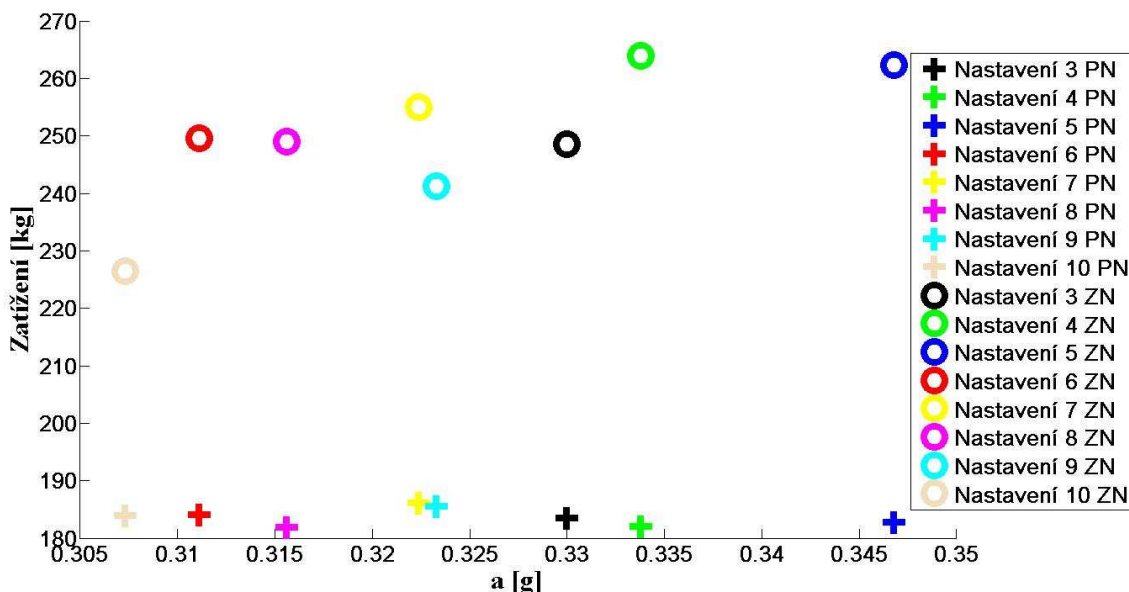


Obr. 6.4 Závislost zatížení na zrychlení pro rychlost 160 km/h (druhý úsek trati)

Obrázky 6.5 a 6.6 odpovídají rychlosti 200 km/h.



Obr. 6.5 Závislost zatížení na zrychlení pro rychlost 200 km/h (první úsek trati)



Obr. 6.6 Závislost zatížení na zrychlení pro rychlost 200 km/h (druhý úsek trati)

6.1 NASTAVENÍ VOZU

Interpretace výsledků z předchozích grafů není zcela jednoznačná. S jistotou můžeme prohlásit, že nastavení vozu reprezentované modrou a zelenou barvou, tedy nastavení 5 a 4, mají obecně největší přítlak na zadní nápravě, za cenu největšího odporu vzduchu. Výhodnější je dle mého názoru používat nastavení číslo 4, protože má ve většině měření větší přítlak na zadní nápravě a menší odpor vzduchu, přítlak na přední nápravě je prakticky totožný. Tato dvě nastavení byla testována s dvojitým zadním přítláčným křídlem na zvýšení přítlaku, můžeme tedy říct, že tento aerodynamický prvek splňuje svůj účel.

Dále následuje nastavení číslo 3, které bych označil jako „průměrné“ nastavení. Oproti ostatním nemá ani lepší hodnoty přítlaku na nápravách ani nižší aerodynamické odpory.

Na druhém konci spektra se objevuje nastavení 10, které se vyznačovalo nepřítomností difuzoru. Je naprosto jasné, že tato aerodynamická součást vozu má svoje velké opodstatnění. Vozidlo má bez něj mnohem menší aerodynamický odpor, avšak přítlaku na zadní nápravě radikálně ubývá a to i přesto, že v grafech není zahrnuto snížení hmotnosti vlivem odstranění difuzoru (přibližně 6 kg). Snížení přítlaku se projevuje především ve vyšších rychlostech.

Porovnání ostatních nastavení, tedy 6, 7, 8 a 9, která zkoumala vliv výšky vozidla na jízdní vlastnosti, nemá jasnou interpretaci. Dalo by se říci, že nastavení číslo 7 má z těchto variant největší přítlak na obou nápravách, pro jasnější vyvození výsledků by ovšem bylo potřeba větší množství přesnějších měření.

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, mnohem výrazněji se na výsledných grafech projevují změny na aerodynamických prvcích vozidla (přední křídlo, zadní křídlo, difuzor), než změny výšky vozidla.



6.2 ZPRACOVÁNÍ DAT, PŘESNOST A OPAKOVATELNOST MĚŘENÍ

Pro vytvoření grafů v kapitole 6 byly použity údaje z vyhodnocení dojezdové zkoušky druhou metodou, tedy derivací polynomu čtvrtého stupně. Tato metoda byla zvolena jako nejvhodnější pro zpracování naměřených dat, z důvodu její největší přesnosti. Pokud bychom prokládali rychlost polynomem nižšího stupně, vznikaly značné nepřesnosti po jeho derivaci (jak bylo ukázáno výše) a naopak proložení polynomem vyššího stupně nám již nepřineslo žádné zásadní změny ve výsledcích. Metoda přímé derivace rychlosti pracuje s velkým množstvím okamžitých rychlostí a tím po jejich derivaci vzniká i velké množství zrychlení. Tato zrychlení mají značný rozptyl a při jejich proložení může docházet k nepřesnostem (ne však tak velkým, jako při derivaci polynomu nižšího stupně).

Metoda na zpracování výsledků zkoušky za konstantní rychlosti se zdá být spolehlivá. K její větší přesnosti by bylo potřeba provést mnohem více jízd, protože z každé rychlosti získáváme pouze dva body (pro každý směr jeden), s kterými pak dále pracujeme. Dále by bylo též výhodné vytýčit naprosto přesný úsek, po který budou měření probíhat, to se bohužel díky nedostatku času a krátké zkušební dráze nepovedlo realizovat. K nepřesnostem v měření také přispěla nekvalitní zkušební dráha a to hlavně její povrch a časté změny sklonu. Její nedokonalosti jsme se snažili vyeliminovat při samotném návrhu zkoušky, což se podařilo pouze částečně.

Při dojezdové zkoušce, byl počet měřených jízd a tím pádem i množství získaných údajů, dostatečný. V kapitole 5 na obrázku 5.8 a 5.9 je snadno demonstrovatelná přesnost měření a jeho hlavní nedostatky. Přesnost měření je na slušné úrovni, pokud budeme porovnávat mezi sebou pouze stejné úseky trati (což nijak nesnižuje získané výsledky). Tato skutečnost je dána již zmíněnými nedostatky především ve zkušební dráze. Další věcí, která by přispěla ke zkvalitnění naměřených dat, by byl přístroj měřící relativní rychlost vzduchu, například pitotova trubice. Výsledky by poté nebyly ovlivněny působením povětrnostních podmínek, které se nám přes pravidelné měření a zapisování nepovedlo eliminovat.

Celkově by se daly naměřené a zpracované výsledky označit jako dostačující z hlediska porovnání jednotlivých nastavení vozu s tím, že pro nastavení s menší změnou vlivu na aerodynamiku by bylo potřeba provést více měření. Pro další využití výsledků k přesnějším číselným výpočtům, například koeficientu odporu vzduchu, je nutné provést měření přesnější.



ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo vytvoření funkčního měřicího řetězce za účelem zmapování aerodynamických vlivů působících na vozidlo a následné vyhodnocení naměřených dat. Hlavním předmětem zkoumání se staly velikosti vztlakových a odporových sil v závislosti na změnách aerodynamických prvků vozidla a změnách světlé výšky vozidla.

Jako nástroj pro měření hledaných závislostí byly zvoleny dojezdová zkouška a zkouška za konstantních rychlostí, které nejlépe odpovídají matematickému modelu reprezentujícímu aerodynamický odpor respektive aerodynamický vztlak. Metodika zkoušek musela být oproti normě a původnímu návrhu upravena přímo na místě měření v důsledku nedokonalosti zkušební dráhy. Samotné měření probíhalo na formuli závodního týmu Chabr Motorsport, která disponovala nastavitelnými aerodynamickými prvky (přední a zadní křídlo, difuzor) a nastavitelnou výškou vozu.

Pro vyhodnocení naměřených údajů z dojezdové zkoušky byly navrženy dvě metody řešení: Metoda přímé derivace rychlosti pomocí matematického kanálu a metoda derivace polynomu proloženého závislostí rychlosti na čase. První metoda přímé derivace má nedostatky především ve velkém rozptylu hodnot zrychlení získaných derivací. Proto jejich následné proložení polynomem, z důvodu možnosti porovnání jednotlivých nastavení vozu, může vykazovat určité menší nepřesnosti, a proto tato metoda není doporučena jako nejvhodnější k vyhodnocení daných údajů. U druhé metody proložením polynomu vyvstala otázka, jaký stupeň polynomu je nejvhodnější použít. Pro druhý stupeň vznikly po následné derivaci velmi nepřesné a zkreslené výsledky, při čtvrtém stupni polynomu jsme získali relativně přesné výsledky, vyšší stupeň polynomu již nepřinesl žádné vylepšení dosažených výsledků. Z výše uvedeného vyplývá, že metodou nejvhodnější pro vyhodnocení a následné porovnání naměřených údajů, je proložit závislost rychlosti na čase polynomem čtvrtého stupně, a ten následně derivovat, dodatečné proložení této derivace opět nepřináší žádné další výsledky.

Ke zpracování údajů naměřených při jízdě za konstantní rychlosti bylo použito proložení zprůměrovaných dat pro každou testovanou rychlost polynomem druhého stupně. Tato metoda je dostatečně spolehlivá, avšak přesnost dosažených výsledků je ovlivněna nízkým počtem provedených testovacích jízd.

Tímto bylo splněno zadání diplomové práce, byly navrženy zkoušky a postupy zpracování naměřených výsledků, které jsou použitelné pro libovolný automobil. Pro získání výsledků vhodných ke konkrétním číselným výpočtům by bylo potřeba provést větší množství testovacích jízd, zvolit zkušební dráhu vhodnější pro potřeby měření a použít systém měření rychlosti, který eliminuje povětrnostní vlivy. Výsledky porovnání jednotlivých aerodynamických nastavení jsou použitelné pro tým Chabr Motorsport jako podklad pro výběr nejvhodnějšího nastavení vozu pro daný závod.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] VLK, F. *Dynamika motorových vozidel*. 1. vyd. Brno: Nakladatelství VLK, 2000. ISBN 80-238-5273-6.
- [2] GILLESPIE, T.D. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, 1992. ISBN 1-56091-199-9.
- [3] VANČURA, J. *Výpočet aerodynamiky závodního automobilu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 77 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Porteš, Dr.
- [4] OSLIZLO, A. *Vliv rotace kol na aerodynamické charakteristiky vozu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 64 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Vančura
- [5] JAWAD, B., LONGNECKER, M., TIMMER, J. *The Impact of Aerodynamics in a Formula SAE Racing Style Vehicle*. SAE technical paper series, 2001, ISSN 0148-7191.
- [6] LE GOOD, G., HOWELL, J., PASSMORE, M., GARRY, K. *On-Road Aerodynamics Drag Measurements Compared with Wind Tunnel Data*. SAE technical paper series, 1995, ISSN 0148-7191
- [7] LE GOOD, G., McARTHUR, A. *On-Road Measurements of Aerodynamic Lift Compared with Wind Tunnel Data*. SAE technical paper series, 1996, ISSN 0148-7191
- [8] CREWE, C., PASSMORE, M., SYMONDS, P. *Measurement of Formula One Car Drag Forces on the Test Track*, 1996.
- [9] PETRUSHOV, V. *Coast Down Method in Time-Distance Variables*. SAE technical paper series, 1997, ISSN 0148-7191
- [10] *Aerodynamics application note* [online]. Pi Research Limited, 1998. [cit. 2011-11-08]. <<http://www.pi-group.com>>.
- [11] SLANÝ, K. *Aerodynamika* [online]. [cit. 2012-03-28]. <<http://lu.fme.vutbr.cz/ucebnice/opory/aerodynamics.php>>.
- [12] AIM RACING. *AIM Racing Data Power - Car products: EVO4* [online]. Poslední revize 3.11.2009 [cit. 2012-04-30]. <http://www.aimtec.co.uk/pages/car/section_car_evo4.htm.html>.
- [13] *Jizdni_odpory_vozidla* [online]. Poslední revize 18.8.2011 [cit. 2012-03-05]. <http://homen.vsb.cz/~vac174/vyuka/EP%20EEN/Studijni_opory/Jizdni_odpory_vozidla.pdf>.
- [14] *Auto 123.com* [online]. Poslední revize 19.4.2011 [cit. 2012-04-13]. <<http://www.auto123.com/en/racing-news/f1-ferrari-has-problems-with-its-wind-tunnel?artid=130333>>.



- [15] KOVANDOVÁ, M., VOLÁK, V. *Edutorium* [online]. Poslední revize 2008 [cit. 2012-03-25].
<http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=4d656368616e696b61h&key=281>
- [16] *Fyzweb* [online]. [cit. 2012-03-25].
<http://fyzweb.cuni.cz/dilna/krouzky/sr_rot/k43.htm>
- [17] *Kasravi* [online]. Poslední revize 8.4.2008 [cit. 2012-03-26].
<<http://www.kasravi.com/cmu/tec452/Aerodynamics/WindTunnel.htm>>
- [18] SEAS. *F1-dictionary* [online]. Poslední revize 2.6.2011 [cit. 2012-03-26]. <http://f1-dictionary.110mb.com/wind_tunnel.html>
- [19] GOOGLE. *Mapy Google* [online]. [cit. 2012-03-28].
<<http://maps.google.cz/maps?hl=cs&tab=wl>>



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ΔS	[m]	změna délky tlumiče
a	[m/s ²]	zrychlení vozidla
c_x	[-]	koeficient odporu vzduchu
c_z	[-]	koeficient vztlaku
d	[m]	charakteristický rozměr
F_k	[N]	hnací síla vozidla potřebná k překonání jízdních odporů
f_k	[-]	součinitel valivého odporu kola
F_{stat}	[N]	statická síla působící na vozidlo
F_x	[N]	odporová síla vzdušná
F_y	[N]	boční síla
$F_z, F_{vzp}, F_{vzz}, F_L$	[N]	vztlaková síla
F_{zk}	[N]	silová reakce vozovky
g	[m/s ⁻²]	tíhové zrychlení
h	[m]	výška
HP	[-]	jednotka výkonu motoru
i_c	[-]	celkový převod mezi motorem a hnacími koly
i_r	[-]	převod rozvodovky
J_{ki}	[kg.m ²]	moment setrvačnosti kol vozidla
J_m	[kg.m ²]	moment setrvačnosti rotujících částí motoru
J_p	[kg.m ²]	moment setrvačnosti rotujících částí převodového ústrojí
l	[m]	rozvor kol
m	[kg]	hmotnost
M_r	[Nm]	setrvačný moment rotujících částí vozidla
M_{rk}	[Nm]	moment potřebný k zrychlení kol
M_{rm}	[Nm]	moment potřebný k zrychlení rotujících částí motoru
M_{rp}	[Nm]	moment potřebný k zrychlení rotujících částí převodových ústrojí
M_x	[Nm]	Moment klopení
M_y	[Nm]	moment klonění
M_z	[Nm]	moment stáčení
O_f	[N]	odpor valivý
O_s	[N]	odpor stoupání
O_v	[N]	odpor vzduchu



O_z	[N]	odpor zrychlení
O_{zp}	[N]	odpor zrychlení posuvné části
O_{zr}	[N]	odpor zrychlení otáčejících se částí
p, p_1, p_2	[pa]	tlak vzduchu
p_c	[pa]	celkový tlak
r	[kg/m ³]	rozchod kol
r_d	[m]	dynamický poloměr kola
S_x	[m ²]	čelní plocha vozidla
t	[C°]	teplota
v, v_1, v_2	[ms ⁻¹]	rychlost vzduchu
v_r	[m/s]	rychlost proudění vzduchu
v_v	[m/s]	rychlost větru
W_l	[kg]	zatížení levého kola
W_n	[kg]	zatížení na nápravu
W_{pr}	[kg]	zatížení pravého kola
Z_k	[N]	výslednice elementárních sil
η	[-]	mechanická účinnost
ρ	[kg/m ³]	hustota vzduchu
ϑ	[m ² /s]	kinematická viskozita