



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**EXPERIMENTÁLNÍ IDENTIFIKACE AERODYNAMICKÝCH  
VLASTNOSTÍ VOZIDLA JÍZDNÍ ZKOUŠKOU**

EXPERIMENTAL IDENTIFICATION OF AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF A VEHICLE BY ON-ROAD  
TEST

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Maroš Poláš**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Jan Vančura, Ph.D.**

**BRNO 2017**

# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	<b>Bc. Maroš Poláš</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Automobilní a dopravní inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Jan Vančura, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2016/17

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 identifikace aerodynamických vlastností vozidla jízdní zkouškou**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Těžiště práce spočívá v provedení experimentu jízdních zkoušek dle ISO10521-1. Důraz je kladen na přímé srovnání přístupů učení jízdních odporů, jejich aplikace pro identifikaci vztlakových sil a vytvoření matematického algoritmu pro zpracování standardizovaných měření.

### **Cíle diplomové práce:**

- na experimentálních datech provést srovnání všech přístupů určení jízdních odporů dle 10521-1,
- odvodit matematický model pro identifikaci vztlakových sil z dat získaných měření na vozovce,
- vytvořit softwarový nástroj pro automatické zpracování měření dle ISO 10521-1.

### **Seznam literatury:**

HUCHO, Wolf-Heinrich. Aerodynamics of road Vehicles. 4th edition. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1998. 918 s. ISBN 0-7680-0029-7.

GILLESPIE, Thomas. D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1992. 519 s. ISBN 1-56091-199-9.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Táto práca sa zameriava na jazdné odpory, dojazdové skúšky a vyhodnotenie nameraných dát. Práca sa skladá z dvoch hlavných častí: teoretická a výpočtová časť. V prvej časti sú popísané jazdné odpory so zameraním hlavne na aerodynamický odpor a vztlakovú silu. V druhej časti je vytvorený softvérový nástroj pre spracovanie merania podľa ISO 10521-1 a výpočet vztlakových síl nameraných pomocou metódy skúšok pri konštantných rýchlostiach.

## **KLÍČOVÉ SLOVÁ**

aerodynamická odporová sila, vztlaková sila, aerodynamika, dojazdová skúška, Matlab

## **ABSTRACT**

This thesis deals with road loads, coastdown tests and evaluation of measured data. Thesis consists of two main parts: theoretical and computational. The first part describes road loads with focus on aerodynamic drag and lift force. In the second part, a software tool for processing the measurement per ISO 10521-1 is designed and lift force measured with running resistance method is calculated.

## **KEYWORDS**

aerodynamic drag, lift force, aerodynamics, coastdown test, Matlab

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

POLÁŠ, M. *Experimentální identifikace aerodynamických vlastností vozidla jízdou zkouškou*. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 59 s. Vedoucí diplomové práce Jan Vančura.

## ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Jana Vančuru Ph.D. a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brne dňa 25. května 2017

.....  
Bc. Maroš Poláš

## **POĎAKOVANIE**

Týmto by som sa chcel poďakovať pánovi Ing. Janovi Vančurovi, Ph.D. za odborné rady a čas strávený konzultáciami. Zároveň by som sa chcel poďakovať celej mojej rodine vrátane mojej priateľky za podporu počas celého štúdia.

## OBSAH

Úvod.....	9
1 Jazdné odpory .....	10
1.1 Valivý odpor .....	10
1.2 Aerodynamický odpor .....	11
1.3 Odpor stúpania.....	16
1.4 Odpor zrýchlenia.....	16
1.5 Odpor prívesu.....	17
2 Metódy merania odporovej sily .....	18
2.1 Multisegmentová metóda stacionárnej anemometrie.....	19
2.2 Metóda priemerného spomalenia.....	20
2.3 Priama regresná metóda.....	20
2.4 Metóda WLTP .....	21
2.5 Metóda palubnej anemometrie.....	21
2.6 Aerodynamický tunel.....	23
2.7 Meranie jazdného odporu metódou merania krútiaceho momentu.....	24
3 Vztlková sila.....	26
3.1 Vplyv vztaku.....	26
3.2 Meranie vztlakovej sily.....	27
3.3 Možnosti zlepšenia.....	27
4 Postup výpočtov odporovej sily.....	28
4.1 Spracovanie dát.....	28
4.2 Návrh GUI .....	30
4.3 Výpočty odporovej sily multisegmentovou metódou .....	32
4.4 Výpočet odporovej sily metódou priemerného spomalenia.....	34
4.5 Výpočet odporovej sily upravenou metódou priemerného spomalenia.....	36
4.6 Výpočet odporovej sily priamou regresnou metódou .....	38
4.7 Výpočet odporovej sily metódou WLTP .....	39
4.8 Porovnanie výsledkov .....	40
4.9 Korekcia výsledkov .....	44
5 Postup výpočtov vztlakovej sily .....	46
5.1 Metóda výškomerov.....	46
5.2 Výpočet mernej hmotnosti vzduchu .....	46
5.3 Metóda silomerov .....	47
Záver .....	53
Zoznam použitých skratiek a symbolov .....	56
Zoznam príloh.....	59



## ÚVOD

Automobily sú na cestách už dlhé roky a od začiatku to bolo o prekonávaní limitov. Práve motoršport výrazne ovplyvnil vývoj aerodynamiky vozidiel. Postupne sa poznatky preniesli aj do osobných automobilov. So zvyšujúcou sa rýchlosťou vzrastá jej vplyv na vozidlo. Aerodynamika neovplyvňuje iba maximálnu rýchlosť vozidla, ale aj jeho jazdné vlastnosti, ovládateľnosť hlavne pri vysokých rýchlostiach a v poslednej dobe veľmi diskutovaný problém a to spotrebu paliva a s ňou spojenú ekologickosť a ekonomickosť jazdy. Dnes sú aerodynamické vlastnosti skúmané od začiatku návrhu vozidla pomocou počítačových simulácií, meraním modelov v aerodynamickom tuneli a testovaním funkčného automobilu jazdnými skúškami, ktorými sa táto diplomová práca zaoberá. Jazdné skúšky sú finančne menej náročné a prístupnejšie ako testovanie v aerodynamickom tuneli.

Začiatok práce je venovaný teórii jazdných odporov a popisu existujúcich metód pre ich určenie. Cieľom práce je vyhodnotením nameraných dát na vozidle Škoda Octavia tretej generácie porovnať metódy určenia jazdných odporov metódou WLTP a metódami popísanými v norme ISO 10521-1:2006(E). Ďalším cieľom je pre urýchlenie výpočtov odporovej sily v budúcnosti vytvoriť výpočtový softvér v programe Matlab. Posledným cieľom je odvodenie matematického modelu pre výpočet vztlačových síl a použitie ho na namerané dáta.

# 1 JAZDNÉ ODPORY

Automobil sa pohybuje v reálnom svete a tak na neho pôsobí niekoľko druhov jazdných odporov. Pri vzniku pohybu vozidla je potrebné vyvinúť potrebnú hnaciu silu na prekonanie týchto odporov. S tým súvisí zároveň aj spotreba paliva. Čím väčšie sú odporové sily, tým je potrebné vytvoriť väčšiu hnaciu silu a tak aj použiť viac paliva. Odpor sa delia na:

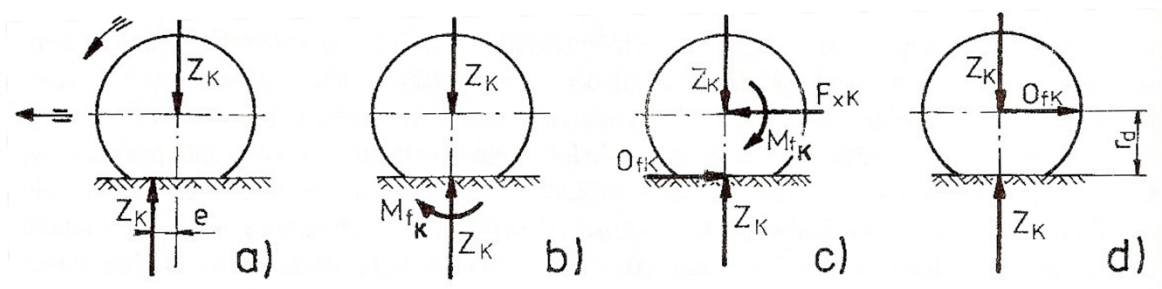
1. Valivý odpor
2. Aerodynamický odpor
3. Odpor stúpania
4. Odpor zrýchlenia
5. Odpor prívesu

## 1.1 VALIVÝ ODPOR

Automobil prichádza ku kontaktu s vozovkou pomocou plochy pneumatík zvanej stopa. Valivý odpor vzniká deformáciou pneumatiky a vozovky. Ak je vozovka tuhá, dochádza iba k deformácii pneumatiky. Valivý odpor sa dá vypočítať pre každé koleso takto:

$$O_{fK} = Z_K \frac{e}{r_d} = Z_K f_K, \quad (1)$$

kde  $O_{fK}$  je valivý odpor kolesa,  $Z_K$  je radiálna reakcia vozovky,  $e$  je excentricita o ktorú je posunutá radiálna reakcia vozovky voči zvislej osi kolesa, viditeľná na Obr. 1,  $r_d$  je dynamický priemer kolesa a  $f_K$  je súčiniteľ valivého odporu kolesa, ktorý má rozdielne hodnoty pre rôzne povrchy (zobrazené v Tab. 1), rýchlosti otáčania kolies či tlaky pneumatík, keďže pri nižšom tlaku vzrastie deformačná práca a teda aj tlniacia práca, čo sa prejaví zvýšením valivého odporu. Na mäkkých povrchoch ako napr. piesok pri vyššom tlaku dôjde k zvýšeniu "ground penetration work" a tým aj zvýšeniu koeficientu. Vo všeobecnosti zvýšenie trakcie na takomto povrchu je docielené znížením tlaku pneumatík a teda znížením koeficientu valivého odporu. Jeho hodnoty sa menia aj s rozdielnou konštrukciou pneumatík.



Obr. 1 Grafické znázornenie valivého odporu  $O_{fK}$  [1]

V prednej časti stopy v smere odvaľovania kolesa dochádza k stlačovaniu obvodu pneumatiky do roviny vozovky. V zadnej časti stopy dochádza k vyrovnaniu do kruhového tvaru. Pneumatika sa deformáciou zahrieva, čo predstavuje straty, ktoré zapríčiňujú, že veľkosť sily potrebnej na stlačenie pneumatiky je väčšia, než sila pneumatiky pôsobiaca na vozovku pri vracaní sa do pôvodného kruhového tvaru. Merné tlaky sú v prednej časti stopy väčšie a tak dochádza k posunutiu výslednice síl  $Z_k$  pred zvislú os kolesa o excentricitu  $e$ , ktorá je viditeľná na Obr. 1 a). V prípade zavedenia momentu  $M_{fK} = Z_k e$  je možné presunúť výslednicu  $Z_k$  do

zvislej osi kola ako na Obr. 1 b). Moment  $M_{fk}$  vyvolá reakciu  $O_{fk}$  smerujúcu proti pohybu kola.

Tab. 1 Súčiniteľ valivého odporu  $f_k$  pre rôzne povrchy [1]

Povrch	$f_k [-]$
Asfalt	0,01 – 0,02
Betón	0,015 – 0,025
Dlažba	0,02 – 0,03
Makadam	0,03 – 0,04
Poľná cesta za sucha	0,04 – 0,15
Poľná cesta za mokra	0,08 – 0,20
Trávnatý terén	0,08 – 0,15
Hlboký piesok	0,15 – 0,30
Čerstvý sneh	0,20 – 0,30
Bahnitý terén	0,20 – 0,40
Ľad	0,01 – 0,025

Výsledný valivý odpor vozidla je daný súčtom valivých odporov jednotlivých kolies  $O_{fki}$ :

$$O_f = \sum_i O_{fki}, \quad (2)$$

Okrem valivého odporu pôsobia na vozidlo ďalšie odpory veľmi podobné valivému. Je to odpor, ktorý vzniká zbiehavosťou predných kolies, je však veľmi malý a tak sa obvykle nevyskytuje vo výpočtoch. Ďalej je to odpor vznikajúci pri prekonávaní nerovností vozovky. Tie vytvárajú ďalšie deformácie pneumatiky a tým aj odpor. Nerovnosti vozidlo netlmí iba deformáciou pneumatiky, ale aj tlmičmi, kde pri ich pohybe vzniká trenie a straty v podobe tepla. Pri jazde sa koleso stretáva s okolitým vzduchom, čím vzniká aerodynamický odpor. Ten sa pripočítava k celkovému aerodynamickému odporu vozidla. Odpor vzniká aj pri zatáčaní vozidla, kedy kolesá sa odvažujú so smerovými úchylkami  $\alpha$ . V prípade zjazdených, hladkých pneumatík sú hodnoty koeficientu valivého odporu až o 20 % nižšie ako u úplne nových pneumatík. [1], [2]

## 1.2 AERODYNAMICKÝ ODPOR

Vývoj vozidiel priniesol postupné zlepšovanie aerodynamiky vozidiel nie len pri závodných vozidlách. Vplyv minimalizovania aerodynamického odporu je asi najviditeľnejší na dnešných automobiloch tvarom ich karosérie. Aerodynamika ovplyvňuje spotrebu paliva, maximálnu rýchlosť a jazdné vlastnosti vozidla. Prvý, sériovo vyrábaný automobil s aerodynamickými tvarmi bola Tatra 77 z roku 1934. Súčiniteľ aerodynamického odporu  $c_x$  mala iba 0.212. Táto hodnota je aj dnes obdivuhodným číslom, a bola prekonaná až v roku 1995 kontroverzným a vo svojej dobe veľmi populárnym elektromobilom GM EV1 hodnotou  $c_x = 0.19$ . Produkcia tohto nádejného elektromobilu, ktorý mal zmeniť celý automobilový priemysel, bola predčasne ukončená a tak nie je úplne na mieste hovoriť o ňom ako o masovo vyrábanom automobile

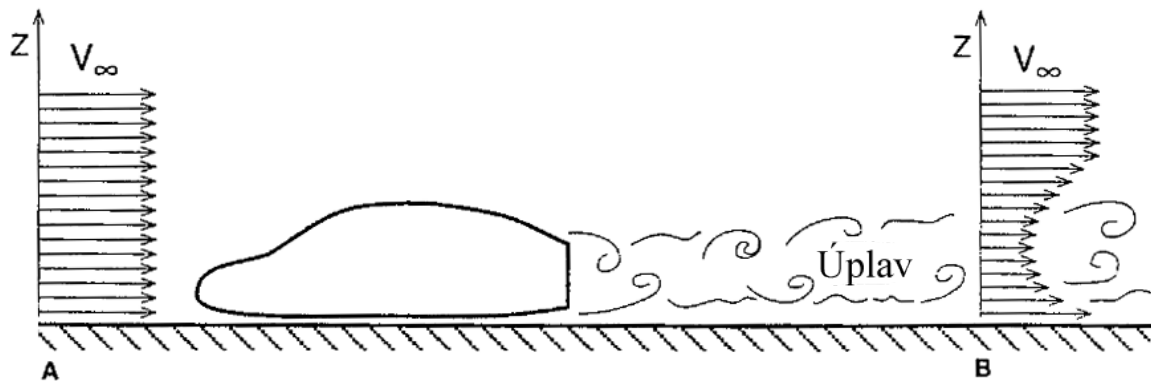
(1117 kusov). Odvtedy sa stala aerodynamika dôležitou súčasťou každého vozidla, čo je vidieť aj na pripravovanom elektromobile Tesla Model 3 s  $c_x = 0.21$ , ktorý by mal s plánovanou sériovou produkciou prebrať titul najaerodynamickejšie sériovo vyrábané vozidlo.



*Obr. 2 Tatra 77 z roku 1936 [3]*

Vzduch obteká pri jazde karosériu, prúdi ponad ňu, okolo nej, cez otvory určené pre prístup vzduchu k chladičom či saniu, ale aj cez priestor medzi vozovkou a podvozkom vozidla. Prúdnice sa za vozidlom nezatvárajú, ale dochádza k víreniu. Obtekaním vzduchu okolo vozidla vzniká aerodynamický odpor, ktorý bráni pohybu vozidla. Jeho veľkosť je daná výslednicou normálových tlakov vzduchu na povrch karosérie a trecích síl pôsobiacich v dotyčnicovom smere prúdenia vzduchu okolo karosérie. Skladá sa z odporu vznikajúceho vírením a trením vzduchu pri otáčajúcich sa kolesách, z odporu vznikajúceho pri prechode vzduchu chladiacim a vetracím systémom, z indukovaného aerodynamického odporu vznikajúceho z vírenia v priečnej rovine automobilu, ktoré je zapríčinené rozdielom medzi pretlakom pod vozidlom a veľkým podtlakom nad ním.

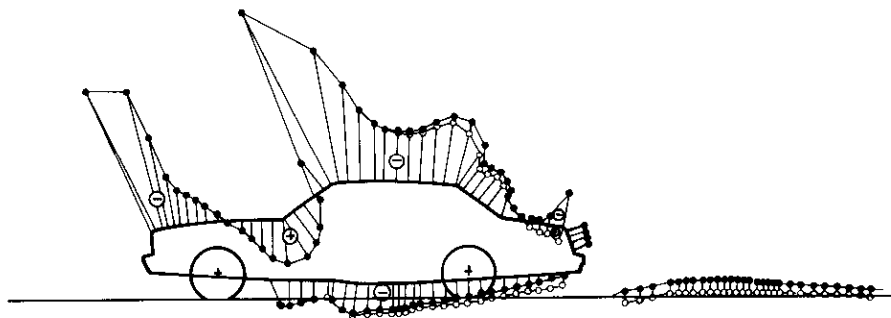
Pre určenie aerodynamických vlastností vozidla je dôležité poznať účinky jeho obtekania za ním. Vzniká úplav, čo je nekludné prúdenie za vozidlom umiestený do inak pokojného prúdenia. Tento efekt je viditeľný napr. za lietadlom, alebo nákladným vozidlom, pri ktorom sa vzduch roluje ešte dlho po jeho prejazde. Ak by bola meraná po výške rýchlosť prúdenia v dostatočnej vzdialenosti pred vozidlom, tak bude rozloženie rýchlostí konštantné. Ak by bolo vykonané rovnaké meranie za vozidlom aj vo väčšej vzdialenosti, je viditeľný pokles veľkosti rýchlosti v určitých nameraných výškach. V oblasti úplavu je prúdenie akoby ťahané za vozidlom, čo ale spôsobuje odpor proti pohybu. Spôsobuje asi tretinu celkového aerodynamického odporu vozidla.



Obr. 3 Znárodnenie úplavu a rýchlostí prúdenia [5]

Na druhú stranu keďže prúdenie vnútri úplavu sa pohybuje v smere pohybu vozidla, ďalšie vozidlo za ním tým získava výhodu a môže využiť túto oblasť odtrhnutého prúdenia pre tzv. draftovanie. Vtedy mu prostredie kladie menší odpor ako tomu, ktorý svojou jazdou túto oblasť vytvára. Draftovanie je často používané v motošporte, ale v prípade závodných vozidiel s veľkým prítlakom zvyčajne úplav zníži časť prítlaku a tým sa stáva vozidlo druhé v poradí menej konkurencieschopné voči tomu, čo úplav vytvára.

Obtekaním vozidla vzduchom vznikajú oblasti s rôznymi hodnotami tlaku. Záporný tlak (menší ako tlak v okolí) vzniká na prednom okraji kapoty prúdením zdvíhajúcim sa okolo prednej časti vozidla, ktoré sa snaží otočiť do smeru kapoty. Tým môže spôsobiť spomalenie prúdenia v medznej vrstve a tým nárast aerodynamického odporu. Naopak v oblasti horného konca kapoty a spodnej časti čelného skla je prúdenie otáčané nahor, čím sa vytvára kladný tlak (väčší ako v okolnom prostredí). Práve preto je vhodné do tejto oblasti umiestniť otvor pre nasávanie vzduchu do motora, prípadne pre ventiláciu kabíny či klimatizácie. Na streche je opäť negatívny tlak spôsobený kvôli prúdu vzduchu snažiacemu sa kopírovať tvar strechy a zadnej časti vozidla. Tu najčastejšie dochádza k odtrhnutiu prúdenia. Je dôležité správne navrhnuť klesanie zadnej časti vozidla, keďže ovplyvňuje aerodynamiku vozidla cez bod odtrhnutia prúdu. Čím menšia je plocha za týmto bodom, tým menší je aj aerodynamický odpor, preto najideálnejším tvarom je tvar kvapky. Veľkosť plochy odtrhnutého prúdenia ovplyvňuje priamo aerodynamický odpor, ale miera, akou je prúdenie strhnuté za vozidlom smerom dole ovplyvňuje aerodynamický vztlak na zadnej časti. Je to zapríčinené znížením tlaku spôsobeného tlačením prúdu vzduchu smerom dole.



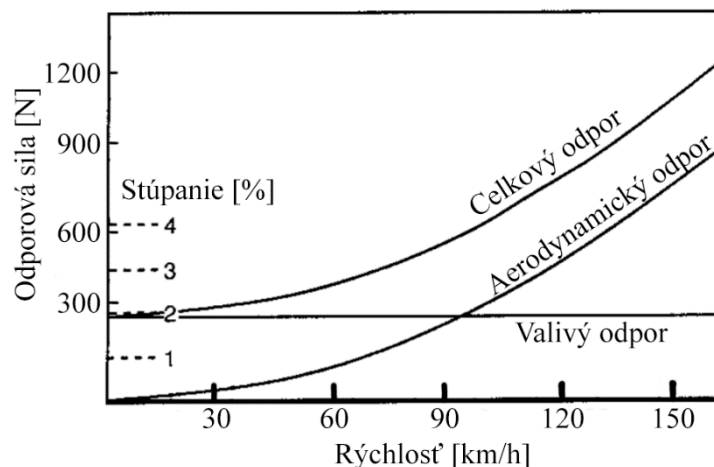
Obr. 4 Znárodnenie tlakov na karosérii vozidla [2]

Veľkosť aerodynamického odporu sa dá určiť rovnicou:

$$O_v = \frac{1}{2} \rho S_x c_x v_r^2, \quad (3)$$

kde  $\rho$  je merná hmotnosť vzduchu,  $S_x$  je čelná plocha automobilu,  $c_x$  je súčiniteľ aerodynamického odporu a  $v_r$  je náporová rýchlosť, zložená zo súčtu zápornej rýchlosti pohybu automobilu, ktorou prechádza cez pokojný vzduch a rýchlosti vetra. Vplyv aerodynamického odporu na ekonomiku jazdy sa zväčšuje s rýchlosťou, zatiaľ čo valivý odpor pneumatík sa s rýchlosťou mení iba minimálne. Dôležité je tiež na aký účel je vozidlo používané. Pokiaľ ide o vozidlo určené primárne pre dopravu po meste, je vidieť podľa Obr. 5, že nepotrebuje vynikajúcu aerodynamiku oproti vozidlu určenému na dlhé trasy pri vysokej rýchlosti po diaľnici. Ekonomiku jazdy v prípade mestského vozidla zlepši zníženie valivého odporu napr. použitím pneumatík s nízkym valivým odporom resp. udržiavaním správneho tlaku v nich. To je od konca roku 2014 jednoduchšie kvôli zavedeniu povinných snímačov tlakov pneumatík pre každé nové vozidlo (hlavne s priamym systémom merania tlakov).

### 1.2.1 MERNÁ HMOTNOSŤ VZDUCHU $\rho$



Obr. 5 Priebeh odporov v závislosti na rýchlosti 55[2]

Keďže je plyn stlačiteľný a jeho hmotnosť nám nedá okamžitú predstavu o jeho objeme, táto veličina udáva pomer hmotnosti a objemu. Závisí hlavne na teplote a tlaku okolitého vzduchu. Pre teplotu  $t_0 = 15^\circ\text{C}$  a tlak vzduchu  $p_0 = 101,3 \text{ kPa}$  je merná hmotnosť vzduchu rovná hodnote  $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ . Táto hodnota sa používa vo väčšine praktických výpočtov. V prípade potreby väčšej presnosti je možné použiť tento vzťah:

$$\rho = \rho_0 \frac{p(t_0 + 273)}{p_0(t + 273)} = \frac{354p}{(t + 273)}. \quad (4)$$

### 1.2.2 ČELNÁ PLOCHA AUTOMOBILU $S_x$

Táto plocha je veľmi dôležitá pre určenie aerodynamických vlastností vozidla. Čím menšia plocha, tým menší súčin  $c_x \times S_x$ . Pre porovnanie BMW e92 M3 má čelnú plochu  $2,17 \text{ m}^2$  a koeficient  $c_x$  0.33. Súčin je potom 0.72 oproti hodnote 1.07, ktorú má BMW X6 M s oveľa väčšou čelnou plochou  $2,85 \text{ m}^2$  a  $c_x$  0.38. Dá sa získať či už meraním, alebo výpočtom z 3D modelu vozidla. V prípade merania je možné použiť tieto postupy:

- Projekčná metóda. Základom je nasvietenie roviny kolmej k ose vozidla, čím sa docieli vytvorenie tieňa na projekčnej stene, ten predstavuje plochu  $S_x$ .
- Metóda laserového meracieho systému. Táto metóda je veľmi presná, rýchla, ale zároveň nákladnejšia oproti predošlým možnostiam. V tomto prípade je vozidlo postavené medzi laserové zariadenie a projekčnú stenu podobne, ako v predošlej metóde. Laserový lúč je vysielaný rovnobežne s pozdĺžnou osou vozidla na projekčnú stenu. Pomocou pohybov meracej hlavy v horizontálnom a vertikálnom smere sa postupne určujú súradnice obrysu vozidla. Z nich je následne určená plocha  $S_x$ .

### 1.2.3 SÚČINITEĽ AERODYNAMICKÉHO ODPORU $c_x$

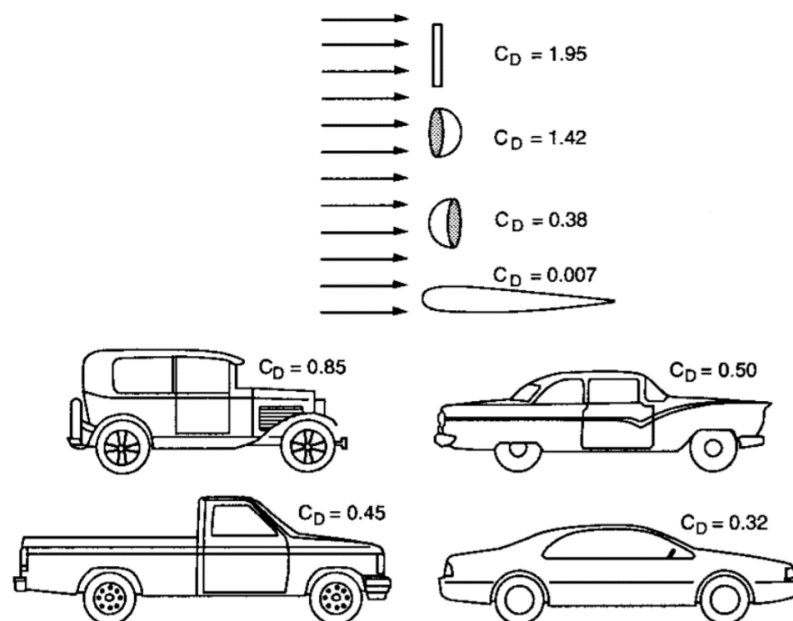
Súčiniteľ  $c_x$  vyjadruje závislosť odporu prostredia na tvare vozidla. Tento súčiniteľ sa často označuje aj ako koeficient, čo by znamenalo konštantnú hodnotu, no tento súčiniteľ je závislý na Reynoldsovom čísle  $Re$ , ktoré je závislé na rýchlosti prúdenia.

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu}, \quad (5)$$

kde  $v$  je rýchlosť,  $L$  je dĺžka vozidla a  $\mu$  je dynamická hustota v  $[\text{Ns}/\text{m}^2]$ . Určenie súčiniteľa aerodynamického odporu  $c_x$  je možné niekoľkými spôsobmi. Experimentálne je možné tento koeficient určiť v aerodynamickom tuneli.

$$c_x = \frac{2O_v}{\rho S_x v_r^2} \quad (6)$$

Pre porovnanie aerodynamických vlastností vozidiel je lepšie použiť súčin tohto koeficientu s čelnou plochou vozidla  $c_x S_x$ , čím vzniká hodnota porovnateľná aj napr. medzi športovým vozidlom a vozidlom SUV, ktoré má väčšiu čelnú plochu. Tá sa pri porovnaní týmto spôsobom prejaví negatívne násobením koeficientu čelnou plochou, naopak pri porovnaní koeficientov  $c_x$  je tento koeficient delený touto plochou. Pri porovnávaní vozidiel s rovnakým koeficientom aerodynamického odporu a rozdielnou čelnou plochou je vidieť rozdiel. [1], [2], [4], [5]



Obr. 6 Súčiniteľ aerodynamického odporu pre rôzne tvary karosérie [2]

### 1.3 ODPOR STÚPANIA

Tento druh odporu vzniká pri jazde na pozdĺžnom kopci. Závisí na uhle stúpania  $\alpha$ . Jeho veľkosť je daná rovnicou:

$$O_s = \pm G \sin \alpha, \quad (7)$$

kde  $G$  je tiaž vozidla a uhol  $\alpha$  zvierá rovina vozovky s vodorovnou rovinou. V prípade, že vozidlo ide z kopca sa počíta so záporným a naopak, ak ide vozidlo do kopca, s kladným znamienkom.

$$s = \frac{h}{l} = \tan \alpha. \quad (8)$$

Namiesto uhla stúpania sa dá použiť pri výpočtoch sklon svahu (stúpanie)  $s$ . Pre malé uhly do  $\alpha = 17^\circ$ , alebo  $s = 30\%$  platí, že  $\sin \alpha$  je približne rovné  $\tan \alpha$ . To stačí pre väčšinu výpočtov, keďže maximálne stúpanie cesty je 10 až 12 % a na diaľniciach 6 %. Vyššie stúpanie býva väčšinou iba v prípade vysokohorských ciest. Naopak pri jazde zo svahu nie je sínusová zložka odporom, ale poháňa vozidlo smerom dole. V prípade dojazdových skúšok je tento odpor minimálny resp. v ideálnom prípade ak trať spĺňa požiadavky normy na 100%, tak je nulový.[1]

### 1.4 ODPOR ZRÝCHLENIA

Pri zrýchľovaní automobilu vzniká zotrvačná sila, ktorá pôsobí proti smeru zrýchlenia. Táto sila predstavuje odpor zrýchlenia a je určená rovnicou:

$$O_z = O_{zp} + O_{zr}, \quad (9)$$

kde odpor zrýchlenia posuvnej časti je:

$$O_{zp} = m\ddot{x}, \quad (10)$$

kde  $m$  je hmotnosť vozidla a  $\ddot{x}$  je zrýchlenie, prípadne spomalenie vozidla. Odpor zrýchlenia otáčajúcich sa častí je:

$$O_{zr} = \sum_i \frac{J_{Ki}}{r_{di}r_{Ki}} \ddot{x} = \frac{M_r}{r_d}, \quad (11)$$

kde  $J_{Ki}$  je hmotnostný moment zotrvačnosti rotujúcich kolies,  $r_{Ki}$  je valivý polomer kolesa,  $r_{di}$  je dynamický (účinný) polomer kolesa a  $M_r$  je zotrvačný moment rotačných častí vozidla, ktorý je treba priviesť na hnacie kolesá vozidla, aby došlo k prekonaniu odporu rotačných častí. Skladá sa z:

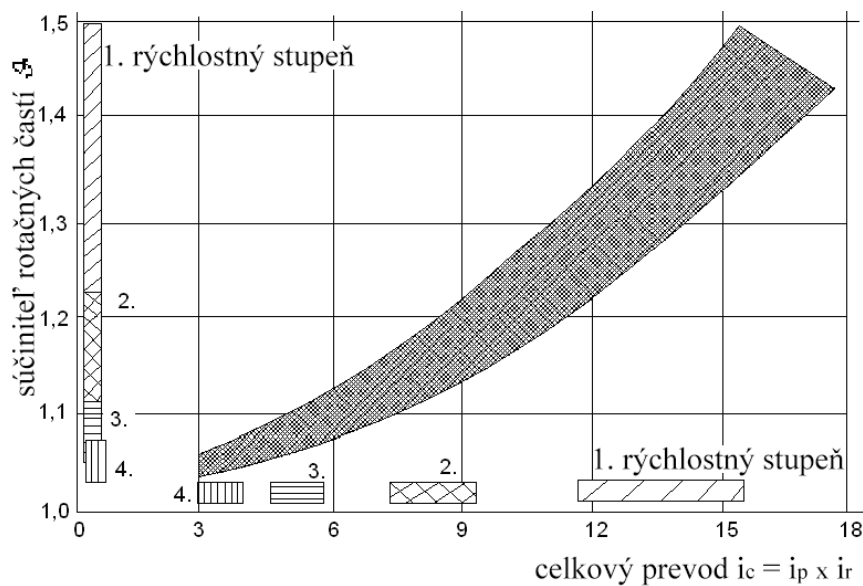
$$M_r = M_{rm} + M_{rp} + M_{rK}, \quad (12)$$

kde  $M_{rm}$  je moment na hnacích kolesách, ktorý je potrebný na zrýchlenie rotujúcich častí motora,  $M_{rp}$  je moment potrebný k zrýchleniu rotujúcich častí prevodového ústrojenstva a  $M_{rK}$  je moment potrebný pre zrýchlenie kolies vozidla. Potom celkový odpor zrýchlenia  $O_z$  je rovný:



$$O_z = \left[ 1 + \frac{(J_m i_c^2 + J_p i_r^2) \eta + \sum J_{Ki}}{m \cdot r_d^2} \right] \cdot m \cdot \ddot{x} = \vartheta \cdot m \cdot \ddot{x}, \quad (13)$$

kde  $J_m$  je hmotnostný moment zotrvačnosti rotujúcich častí motora,  $i_c$  je celkový prevod medzi motorom a hnacími kolesami,  $J_p$  je hmotnostný moment zotrvačnosti rotujúcich častí prevodového ústrojenstva,  $i_r$  je prevod rozvodovky,  $\eta$  je mechanická účinnosť a  $\vartheta$  je súčiniteľ vplyvu rotačných častí. Z rovnice (13) je viditeľné, že súčiniteľ  $\vartheta$  je závislý nielen na konštantných parametroch ako napr. momenty zotrvačnosti, ale aj na parametroch premenných počas jazdy, ako napr. aktuálny prevodový pomer či hmotnosť vozidla. Pri priamom zábere, kedy prevodový pomer je  $i_c=1$ , zväčšujú rotačné časti vozidla potrebnú zrýchľujúcu silu asi o 7%. Pri prvom prevodovom stupni je vplyv oveľa väčší. Pre prvý prevodový stupeň v osobných vozidlách je prevodový pomer približne  $i_c=4$ , kedy zrýchľujúca sila narastá podľa Obr. 2 približne o 70%. [1]



Obr. 7 Vplyv prevodového pomeru na súčiniteľ rotačných častí [1]

## 1.5 ODPOR PRÍVESU

V prípade jazdnej súpravy je dôležité určiť aj odpor prívesu. Jeho aerodynamický odpor sa vždy určuje pre celú jazdnú súpravu (teda automobil s prívesom, prípadne ťahač s návesom). Odpor návesu sa často rieši rôznymi strešnými aerodynamickými nadstavbami na ťahač pre zlepšenie jazdných vlastností a hlavne ekonomickosti prepravy. [1]

## 2 METÓDY MERANIA ODPOROVEJ SILY

Pre určenie odporovej sily (osa x) boli namerané dáta podľa normy WLTP<sup>1</sup> (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures). Tá popisuje metódy, ktoré majú zaručiť celosvetový spôsob popisu emisií, množstva CO<sub>2</sub>, pevných častíc, spotreby paliva, elektrickej energie a dojazdu na elektrický pohon pre vozidlá do 3500 kg v základnej výbave. Taktiež sa zameriava na to, aby tieto hodnoty boli znovu namerateľné a odpovedali hodnotám namerateľným v každodennej prevádzke daných vozidiel. Získanie presných dát zaťaženia nameraných na testovacej trati je zložitý proces, pri ktorom je potrebné rátať s chybou, ktorá sa vytvára aj pri podmienkach s minimálnym vetrom. Pre čo najpresnejšie výsledky je vo výpočtoch zavedená potrebná nasledujúca presnosť merania:

- Rýchlosť testovaného vozidla:  $\pm 0.2$  km/h s frekvenciou merania minimálne 10 Hz;
- Presnosť, precíznosť a rozlíšenie nameraného času: minimálne  $\pm 10$  ms;
- Krútiaci moment kolesa:  $\pm 6$  Nm alebo  $\pm 0.5\%$  z nameraného maxima krútiaceho momentu, podľa toho, ktorá hodnota je väčšia pre celé testované vozidlo a pri meracej frekvencii aspoň 10 Hz;
- Rýchlosť vetra:  $\pm 0.3$  m/s, pri meracej frekvencii aspoň 1 Hz;
- Smer vetra:  $\pm 3^\circ$ , pri meracej frekvencii aspoň 1 Hz;
- Atmosferická teplota:  $\pm 1$  °C, pri meracej frekvencii aspoň 0.1 Hz;
- Atmosferický tlak:  $\pm 0.3$  kPa, pri meracej frekvencii aspoň 0.1 Hz;
- Hmotnosť vozidla nameraná na rovnakom meracom zariadení pred a po teste:  $\pm 10$  kg;
- Tlak pneumatík:  $\pm 5$  kPa;
- Frekvencia otáčania kolesa:  $\pm 0.05$  s<sup>-1</sup> alebo 1%, podľa toho, ktorá hodnota je väčšia.

Namerané dáta s touto presnosťou boli použiteľné aj v spojení s normou ISO 10521-1:2006(E), keďže metódy popísané touto normou sú menej náročné na presnosť, ako norma WLTP, jedine presnosť krútiaceho momentu je väčšia. Hlavné rozdiely vo vyžadovanej presnosti sú:

- Rýchlosť testovaného vozidla:  $\pm 0.5$  km/h, alebo  $\pm 1\%$ , podľa toho čo je väčšie;
- Čas:  $\pm 50$  ms, alebo  $\pm 1\%$ , podľa toho čo je väčšie;
- Krútiaci moment kolesa:  $\pm 3$  Nm, alebo  $\pm 0.5\%$ , podľa toho čo je väčšie;
- Atmosférická teplota:  $\pm 1$  K – zmena v jednotke, nie v presnosti.

Táto norma popisuje meranie a vyhodnocovanie dát pre získanie priemernej odporovej sily z testov vykonaných na ceste, ale aj pre testy vo veternom tuneli, prípadne na dynamometri. Jednotlivé testy je možné vykonať ešte rozdielnymi spôsobmi. Dáta pre túto diplomovú prácu boli namerané prvým spôsobom, konkrétne dojazdovými skúškami vozidla. Táto norma rozlišuje tri rozdielne metódy vyhodnocovania daných testov. Sú to:

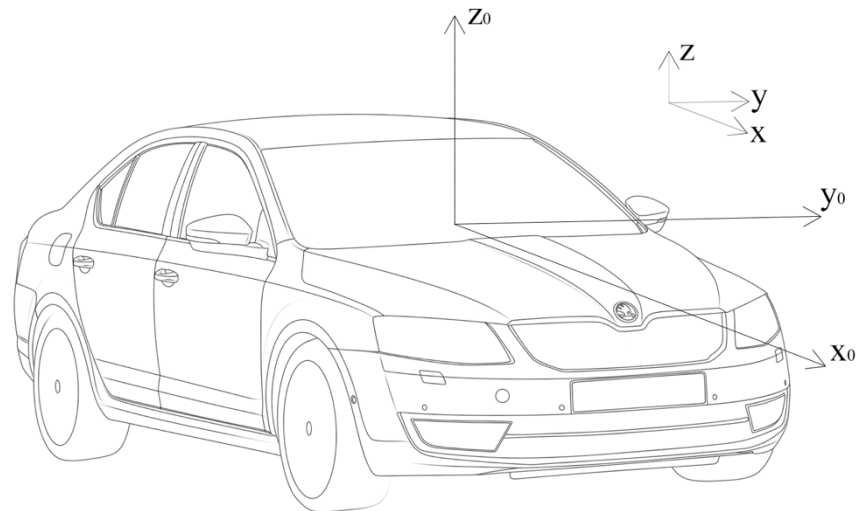
- Multisegmentová metóda stacionárnej anemometrie
- Metóda priemerného spomalenia
- Priama regresná metóda.

Metódy majú rôzne postupy v spracovaní nameraných dát, ale spoločným výstupom je vždy priebeh odporovej sily  $F$  popísanej koeficientami  $f_0$ ,  $f_1$  a  $f_2$ , kde  $f_0$  predstavuje konštantu v jednotkách newton [N],  $f_1$  je koeficient prvého rádu rýchlosti vozidla v jednotkách newton hodina za kilometer [N h/km] a  $f_2$  je koeficient druhého rádu rýchlosti vozidla v jednotkách

---

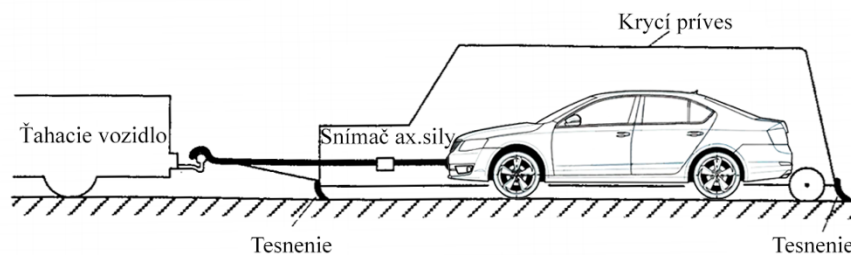
<sup>1</sup> z angl. Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures

newton hodina na druhú za kilometer na druhú  $[N (h/km)^2]$ . Súradnicový systém použitý vo všetkých meraniach a výpočtoch je zobrazený na Obr. 8. [6]



Obr. 8 Súradnicový systém, pôvodný obrázok z [7]

Problém môže byť s odlišením aerodynamického odporu od mechanických strát ako napr. valivý odpor kolies, či trecie straty v hnacom ústrojenstve. Podľa Obr. 5 sa valivý odpor kolies mení s rýchlosťou (určenou pre osobné vozidlá) minimálne a dá sa zistiť z technických listov od výrobcu pneumatiky. Na Obr. 9 je zobrazený spôsob, akým sa dá eliminovať z merania aerodynamický odpor. Vozidlo je ťahané vnútri krycieho privesu, ktorý ho oddeľuje od okolitých poveternostných podmienok. Vnútri je meraná ťahová sila, ktorá je potrebná pre prekonanie valivého odporu kolies a trenia v hnacom ústrojenstve. Jej odčítaním od celkovej odporovej sily sa dá získať samotný aerodynamický odpor. [5], [6]



Obr. 9 Možný spôsob eliminácie aerodynamického odporu pri meraní [5]

## 2.1 MULTISEGMENTOVÁ METÓDA STACIONÁRNEJ ANEMOMETRIE

Táto metóda spočíva v meraní rýchlosti a času pri dojazde vozidla z prvého rýchlostného referenčného bodu až do posledného. Body sa volia tak, aby medzi nimi nebol väčší rozdiel ako 20 km/h a minimálny počet je šesť. Najvyššia referenčná rýchlosť nesmie byť menšia, ako najväčšia rýchlosť rozsahu rýchlostí a zároveň najnižšia referenčná rýchlosť nesmie byť väčšia, ako najmenšia rýchlosť rozsahu sledovaných rýchlostí.

Pred začatím testov sa musí vozidlo zohriať jazdou. Počas tejto fázy nesmie prekročiť najvyššiu referenčnú rýchlosť. Zahrievacia jazda trvá dokiaľ nenastanú stabilné podmienky (asi 30 minút). Samotné jazdy sa vykonávajú v oboch smeroch (tam aj späť označených ako smer *a* a *b*) a pre určitú štatistickú presnosť merania, popísanú normou, je potrebné namerať minimálne tri páry jazd. Počas jazdy je nutné, aby bol zaradený neutrál, motor sa točil voľnobežnými otáčkami, vozidlo nebrzdilo a aby bol minimálny pohyb volantom. Všetky okná, dvere, kapota a kufror majú byť zatvorené, taktiež aj ventilácia a klimatizácia má byť vypnutá. V prípade krátkej trate je možné rozdeliť merania. Ak dôjde k chybe pri meraní, nepočíta sa s dátami z celého nameraného páru, nie len z danej jazdy.

Metóda je založená na priamom výpočte spomalenia podelením zmeny rýchlosti a času, pomocou ktorého je možné vypočítať odporovú silu pôsobiacu na vozidlo pri danej rýchlosti.

$$F = \frac{1}{3.6} \times (m + m_r) \times \frac{2 \times \Delta V}{\Delta t} \quad (14)$$

Následne preložením vektoru týchto odporových síl polynómom druhého stupňa je možné vypočítať koeficienty  $f_0$  a  $f_1$  popisujúce mechanické straty a  $f_2$  aerodynamický odpor.

$$F = f_0 + f_1 \times V + f_2 \times V^2 \quad (15)$$

Spriemerovaním koeficientov pre oba merané smery je možné vypočítať priemernú odporovú silu pôsobiacu na vozidlo. [6]

## 2.2 METÓDA PRIEMERNÉHO SPOMALENIA

Pri metóde prebieha príprava vozidla rovnakým spôsobom ako v multisegmentovej metóde a pracuje sa s rovnakým zvolením referenčných rýchlostných bodov. Taktiež sú povolené rozdelené jazdy, kvôli krátkej testovacej dráhe, preto je možné použiť rovnaké vstupné dáta.

Metóda je založená na výpočte odporovej sily pomocou spomalenia vozidla. Pomocou nameranej rýchlosti spracovanej kubickou regresiou je vypočítané spomalenie jej deriváciou. Druhým Newtonovým zákonom je vypočítaná celková odporová sila, z ktorej sú vypočítané koeficienty  $f_0$ ,  $f_1$  a  $f_2$ . [6]

## 2.3 PRIAMA REGRESNÁ METÓDA

Táto metóda opäť pracuje so vstupnými dátami nameranými a rozdelenými za rovnakých podmienok ako u predošlých metódach. Základom tejto metódy je vyjadrenie rýchlosti ako:

$$V = \frac{\sqrt{4 \times f_0 f_2 - f_1^2}}{2 \times f_2} \tan \left( -\frac{3.6 \times \sqrt{4 \times f_0 f_2 - f_1^2}}{2 \times (m + m_r)} \times t - C_0 \right) - \frac{f_1}{2 \times f_2}, \quad (16)$$

kde  $C_0$  je integračná konštanta. Táto rovnica vznikla z rovnice (15) a druhého Newtonovho zákona uplatneného na tento príklad:

$$F = -\frac{1}{3.6} \times (m + m_r)_0 \times \frac{dV}{dt}. \quad (17)$$

Kvôli zložitosti výpočtov je možné použiť nasledovnú substitúciu:

$$V = A \times \tan(B \times t + C) + D, \quad (18)$$

podľa tejto rovnice sú preložené namerané dáta a jednoduchým výpočtom z rovníc (19), (20) a (21) je možné vypočítať hľadané koeficienty  $f_0$  a  $f_1$  a  $f_2$ , pomocou ktorých s rovnicou (15) je možné vypočítať odporovú silu pre meranú jazdu v danom smere bez počítania diferenciálnej rovnice. Tým sa značne zníži výpočtový čas a obťažnosť.

$$f_0 = -\frac{1}{3.6} \times (m + m_r) \times \frac{B}{A} \times (A^2 + D^2) \quad (19)$$

$$f_1 = \frac{1}{3.6} \times (m + m_r) \times \frac{2 \times B \times D}{A} \quad (20)$$

$$f_2 = -\frac{1}{3.6} \times (m + m_r) \times \frac{B}{A} \quad (21)$$

Spriemerovaním koeficientov oboch smerov vzniknú výsledné koeficienty, s ktorými je možné opäť pomocou rovnice (15) vypočítať výslednú odporovú silu pôsobiacu na vozidlo pri daných rýchlostiach. [6]

## 2.4 METÓDA WLTP

Táto metóda je veľmi podobná multisegmentovej. Je popísaná normou vydanou Spojenými národmi označenou ako ECE/Trans/WP.29/2016/68, ale sú tam však určité odlišnosti v postupe, ktoré sa môžu prejaviť vo výsledkoch. Vozidlo je v tejto metóde rovnako pripravené na meranie ako v predošlých, to isté platí aj pre pravidlá o zaradení neutrálu, minimálnom pohybe volantu a nepoužívaní brzd. Aj rozdelené meracie jazdy sú povolené, ak nie je dráha dostatočne dlhá.

Rozdiel je však v určení rýchlostných referenčných bodov. Tie začínajú na 130 km/h a končia hodnotou 20 km/h. Nie je však predpísané žiadne zhustenie bodov pri rýchlostiach menších ako 60 km/h a tak referenčných bodov je menej – 12. Pre výpočet odporovej sily podľa rovnice (14) je aj zmena rýchlosti  $\Delta V$  pevne predpísaná v norme hodnotou 5 km/h bez zmeny s klesajúcou rýchlosťou.

Pre počítanie časového intervalu  $\Delta t_j$  pre jazdy smerom  $a$  a  $b$  je použitý harmonický priemer namiesto aritmetického, ktorý sa používa v predošlých metódach. Metóda počíta s celkovým priemerným časom, ktorý potrebuje vozidlo na spomalenie z rýchlosti  $V_j$  na rýchlosť  $V_{j+1}$  pre všetkých päť nameraných jazd v oboch smeroch, z ktorého následne vypočíta priemernú odporovú silu. Kvadratickou regresiou je možné získať koeficienty  $f_0$ ,  $f_1$  a  $f_2$  z rovnice (15). Naopak postup pre multisegmentovú metódu je taký, že sa najprv vypočítajú aritmetickým priemerom časy všetkých 5 nameraných jazd v danom smere, z nich sa vypočítajú dve priemerné odporové sily pre smer  $a$  a  $b$ , z nich sa kvadratickou regresiou získajú koeficienty  $f_{0a}$ ,  $f_{1a}$  a  $f_{2a}$  a  $f_{0b}$ ,  $f_{1b}$  a  $f_{2b}$  a až ich spriemerovaním sa dostaneme k výslednej priemernej odporovej sile pre všetkých desať nameraných jazd. [8]

## 2.5 METÓDA PALUBNEJ ANEMOMETRIE

Hlavnou výhodou tejto metódy je možnosť merania pri rýchlosti vetra až do 10 m/s. Oproti predošlým metódam, ktoré rátajú s maximálnou rýchlosťou do 0.3 m/s. Hlavnou výhodou je možnosť testovania vozidla v poveternostných podmienkach, ktoré sú klasické pre danú oblasť,

kde sa vozidlo predáva a zároveň zariadenie potrebné pre meranie nie je drahé a ani zložité. Tým, že sú merané parametre vetra priamo na vozidle, umožňuje presnejšie korekcie pri vyhodnocovaní nameraných dát. Anemometer je vhodné umiestniť pomocou tyčovej konštrukcie dva metre pred stagnačný bod<sup>2</sup> prednej časti vozidla tak, ako je vidno na Obr. 10, alebo na streche vozidla na pozdĺžnej osi vozidla, ak je to možné 30 cm od čelného skla, alebo na kapote motora opäť na strednej osi pripevnený v strede medzi prednou časťou vozidla a začiatku čelného skla. Tým vzniká nevýhoda tejto metódy – mení sa tok vzduchu okolo vozidla, teda aj aerodynamické charakteristiky, hlavne v posledných dvoch možnostiach umiestnenia. Vtedy je potrebné vykonať korigovanie výpočtov testovaním vozidla v aerodynamickom tuneli, čím sa zvyšuje náročnosť merania, vyhodnocovania a hlavne náklady. Pre porovnanie sa meria vozidlo bez a následne s meracím zariadením tak, ako bude pripevnené pri meraní. Vypočítaný rozdiel je nárast hodnoty koeficientu aerodynamického odporu, ktorý sa spolu s čelnou plochou vozidla môže použiť pre korekciu nameraných výsledkov. Výhodou však je možnosť oddeliť mechanický odpor od aerodynamického, čo je vidieť aj v rovnici (22):

$$-\frac{1}{3.6} \times (m + m_r) \times \frac{dv}{dt} = a_{mech} + b_{mech}v + c_{mech}v^2 + \frac{1}{2} \times \rho S v_r^2 \times c_x, \quad (22)$$

kde  $dv/dt$  je akcelerácia zaznamenaná v kilometroch za hodinu za sekundu [(km/h)/s],  $a_{mech}$  je koeficient mechanického odporu v newtonoch [N],  $b_{mech}$  je tiež koeficient mechanického odporu, ale v newtonoch za kilometre za hodinu [N/(km/h)] a  $c_{mech}$  v newtonoch za kilometre za hodinu na druhú [N/(km/h)<sup>2</sup>]. Sú určené analýzou údajov pomocou metódy najmenších štvorcov. Tieto koeficienty predstavujú straty v pneumatikách a v prevode.  $v_r$  je relatívna rýchlosť vetra a  $c_x$  je koeficient aerodynamického odporu:

$$c_x = (a_0 + a_1\theta + a_2\theta^2 + a_3\theta^3 + a_4\theta^4), \quad (23)$$

kde koeficienty  $a_n$  (n=1..4) sú koeficienty aerodynamického odporu v jednotke [°<sup>-n</sup>] ako funkcia uhla vybočenia  $\theta$ , ktorý je medzi pozdĺžnou osou vozidla a relatívnym smerom vetra v stupňoch [°]. Pomocou nich je možné vypočítať aerodynamický odpor  $F_d$ : [6], [8], [9]

$$F_d = \frac{1}{2} \times \rho S v_r^2 \times c_x. \quad (24)$$

<sup>2</sup> bod na povrchu vozidla, kde je rýchlosť prúdenia vzduchu rovná nule



*Obr. 10 Ford Escort 1300L používaný pre meranie odporov s anemometrom a meračmi momentu hnaných kolies [9]*

## 2.6 AERODYNAMICKÝ TUNEL

Na vývoj a testovanie aerodynamických vlastností vozidla sa primárne používa špeciálne zariadenie zvané aerodynamický tunel. Základné rozdelenie ich konštrukcie je na tunely s otvoreným a uzavreným okruhom.

Aerodynamický tunel s otvoreným okruhom je väčšinou lacnejšia varianta, s menšími rozmermi používaný často na meranie zmenšených modelov vozidiel, resp. prototypov. Výhodou je možnosť vpúšťať do tunela dym na viditeľné zobrazenie prúdu vzduchu okolo auta a tiež odvádzať spaliny bez toho, aby sa vracali. Ďalšou výhodou je konštantná teplota v meracej časti tunela počas dlhých meraní pri konštantných vonkajších poveternostných podmienkach. Nevýhodou je ale práve náchylnosť na zmenu vonkajších poveternostných podmienok, šírenie hluku z ventilátora a jeho pohonu do okolia (v prípade umiestnenia tunela vo veľkých budovách tieto nevýhody miznú), či väčšia energetická náročnosť oproti variante s uzavreným okruhom.

Varianta s uzavreným tunelom je drahšia, má väčšie rozmery, a nevýhody má v hromadení dymu (ak je použitý) a zvyšovanie teploty kvôli treniu pri dlhých meraniach. Táto nevýhoda sa rieši tepelnými výmeníkmi.

Tunely majú veľkú výhodu oproti meraniu pri jazdení a to možnosť zmeny vlastností okolitého prostredia vplyvajúceho na vozidlo. No zároveň je tento spôsob merania finančne náročnejší, hlavne ak sa meria vozidlo v mierke 1:1. Často sa testuje iba štvrtinový model, ktorý zároveň ale skresľuje meranie. Testovanie takéhoto zmenšeného modelu je ale aj výhodou, keďže je možné testovať vozidlo už pri vývoji bez funkčného modelu 1:1. Ďalším problémom môže byť nepohyblivá podlaha (pri jazde vozidla je rýchlosť prúdenia voči vozovke nulová, býva to riešené napr. pohyblivým pásom) a steny tunela. Ak je vozidlo obtekané vzduchom medzi dvomi stenami, dochádza k deformácii prúdenia a ak sú steny tunela blízko (v prípade menších rozmerov meracej časti) v medzere medzi vozidlom a stenami sa zvýši rýchlosť prúdenia a zmení sa vztlačová a odporová sila. Preto je lepší tunel s väčšími rozmermi, to ale zvyšuje jeho cenu. Pri správnom zvolení všetkých možností vyjdú výsledky s dostatočnou presnosťou, ktorá je ťažko dosiahnuteľná meraním jazdnými testami. [5]

## 2.7 MERANIE JAZDNÉHO ODPORU METÓDOU MERANIA KRÚTIACEHO MOMENTU

V prípade tejto metódy je postup výpočtov veľmi podobný predošlým, ale podstatou je meranie krútiaceho momentu kolies pri rôznych rýchlostiach v časových intervaloch aspoň päť sekúnd. Podľa normy ISO 10521-1 je potrebné, aby každé hnané koleso bolo osadené snímačom krútiaceho momentu. Sú rôzne varianty meračov, staršie sú pripevnené na skrutky z vonkajšej strany disku ako na Obr. 10. Tie však ovplyvňujú obtekanie vzduchu okolo kolies. Dnešné meracie zariadenia ako na Obr. 11 sú tvarované ako kryt kolesa, čím sa znižuje skresľovanie prúdenia vzduchu v okolí meraného kolesa, ale stále zväčšujú aerodynamický odpor. V tomto smere vhodnejšie sú merače inštalované medzi náboj kolesa a disk.



Obr. 11 Riešenie meracieho zariadenia od firmy Kistler [10]

Okrem krútiaceho momentu, času a hmotnosti vozidla je meraná rýchlosť vozidla a otáčky hnaných kolies z minimálne desiatich jázd v oboch smeroch. Meranie začína s rýchlostným referenčným bodom s najväčšou rýchlosťou (aj v tejto metóde je to 130 km/h) a postupne klesá po 10 km/h až do 20 km/h. Počas merania je opäť potrebný minimálny pohyb volantom a nepoužívanie brzd. Následne je potrebné určiť priemerné rýchlosti  $v_{jm}$  a priemerné krútiace momenty  $C_{jm}$ :

$$v_{jm} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k v_{ji}, \quad (25)$$

kde  $k$  je počet súborov dát a  $v_{ji}$  je rýchlosť vozidla  $i$ -teho súboru dát v referenčnom bode  $j$  v [km/h] a:

$$C_{jm} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k C_{ji} - C_{js}, \quad (26)$$

kde  $C_{ji}$  je krútiaci moment  $i$ -teho súboru dát pre  $j$ -ty referenčný bod v [Nm]. Počas jazdy meracie zariadenie krútiaceho momentu preukazuje určitý drift signálu v čase a tak je potrebné určiť kompenzačný člen  $C_{js}$  pre elimináciu tohto javu:

$$C_{js} = (m_{av} + m_r) \times \alpha_j r_{dj}, \quad (27)$$

kde  $m_{av}$  je hmotnosť vozidla na začiatku merania tesne po zahriatí v [kg],  $\alpha_j$  je priemerné zrýchlenie  $j$ -teho referenčného bodu v [m/s<sup>2</sup>], ktoré sa vypočíta ako:



$$\alpha_j = \frac{1}{3.6} \times \frac{k \sum_{i=1}^k t_i v_{ji} - \sum_{i=1}^k t_i \sum_{i=1}^k v_{ji}}{k \times \sum_{i=1}^k t_i^2 - [\sum_{i=1}^k t_i]^2}, \quad (28)$$

kde  $t_i$  je čas, pri ktorom vozidlo dosiahlo  $i$ -ty referenčný bod a  $r_{dj}$  je dynamický polomer kolesa vypočítaný podľa rovnice:

$$r_{dj} = \frac{1}{3.6} \times \frac{v_{jm}}{2 \times \pi N}, \quad (29)$$

kde  $v_{jm}$  je priemerná rýchlosť vozidla v [km/h] a  $N$  sú otáčky hnaného kolesa v otáčkach za sekundu [ $s^{-1}$ ]. Podelením nameraného krútiaceho momentu kolesa vypočítaným dynamickým polomerom  $r_{dj}$  kolesa sa dá získať sila, ktorá pôsobí priamo na stopu pneumatiky. Ďalej je postup pri vyhodnotení nameraných dát veľmi podobný ako v multisegmentovej metóde stacionárnej anemometrie. Z nameraných rýchlostí a momentov kvadratickou regresiou je možné vypočítať koeficienty pre oba smery  $c_{0a}$ ,  $c_{0b}$ ,  $c_{1a}$ ,  $c_{1b}$ ,  $c_{2a}$  a  $c_{2b}$ .

$$C_a = c_{0a} + c_{1a}v + c_{2a}v^2, \quad (30)$$

$$C_b = c_{0b} + c_{1b}v + c_{2b}v^2, \quad (31)$$

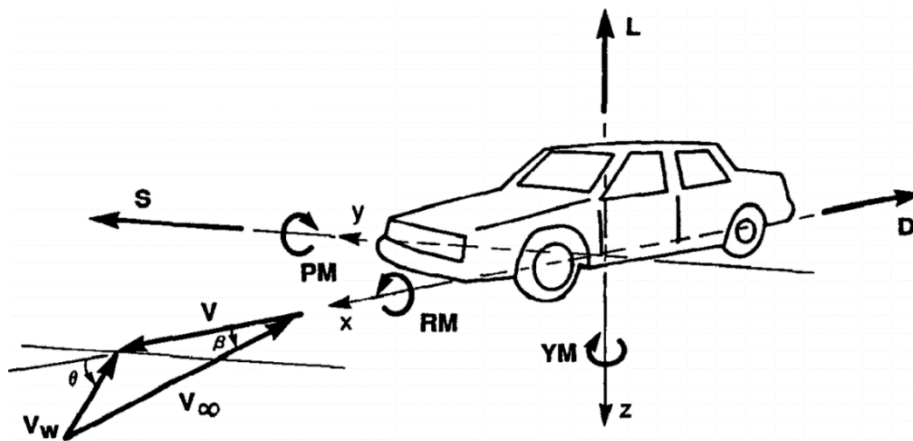
kde  $C_a$  a  $C_b$  sú jazdné odpory v oboch smeroch v [Nm]. Z koeficientov oboch smerov  $c_{0a}$ ,  $c_{0b}$ ,  $c_{1a}$ ,  $c_{1b}$ ,  $c_{2a}$  a  $c_{2b}$  sa následne vypočítajú priemerné koeficienty  $c_0$  [Nm],  $c_1$  [Nm(h/km)] a  $c_2$  [Nm(h/km)<sup>2</sup>] tak, ako v multisegmentovej metóde stacionárnej anemometrie a potom rovnica pre výpočet priemerného celkového jazdného odporu  $C_{avg}$  má tvar:

$$C_{avg} = c_0 + c_1v + c_2v^2. \quad (32)$$

Dá sa predpokladať, že koeficient  $c_1$  je rovný nule, ak hodnota  $c_1v$  nie je väčšia ako 3% z jazdného odporu  $C$  pri danej referenčnej rýchlosti. Potom sú zvyšné koeficienty  $c_0$  a  $c_2$  znova prepočítané pomocou metódy najmenších štvorcov. Výsledkom je opäť závislosť jazdného odporu  $C_{avg}$  na rýchlosti  $v$  zložená z valivého (premenného) a aerodynamického odporu. [6], [8]

### 3 VZTLAKOVÁ SILA

Odporová sila nepôsobí ako jediná na vozidlo v pohybe. Okrem nej sú viditeľné na Obr. 12 vztlaková sila  $L$ , moment klonenia  $PM^3$ , moment stáčania  $YM^4$ , moment klopenia  $RM^5$  a bočná sila vzdušná  $S$ . Tlakový rozdiel od vrchu po spodok vozidla vytvára tlakovú silu. Počas priamej jazdy v bezvetří sa ráta iba s aerodynamickým odporom, vztlakom a momentom klonenia. Celková vztlaková sila je meraná na pozdĺžnej osi vozidla v strede rázvoru kolies v rovine styku kolies s vozovkou, prípadne sa volí počiatok súradnicovej sústavy v osi otáčania predných kolies, prípadne v strede vozidla.



Obr. 12 Zobrazenie smerov všetkých síl a momentov pôsobiacich na vozidlo [4]

Vztlaková sila  $F_L$  je vyjadrená rovnicou:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho S_x v_r^2 c_L, \quad (33)$$

kde  $c_L$  je koeficient vztlaku [-]. Je menší ako súčiniteľ aerodynamického odporu  $c_x$ . Veľkosť závisí od uhla nábehu vzduchu  $\theta_L$ , pri veľkosti  $25^\circ$  je hodnota  $c_L$  väčšia až trikrát než pri nulovom bočnom vetre.

#### 3.1 VPLYV VZTLAKU

Vztlak má vplyv zvyšujúci sa s rýchlosťou na jazdné vlastnosti a stabilitu vozidla. Niekedy sa počíta koeficient vztlaku ako príčina vztlaku a momentu klonenia pre predné a zadné kolesá. Narozdiel od vztlaku moment klonenia neuberá alebo nepridáva záťaž na jednotlivé nápravy, ale mení rozdelenie zaťaženia medzi nimi, čo mení ovládateľnosť vozidla pri zmene smeru. So stúpajúcou rýchlosťou a negatívnym momentom klonenia (predná časť vozidla je zaťažovaná a zadná odľahčovaná) sa zvyšuje pretáčavosť vozidla, čo je nežiadúci efekt. Niektoré vozidlá sú navrhované s ohľadom na maximálne zníženie vztlaku na zadnej náprave aj napriek zvýšeniu odporovej sily. Pri pôsobení vztlaku na vozidlo sú odľahčované jednotlivé kolesá čo spôsobuje zníženie ovládateľnosti vozidla. To je zapríčinené poklesom možnej bočnej sily, ktorú dokáže

<sup>3</sup> z angl. pitching moment

<sup>4</sup> z angl. yaw moment

<sup>5</sup> z angl. rolling moment

pneumatika generovať. Vozidlá s ťažkou prednou časťou využívajú vztlak pre lepšie rozdelenie hmotnosti vozidla pri vysokých rýchlostiach, čím sa zlepšujú jazdné vlastnosti.

### 3.2 MERANIE VZTLAKOVEJ SILY

Hlavnou a najpresnejšou metódou je meranie vztlaku v aerodynamickom tuneli. Okrem toho je možné ho merať aj jazdnými meraniami ako napr. dojazdovou skúškou, alebo metódou running resistance s konštantnými rýchlosťami.

Meranie môže spočívať v sledovaní výšky vozidla. Meraná je poloha tlmičov a výška karosérie, pretože pri odvalovaní kolies dochádza k ich rozťahnutiu a úprave výšky vozidla. Toto zvýšenie polohy karosérie nie je dôsledkom pôsobenia vztlakovej sily. Preto je potrebné z výpočtu túto nepresnosť odstrániť. Toho je docielené odčítaním veľkosti stlačenia tlmiča od výškovej polohy karosérie, prípadne zamedzením pohybu tlmičov. Odčítaním je získaná zmena výšky vozidla zapríčinená vztlakovou silou a po vynásobení tuhosťou tlmičov (ktorá je zistená napr. zaťažovaním vozidla závažiami na váhach) je vypočítaná samotná vztlaková sila pôsobiaca počas jazdy na vozidlo.

Druhá možnosť je meranie sily zaťaženia jednotlivých kolies. Sily môžu byť merané tenzometrami priamo na pružinách, prípadne meracími podložkami pod pružinami, alebo snímačom v horných miskách tlmičov. Tým je eliminovaný vplyv trenia pružiny.

### 3.3 MOŽNOSTI ZLEPŠENIA

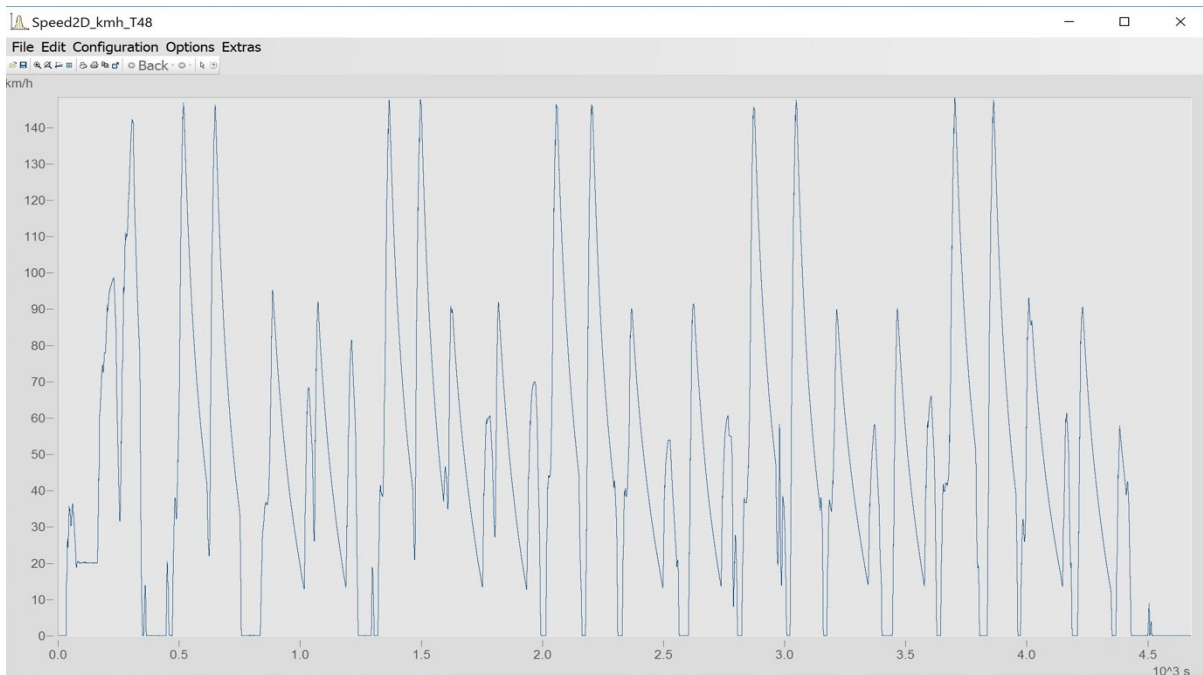
Zníženie vztlakovej sily je možné doceliť vhodne tvarovaným predným nárazníkom, ktorý tvorí predný spojler a predĺži plochu karosérie pod nárazník. Tým síce dôjde k miernemu zväčšeniu aerodynamického odporu, ale aj k výraznejšiemu zníženiu odporu podvozkových častí. Okrem toho sa zníži tlak pod vozidlom, čím dôjde k zníženiu vztlaku na prednej náprave. Zníženie odporu podvozkových častí je možné doceliť aj čo najplochejšie navrhnutým podvozkom bez rôznych vyčnievajúcich častí, resp. ich vhodným krytovaním, s prípadným smerovaním prúdenia vzduchu. Zadný spojler je možné tiež použiť na zníženie vztlaku na zadnej náprave tým, že odkláňa prúd vzduchu smerom hore. Tým sa zvyšuje tlak na zadnej časti vozidla a vytvára sa negatívny vztlak, resp. prítlak.

Vhodným vybavením závodného vozidla aerodynamickými prvkami ako napr. predný či zadný spojler, tvarom podvozku, prípadne pohyblivými časťami či difúzorom je možné vytvoriť negatívny vztlak (prítlak). Prítlak vytvára väčšie zaťaženie pneumatík bez navýšenia hmotnosti vozidla. To umožňuje pneumatikám preniesť väčšie bočné a pozdĺžne sily, čo umožňuje rýchlejšie prejazdy technických častí okruhu. Tieto prvky majú okrem priaznivého vytvorenia prítlaku aj negatívnu vlastnosť. Môžu zväčšovať aerodynamický odpor ale zvýšenie prítlaku má väčší prínos pre takýto typ vozidiel a na prekonanie odporu majú závodné vozidlá dostatok výkonu. Formula 1 vytvárala donedávna 30 % prítlaku predným krídlom, 25 % zadným a až 50 % bolo vytváraných podlahou a difúzorom. Takýmito riešeniami bolo možné vytvoriť prítlak predstavujúci až 3 - 4 násobok váhy vozidla. Od sezóny 2017 sa prítlak ešte viac zväčšil celkovým rozšírením monopostov, pneumatík a krídel. [2], [4], [5]

## 4 POSTUP VÝPOČTOV ODPOROVEJ SILY

Dáta, s ktorými bolo počítané, boli namerané na vozidle Škoda Octavia tretej generácie s dodržaním meracích postupov a presnosti podľa normy WLTP popísaných v kapitole č. 2. Hlavnou úlohou bolo z nameraných dát vypočítať rozdielnymi metódami odporové sily pôsobiace na vozidlo počas dojazdových skúšok. Pre ich výpočet je potrebná okrem rýchlostí a časov jednotlivých jazd aj hmotnosť vozidla  $m$ . Tá bola určená ako priemer hodnôt pred  $m_1$  a po odjazdení skúšok  $m_2$ :

$$m = \frac{m_1 + m_2}{2} = \frac{1399 + 1393}{2} = 1396 \text{ kg.} \quad (34)$$

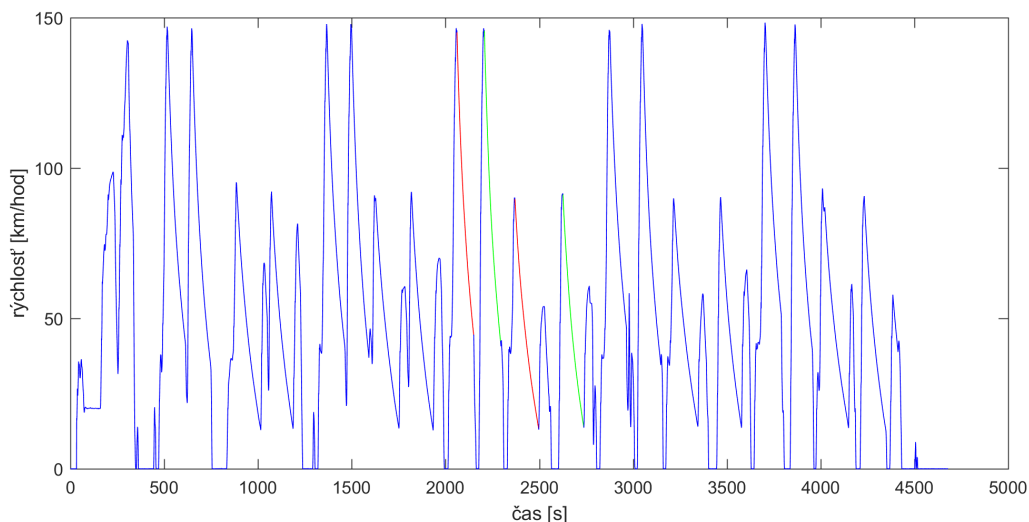


Obr. 13 Grafické zobrazenie celkového priebehu rýchlosti v závislosti na čase v programe imc Famos

### 4.1 SPRACOVANIE DÁT

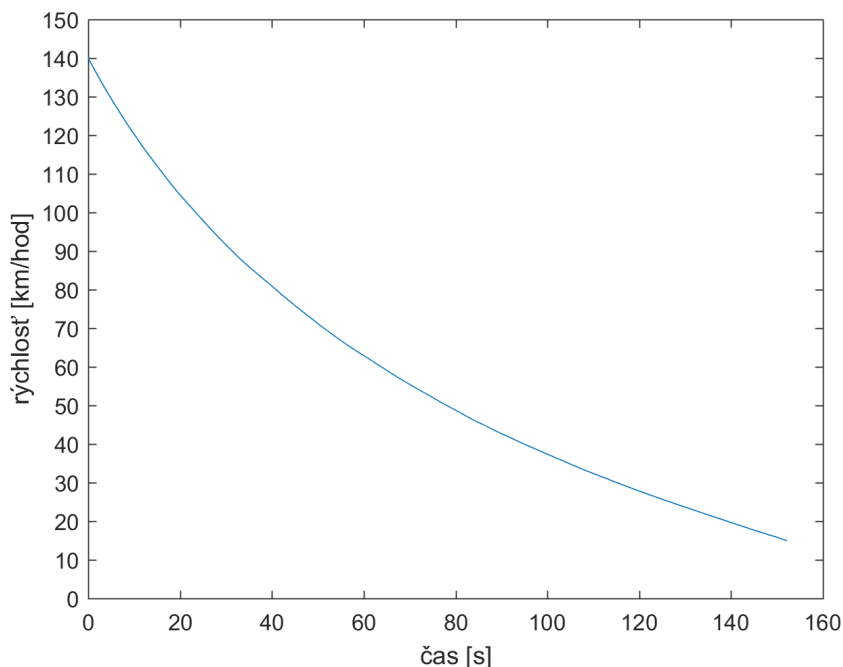
Namerané dáta boli uložené s príponou .raw a zároveň všetky jazdy boli namerané bez prerušenia záznamu. Preto bolo výhodné dáta najprv rozdeliť v programe imc Famos na jednotlivé jazdy. Keďže testovacia dráha nebola dostatočne dlhá a boli dodržané rovnaké podmienky pre obe časti jazd, meranie prebehlo formou rozdelených jazd, ktoré bolo potreba následne po rozdelení všetkých jazd spojiť. Spôsob spájania a priebeh nameranej rýchlosti na čase je vidieť na Obr. 14. Červenou farbou je zvýraznená tretia jazda smerom  $a$  a červenou farbou je vykreslená tretia jazda smerom  $b$ . Najprv bola odjazdená trasa pre oba smery s počiatočnou rýchlosťou väčšou ako prvý referenčný bod (130km/h), následne zvyšný úsek ukončený rýchlosťou menšou, ako posledný referenčný bod (20km/h).

Pre ľahšiu orientáciu vo výpočtoch bol s pripravenými dátami vytvorený kontrolný výpočet odporových síl podľa normy ISO 10521-1:2006(E) v programe PTC Mathcad, ktorý je priložený k diplomovej práci. Po prekontrolovaní postupov boli výpočty presunuté do programu Matlab.



Obr. 14 Zobrazenie závislosti rýchlosti na čase v programe Matlab a zvýraznenie rozdelených jazd

Dáta boli uložené v prehľadných maticiach vo formáte .mat. Označenie bolo zvolené nasledovne: rýchlosť Speed1\_01 predstavuje rýchlosť pre prvú jazdu v jednom smere *a*, zatiaľ čo Speed1\_02 je znova prvá jazda, ale smerom *b*, teda naspäť. Rýchlosť pre druhú jazdu smerom späť je označená ako Speed2\_02 atď. Táto forma označenia platí aj pre ostatné veličiny. Príklad správne spojenej jazdy rýchlosti v závislosti na čase je zobrazený na Obr. 15. [6]



Obr. 15 Grafické zobrazenie závislosti rýchlosti na čase tretej jazdy smerom *a*

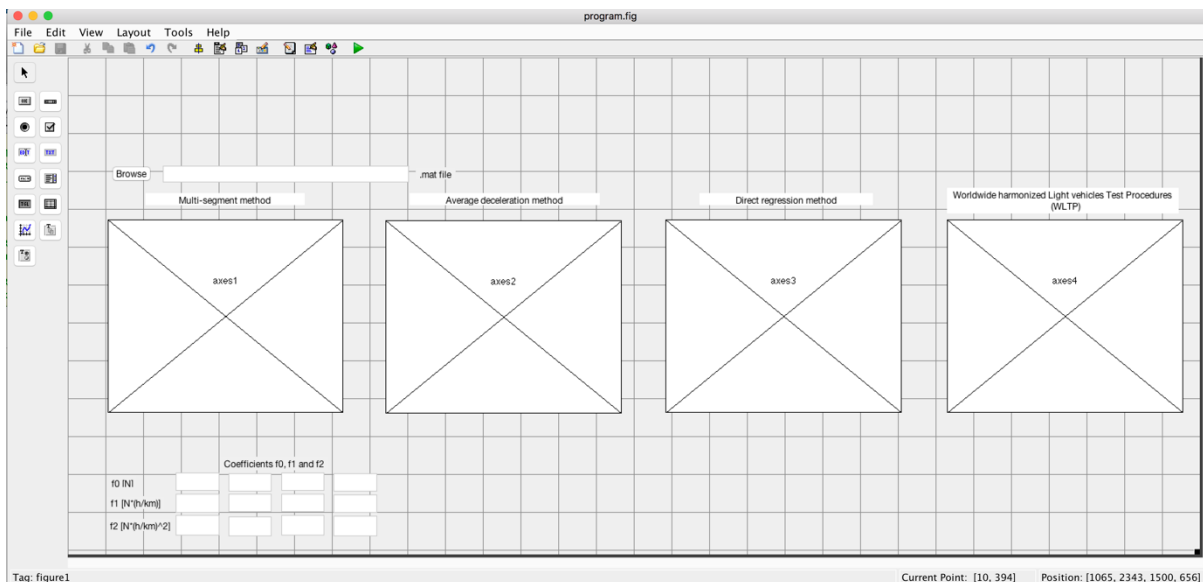
## 4.2 NÁVRH GUI

Po vypočítaní hľadaných síl programom PTC Mathcad bolo možné pokračovať navrhovaním grafického rozhrania programu v Matlab GUI. Výpočtový program sa volá podľa anglického prekladu dojazdových skúšok – Coastdown Test.

V programe bolo zvolené jednoduché ovládanie pomocou jediného tlačidla pre otvorenie dialógového okna na výber vstupných dát s príponou `.mat`. Od začiatku návrhu programu bolo myslené na to, aby nefungoval iba pre dáta z merania vykonaného pre diplomovú prácu, ale aby počítal aj so všeobecnými nameranými dátami potrebnými pre výpočet priebehu odporovej sily podľa noriem ISO 10521-1:2006(E) a WLTP. Pre správne fungovanie programu bolo zvolené nasledovné pomenovanie matíc s nameranými dátami:

- Hmotnosť v kilogramoch je zadaná v matici  $1 \times 1$  s názvom  $m$
- Rýchlosti sú uložené v stĺpcovej matici  $s \times 1$ , kde  $s$  je počet nameraných hodnôt a matica pre prvú jazdu prvým smerom sa volá  $Speed1\_01$ . Systém označenia ďalších matíc platí z podkapitoly č. 4.1
- Časy sú uložené v stĺpcovej matici  $t \times 1$ , kde  $t$  je počet nameraných hodnôt a matica pre prvú jazdu prvým smerom sa volá  $Time1\_01$ . Opäť platí systém označovania z podkapitoly č. 4.1

Program počíta s piatimi párami jazd. Na Obr. 16 je vidieť návrh rozloženia okien v programe Matlab GUI, okrem štyroch okien s grafickým zobrazením priebehov priemernej vztlakovej sily  $F_{avg}$  na rýchlosti  $V_j$  program zobrazí aj vypočítané konštanty  $f_0$ ,  $f_1$  a  $f_2$  pre metódy Multi-segment, Average deceleration, Direct regression a WLTP.



Obr. 16 Návrh grafického rozhrania programu Coastdown Test

Veľkosť okna programu je možné nastaviť pomocou myši zaužívaným spôsobom v operačnom systéme Windows zvolením možnosti *Other (Use SizeChangedFcn)* v nastaveniach GUI. To však neeliminuje rozdielne proporčné zobrazenie okna programu na obrazovkách s rozdielnou veľkosťou či rozlíšením. Pre správne zobrazenie veľkosti okna programu bolo potrebné pridať nasledujúce príkazové riadky do funkcie `program_OpeningFcn`, predtým však

bolo potrebné v každom pridanom objekte nachádzajúcom sa v programe nastaviť po pravom kliknutí myši v *property inspector* jednotku rozmeru z bodov na pixely:

```

set(hObject, 'Units', 'pixels');
figureSize = get(hObject, 'Position');
handles.GUIfigureSize = figureSize(3:4);
screenSize = get(0, 'ScreenSize');
xpos = ceil((screenSize(3)-figureSize(3))/2);
ypos = ceil((screenSize(4)-figureSize(4))/2);
set(hObject, 'Position', [xpos, ypos, figureSize(3:4)]);

fNames = fieldnames(handles);
for i=2:length(fNames)
    field = handles.(fNames{i});
    try field.Units;
        if ~strcmp(field.Units, 'pixels')
            fprintf('warning-Units: expected 'pixels' in
tag=%s\n', field.Tag);
        end
        field.Units = 'normalized';
    catch
    end
    try field.FontUnits;
        field.FontUnits = 'points';
        if strcmp(field.Type, 'uitable')
        else
            field.UserData.GUIfontSize = field.FontSize;
        end
    catch
    end
end
set(hObject, 'Units', 'pixels');

```

Pri zmene veľkosti okna, či obrazovky je potrebné dodržať čitateľnosť textu. To zabezpečí nasledujúci kód pridaný do funkcie *figure1\_SizeChangedFcn*, ktorá bola predtým zvolená v dialógovom okne nastavení GUI.

```

try
    fNames = fieldnames(handles);
    d1 =
handles.(fNames{1}).Position(3)/handles.GUIfigureSize(1);
    d2 =
handles.(fNames{1}).Position(4)/handles.GUIfigureSize(2);
    pixelFactor = min(d1, d2);
    for i=1:length(fNames)
        field = handles.(fNames{i});
        try field.FontSize;
            if strcmp(field.Type, 'uitable')
            else

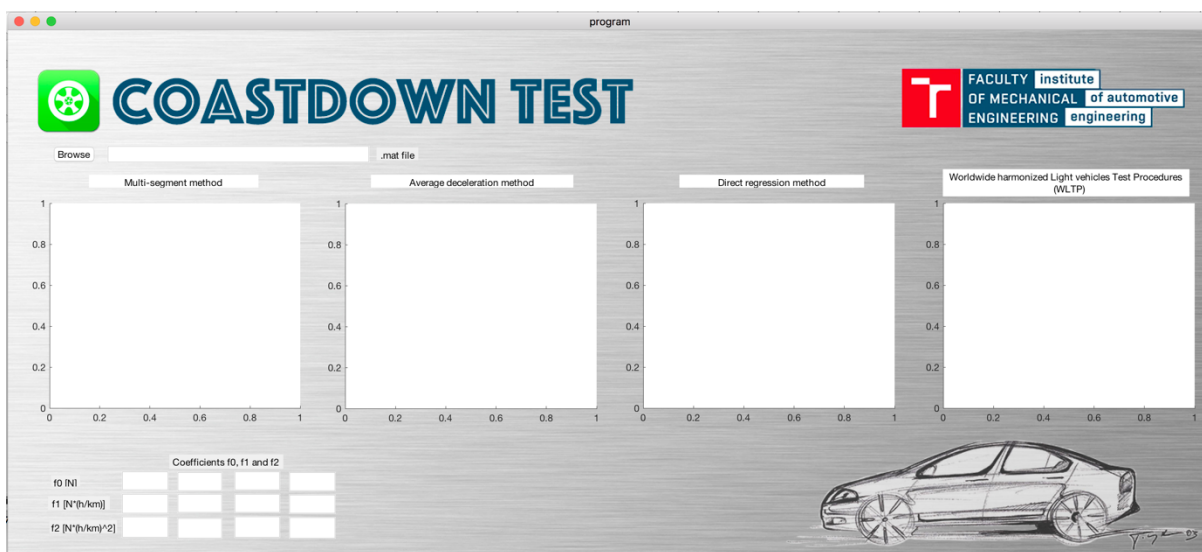
```

```

set(field, 'FontSize', pixelfactor*field.UserDat
a.GUIfontsize);
    end
    catch
    end
end
catch
end

```

Pre spríjemnenie užívateľského prostredia sa po spustení programu zobrazí pozadie s motívom nehrdzavejúcej ocele doplnené o logo VUT, ikonu programu vlastného návrhu a náčrt vozidla Škoda Octavia II. [11],[12]



Obr. 17 Grafické rozhranie po spustení programu

### 4.3 VÝPOČTY ODPOROVEJ SILY MULTISEGMENTOVOU METÓDOU

Nasledovné metódy používajú pre výpočet odporovej sily nameranú rýchlosť v čase od  $V_j + \Delta V$  do  $V_j - \Delta V$ , kde  $\Delta V$  je maximálne 20 km/h, ale presnejšie výsledky je odporúčané použiť 10 km/h pre rýchlostné body  $V_j$  väčšie ako 60 km/h a 5 km/h pre body  $V_j$  menšie ako 60 km/h. V tomto prípade teda pracuje program s rýchlosťami od 140 do 15 km/h. Takto vzniká 16 referenčných bodov s rýchlosťami (130, 120, 110, 100, 90, 80, 70, 60, 55, 50, 45, 40, 35, 30, 25 a 20 km/h) Pre vytvorenie presných časových intervalov  $\Delta T_{jai}$  a  $\Delta T_{jbi}$ , ktoré vyjadrujú čas medzi jednotlivými rýchlostnými referenčnými bodmi, bola použitá interpolácia, aby nevznikla situácia, že nebude možné pre program nájsť v nameraných dátach napr. presnú rýchlosť 130.00 km/h. Pre určenie napr.  $\Delta T_{1a2}$ , čo predstavuje interval prvej jazdy smerom  $a$  medzi rýchlosťami 130 a 110 km/h pre určenie odporovej sily, ktorá pôsobí na vozidlo pri druhom referenčnom bode o rýchlosti 120 km/h, bol použitý nasledovný príkaz:

```

T_1=interp1 (Speed1_01_F,Time1_01,130);
T_2=interp1 (Speed1_01_F,Time1_01,110);
delta_T_1a2=T_2-T_1;

```



Týmto spôsobom sú vypočítané v programe intervaly  $\Delta T_{jai}$  a  $\Delta T_{jbi}$  pre všetky referenčné body, jazdy a smery. Následne boli vypočítané priemerné hodnoty  $\Delta T_{ja}$  a  $\Delta T_{jb}$  podľa rovnice (35) a (36).

$$\Delta T_{ja} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta T_{jai} \quad (35)$$

$$\Delta T_{jb} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta T_{jbi}, \quad (36)$$

kde  $n$  je počet párov jász. Program počíta podľa normy s nameranými piatimi párami. S týmito hodnotami potom pre celkový odpor pre daný rýchlostný bod a smer jazdy platí:

$$F_{ja} = -\frac{1}{3.6} \times (m + m_r) \times \frac{2 \times \Delta V}{\Delta T_{ja}} \quad (37)$$

$$F_{jb} = -\frac{1}{3.6} \times (m + m_r) \times \frac{2 \times \Delta V}{\Delta T_{jb}}, \quad (38)$$

kde  $m$  je hmotnosť vozidla vrátane vodiča a meracích zariadení v kilogramoch [kg],  $m_r$  je hmotnosť kolies a častí rotujúcich s kolesami počas dojazdovej skúšky (program počíta s hodnotou 3 % z hmotnosti  $m$ ) v [kg].

Následne sú z vypočítaných hodnôt vytvorené vektory  $F_a$  a  $F_b$  z ktorých je možné určiť koeficienty  $f_0, f_1$  a  $f_2$  pre dané smery jász preložením polynómom druhého stupňa:

$$F_a = f_{0a} + f_{1a} \times V + f_{2a} \times V^2 \quad (39)$$

$$F_b = f_{0b} + f_{1b} \times V + f_{2b} \times V^2. \quad (40)$$

V programe je výpočet týchto koeficientov pre smer  $a$  (obdobne je riešený smer  $b$ ) riešený nasledovne:

```
A = [ones(length(V_j36),1), V_j36(:), V_j36(:).^2];
b = F_a(:);
f = A\b;
f0_a = f(1);
f1_a = f(2);
f2_a = f(3);
```

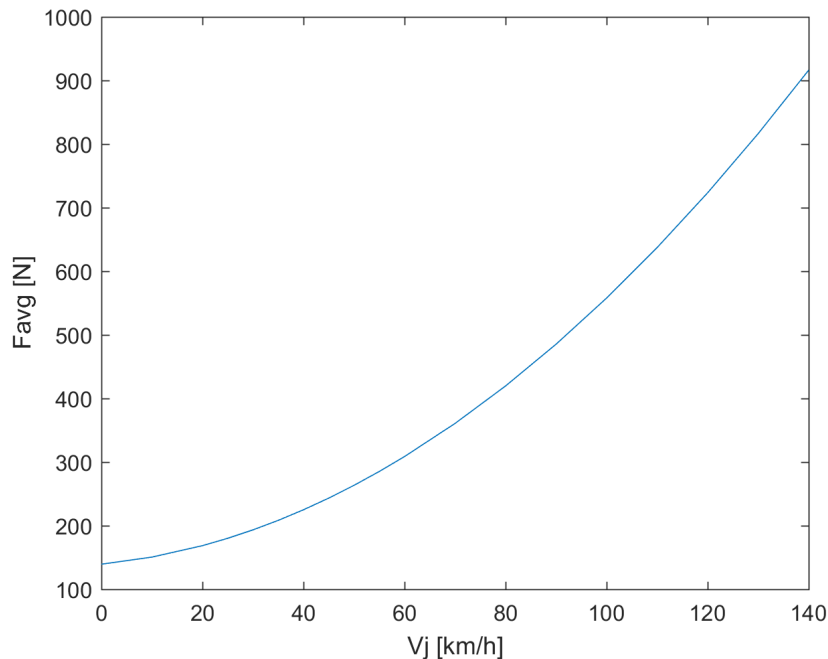
Potom celkové koeficienty  $f_0, f_1$  a  $f_2$  sú vypočítané ako priemer z  $a$  a  $b$  smerov:

$$f_0 = \frac{f_{0a} + f_{0b}}{2} = 139.5214 \text{ N}, \quad (41)$$

$$f_1 = \frac{f_{1a} + f_{1b}}{2} = 2.7933 \frac{\text{N} \cdot \text{h}}{\text{km}}, \quad (42)$$

$$f_2 = \frac{f_{2a} + f_{2b}}{2} = 0.4418 \frac{N \cdot h^2}{km^2}. \quad (43)$$

Tie sú následne vykreslené do tabuľky programu viditeľnej napr. na Obr. 17. Potom je vypočítaná priemerná výsledná odporová sila pre rýchlosti od 140 km/h až po úplné zastavenie vozidla pomocou rovnice (15) s tým, že  $f_0$  a  $f_1V$  predstavuje mechanické straty a  $f_2V^2$  je aerodynamický odpor. Nárast odporovej sily v závislosti na rýchlosti je následne pre užívateľa zakreslený do príslušného okna v programe a zároveň viditeľný na Obr. 18. [6]



Obr. 18 Zobrazenie závislosti priemernej odporovej sily na rýchlosti vypočítanej pomocou multisegmentovej metódy

#### 4.4 VÝPOČET ODPOROVEJ SILY METÓDOU PRIEMERNÉHO SPOMALENIA

Vozidlo je pripravené na meranie takisto ako v predošlej metóde. To isté platí pre výber rýchlostných referenčných bodov a spôsob merania, preto mohli byť namerané dáta použité aj pre túto metódu.

Prvým krokom vo výpočte bolo preloženie rýchlosti v závislosti na čase kubickou regresiou pomocou funkcie v matlabe *lsqcurvefit* (@f2):

$$V_a(t) = A_{0a} + A_{1a} \times t + A_{2a} \times t^2 + A_{3a} \times t^3 \quad (44)$$

$$V_b(t) = A_{0b} + A_{1b} \times t + A_{2b} \times t^2 + A_{3b} \times t^3 \quad (45)$$

```
y=Speed1_01./3.6; %from kph to mps
y=transpose(y);
x=Time1_01;
x=transpose(x);
constant = lsqcurvefit(@f2, [0;0;0;0], x, y);
```

kde funkcia  $f_2$  je:

```
function y = f2(constant,x)
```

```
y = constant(1) + constant(2).*x+constant(3).*x.*x +
constant(4).*x.*x.*x;
end
```

Tým sú vypočítané koeficienty polynómu  $A_0, A_1, A_2$  a  $A_3$ . Ďalej interpoláciou sú vypočítané časové intervaly medzi jednotlivými referenčnými bodmi potrebnými pre dosadenie do derivovaného polynómu podľa rovníc (44) a (45). Tými program počíta spomalenia pre každý referenčný bod jednotlivých jazd.

$$\gamma_j = \frac{1}{3.6} \times (A_1 + 2 \times A_2 \times t_j + 3 \times A_3 \times t_j^2), \quad (46)$$

kde  $t_j$  je čas, pri ktorom sa vozidlo pohybuje rýchlosťou  $V_j$ , resp. jedným z rýchlostných bodov. Ďalším krokom je výpočet priemerného spomalenia pre daný rýchlostný bod pomocou aritmetického priemeru každej nameranej jazdy:

$$\Gamma_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Gamma_{ji}, \quad (47)$$

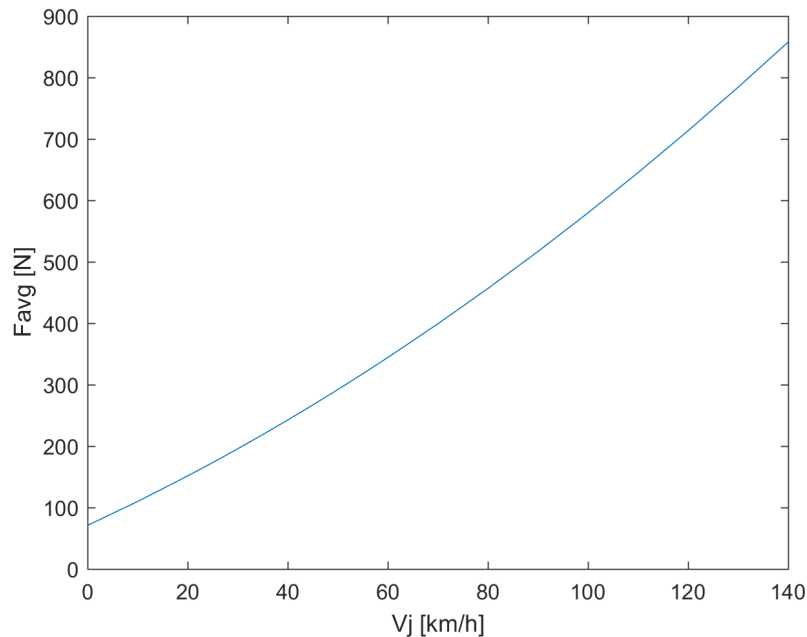
kde priemerné spomalenie  $\Gamma_{ji}$  je rovné priemernej hodnote spomalení  $\gamma_{jai}$  a  $\gamma_{jbi}$  pre danú dvojicu jazd.

$$\Gamma_{ji} = \frac{1}{2} \times (\gamma_{jai} + \gamma_{jbi}) \quad (48)$$

Priemerným spomalením je následne vypočítaná výsledná odporová sila pre daný rýchlostný bod pomocou druhého Newtonovho zákona:

$$F_j = (m + m_r) \times \Gamma_j \quad (49)$$

Koeficienty  $f_0, f_1$  a  $f_2$  sú programom vypočítané z rovnice (15) a vyšli nasledovne:  $f_0 = 70.933 \text{ N}$ ,  $f_1 = 13.521 \text{ N} \cdot (\text{h}/\text{km})$  a  $f_2 = 0.173 \text{ N} \cdot (\text{h}^2/\text{km}^2)$ . Tieto hodnoty sa výrazne odlišujú od hodnôt vypočítaných multisegmentovou metódou, hlavne v pomere mechanických strát a aerodynamického odporu. Táto metóda je najjednoduchšia na výpočet a zároveň najrýchlejšia, čo je jeden z dôvodov, prečo sa často používa v praxi. Na druhú stranu metóda je od začiatku nefyzikálna, rýchlosť sa prekladá polynómom tretieho stupňa a následne je derivovaná. Odlišnosť výsledkov je viditeľná pri záverečnom porovnaní. [6]



Obr. 19 Zobrazenie závislosti priemernej odporovej sily na rýchlosti vypočítanej pomocou metódy priemerného zrýchlenia pri dodržaní postupu z normy ISO 10521-1:2006(E)

#### 4.5 VÝPOČET ODPOROVEJ SILY UPRAVENOU METÓDOU PRIEMERNÉHO SPOMALENIA

Nakoľko výsledky predošlej metódy vyšli nereálne, bola navrhnutá zmena pre spresnenie danej metódy. Pôvodná metóda je od začiatku nefyzikálna, namerané rýchlosti (km/h, resp. m/s) sa prekladajú polynómom tretieho stupňa ( $t^3$  resp.  $s^3$ ). Takto preložené dáta sa následne derivujú. Preloženie polynómom tretieho stupňa je po väčšine priebehu dostatočné, ale začiatok a koniec je nepresný. Tento nedostatok sa zvýrazní pri nasledovnej derivácii nameranej rýchlosti, potrebnej pre získanie spomalenia.

Navrhnutý alternatívny postup je síce zložitejší, ale mal by byť v konečnom dôsledku presnejší. Dáta sú preložené polynómom štvrtého (namiesto pôvodne tretieho) stupňa pomocou upravenej funkcie *lsqcurvefit* (@f2) v Matlabe, čím sa mierne spresní preloženie dát a štatistická hodnota presnosti preloženia R-square sa dostane z 0.997 na hodnotu 1.

```
function y = f2(constant,x)
```

```
y = constant(1) + constant(2).*x + constant(3).*x.*x +
constant(4).*x.*x.*x + constant(5).*x.*x.*x.*x;
end
```

Následne sú polynómy zderivované a ako v pôvodnej metóde, aj v upravenej nasleduje výpočet časových intervalov interpoláciou. Tie sú dosadené do jedenkrát zderivovaného polynómu pre každú jazdu a smer. Tak sú vytvorené vektory časov a spomalení, ktoré sú následne preložené polynómom druhého stupňa cez funkciu *lsqcurvefit* (@f3) v Matlabe:

```

y=gama1_01;
y=transpose(y);
x=timetime1_01;
x=transpose(x);
constant = lsqcurvefit(@f3, [0;0;0], x, y);

a0a1=constant(1);
a1a1=constant(2);
a2a1=constant(3);,

```

kde funkcia  $f_3$  je definovaná ako:

```

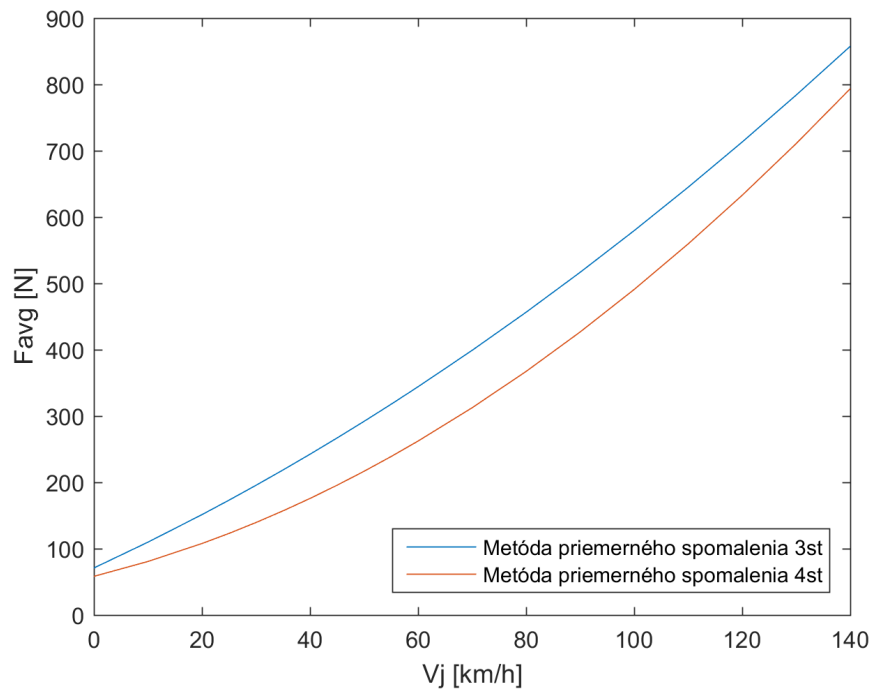
function y = f3(constant,x)

y = constant(1)+constant(2).*x+constant(3).*x.*x;
end

```

Preložením boli vypočítané koeficienty polynómu  $a_0$ ,  $a_1$  a  $a_2$  označené v príkazoch programu ako  $a0a1$ ,  $a1a1$ ,  $a2a1$  atď. pre všetky jazdy a smery. Z nich sú vyjadrené spomalenia znova pre všetky jazdy, tie sú spriemerované, čoho výsledkom je priemerné spomalenie vozidla. Ním je možné vypočítať cez druhý Newtonov zákon priemernú odporovú silu pôsobiacu na vozidlo, v tomto sa už postup zhoduje s pôvodnou metódou. Vypočítaná odporová sila je preložená polynómom druhého stupňa, čím sa vypočítajú koeficienty  $f_0$ ,  $f_1$  a  $f_2$ . Nimi sa vypočíta celková priemerná odporová sila pre rýchlosti od 140 po 0 km/h. Pre porovnanie je opäť vykreslený priebeh odporovej sily na čase a koeficienty  $f_0$ ,  $f_1$  a  $f_2$  do príslušných okien v navrhnutom upravenom programe, ktorý je uložený v adresári *Program s upravenou metódou* a obsahuje všetky metódy rovnaké ako originálny program až na túto upravenú metódu priemerného spomalenia.

Koeficienty  $f_0$ ,  $f_1$  a  $f_2$  vyšli nasledovne:  $f_0 = 58.300$  N,  $f_1 = 7.239$  N·(h/km) a  $f_2 = 0.300$  N·(h<sup>2</sup>/km<sup>2</sup>). Aj napriek zásadnej zmene v postupe metódy sú koeficienty odlišné od ostatných metód. Znížil sa však podiel mechanických strát tvorených koeficientami  $f_0$  a  $f_1$  a naopak zvýšil sa podiel aerodynamických síl, čo by sa malo prejaviť miernym priblížením koeficientu aerodynamického odporu k hodnotám vypočítaných z ostatných metód. Na Obr. 20 je vidieť, rozdielnosť priebehov odporových síl vypočítaných oboma prístupmi a taktiež ich výrazne rozdielne maximálne hodnoty. [6]



Obr. 20 Vzájomné porovnanie pôvodnej (3st) a pozmenenej metódy (4st)

#### 4.6 VÝPOČET ODPOROVEJ SILY PRIAMOU REGRESNOU METÓDOU

Táto metóda počíta s dátami podelenými v multisegmentovej metóde. Z nich pomocou príkazového riadku vypočíta koeficienty A, B, C a D cez funkciu *sseval*, ktorá počíta so sumou štvorcov chýb s pomocou vo forme počiatkových podmienok získaných z aplikácie Curve Fitting Toolbox, ktorý je súčasťou Matlabu. V prípade, že nesedia namerané dáta, je možné cez túto aplikáciu vypočítať nové počiatkové podmienky, s ktorými bude program fungovať správne.

```

tdata=Time3_01;
ydata=Speed3_01./3.6;
fun = @(x)sseval(x,tdata,ydata);
x0 = [17.397,-0.005849,1.1158,-2.66/3.6] %počiatkové podmienky
bestx = fminsearch(fun,x0);

```

```

A = bestx(1);
B = bestx(2);
C = bestx(3);
D = bestx(4);

```

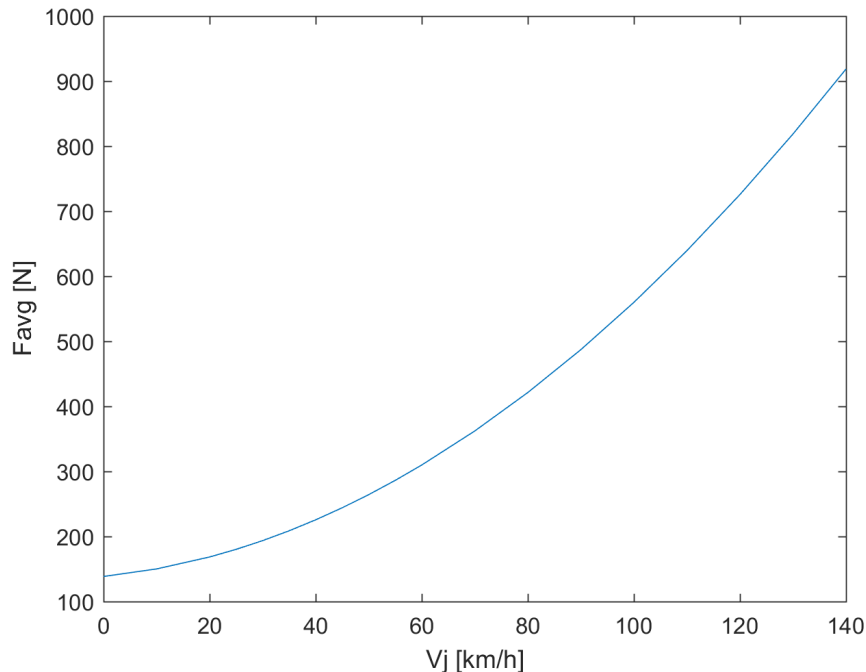
S nasledujúcimi príkazovými riadkami pomocou vypočítaných hodnôt A, B, C a D je možné vypočítať koeficienty  $f_0$ ,  $f_1$  a  $f_2$  pre každú jazdu.

```

f0_31=-(m+0.03*m)*(B/A)*(A*A+D*D);
f1_31=(m+0.03*m)*(2*B*D/A);
f2_31=-(m+0.03*m)*B/A;

```

Výpočet celkových koeficientov  $f_0$ ,  $f_1$  a  $f_2$  je rovnaký ako v multisegmentovej metóde a tak pomocou rovníc (41), (42) a (43) sú vypočítané výsledné priemerné hodnoty, v tomto prípade  $f_0 = 138.582 \text{ N}$ ,  $f_1 = 2.948 \text{ N} \cdot (\text{h}/\text{km})$  a  $f_2 = 0.440 \text{ N} \cdot (\text{h}^2/\text{km}^2)$ , ktoré sa veľmi podobajú práve hodnotám vypočítaných v multisegmentovej metóde. Koeficienty sú následne vypísané do tabuľky programu a rovnicou (15) je vypočítaná celková priemerná odporová sila  $F_{avg}$ . Tá je následne vykreslená v závislosti na rýchlosti do príslušného okna programu. [6]



Obr. 21 Zobrazenie závislosti priemernej odporovej sily na rýchlosti vypočítanej pomocou metódy priamej regresie

#### 4.7 VÝPOČET ODPOROVEJ SILY METÓDOU WLTP

Ako je popísané v kapitole 2.4, dáta boli namerané touto metódou a sú použiteľné s ostatnými, no táto metóda vyžaduje rozdielne rozdelenie rýchlostných intervalov, resp. hodnota  $\Delta V$  je rovná 5 km/h pre všetky rýchlosti, čím vzniká aj menej referenčných bodov. Toto rozdelenie počítané interpoláciou ako v predošlých metódach. Príkazové riadky pre určenie prvej hodnoty  $\Delta t_{1a}$  v programe vyzerá nasledovne:

```
T_1=interp1(Speed1_01_F,Time1_01,135);
T_2=interp1(Speed1_01_F,Time1_01,125);
delta_t1a1=T_2-T_1;
```

Potom sú vypočítané časy  $\Delta t_{ja}$  a  $\Delta t_{jb}$  pre oba smery pomocou harmonického priemeru:

$$\Delta t_{ja} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\Delta t_{j(a)i}}}, \quad (50)$$

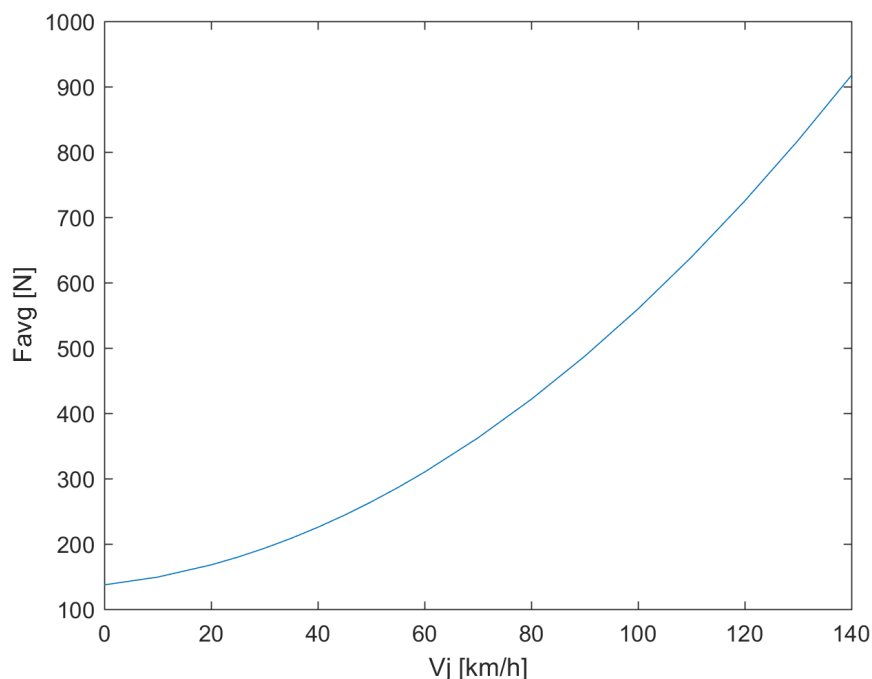
obdobne je vypočítaný aj čas  $\Delta t_{jb}$ , z nich je následne vypočítaný pre každý referenčný bod  $j$  čas  $\Delta t_j$ :

$$\Delta t_j = \frac{2}{\left(\frac{1}{\Delta t_{ja}}\right) + \left(\frac{1}{\Delta t_{jb}}\right)} \quad (51)$$

Výslednú priemernú odporovú silu je možné vypočítať pomocou rovnice:

$$F_j = \frac{1}{3.6} \times (m_{av} + m_r) \times \frac{2 \times \Delta V}{\Delta t_j} \quad (52)$$

Po preložení vypočítanej sily polynómom druhého stupňa sú koeficienty  $f_0$ ,  $f_1$  a  $f_2$  určené rovnakými príkazmi ako v multisegmentovej metóde. Z nich je možné vypočítať opäť priebeh odporovej sily pre rýchlosti od 0 po 140 km/h. Koeficienty aj spolu so závislosťou sú vykreslené v programe pre porovnanie s ostatnými metódami. Touto metódou boli vypočítané hodnoty  $f_0 = 137.285$  N,  $f_1 = 3.082$  N·(h/km) a  $f_2 = 0.436$  N·(h<sup>2</sup>/km<sup>2</sup>), ktoré sú znova veľmi podobné multisegmentovej metóde a metóde priamej regresie. Aerodynamická zložka odporu vyšla najmenšia v porovnaní s predošlými metódami. [8]

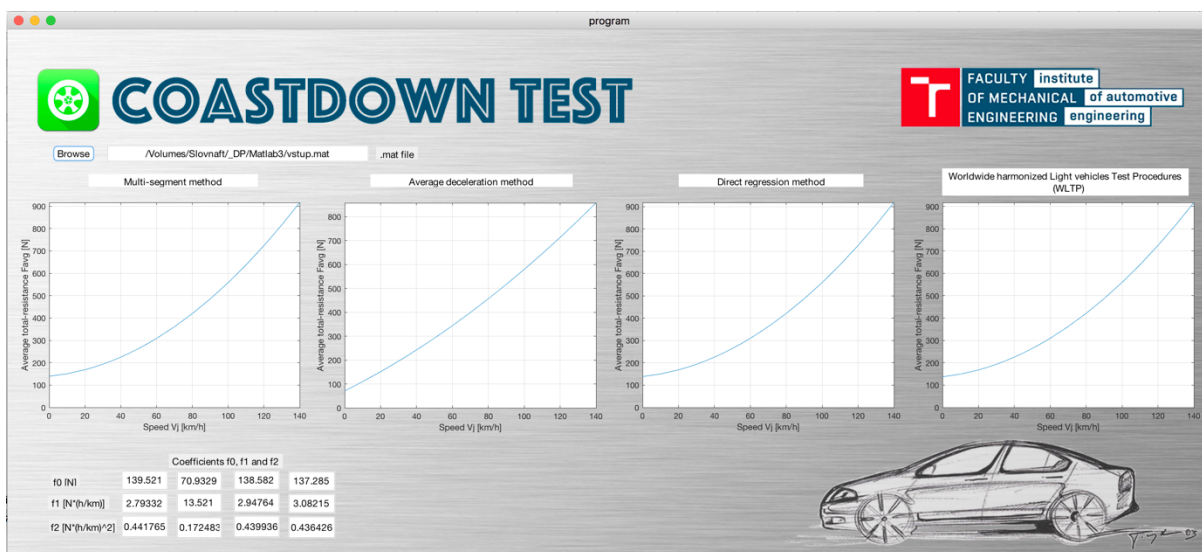


Obr. 22 Zobrazenie závislosti priemernej odporovej sily na rýchlosti vypočítanej metódou WLTP

#### 4.8 POROVNANIE VÝSLEDKOV

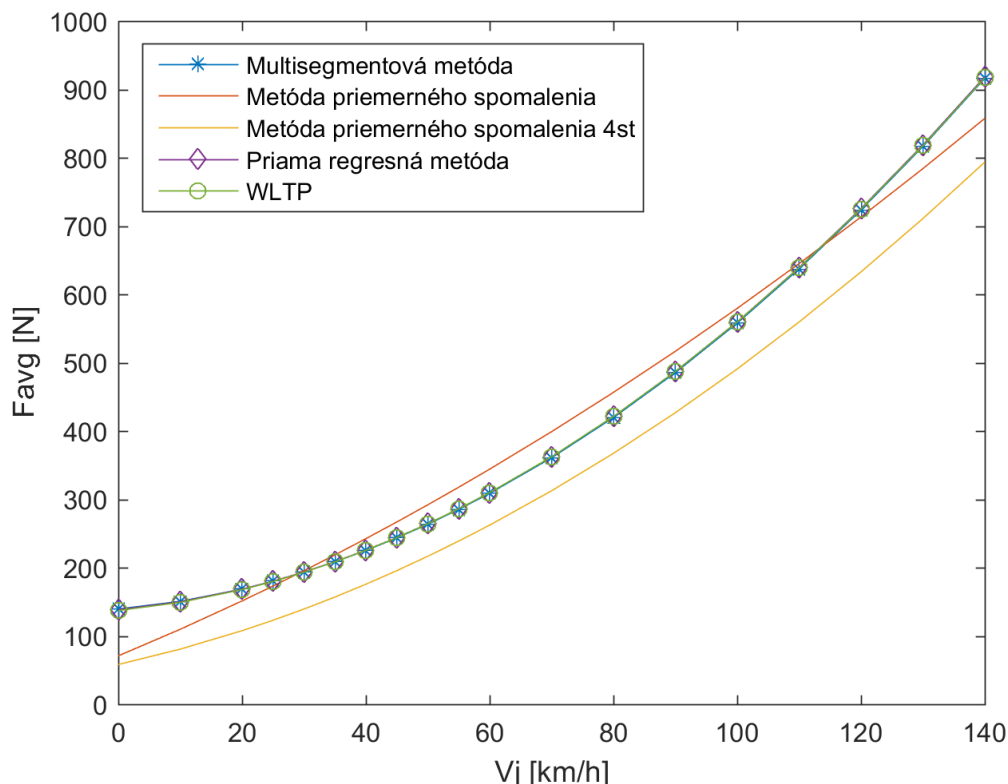
Navrhnutý program po vypočítaní potrebných hodnôt všetkých použitých metód (dve varianty metódy priemerného spomalenia) vykreslí všetky závislosti odporovej sily na rýchlosti a zároveň vypíše koeficienty  $f_0$ ,  $f_1$  a  $f_2$  do prehľadnej tabuľky ako na Obr. 23. Podľa priebehov zobrazených na Obr. 24, Obr. 25 a Obr. 26 je vidieť, že všetky pôvodné metódy okrem metódy priemerného spomalenia sú si veľmi podobné.



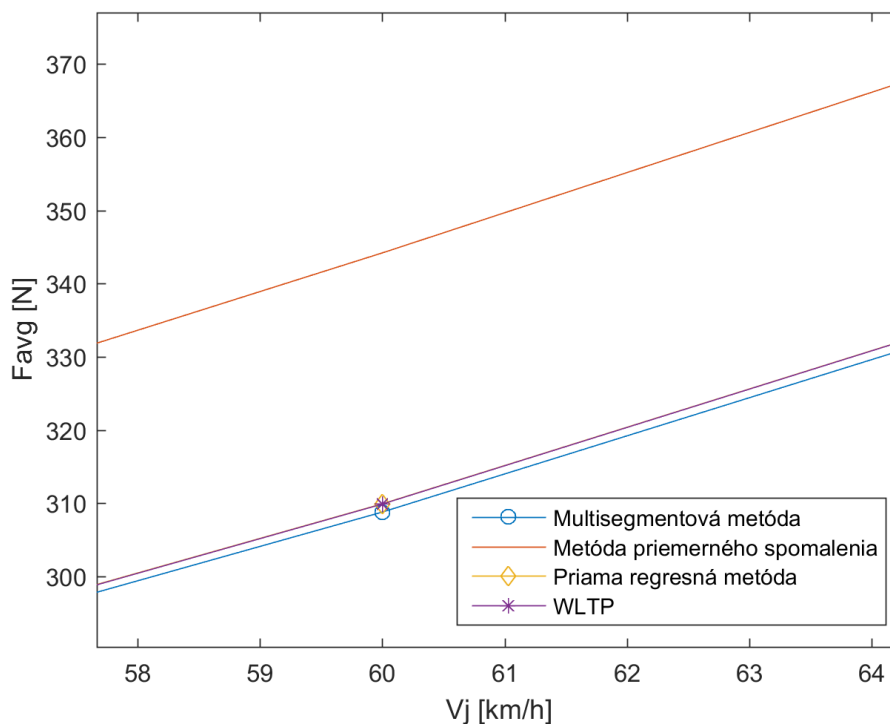


Obr. 23 Vykreslenie grafov a vyplnenie tabuliek po úspešných výpočtoch programu

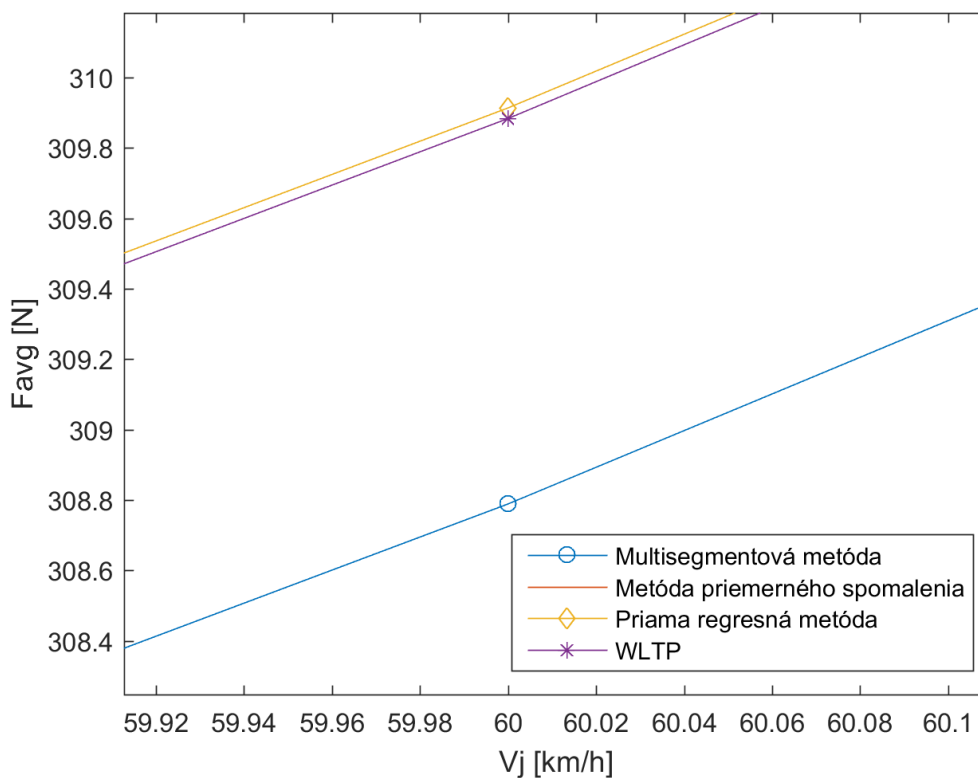
Na Obr. 24 sú vidieť opäť rozdiely medzi pôvodnou a upravenou metódou priemerného spomalenia a priebeh odporových síl vypočítaných zvyšnými metódami.



Obr. 24 Zobrazenie všetkých použitých metód pre výpočet odporovej sily vrátane pozmenenej metódy priemerného spomalenia. Pre lepšiu viditeľnosť prekrývania sa boli pridané značky



Obr. 25 Rozdiel hodnôt odporu medzi metódou priemerného spomalenia a ostatných  
 Obr. 26 Minimálny rozdiel medzi metódou WLTP a priamou regresnou metódou, multisegmentovou metódou sú vypočítané o málo menšie hodnoty



V Tab. 2 sú pre porovnanie vypočítané koeficienty  $f_0$ ,  $f_1$  a  $f_2$  všetkých použitých metód, kde je vidieť výrazný rozdiel v oboch metódach počítaných s priemerným spomalením oproti ostatným metódam.

Tab. 2 Zobrazenie koeficientov  $f_0$ ,  $f_1$  a  $f_2$  vypočítaných všetkými použitými metódami

	Multisegmentová metóda	Metóda priemerného spomalenia	Metóda priemerného spomalenia 4st	Priama regresná metóda	WLTP
$f_0$	139.521	70.933	58.300	138.582	137.285
$f_1$	2.793	13.521	7.239	2.948	3.082
$f_2$	0.442	0.173	0.300	0.440	0.436

Pre porovnanie boli vypočítané z rovnice (15) koeficienty aerodynamického odporu po dosadení v predošlých krokoch vypočítaného výsledného priemerného odporu danej metódy pri vybraných rýchlostiach 140, 80 a 20 km/h. Výsledky sú zobrazené v Tab. 3. Hodnota čelnej plochy vozidla je  $S_x = 2.21 \text{ m}^2$  a merná hmotnosť vzduchu  $\rho$  bola použitá z výpočtu vztlaku. Hodnota koeficientu aerodynamického odporu  $c_x$  udávaná výrobcom pre vozidlo Škoda Octavia III je  $c_x = 0.29/0.30$  (pre porovnanie bola použitá priemerná hodnota 0.295) podľa motoru. [13]

Tab. 3 Vypočítané koeficienty aerodynamického odporu pre rozdielne rýchlosti

Rýchlosť [km/h]	Multisegmentová metóda	Metóda priemerného spomalenia	Metóda priemerného spomalenia 4st	Priama regresná metóda	WLTP
140	0.3382	0.1321	0.2297	0.3368	0.3341
80	0.3382	0.1321	0.2297	0.3368	0.3341
20	0.3382	0.1321	0.2297	0.3368	0.3341

Podľa Tab. 3 je vidieť, že vypočítané koeficienty aerodynamického odporu  $c_x$  sa prakticky s rýchlosťou nemenia (jednotlivé hodnoty pre rozdielne rýchlosti sa líšili sa o milióntiny). Najbližšie k hodnote udávanej výrobcom sa priblížila metóda WLTP. Líši sa o 13%. Zároveň je však najaktuálnejšia, najnovšia verzia normy je z roku 2016, oproti ostatným z roku 2006. Nasledovala priama regresná metóda (14.2%) a Multisegmentová metóda (14.6%). Ako druhá najhoršia vyšla z tohto hľadiska upravená metóda priemerného spomalenia a najhoršie jej verzia s postupom podľa normy.

Hodnota  $c_x = 0.23$  nie je nereálna, dnešné vozidlá ako Audi A4 či Mercedes-Benz CLA ich dosiahli, ale Octavia nie. Aj vypočítané hodnoty približne 0.34 sú reálne, ale skôr pre osobné vozidlá z rokov 1990-2000. Naopak hodnota vypočítaná pôvodným postupom metódy priemerného spomalenia 0.1321 je veľmi nereálna a porovnateľná jedine tak s VW L1, ktorý však vôbec nespadá do kategórie vozidiel v akej je Octavia. Hlavnými príčinami rozdielov je použitie meracích kolies, ktoré zvyšujú aerodynamický odpor a fakt, že vozidlo bolo testované

s vyššou svetlou výškou, oproti pôvodnému továrenskému nastaveniu. K spresneniu výsledkov by mohlo pomôcť buď použitie snímačov medzi kolesom a nábojom kola, prípadne odmeranie v aerodynamickom tuneli o akú hodnotu menia meracie kolesá výsledné hodnoty. To by ale meranie výrazne predražilo, ale zároveň priblížilo výsledky k hodnotám udávaných výrobcami. [5], [14], [15]

#### 4.9 KOREKCIA VÝSLEDKOV

Podľa normy ISO 10521-1:2006(E) aj WLTP je možné spresniť výsledky meraním rýchlosti vetra smerujúceho proti testovacej dráhe  $v_w$ , teploty a tlaku, prípadne aj valivého odporu pneumatík. V nameraných dátach nebola uvedená charakteristika pneumatík, preto bol zvolený korekčný faktor  $K_0$  podľa vyššie uvedených metód nasledovne:

$$K_0 = 8.1 \times 10^{-3} K^{-1}. \quad (53)$$

Korekčný faktor  $K_2$  aerodynamického odporu sa vypočíta ako:

$$K_2 = \frac{T}{293} \times \frac{100}{p}, \quad (54)$$

kde  $T$  je priemerná teplota v [K] a  $p$  je priemerný atmosférický tlak v [kPa]. Následne boli vypočítané koeficienty  $f_0, f_1$  a  $f_2$  pomocou skriptu *korekce.m* založeného na rovnici (55), ktorého výstupom sú aj korigované hodnoty koeficientu aerodynamického odporu zobrazené v Tab. 5.

$$F_{cor} = [(f_0 - w_1) + f_1 \times V] \times [1 + K_0 \times (T - 293)] + K_2 f_2 \times V^2, \quad (55)$$

kde  $w_1$  predstavuje korekčný faktor vetra pre dojazdovú skúšku, ktorý sa rovná:

$$w_1 = 3.6^2 \times f_2 \times v_w^2. \quad (56)$$

Tab. 4 Zobrazenie koeficientov  $f_0, f_1$  a  $f_2$  po korekcii výsledkov zo všetkých použitých metód

	Multisegmentová metóda	Metóda priemerného spomalenia	Metóda priemerného spomalenia 4st	Priama regresná metóda	WLTP
$f_0$	134.4145	69.8820	55.0541	134.9793	133.7069
$f_1$	1.6917	13.8155	7.3964	3.0118	3.1493
$f_2$	0.4543	0.1763	0.3067	0.4496	0.4461

Pre porovnanie boli z rovnice (15) pomocou skriptu *korekce.m* vypočítané korigované hodnoty aerodynamického odporu pre rýchlosť 140 km/h (z Tab. 3 bolo vidieť, že koeficienty sa menili s rýchlosťou iba minimálne).

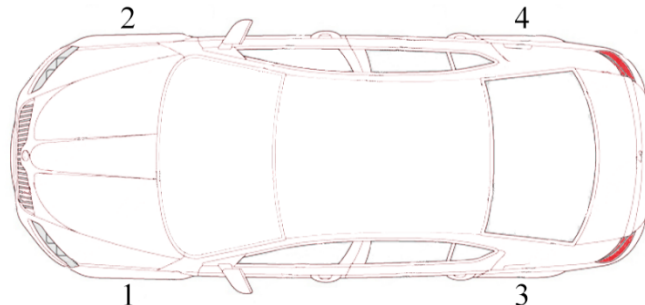
Tab. 5 Vypočítané koeficienty aerodynamického odporu po korekcii pre rýchlosť 140 km/h

Rýchlosť [km/h]	Multisegmentová metóda	Metóda priemerného spomalenia	Metóda priemerného spomalenia 4st	Priama regresná metóda	WLTP
140	0.3478 (+2.8%)	0.1350 (2.1%)	0.2348 (+2.2%)	0.3442 (+2.2%)	0.3415 (+2.2%)

V Tab. 5 je vidieť okrem korigovaných hodnôt koeficientu aerodynamického odporu aj ich zmenu vyjadrenú v percentách. V porovnaní s katalógovou hodnotou udávanou výrobcom sa od nej vo väčšine prípadov vypočítané hodnoty vzdialili. Jedine pre hodnoty z metódy priemerného spomalenia a jej upravenej verzie sa znížilo percento odchýlky, keďže už v pôvodných nekorigovaných výsledkoch boli pod katalógovou hodnotou a z rovnice (55) je vidieť, že k zmenšeniu výsledkov nemôže dôjsť, keďže k pôvodným vypočítaným hodnotám odporovej sily sa prirátavajú hodnoty korigované.

## 5 POSTUP VÝPOČTOV VZTLAKOVEJ SILY

Namerané dáta boli získané počas merania metódy WLTP, ktoré boli použité na výpočet odporovej sily. Namerané veličiny boli označené v poradí podľa Obr. 27



Obr. 27 Označenie poradia kolies pre identifikáciu nameraných síl, pôvodný obrázok z [16]

### 5.1 METÓDA VÝŠKOMEROV

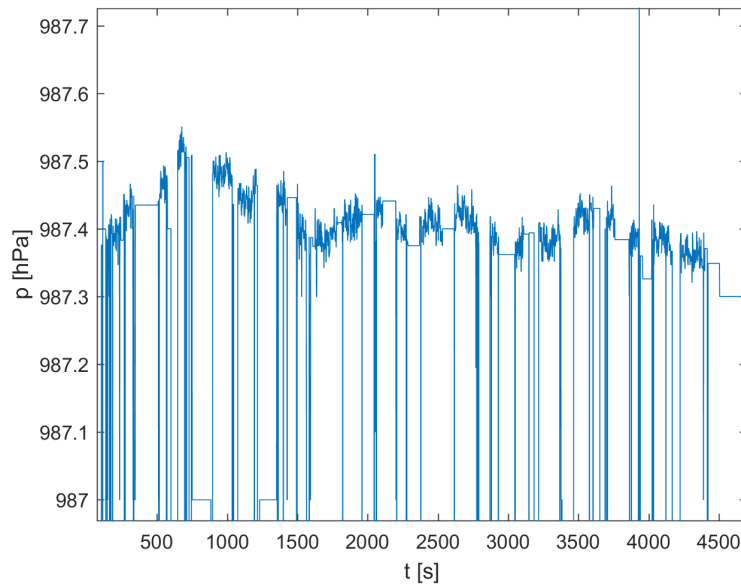
Pre výpočet vztlakovej sily touto metódou sú potrebné okrem rýchlosti zo súboru dát Speed2D\_kmh\_T48 aj hodnoty zdvihov tlmičov označené ako Mon\_Damper\_FL, Mon\_Damper\_FR, Mon\_Damper\_RL (ten však bol počas merania vypnutý a tak s ním nebolo ďalej počítané) a Mon\_Damper\_RR a posun karosérie v osi z označené ako Mon\_Height\_FL, Mon\_Height\_FR a Mon\_Height\_R (bol meraný celkový posun zadnej časti karosérie).

Dáta boli rovnako ako pri výpočte odporovej sily rozdelené podľa jednotlivých jazd a kvôli rozdeleným meracím jazdám spojené tak, ako vo výpočtoch odporovej sily. Jednotlivé namerané dáta boli preložené polynómom druhého stupňa a pripravené na ďalšie spracovanie, ale kvôli veľkému šumu signálu nebola dosiahnutá potrebná presnosť. Po zdĺhavom filtrovaní bol nakoniec zvolený iný prístup metódou zaťaženia jednotlivých kolies resp. metóda silomerov pomocou dát nameraných metódou running resistance.

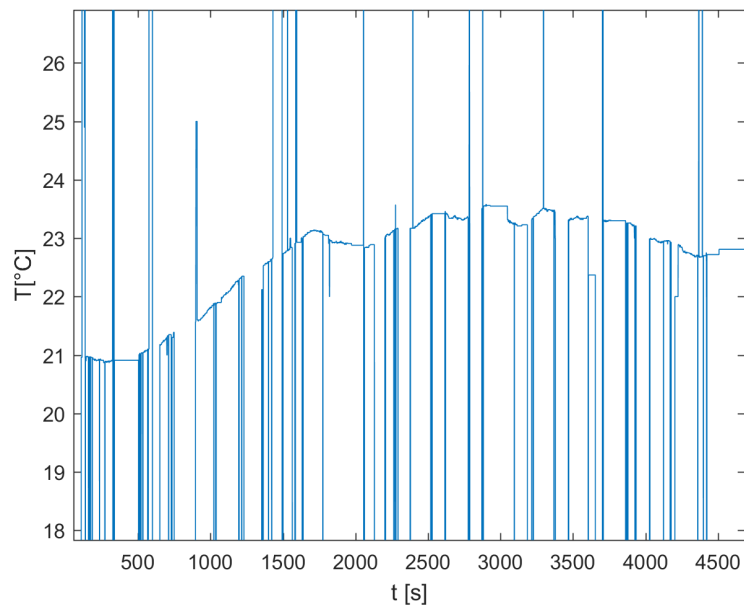
### 5.2 VÝPOČET MERNEJ HMOTNOSTI VZDUCHU

Pre určenie vztlakovej sily je podľa rovnice (33) je potrebná merná hmotnosť vzduchu. K jej výpočtu je podľa rovnice (4) potrebná teplota a tlak. Použité dáta boli namerané pri dojazdovej skúške, poveternostné podmienky boli ale veľmi podobné a tak by nemali výrazne skresliť nasledovný výpočet vztlakovej sily.

Pri meraní týchto veličín bol signál posielaný rádiovo do vozidla a kvôli malému dosahu došlo k skresleniu signálu a tak ich bolo potrebné filtrovať a pre výpočet spriemerovať. Výsledné hodnoty, s ktorými je ďalej počítané, sú:  $t_{avg} = 22.6892 \text{ } ^\circ\text{C}$  a  $p_{avg} = 0.09874 \text{ MPa}$ . Po dosadení do rovnice (4) vyjde merná hmotnosť vzduchu  $1.1821 \text{ kg/m}^3$ .



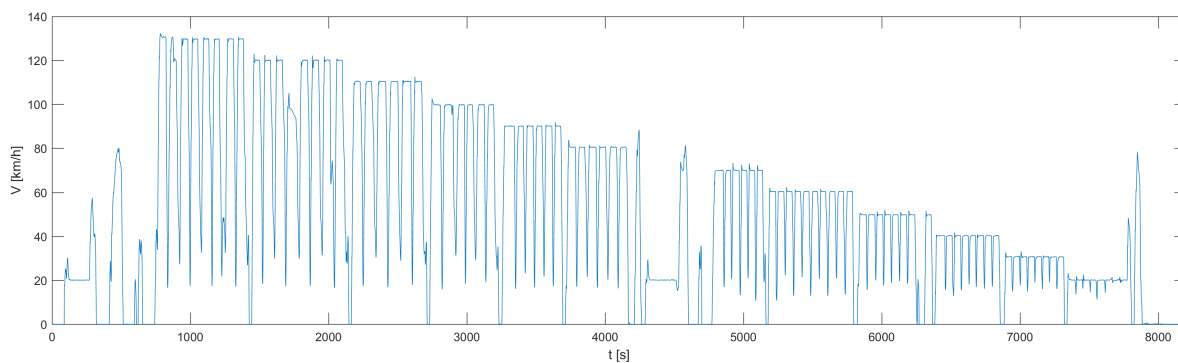
Obr. 28 Zobrazenie priebehu nameraného tlaku v závislosti na čase



Obr. 29 Zobrazenie nameraného priebehu teploty v závislosti na čase

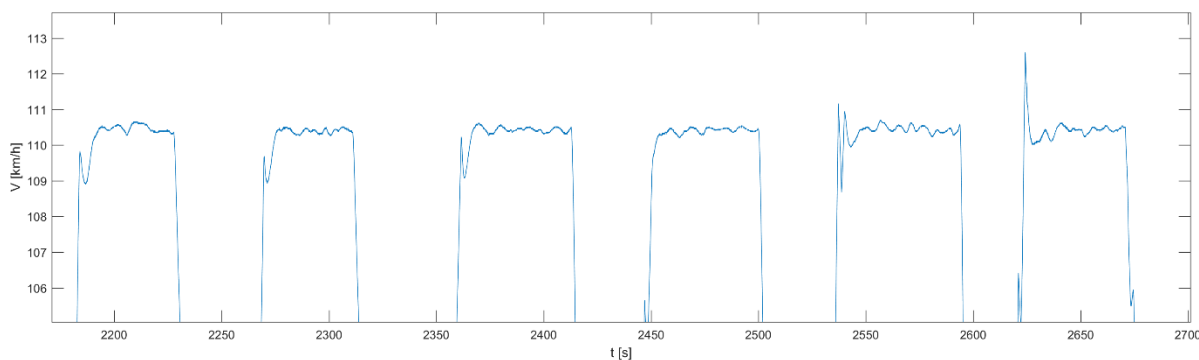
### 5.3 METÓDA SILOMEROV

Namerané dáta boli získané pomocou metódy skúšky za konštantnej rýchlosti z angl. *running resistance*. V nej sa vozidlo pohybuje po testovacej dráhe rýchlosťou 130 až 20 km/h tak, ako v metóde WLTP. Vozidlo ale udržiava rýchlosť daného referenčného bodu minimálne 5 sekúnd pre ustálenie hodnôt. Referenčné body sú medzi sebou vzdialené po 10 km/h. Meria sa opäť v smere *a* a *b* a sú potrebné aspoň tri páry merania.



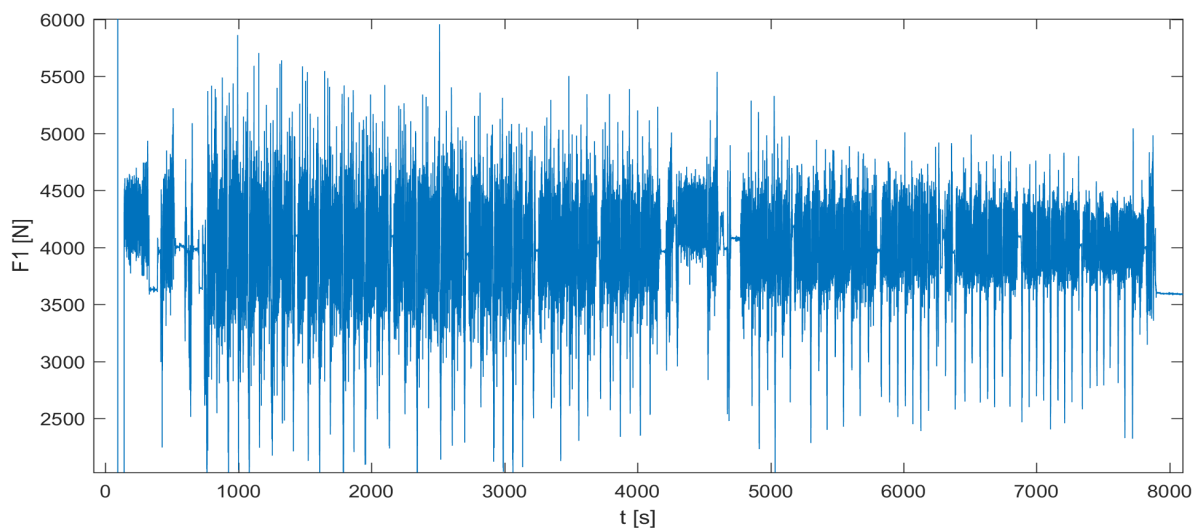
Obr. 30 Celkový záznam nameranej rýchlosti na čase metódou running resistance

Potrebné zaťaženia jednotlivých kolies označené ako  $Adi\_Ki\_MR\_Fz\_i\_Mon$ , kde  $i = 1$  až 4 podľa Obr. 27 boli podelené podľa časových intervalov, kedy vozidlo udržovalo konštantnú rýchlosť. Na Obr. 31 je vidieť príklad šesť v rade nameraných rýchlostí vozidla pri referenčnom bode  $V_3 = 110$  km/h. Na Obr. 33 je vidieť príslušné namerané zaťaženie na ľavé predné koleso opäť 6 krát po sebe v časovom intervale rovnakom ako na Obr. 31.

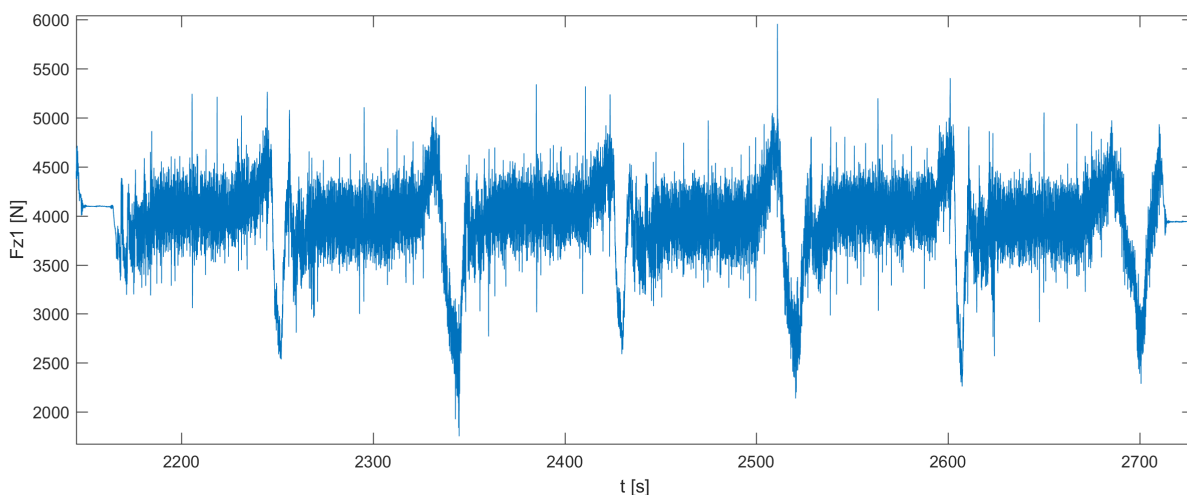


Obr. 31 Detailný záber nameraných dát pri rýchlosti 110 km/h



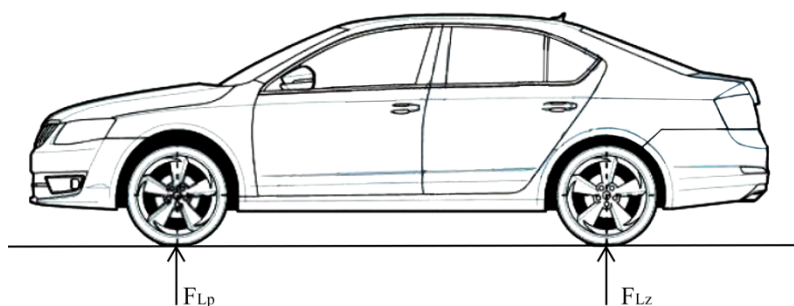


Obr. 32 Priebeh nameraného zaťaženia na ľavé predné koleso v čase



Obr. 33 Zobrazenie zaťaženia predného ľavého kolesa pre referenčný bod 110 km/h

Pre každé zaťaženie pri konštantnej rýchlosti boli vypočítané priemerné hodnoty zaťaženia. Tie boli následne sčítané s priemerným zaťažením druhého kolesa na náprave, čím vzniká priemerné zaťaženie jednotlivých náprav. Celkový koeficient vztlaku je súčtom oboch náprav.



Obr. 34 Rozloženie vztlakových síl na jednotlivé nápravy, pôvodný obrázok z [17]

Jednotlivé vektory zaťaženia náprav boli preložené polynómom druhého stupňa, ich predpis vyšiel nasledovne:

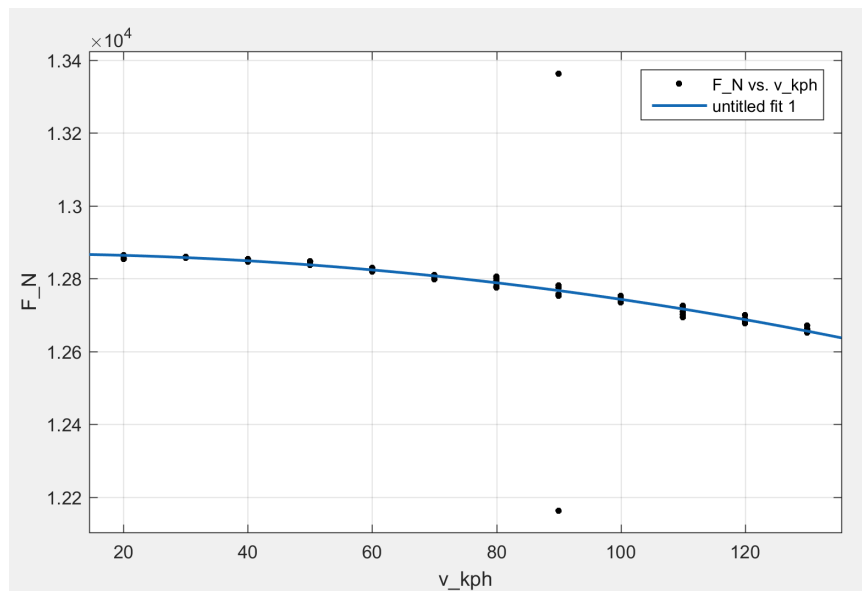
$$F_{Lp} = f_0 + f_1v + f_2v^2 = 7505 + 0.1377v - 0.09393v^2 \quad (57)$$

$$F_{Lz} = f_0 + f_1v + f_2v^2 = 5363 - 0.03144v - 0.07197v^2. \quad (58)$$

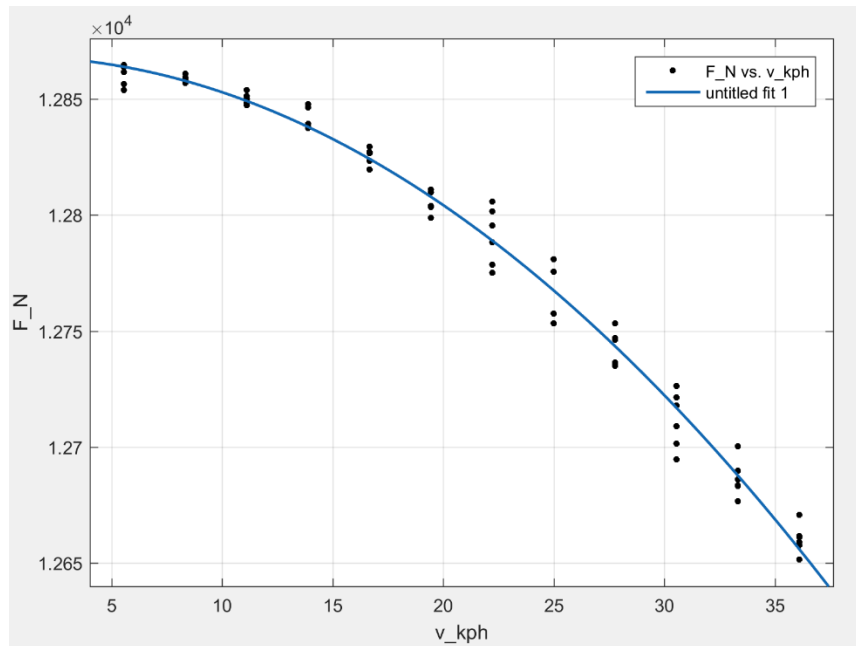
Pri prekladaní zaťaženi polynómom vyšli dve odlišné hodnoty zaťaženia pre obe nápravy pri rýchlosti 90 km/h. Chyby v meraní boli nahradené vo vektoroch zaťaženia hodnotou NaN, s ktorou Matlab nepočíta a následne boli vektory znova preložené polynómom. Touto úpravou sa spresnilo preloženie zaťaženi s hodnotami R-square 0.9908 pre prednú a 0.9718 pre zadnú nápravu. Z vypočítaných koeficientov  $f_0$  pre jednotlivé nápravy je vidieť rozloženie hmotnosti testovaného vozidla, resp. statické zaťaženie jednotlivých kolies. Koeficient  $f_1$  predstavuje vplyv Reynoldsového čísla a z koeficientu  $f_2$  je možné vyjadriť a vypočítať koeficient vztlaku pre jednotlivé nápravy nasledujúcou rovnicou:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho S_x v_r^2 c_L = f_2 v_r^2 \quad (59)$$

Hodnoty koeficientov  $c_{Lp}$  a  $c_{Lz}$  sú uvedené v Tab. 6. Po vypočítaní koeficientov boli sčítané aj zaťaženia jednotlivých náprav, čím vznikol vektor so šiestimi priemernými hodnotami celkového zaťaženia vozidla v osi z pre každý meraný rýchlostný bod. Tie isté chyby merania ako pri výpočte koeficientov vztlakov pre jednotlivé nápravy sa prejavili aj pri prekladaní celkového zaťaženia vozidla, čo je vidieť na Obr. 35 a Obr. 36.



Obr. 35 Preloženie celkového zaťaženia vozidla polynómom druhého stupňa s viditeľnými chybami merania pri rýchlosti 90 km/h



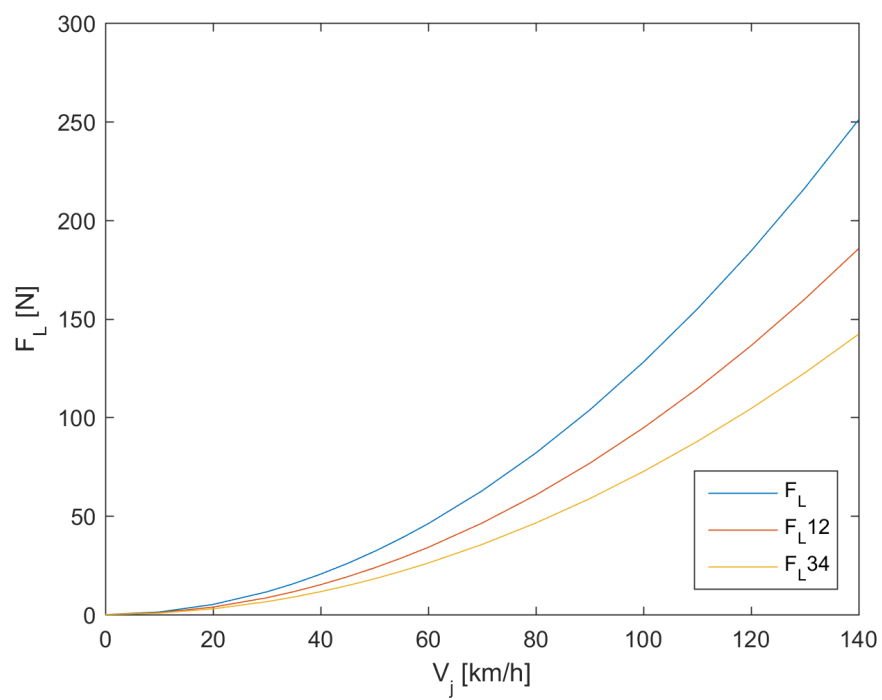
Obr. 36 Preloženie celkového zaťaženia vozidla s dostatočnou presnosťou

Prvé preloženie ale malo nedostatočnú presnosť vyjadrenú cez sumu chýb štvorcov R-square 0.306. Po ich vynechaní preložením opäť polynómom druhého stupňa boli získané koeficienty  $f_0$ ,  $f_1$  a  $f_2$  s hodnotou  $f_0 = 12870$ ,  $f_1 = 0.1239$  a  $f_2 = -0.1663$ . Z koeficientu  $f_2$  je následne vypočítaný celkový koeficient vztlaku  $c_L$  obdobným postupom, ako pri výpočte jednotlivých náprav.

Tab. 6 Výsledné koeficienty vztlaku

$c_{Lp}$	$c_{Lz}$	$c_L$
0.072	0.055	0.127

Predpokladaná hodnota celkového súčiniteľa vztlaku pre testované vozidlo bola od 0.100 do 0.180, takže vypočítaná hodnota 0.127 je reálna hodnota. Následne bola pomocou koeficientu vztlaku vypočítaná celková vztlaková sila pre rýchlosti od 0 po 140 km/h a vykreslená do grafu na Obr. 37. Okrem nej boli do tohto grafu pre porovnanie vykreslené aj priebehy vztlakových síl prednej  $F_{L12}$  a zadnej nápravy  $F_{L34}$ . Z priebehu je vidieť že vztlaková sila rastie s rýchlosťou. Pri mestských rýchlostiach je vztlaková sila podobne ako odporová sila neporovnateľne menšia oproti hodnotám napr. pri diaľničných rýchlostiach. Pri vyšších rýchlostiach sa prejaví druhá mocnina rýchlosti v rovnici (59) a vztlaková sila dokáže nadvihovaním vozidla a znižovaním stopy pneumatík vážnejšie ovplyvňovať jazdné vlastnosti testovaného vozidla. Tento vplyv je pri závodných vozidlách ešte väčší, kde sa s ním bojuje pomocou vytvárania záporného vztlaku. Správnosť výsledkov potvrdzuje aj hodnota koeficientu  $f_0 = 12870$  N, ktorá predstavuje statické zaťaženie všetkých štyroch kolies. Po vydelení tejto hodnoty gravitačným zrýchlením  $9.8 \text{ m/s}^2$  má byť hmotnosť vozidla 1313 kg, vo výpočte je počítané s hodnotou 1396 kg. Malý rozdiel mohol byť zapríčinený znížením hmotnosti paliva jeho spotrebovaním počas testovania, resp. hodnota hmotnosti bola použitá pre výpočty dojazdových skúšok, ktorých meracie zariadenia mohli byť ťažšie ako tie pre túto metódu.



Obr. 37 Rastúci priebeh vztlakových síl s rýchlosťou

## ZÁVER

Cieľom tejto práce bolo spracovanie nameraných dát z dojazdových skúšiek pomocou daných noriem, výpočet odporovej sily a porovnanie použitých metód. Najprv boli spracované namerané hodnoty rýchlostí, vypracovaný kontrolný výpočet v Mathcade a následne boli vypočítané odporové sily pomocou multisegmentovej metódy, metódy priemerného spomalenia, metódy priamej regresie a metódy WLTP. Pre spresnenie výpočtu bol zahrnutý aj vplyv vetra a valivého odporu pneumatík. Následne boli porovnané jednotlivé výsledky a navrhnutý upravený postup metódy priemerného spomalenia pre nedostatočnú presnosť oproti ostatným použitým metódam. Pre lepšie porovnanie boli vypočítané koeficienty aerodynamického odporu pre všetky metódy. Vypočítané odporové sily boli vykreslené v závislosti na rýchlosti pre prehľadné porovnanie jednotlivých metód. Rozdiely medzi multisegmentovou metódou, metódou priamej regresie a WLTP sú minimálne. Najbližšie ku katalógovej hodnote koeficientu aerodynamického odporu udávanej výrobcom bola metóda WLTP. Merané vozidlo malo na kolesách pripevnené merače a podvozok bol nastavený na vyššiu svetlú výšku. Tieto faktory sú dôvodom rozdielov medzi tromi najpresnejšími metódami a hodnotou udávanou výrobcom. Najviac sa líšila metóda priemerného spomalenia.

Ďalším cieľom bolo vytvorenie softvéru pre urýchlenie výpočtov a spracovania dát z vyššie uvedených dojazdových skúšiek. Program bol od prvého návrhu písaný tak, aby fungoval nie len s dodanými nameranými dátami pre túto diplomovú prácu. Najprv bolo navrhnuté prehľadné užívateľské prostredie so všetkými dôležitými výstupmi z popísaných metód a zároveň bolo dbané na jednoduchosť. Potom nasledoval návrh označenia vstupných veličín pre výpočet odporových síl v navrhnutom programe (hmotnosť vozidla, rýchlosť a čas, popis názvov jednotlivých matíc je popísaný v práci), výber príkazov pre správny postup výpočtov jednotlivých metód a napísanie samotného programu, resp. jeho verzie s upravenou metódou priemerného spomalenia. Pre overenie funkčnosti programu pri použití rovnakých vstupných dát boli výsledky z programu v porovnaní s výsledkami, ktoré boli vypočítané v predošlých krokoch, rovnaké (minimálne odlišnosti spôsobené zaokrúhlením).

Posledným cieľom práce bolo odvodiť matematický model pre identifikáciu vztlakových síl z dát meraných na vozovke. V prvom rade boli použité dáta namerané dojazdovou skúškou, ktoré boli použité aj pre výpočet odporových síl. Zvolený bol postup sledovania výšky karosérie a stlačenia tmičov. Dáta boli sfiltrované a preložené polynómom druhého stupňa a následne odčítané od seba pre elimináciu vplyvu rozťahovania kolies pri odvalovaní (nadvihnutie karosérie nespôsobené vztlakovou silou). Ďalší postup metódy mal spočívať v tom, že by sa odmerala tuhosť pružín meraného vozidla a po vynásobení by bolo možné vypočítať výslednú vztlakovú silu. Pri vyhodnotení vztlakových síl bol bohužiaľ pre veľký šum nameraných dát zmenený zdroj dát (namerané pomocou metódy running resistance s konštantnými rýchlosťami) a zároveň aj postup vyhodnotenia. Tentokrát sa sledovali zaťaženia jednotlivých kolies. Pomocou nameraných rýchlostí boli identifikované časové úseky s konštantnou rýchlosťou. Z nich boli vypočítané priemerné zaťaženia na každé koleso resp. súčtom vypočítané zaťaženie na nápravu či celkovo na vozidlo. Po preložení zaťaženia polynómom boli vypočítané vztlakové sily, ktoré boli následne vykreslené v závislosti na rýchlosti. Z týchto síl boli vypočítané koeficienty vztlaku, ktoré boli v rámci predpokladaných hodnôt pre merané vozidlo, čo potvrdilo správnosť výpočtu.

Meranie jazdných odporov s presnými výsledkami je zložitý proces. Najmä keď výsledky môže ovplyvniť nespočetné množstvo chýb či už pri meraní, alebo pri ich vyhodnotení. Ich výpočtom a následne príslušnou úpravou vozidla je možné kladne ovplyvniť jazdné vlastnosti vozidla, ba

dokonca zlepšiť ekologickosť a ekonomickosť jazdy. Práve ekonomickosť a ekologickosť sú dnes v doprave dôležitými vlastnosťami a preto vývoj v oblasti minimalizovania jazdných odporov s príchodom nových možností pohonov čaká svetlá budúcnosť.

## POUŽITÉ INFORMAČNÉ ZDROJE

- [1] VLK, František. *Dynamika motorových vozidel*. 2. vyd. Brno: František Vlk, 2003. ISBN 80-239-0024-2.
- [2] GILLESPIE, Thomas. D. *Fundamentals of vehicle dynamics*. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 1992. ISBN 15-609-1199-9.
- [3] LUPÍK, Dalibor, Jan MARKOVIČ a Irena TESARČÍKOVÁ. Tatra T77 prošla dvacetiletou rekonstrukcí a hned se stala hvězdou v Pebble Beach. In: *Hospodářské noviny* [online]. 2014 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://ihned.cz/c1-62657790-tatra-t77-prosla-dvacetiletou-rekonstrukci-a-hned-se-stala-hvezdou-v-pebble-beach>
- [4] HUCHO, Wolf-Heinrich. *Aerodynamics of road vehicles: from fluid mechanics to vehicle engineering*. 4th ed. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 1998. ISBN 978-0768000290.
- [5] KATZ, Joseph. *Race car aerodynamics: designing for speed*. Cambridge, MA, USA: R. Bentley, 1995. ISBN 08-376-0142-8.
- [6] ISO 10521-1:2006(E). Road vehicles — Road load: Determination under reference atmospheric conditions. Geneva, 2006.
- [7] ITTERHEIM, Martin. Škoda Octavia 3. generace. In: *Line-cars* [online]. 2012 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://line-cars.kvalitne.cz/perovky/Skoda/nova-octavia-002.png>
- [8] ECE/TRANS/WP.29/2016/68. Proposal for Amendment 1 to global technical regulation No. 15 (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures (WLTP)). Geneva: United Nations, 2016.
- [9] PASSMORE, M.A. *The measurement and analysis of road vehicle drag forces*. Loughborough, 1990. Disertace. Loughborough University.
- [10] Measuring Systems for Vehicle Development [online]. Winterthur: Kistler Instrumente, 2007 [cit. 2017-05-16]. 200-460e-08.07. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/en/document/view/9595327/catalogue-brochure-vehicles-measuring-systems-for-techno-volt/28>
- [11] DVOŘÁK, František. Octavia odhalena: Škoda oznámila cenu základního modelu. In: *Auto.idnes.cz* [online]. Praha: Mafraprint, 2004 [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: [http://auto.idnes.cz/octavia-odhalena-skoda-oznamila-cenu-zakladniho-modelu-pg2-ak\\_aktual.aspx?c=A040302\\_154237\\_ak\\_aktual\\_fdv](http://auto.idnes.cz/octavia-odhalena-skoda-oznamila-cenu-zakladniho-modelu-pg2-ak_aktual.aspx?c=A040302_154237_ak_aktual_fdv)
- [12] Steel-stainless-background-lt. In: *Stainless Aquatics* [online]. Del Mar (California): Stainless Aquatics, 2014 [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <http://www.stainlessaquatics.com/steel-stainless-background-lt/>
- [13] The New ŠKODA Octavia. In: *Skoda Auto New Zeland* [online]. Nový Zéland, 2013 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: [http://www.skoda.co.nz/SiteCollectionDocuments/Brochures/Octavia\\_mainENG\\_0513.pdf](http://www.skoda.co.nz/SiteCollectionDocuments/Brochures/Octavia_mainENG_0513.pdf)
- [14] Automobile drag coefficient. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Automobile\\_drag\\_coefficient](https://en.wikipedia.org/wiki/Automobile_drag_coefficient)
- [15] Vehicle Coefficient of Drag List. *EcoModder*. [online]. 2016 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: [http://ecomodder.com/wiki/index.php/Vehicle\\_Coefficient\\_of\\_Drag\\_List](http://ecomodder.com/wiki/index.php/Vehicle_Coefficient_of_Drag_List)
- [16] Skoda Octavia. In: *The blueprints* [online]. Amsterdam, 2012 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: [https://www.the-blueprints.com/vectordrawings/show/8445/skoda\\_octavia/](https://www.the-blueprints.com/vectordrawings/show/8445/skoda_octavia/)
- [17] Skoda Octavia (2013). In: *The blueprints* [online]. Amsterdam, 2013 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: [https://www.the-blueprints.com/blueprints/cars/skoda/56333/view/skoda\\_octavia\\_%282013%29/](https://www.the-blueprints.com/blueprints/cars/skoda/56333/view/skoda_octavia_%282013%29/)

## ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

$A$	[°]	Uhol medzi rovinou vozovky a vodorovnou rovinou
$a_{mech}$	[N]	Koeficient mechanického odporu
$B$	[m]	Rozchod kolies
$b_{mech}$	[N/(km/h)]	Koeficient mechanického odporu
$C_0$	[-]	Integračná konštanta
$C_{avg}$	[Nm]	Priemerný jazdný odpor
$C_{jm}$	[Nm]	Priemerné krútiace momenty
$C_{js}$	[-]	Kompenzačný člen
$c_L$	[-]	Koeficient vztlaku
$c_{Lp}$	[-]	Koeficient vztlaku prednej nápravy
$c_{Lz}$	[-]	Koeficient vztlaku zadnej nápravy
$c_{mech}$	[N/(km/h) <sup>2</sup> ]	Koeficient odporu
$c_x$	[-]	Súčiniteľ aerodynamického odporu
$e$	[m]	Excentricita
$f_0$	[N]	Koeficient pri výpočte odporovej sily
$f_1$	[N (h/km)]	Koeficient pri výpočte odporovej sily
$f_2$	[N (h/km) <sup>2</sup> ]	Koeficient pri výpočte odporovej sily
$F_d$	[N]	Aerodynamický odpor
$f_k$	[m]	Súčiniteľ valivého odporu kolesa
$F_L$	[N]	Vztlaková sila
$G$	[N]	Tiaž vozidla
$H$	[m]	Celková výška vozidla
$h$	[m]	Výška svahu
$i_C$	[-]	Celkový prevod medzi motorom a hnacími kolesami
$i_r$	[-]	Prevod rozvodovky
$J_{Ki}$	[kg m <sup>2</sup> ]	Hmotnostný moment zotrvačnosti rotujúcich kolies
$J_m$	[kg m <sup>2</sup> ]	Hmotnostný moment zotrvačnosti rotujúcich častí motoru
$J_p$	[kg m <sup>2</sup> ]	Hmotnostný moment zotrvačnosti rotujúcich častí prevodky
$k$	[-]	Počet súborov nameraných dát
$K_0$	[K <sup>-1</sup> ]	Korekčný faktor valivého odporu
$K_2$	[K/kPa]	Korekčný faktor aerodynamického odporu
$L$	[m]	Dĺžka vozidla



$l$	[m]	Rovinná dĺžka svahu
$m$	[kg]	Hmotnosť
$m_{av}$	[kg]	Hmotnosť vozidla na začiatku merania tesne po zahriatí
$M_{fk}$	[Nm]	Krútiaci moment kolesa vytvorený reakciou od vozovky
$M_r$	[kg m <sup>2</sup> ]	Zotrvačný moment rotačných častí vozidla
$m_r$	[kg]	Hmotnosť rotačných častí
$M_{rK}$	[Nm]	Moment potrebný pre zrýchlenie kolies vozidla
$M_{rm}$	[Nm]	Moment na hnacích kolesách
$M_{rp}$	[Nm]	Moment rotujúcich častí prevodového ústrojenstva
$N$	[-]	Počet párov jász
$N$	[s <sup>-1</sup> ]	Otáčky
$O_{fK}$	[N]	Valivý odpor kolesa
$O_{fK}$	[N]	Reakcia smerujúcu proti pohybu kolesa
$O_s$	[N]	Odpor stúpania
$O_Z$	[N]	Odpor zrýchlenia
$O_{Zp}$	[N]	Odpor zrýchlenia posuvných častí
$O_{Zr}$	[N]	Odpor zrýchlenia rotujúcich častí
$p_0$	[Pa]	Tlak vzduchu
$p_{avg}$	[Pa]	Priemerný tlak
$r_{di}$	[m]	Dynamický (účinný) polomer kolesa
$Re$	[-]	Reynoldsovo číslo
$r_{Ki}$	[m]	Valivý polomer kolesa,
$s$	[%]	Sklon svahu (stúpanie)
$S_X$	[m <sup>2</sup> ]	Čelná plocha automobilu
$t_0$	[°C]	Teplota
$t_{avg}$	[°C]	Priemerná teplota
$v$	[m/s]	Rýchlosť
$V_j$	[m/s]	Rýchlosti jednotlivých jász
$v_{jm}$	[m/s]	Priemerné rýchlosti
$v_r$	[m/s]	Náporová rýchlosť
$v_w$	[m/s]	Rýchlosť vetra
$w_l$	[N]	Korekčný faktor vetra
$Z_K$	[N]	Radiálna reakcia vozovky

$\alpha_j$	[m/s <sup>2</sup> ]	Priemerné zrýchlenie
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Merná hmotnosť vzduchu
$\mu$	[Ns/m <sup>2</sup> ]	Dynamická hustota
$\eta$	[%]	Mechanická účinnosť
$\mathcal{G}$	[-]	Súčiniteľ vplyvu rotačných častí
$\ddot{x}$	[m/s]	Zrýchlenie
$\gamma$	[m/s <sup>2</sup> ]	Spomalenie
$\Gamma$	[m/s <sup>2</sup> ]	Priemerné spomalenie
$\Delta t$	[s]	Zmena času
$\Delta V$	[m/s]	Zmena rýchlosti
$\theta$	[°]	Uhol vybočenia
$\theta_L$	[°]	Uhol nábehu vzduchu

## ZOZNAM PRÍLOH

Kópia diplomovej práce

Súbor *Korekce*

- m-súbor s dátami potrebnými pre korekciu výsledkov odporových síl

Súbor *Program*

- Softvér pre výpočet odporových síl v Matlabe
- Kontrolný výpočet odporových síl v Mathcade
- m-súbor so vstupnými datami

Súbor *Program s upravenou metódou*

- Softvér pre výpočet odporových síl v Matlabe s upravenou metódou priemerného spomalenia
- m-súbor so vstupnými datami

Súbor *Vstupné dáta*

- autorom použité namerané dáta potrebné pre výpočty

Súbor *Vztlak*

- Výpočet vztlakových síl v Mathcade
- m-súbory so vstupnými dátami potrebnými pre výpočet