

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Bc. Radek Dvořáček

BOČNÍ DYNAMIKA VOZIDLA

Diplomová práce

2015



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta dopravní
d ě k a n**
Konviktská 20, 110 00 Praha 1

K623 Ústav bezpečnostních technologií a inženýrství

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Radek Dvořáček

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – BD – Bezpečnost dopravních prostředků a cest

Název tématu (česky): **Boční dynamika vozidla**

Název tématu (anglicky): Lateral Vehicle Dynamic

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Dynamika jízdy vozidla; rozbor sil působících na vozidlo při průjezdu směrovým obloukem
- Vliv boční dynamiky na bezpečnost
- Popis a vyhodnocení jízdní zkoušky provedené na FD
- Porovnání metodiky a výsledků testu s publikovanými zkouškami
- Zhodnocení sil působících na vozidlo při průjezdu zatáčkou
- Závěry a doporučení pro další testy

Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího diplomové práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: Ripka, P., Ďaďo, S., Kreidl, M., Novák, J.: Senzory (opr. dotisk). Skripta ČVUT FEL, Praha 2007

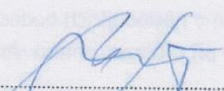
Jan, Z., Ždánský, B., Čupera, J.: Automobily I - podvozky, AVID 2009

Kovanda J., Resl I., Socha J.: Konstrukce automobilů – pérování vozidel. Vydavatelství ČVUT Praha 1997

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Jan Kovanda, CSc.**

Datum zadání diplomové práce: **30. června 2014**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **31. května 2015**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

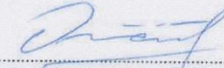

doc. Ing. Václav Jirovský, CSc.
vedoucí

Ústavu bezpečnostních technologií a inženýrství




prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.


Bc. Radek Dvořáček
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 30. června 2014

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 31. května 2015

.....

podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu prof. Ing. Janu Kovandovi, CSc. za poskytnutí odborných rad, věcné připomínky, ochotu a vstřícný přístup během zpracování této práce. Dále bych rád poděkoval Haně Najzarové za pomoc při vývoji softwarových podkladů pro záznam dat a týmu laboratoře K623 za pomoc a trpělivost při přípravách experimentu.

Velké poděkování náleží celé mé rodině a přátelům za obrovskou podporu, v těžkých i lehkých dobách studia.

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

Boční dynamika vozidla

diplomová práce

květen 2015

Bc. Radek Dvořáček

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce "**Boční dynamika vozidla**" je příprava, realizace a vyhodnocení jízdni zkoušky zaměřené na boční dynamiku vozidel, zejména na jízdni chování.

KLÍČOVÁ SLOVA

boční dynamika, jízdni chování, přetáčivost, nedotáčivost, úhlová rychlost, pól pohybu, CarMaker, simulace

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

Faculty of Transportation Science

Lateral Vehicle Dynamic

diploma thesis

may 2015

Bc. Radek Dvořáček

ABSTRACT

The subject of the diploma thesis "**Lateral Vehicle Dynamic**" is preparation, realization and analysis of driving test focused on lateral vehicle dynamic, especially on vehicle behaviour.

KEY WORDS

lateral dynamic, vehicle behaviour, oversteer, understeer, angular velocity, movement pole, CarMaker, simulation

Obsah

Úvod.....	10
1 Dynamika jízdy vozidla	11
1.1 Newtonovy pohybové zákony	11
1.1.1 První Newtonův zákon	11
1.1.2 Druhý Newtonův zákon	11
1.1.3 Třetí Newtonův zákon	11
1.2 Síly působící na těleso	12
1.2.1 Síly akční a reakční	12
1.2.2 Síly vnější a vnitřní	12
1.2.3 Síly vazbové	14
1.2.4 Síly pracovní	14
1.3 Dynamika vozidel.....	16
1.3.1 Referenční soustava.....	16
1.4 Rozbor sil působících na vozidlo při průjezdu směrovým obloukem	17
2 Vliv boční dynamiky na bezpečnost	20
2.1 Jízdní chování vozidel	20
2.1.1 Nedotáčivost.....	20
2.1.2 Neutrální chování	20
2.1.3 Přetáčivost	21
2.1.4 Určení jízdního chování automobilu	21
2.2 Aktivní systémy mající vliv na jízdní chování vozidla	23
2.2.1 ESP	23
3 Testování boční dynamiky	25
3.1 Jízdní zkoušky	25
3.1.1 Čistě subjektivní hodnocení	25
3.1.2 Subjektivní hodnocení.....	25

3.1.3	Objektivní hodnocení	26
3.2	Jízdní zkoušky z hlediska boční dynamiky	27
3.2.1	Ustálená jízda v kruhu - ISO 4138:2012	27
3.2.2	Fishhook test	28
3.2.3	Citlivost na boční vítr – zkouška CBV	30
3.3	Počítačové simulace	31
3.3.1	CarMaker	31
4	Popis a vyhodnocení zkoušky na FD	34
4.1	Popis jízdních zkušek	34
4.1.1	Jízdní plocha	34
4.2	Jízdní zkoušky	35
4.3	Měřicí zařízení	36
4.3.1	Akcelerometry	36
4.4	Snímání dat	38
4.5	Umístění na vozidlech	39
4.6	Diagram měřícího zařízení	41
4.7	Metodika vyhodnocení experimentu	42
4.7.1	Výpočet stáčivé rychlosti a stáčivého zrychlení	42
4.7.2	Výpočet umístění pólu pohybu	44
4.8	Naměřené hodnoty	45
4.9	Výpočet stáčivé rychlosti a zrychlení	46
4.10	Poloha pólu pohybu	47
4.10.1	Pól pohybu u Škoda Rapid	49
4.10.2	Pól pohybu u Škoda Octavia	50
4.10.3	Pól pohybu u BMW 320d Touring	51
5	Porovnání metodiky a výsledků testu s publikovanými zkouškami	53
5.1	Návrh a průběh simulace	53

5.2	Zhodnocení simulace	55
5.3	Porovnání simulace a reálné zkoušky.....	56
6	Zhodnocení sil působících na vozidlo při průjezdu zatáčkou	57
	Porovnání hodnot úhlové rychlosti ω	57
7	Závěr.....	59
8	Zdroje	61
9	Seznam Obrázků	63
10	Seznam Tabulek	64
11	Seznam Grafů	64
	Příloha 1 – Naměřené hodnoty zrychlení	Chyba! Záložka není definována.

Úvod

Ve své diplomové práci z části navazuji na problematiku, kterou jsem se zabýval ve své práci bakalářské – Vliv pneumatik na jízdu vozidel. Cílem mé diplomové práce je lépe porozumět chování vozidel při jízdě směrovým obloukem a jeho odezvou na vyvolaný impuls.

Při jízdě vozidla zatáčkou vznikají různé fyzikální děje a pro bezpečný průjezd vozidla zatáčkou musí tyto děje nabývat přijatelných hodnot. Pneumatiky vozidla mohou na vozovku přenášet pouze omezené množství sil, jinak dochází ke ztrátě přilnavosti a výrazně se zvyšuje riziko dopravní nehody.

Pro mou diplomovou práci byla navržena série testů pro různé typy automobilů. Tyto testy jsou navrženy tak, aby v nízkých rychlostech otestovaly odezvu automobilu na impuls vyvolaný překážkou na vozovce. Tento děj může nastat například při přejetí uklidňovacího prvku dopravy a může mít za následek snížení stability vozidla. Nízké rychlosti jsou navrženy z důvodu bezpečného průběhu zkoušek, takže očekávané výsledky budou nabývat lineárních hodnot.

Pro mé testy budu potřebovat speciální čidla a záznamové zařízení pro sběr dat, aby bylo možné data následně vyhodnotit a porovnat. Jako senzory jsou zvoleny tříosé akcelerometry s citlivostí 2G, což je rozmezí plně dostačující pro zvolené zkoušky. Navržené testy budou provedeny na automobilech Škoda Rapid, Škoda Octavia II. generace a BMW 320d Touring a u vozidla Škoda Octavia II dojde k několika modifikacím.

Podle úspěšnosti zkoušek a jejich vyhodnocení ve vyhodnocovací fázi provedu analýzu jízdního chování nalezením pólu pohybu daných automobilů pomocí veličin vypočtených rozkladem sil z naměřených hodnot jízdních zkoušek.

V následující části porovnám provedené testy s publikovanými jízdními zkouškami nebo s provedenou simulací v nějakém softwarovém prostředí, ve kterém provedu obdobné jízdní zkoušky jako zkoušky naplánované pro reálný experiment.

1 Dynamika jízdy vozidla

Dynamika je odvětví mechaniky, které se zabývá pohybem hmotných objektů, jako jsou body, tělesa nebo soustavy těles. Jejím cílem je určení pohybu hmotného objektu, známe-li síly, které na něj působí. Jedná se tedy o určení rychlosti a polohy objektu v daném čase.

Dynamiku lze jednoduše popsat jako soubor tří veličin:

- Prostor
- Čas
- Silové vektory

1.1 Newtonovy pohybové zákony

Vztahy mezi pohybem těles a silami na ně působící nám udávají Newtonovy pohybové zákony. Tyto zákony, které tvoří základ dynamiky nám umožňují určit jaký bude pohyb tělesa, známe-li síly na něj působící.

1.1.1 První Newtonův zákon

Nazývá se také Zákon setrvačnosti.

Jestliže na těleso nepůsobí žádné vnější síly nebo výslednice sil je nulová, pak těleso setrvává v klidu nebo v rovnoměrně přímočarém pohybu.

1.1.2 Druhý Newtonův zákon

Nazývá se také Zákon Síly.

Jestliže na těleso působí síla, pak se těleso pohybuje se zrychlením, které je přímo úměrné působící síle a nepřímo úměrné hmotnosti tělesa.

Nejčastěji používaný vztah ve spojitosti s druhým pohybovým zákonem je vztah:

$$\vec{F} = m\vec{a}, \text{ kde}$$

Fje vektor síly [N],

m je hmotnost tělesa [kg] a

\vec{a} je vektor zrychlení [$m \cdot s^{-2}$].

1.1.3 Třetí Newtonův zákon

Nazývá se také Zákon akce a reakce.

Proti každé akci vždy působí stejná reakce; jinak: vzájemná působení dvou těles jsou vždy stejně velká a míří na opačné strany.

Vztahově vyjádřeno jako $F_{12} = -F_{21}$, kde F_{12} je síla kterou působí těleso 1 na těleso 2 a síla F_{21} je síla kterou odpovídá těleso 2 na těleso 1.

1.2 Síly působící na těleso

Síly, které působí na hmotný bod, soustavu hmotných bodů nebo na těleso řadíme do několika základních kategorií.

1.2.1 Síly akční a reakční

Jak již bylo zmíněno v kap. 1.1.3. Třetí Newtonův zákon, jestliže působíme na těleso akční silou F^A , například naložením nákladu na střešní nosič automobilu, vyvoláme reakci vozovky o stejné hodnotě na pneumatiky automobilu. Součtem reakcí těchto sil získáme reakční sílu F^R , protože musí platit že $F^A = F^R$.

1.2.2 Síly vnější a vnitřní

Vnější síly F^E mají zdroj mimo soustavu hmotných bodů a jsou to síly, které jsou zodpovědné za pohyb soustavy. Naproti tomu vnitřní síly F^I jsou síly, které působí mezi jednotlivými hmotnými body uvnitř soustavy hmotných bodů a na pohybu soustavy se nepodílejí.

Odstředivá síla

Vzhledem k zaměření mé diplomové práce je nejdůležitější vnější silou síla odstředivá F_o , známá ze vztahu:

$$F_o = m \cdot \frac{v^2}{r} = ma_d,$$

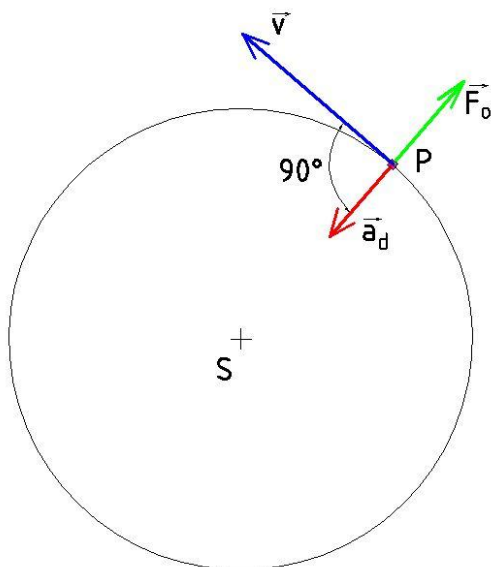
kde: mje hmotnost tělesa,

vje rychlost tělesa,

rje poloměr opisované dráhy,

a_dje dostředivé zrychlení.³

Tato síla působí na těleso při pohybu na kruhové dráze ve směru od středu křivosti trajektorie. Pokud se těleso pohybuje po kružnici, působí tato síla od středu této kružnice.



Obrázek 1 - Síly působící na těleso při pohybu na kružnici ^{3(upraveno)}

Ve spojitosti s odstředivou silou je nutné uvést i veličinu dostředivé zrychlení a_d , které vyjadřuje změnu rychlosti v čase a už podle názvu je patrné, že směřuje do středu bodu otáčení:

$$a_d = \frac{v^2}{r} = \omega^2 \cdot r.$$

Jednotkou zrychlení je $m \cdot s^{-2}$ a pokud tuto veličinu vydělíme gravitačním zrychlením $g = 9,81 \text{ m} \cdot s^{-2}$ získáváme běžně používanou veličinu gravitační přetížení označované písmenem G.

S těmito veličinami se v dopravním prostředku setkáváme například při průjezdu zatáčkou. Na řidiče působí toto gravitační přetížení násobkem jeho vlastní váhy. Například pokud bude řidič vážící 75 kg čelit přetížení 2G, na jeho tělo bude působit síla 150 kg. V běžném provozu při průjezdu zatáčkou jsou osobní vozidla schopna na řidiče vyvinout přetížení přibližně o velikosti 1G ale například vozy F1 díky svým technologiím dosahují při průjezdu zatáčkou na piloty přetížení až 6G. Až dvojnásobným hodnotám musí čelit piloti stíhacích letounů. Hodnota označovaná jako limitní pro těžké ublížení na zdraví nebo smrt je stanovena na 25G ale je známa situace kdy lidské tělo přežilo přetížení 200G.

1.2.3 Síly vazbové

Složky vazbových sil F^V nekonají pohyb, tvoří ideální vazbu.

1.2.4 Síly pracovní

S pracovními silami F^P se v oblasti dynamiky a zejména dynamiky vozidel setkáváme ve formě odporů. Jízdní odpory jsou síly, které působí proti pohybu vozidla. Celkový jízdní odpor se skládá z několika druhů odporů. Patří sem odpor valivý O_f , vzdušný O_v , stoupání O_s , zrychlení O_z , a pokud je za vozidlem připojen přívěs, tak i odpor přívěsu O_p . Tyto jízdní odpory musí být překonány hnací silou od motoru.

Valivý odpor

Mezi nejvýznamnější jízdní odpor, který ovlivní mé zkoušky, patří valivý odpor O_f , který vzniká valením pneumatiky po vozovce. Valivý odpor jednoho kola je znám ze vztahu:

$$O_f = \sum N_{ki} \cdot f_{ki},$$

kde: N_k je radiální reakce vozovky,

f_k je součinitel valivého odporu kola,

i je počet kol. ²

Za předpokladu že všechna kola na automobilu mají stejnou hodnotu součinitele valivého tření, vypočítáme valivý odpor ze vztahu:

$$O_f = f \cdot G$$

kde: f je součinitel valivého odporu,

G je gravitační tíha vozidla [N]. ²

Odpor vzduchu

Jízdní odpor, který rovněž ovlivní mé zkoušky a je znatelný zejména ve vyšších rychlostech je aerodynamický odpor O_v , který je znám ze vztahu:

$$O_v = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot c_w$$

kde: ρ je hustota vzduchu [$kg \cdot m^3$]

v je rychlost vozidla [$m \cdot s^{-1}$]

S je velikost čelní plochy automobilu [m^2]

c_w je součinitel aerodynamického odporu [1] ²

Odpor stoupání

Odpor stoupání vzniká při jízdě vozidla na podélném svahu. Jeho velikost určuje sinová složka tíhy vozidla. Kde G je celková tíha vozidla a úhel α je úhel, který svírá vodorovná rovina s rovinou vozovky. Velikost odporu stoupání je dána vztahem:

$$O_s = \pm G \cdot \sin \alpha,$$

kde znaménko plus platí pro vozidlo jedoucí do svahu (je odporem proti pohybu vozidla) a naopak znaménko mínus je pro vozidlo jedoucí ze svahu (napomáhá pohybu vozidla).

Odpor zrychlení

Setrvačný odpor vzniká při změně rychlosti jízdy vozidla. Při zrychlování vozidla působí protisměru jízdy, naopak při zpomalování po směru jízdy vozidla. Velikost setrvačného odporu je dána vztahem:

$$O_z = O_{zp} + O_{zr},$$

a skládá se ze dvou složek:

- z odporu zrychlení posuvné části o hmotnost

$$O_{zp} = m \cdot a,$$

kde: m je hmotnost vozidla

a je zrychlení vozidla

- z odporu zrychlení otáčejících se částí

$$O_{zr} = \frac{M_r}{r_d},$$

kde: M_r je moment rotačních částí vozidla,

r_dje dynamický poloměr kola. ²

1.3 Dynamika vozidel

Dynamika vozidel je odvětví dynamiky primárně založené na klasické mechanice, ale zahrnuje také fyziku, elektrotechniku, chemii, komunikace atd. U automobilových vozidel je především kladen důraz na styk pneumatiky s podložím. Dynamika vozidel zahrnuje spolupůsobení:

- řidiče,
- vozidla,
- nákladu,
- prostředí.

Dynamika vozidel se zabývá především:

- zlepšení aktivní bezpečnosti a pohodlí jízdy
- redukce nerovností přenášených z vozovky na vůz

Řidič má možnost ovládat vozidlo ve dvou směrech, v podélném a bočním. V bočním směru se jedná o zásah na:

- volantu,

zatímco v podélném směru řidič ovlivňuje pohyb:

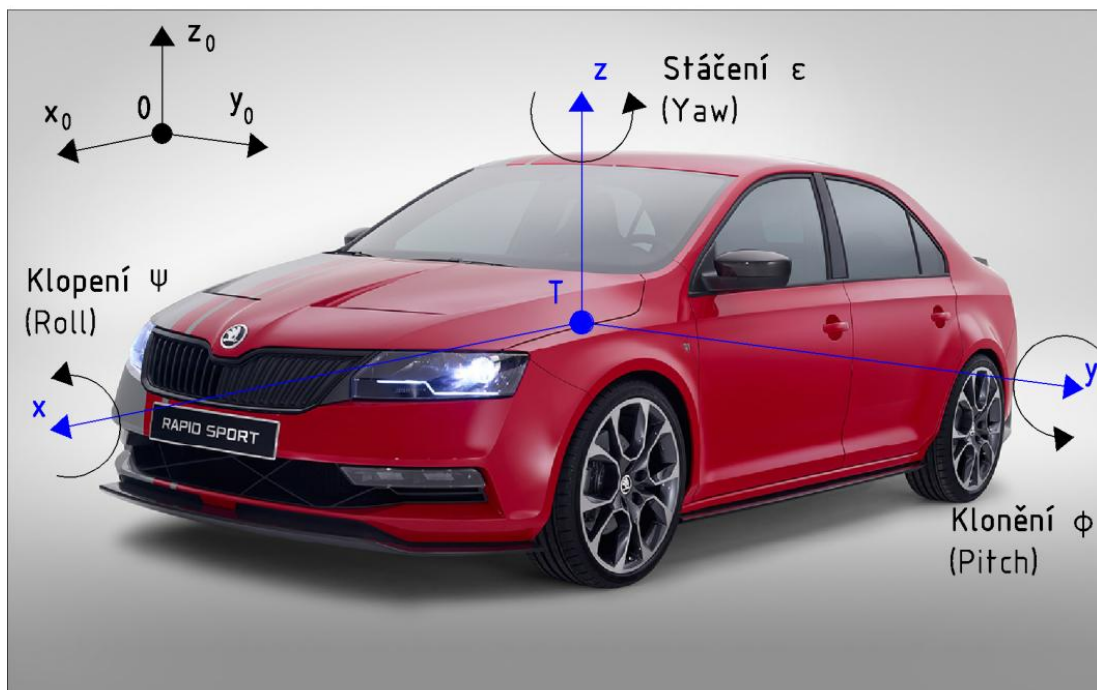
- sešlápnutím pedálu
 - spojky
 - brzdy
 - plynu
- řazením.

1.3.1 Referenční soustava

Pro pozorování tělesa je třeba znát souřadnicovou soustavu, pomocí níž můžeme pohyb mapovat. Tato souřadnicová soustava je popsána normou ISO 8855:2011.

To kolik pohybů může těleso vykonávat, určují jeho stupně volnosti. Stupně volnosti označují základní směry posunu a směry otáčení, kterými se těleso může posouvat a otáčet.

V ploše má těleso 3 stupně volnosti, posun ve směru os x , y a z . V prostoru je stupňů volnosti 6 a to z toho důvodu, že těleso může rotovat okolo všech tří os, které má.



Obrázek 2 – Referenční soustava¹⁴

Na obrázku 2 pozorujeme vozidlo jako těleso v prostoru. Jeho těžištěm prochází 3 osy (modrá barva), ve kterých koná tyto pohyby:

- Podélný pohyb (škubání) – osa x ,
- boční pohyb (vybočování) – osa y ,
- svislý pohyb (nadnášení) – osa z .

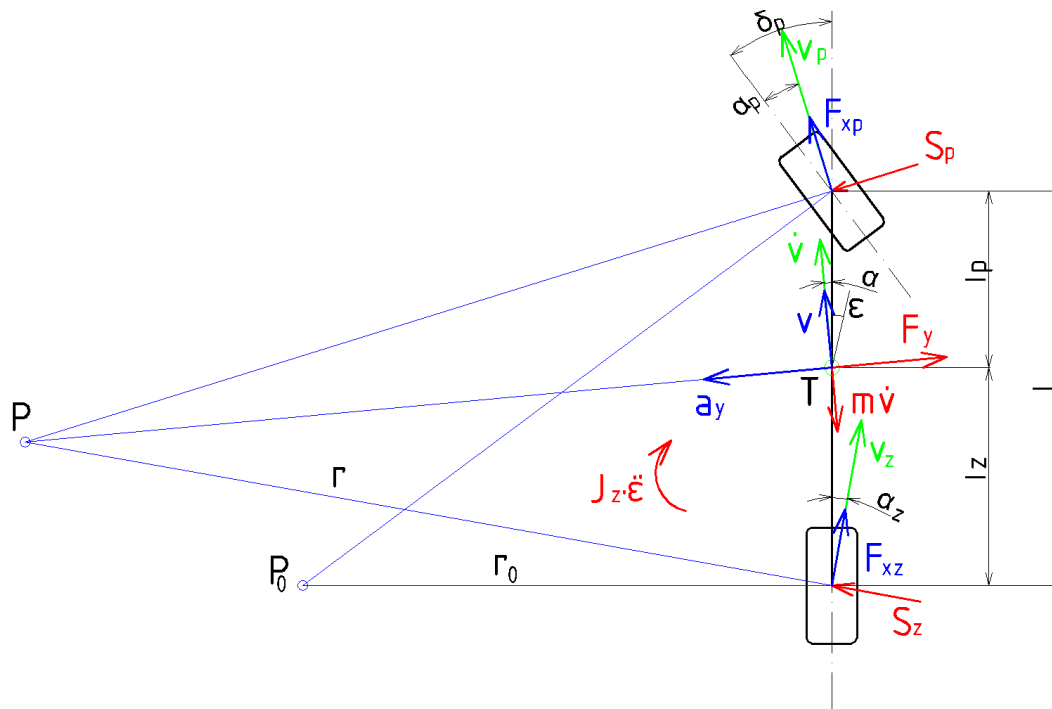
Aby byla splněna podmínka 6 ti stupňů volnosti tělesa v prostoru, musí ještě platit rotační pohyby:

- Klopení Ψ – osa x ,
- klonění Φ – osa y ,
- stáčení \mathcal{E} – osa z .

1.4 Rozbor sil působících na vozidlo při průjezdu směrovým obloukem

Jedním ze základních principů popisu vozidla a sil na něj působících při průjezdu zatáčkou je jednostopý model vozidla.

Jednostopý model vozidla představuje zjednodušený půdorys automobilu, kde jsou kola přední i zadní nápravy modifikována v jedno. Vlastnosti pneumatik na přední i zadní nápravě se sečtou a vytvoří tak bod, ve kterém působí síly, které by jinak působily na obě kola automobilu. Jednostopý model automobilu je zobrazen na obrázku (3).



Obrázek 3 – Jednostopý model automobilu¹⁰

Jak je vidět na obrázku 3, zobrazené vozidlo zatáčí doleva a vinou tohoto manévru dochází například k vzniku bočních sil, vzniku stáčivých momentů nebo k zvětšení úchylek pneumatik. V případě ideálně tuhých pneumatik a ideálního přenosu sil na vozovku by nedocházelo k vzniku směrových úchylek a automobil by se otáčel okolo bodu P_0 . Jedná se o ideální případ, kterému se můžeme přiblížit například nahrazením pneumatik bruslemi a jízdou po ledě. V reálném provozu je mnohem důležitější bod P , který se nazývá pól pohybu. Jedná se průsečík normál úchytky přední a zadní nápravy. Vozidlo se v daný okamžik pohybuje právě okolo tohoto bodu, který není pevný, ale cestuje společně s vozidlem.

Při správně vyobrazených silách je možné z jednostopého modelu získat pohybové rovnice pro jednotlivé složky pohybu. Pohyb v podélném směru ve směru osy x odpovídá rovnici:

$$x : m \cdot \dot{v} \cdot \cos \alpha - mv(\dot{\varepsilon} + \dot{\alpha}) \sin \alpha = -S_p \sin(\delta_p - \alpha_p) + F_{xp} \cos(\delta_p - \alpha_p) - S_z \sin \alpha_z + F_{xz} \cos \alpha_z. {}^{10}$$

Obdobným způsobem se sestaví rovnice pro boční složky ve směru osy y:

$$y : m \cdot \dot{v} \cdot \sin \alpha - mv(\dot{\varepsilon} + \dot{\alpha}) \cos \alpha = -S_p \cos(\delta_p - \alpha_p) + F_{xp} \sin(\delta_p - \alpha_p) - S_z \cos \alpha_z + F_{xz} \sin \alpha_z + F_y$$

10

Stáčivému momentu kolem svislé osy z pak odpovídá rovnice:

$$M_{zT} : J_z \ddot{\varepsilon} = S_p \cdot l_p \cdot \cos(\delta_p - \alpha_p) - S_z \cdot l_z \cdot \cos \alpha_z + F_{xp} \cdot l_p \cdot \sin(\delta_p - \alpha_p) - F_{xz} \cdot l_z \cdot \sin \alpha_z. {}^{10}$$

2 Vliv boční dynamiky na bezpečnost

Při přímé jízdě mají boční síly minimální vliv na chování vozidla. Tyto síly nejsou zanedbatelné, protože i při přímé jízdě na pneumatikách vznikají směrové úchytky, které mohou mít vliv na bezpečnost jízdy. Mnohem zajímavější situací ale z hlediska boční dynamiky představuje jízda v zatáčce. Zejména při vyšších rychlostech se zde projevuje jízdní chování automobilu a tím i vlastnosti vozidla na bezpečnost jízdy.

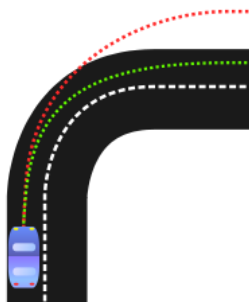
2.1 Jízdní chování vozidel

Jízdním chováním se rozumí odezva automobilu na vstup volantu. Faktory ovlivňující jízdní chování jsou například poloha těžiště automobilu, vlastnosti pneumatik nebo také přítomnost aktivních prvků bezpečnosti. Jízdní chování dělíme na 3 kategorie:

- nedotáčivost
- neutrální chování
- přetáčivost

2.1.1 Nedotáčivost

Nedotáčivost (Obrázek 4) je vlastnost vozidla, při které automobil opisuje větší poloměr jízdy, než který je požadován natočením volantu. Přední kola automobilu nepřenášejí na vozovku požadovanou velikost řídicích sil. Tato vlastnost je velmi častá u vozidel s motorem v přední části. Jedná se o stabilní stav, jelikož automobil nejde do smyku.



Obrázek 4 - Nedotáčivost¹²

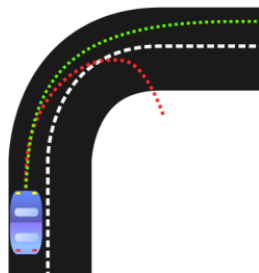
2.1.2 Neutrální chování

Ideálním stavem pro většinu jízdních případů je neutrální chování automobilu. Automobil přesně reaguje na natočení volantu, aniž by došlo k prokluzu předních kol nebo smyku vozidla. Tomuto stavu se snaží co nejvíce přiblížit prvky aktivní bezpečnosti včasným

rozpoznáním nebezpečné situace. Nejčastěji se s neutrálním chováním setkáváme u vozidel s motorem uprostřed.

2.1.3 Přetáčivost

Přetáčivost (Obrázek 5) je nestabilní stav vozidla, tudíž nejnebezpečnější ze všech 3 druhů jízdního chování. Při tomto stavu, ke kterému dochází zejména u vozidel s motorem a tedy i těžištěm v zadní části automobilu, dochází ke smyku zadních kol a přetočení automobilu. Vozidlo se stává neovladatelné a hrozí velmi nebezpečné boční nárazy.



Obrázek 5 - Přetáčivost¹³

2.1.4 Určení jízdního chování automobilu

Vychází se z rozdílu směrových úchylek, kdy dojde k rozdílu úchylky na přední a zadní nápravě:

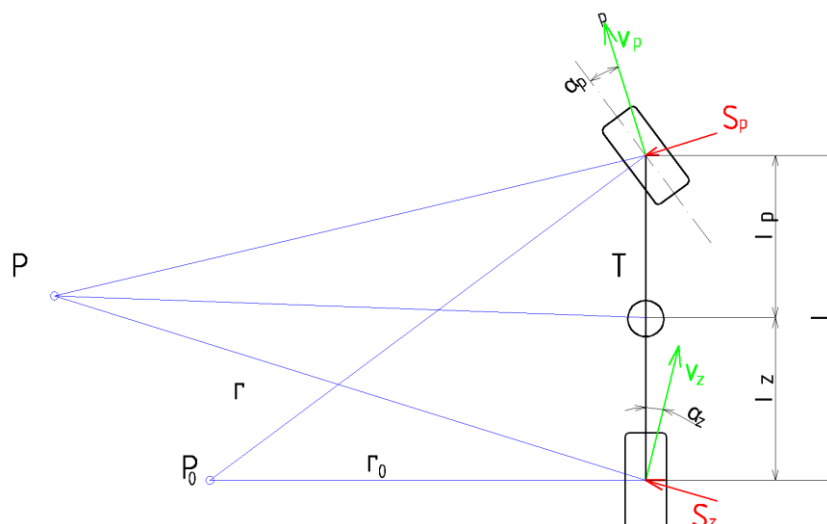
$$\Delta\alpha = \alpha_p - \alpha_z = \frac{m}{l} \cdot \left(\frac{l_z}{c_{ap}} - \frac{l_p}{c_{az}} \right) \cdot \frac{v^2}{r},$$

kde: c_{ap} je směrová úchylka přední nápravy,

c_{az} je směrová úchylka zadní nápravy.¹⁰

V případě kdy je pól pohybu na úrovni před těžištěm vozidla (Obrázek 6), můžeme předpokládat, že vozidlo bude nedotáčivé. V tomto případě bude rozdíl směrových úchylek nabývat kladných hodnot a bude tedy platit podmínka:

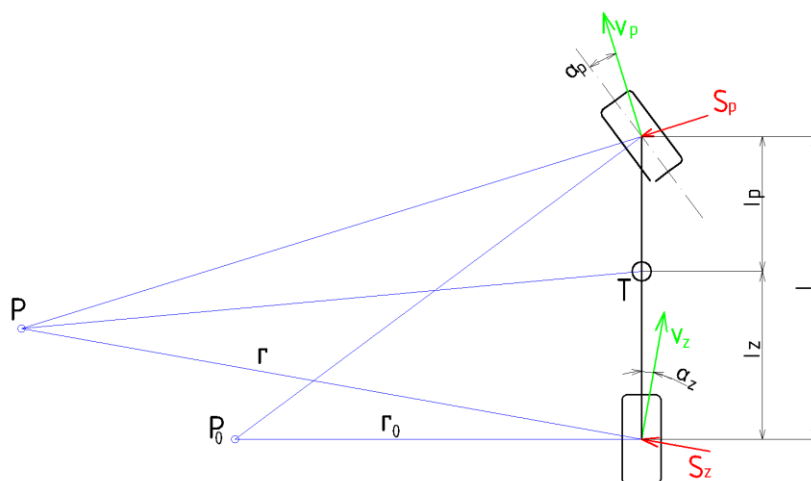
$$\Delta\alpha = \alpha_p - \alpha_z > 0.$$



Obrázek 6 – Jednostopý nedotáčivý model^{10(upraveno)}

V opačném případě, kdy má vozidlo pól pohybu až za úrovní těžiště, předpokládáme, že má vozidlo přetáčivý charakter (Obrázek 7). Pro tento případ tedy musí rozdíl směrových úchylek nabývat hodnot záporných a bude platit podmínka:

$$\Delta\alpha = \alpha_p - \alpha_z < 0.$$



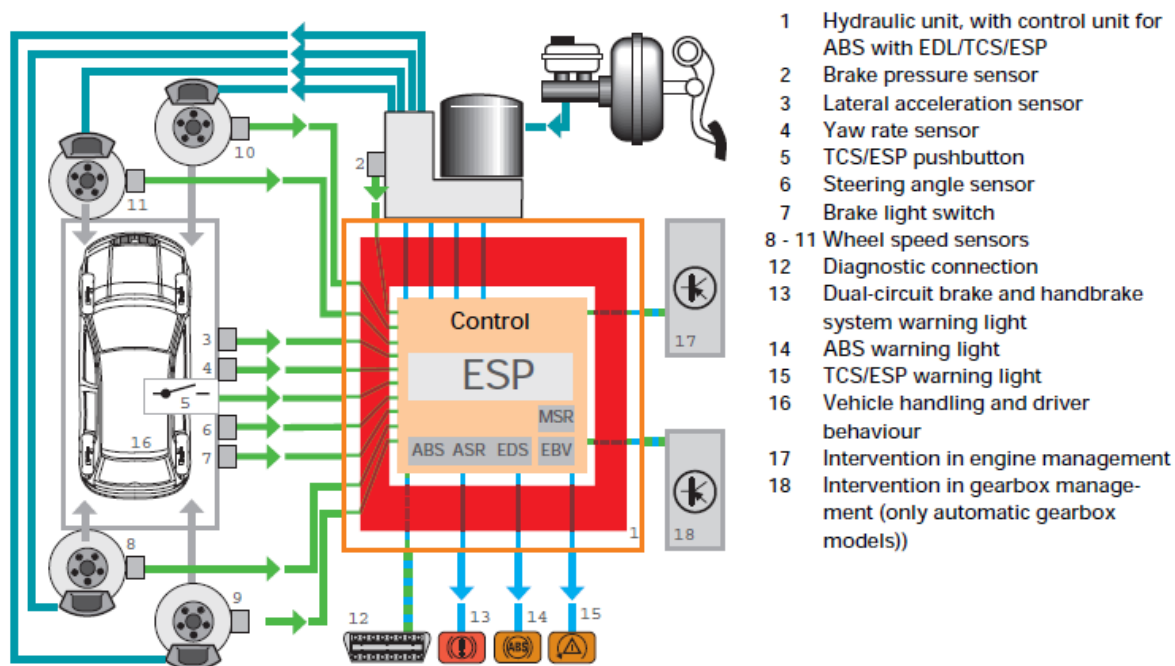
Obrázek 7 – Jednostopý přetáčivý model^{10(upraveno)}

2.2 Aktivní systémy mající vliv na jízdní chování vozidla

Prvky aktivní bezpečnosti, mezi které se řadí zejména elektronické systémy regulující průběh jízdy vozidla v oblouku, mají zásadní význam pro bezpečnost jízdy.

2.2.1 ESP

V současné době už povinný systém pro všechna nová vozidla, který přímo ovlivňující riziko smyku je ESP (Electronic stability program). Tento systém je navržen tak, aby řidiči asistoval při prudkých manévrech, ale i při vysoké rychlosti v zatáče.

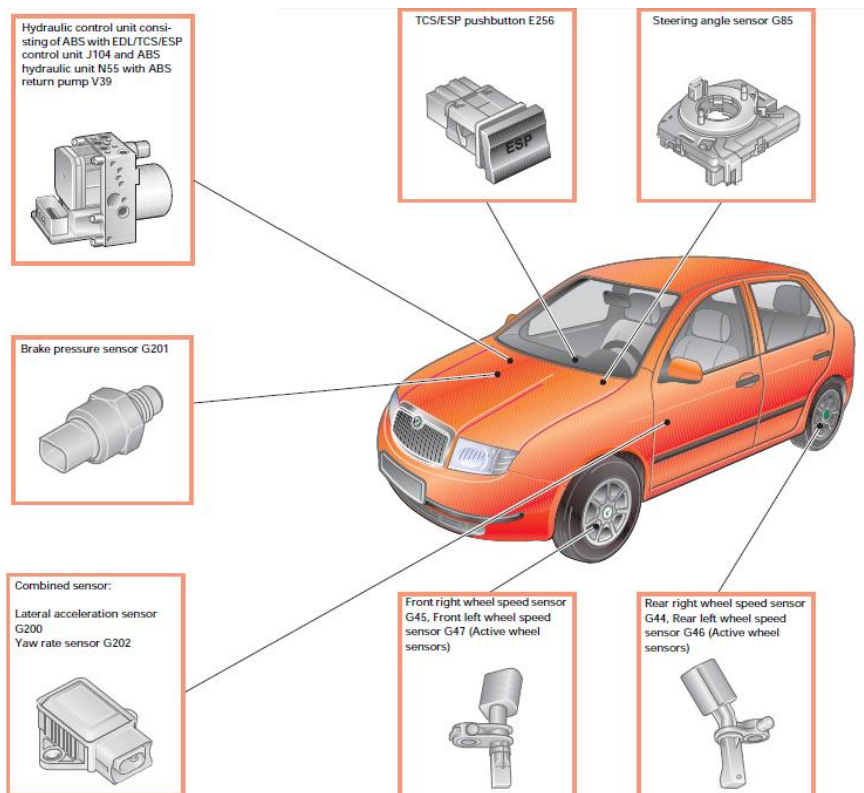


Obrázek 8 – Model ESP⁸

ESP (Obrázek 8) vyhodnocuje 25x za minutu rychlosti jednotlivých kol automobilu a pokud vyhodnotí riziko nestabilního chování, reguluje příslušné rychlosti kol včasným zásahem. Díky tomu je zajištěno, že každá pneumatika přenáší na vozovku maximální možné síly. Aby systém pracoval správně, musí jeho jednotka zaznamenávat a vyhodnocovat následující veličiny:

- Rychlost jednotlivých kol
- Krouticí moment motoru
- Otáčky motoru
- Natočení volantu
- Dostředivé zrychlení

Tyto veličiny jsou průběžně zaznamenávány senzory zabudovanými v automobilu. Příklad rozmístění čidel u vozu Škoda Fabia je na obrázku 9.



Obrázek 9 – Komponenty ESP⁸

3 Testování boční dynamiky

Testování stability a boční dynamiky je důležitou součástí aktivní bezpečnosti vozidel. Máme k dispozici 2 varianty zkoušení boční dynamiky:

- reálné jízdny zkoušky
- počítačové simulace

3.1 Jízdny zkoušky

Jízdny zkoušky jsou reálné experimenty, kterými získáme reálná data z měřících přístrojů. Oproti počítačovým simulacím je nutné pečlivě provést přípravu experimentu tak, aby se dané hodnoty správně zaznamenaly a test se následně mohl vyhodnotit. K hodnocení jízdny zkoušek můžeme přihlížet třemi způsoby:

- čistě subjektivní hodnocení
- subjektivní hodnocení
- objektivní hodnocení

3.1.1 Čistě subjektivní hodnocení

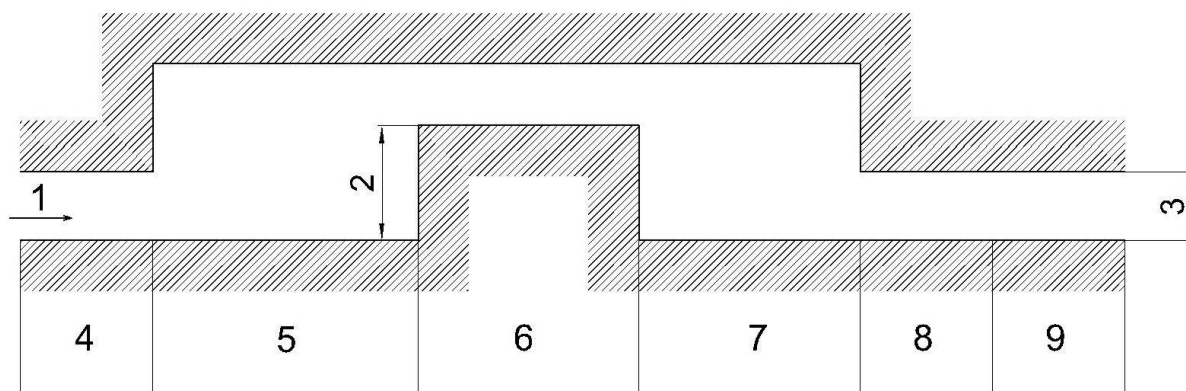
Při čistě subjektivním hodnocení vozidla má rozhodující slovo řidič. Tato metoda je založena na zkušenostech, znalostech a citu pilota, který si během jízdny zkoušky vozidlo otestuje a následně dle svého uvážení ohodnotí. Tato metoda se tedy nedá jednoznačně považovat za nejpřesnější.

3.1.2 Subjektivní hodnocení

U subjektivní zkoušky zkušební řidič s vozidlem projíždí zadanou dráhu, přičemž vozidlo nesmí vybočit přes vodící kužely. Ovladatelnost je hodnocena podle rychlosti jízdy, vzdálenosti značek a dalších veličin. Příkladem této metody je například známá jízdny zkouška předjížděcí manévry což je dynamický proces spočívající v rychlém řízení vozu z pruhu do pruhu a zpět bez extrémních hranic. Rychlost při zkoušce simuluje rychlost mimo obec, jedná se tedy o zkoušku při vyšších rychlostech. ISO norma uvádí 2 způsoby testu v závislosti na rychlosti:

- Při rychlosti $80 \pm 3 \text{ km/h}$ (doporučená)
- Při maximální možné rychlosti

Cílem zkoušky je projet měřený úsek (Obrázek 10) o rozměrech (Tabulka 1) v co nejkratším čase při nejsnadnějším provedení.



Obrázek 10 - Zkušební dráha pro předjížděcí manévr¹¹(upraveno)

- | | | |
|-------------------|-----------|-----------|
| 1) Směr jízdy | 4) Úsek 1 | 7) Úsek 4 |
| 2) Odsazení pruhu | 5) Úsek 2 | 8) Úsek 5 |
| 3) Šířka | 6) Úsek 3 | 9) Úsek 6 |

Úsek	Délka	Odsazení pruhu	Šířka
1	15	-	1,1 x šířka vozidla + 0,25
2	30	-	-
3	25	3,5	1,2 x šířka vozidla + 0,25
4	25	-	-
5	15	-	1,3 x šířka vozidla + 0,25
6	15	-	1,3 x šířka vozidla + 0,25

Tabulka 1 - Rozměry dráhy¹¹

Ve výsledcích testů se porovnává rychlost průjezdů vozidla úsekem. Pro vyhodnocení je třeba provést 15 jízd, z čehož musí být alespoň 5 jízd úspěšných.

3.1.3 Objektivní hodnocení

Objektivní zkoušky eliminují zásahy řidiče do jízdni zkoušky. Řidič je ve voze přítomen, ale pouze pro obsluhu testovacích systémů. Vlastnosti vozidla se posuzují měřením odezev vozidla na definované úkony. Mezi objektivní zkoušky patří:

- Brzdění při přímé jízdě
- Ustálené zatáčení
- Zatáčení přes ojedinělou nerovnost
- Skokové natočení volantu
- Impulsové natočení volantu

- Harmonické natočení volantu
- Změna hnací síly při zatažení
- Brzdění při zatažení
- Citlivost na boční vítr při zafixovaném volantu⁴

3.2 Jízdní zkoušky z hlediska boční dynamiky

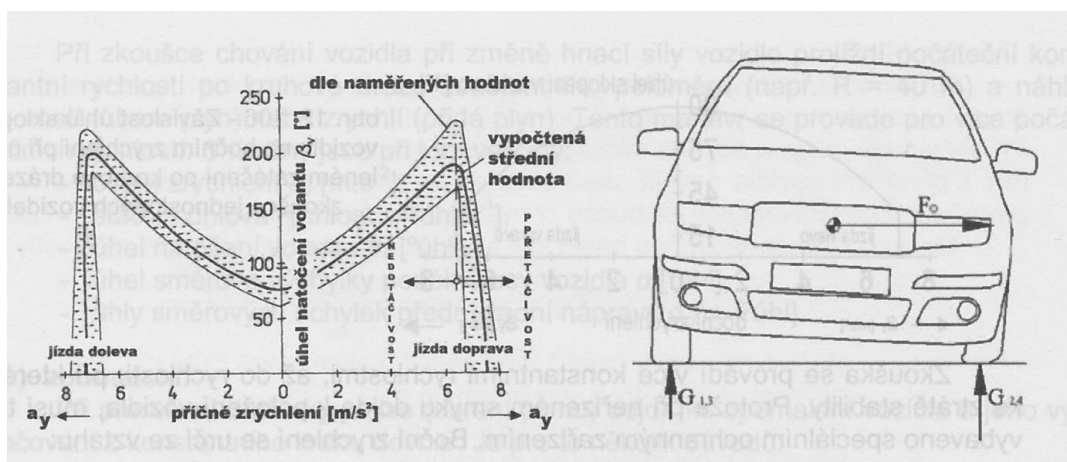
V této kapitole blíže uvedu a popíšu jízdní zkoušky, které se provádějí na zjištění boční dynamiky vozidel. Mezi nejdůležitější zkoušky patří:

- Ustálená jízda v kruhu
- Fishhook test
- CBV

3.2.1 Ustálená jízda v kruhu - ISO 4138:2012

Tato zkouška dle normy ISO 4138:2012 je jednou z nejstarších metod pro zkoušení ovladatelnosti a boční dynamiky. Jízdní chování automobilu charakterizuje úhel natočení volantu β_V , úhel směrové úchyly těžiště α , úhly směrových úchylek náprav α_p a α_z , úhel klopení karoserie ψ , a moment na volantu M_V . Jízdní chování se následně posuzuje podle závislosti úhlu natočení na bočním zrychlení.

Při zkoušce jede vozidlo stálou rychlostí po kruhové dráze daného poloměru. Zkouška se provádí konstantní rychlostí a tato rychlost je zvyšuje, až do rychlosti, která hraničí se ztrátou stability. Jedním z výstupů zkoušky je graf závislosti úhlu natočení volantu na bočním zrychlení a zkoumání reakcí kol působících na vozidlo (Obrázek 11).



Obrázek 11 – Závislost bočního zrychlení na úhlu natočení volantu a rozdílnost sil působících na nápravu²

3.2.2 Fishhook test

Fishhook test, v překladu “test rybí háček”, představuje jeden z hlavních testů boční dynamiky vozidel. Tento test je prováděn hlavně organizací NHTSA, severoamerické odvětví NCAP. Jedná se o manévr, při kterém dojde 2x k změně směru jízdy a velmi často může dojít k převrácení automobilu. Tento test je důležitý zejména z toho důvodu, že trend současného automobilového průmyslu zásobuje trh vozidly s vyšším těžištěm (SUV, MPV) a zde je riziko převrácení automobilu vyšší než u běžných vozů.

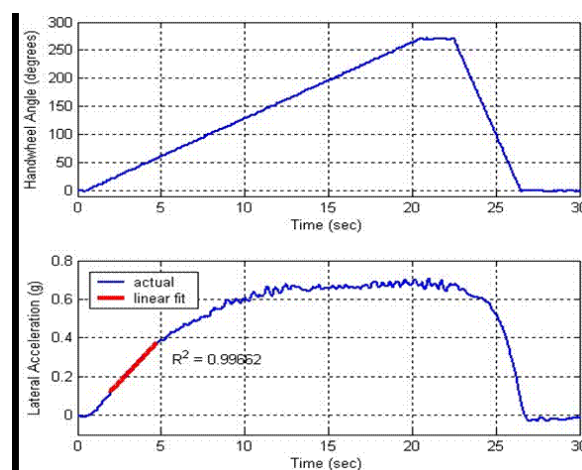
Tento jízdní test je složen ze dvou částí:

- Manévr 1 - Pomalý náběh úhlu zatačení
- Manévr 2 - Fishhook test

Manévr 1

Tento manévr se provádí za cílem zjištění vlastností dynamiky každého testovaného vozidla. Při tomto testu jede vozidlo stálou rychlostí v a zvyšuje se úhel natočení volantu β_V . Tímto manévrem se zjistí úhel natočení volantu, který vyvine na vozidlo přetížení 0,3g. Tento úhel se zaznamená a následně je využit pro druhou část testu.

Vozidlo jede po přímé dráze rychlostí 50mil/h (přibližně 80 km/h) a volant je otáčen z pozice 0° do pozice 270° rychlostí $13,5^\circ$ za sekundu. V momentě kdy je volant v pozici 270° je tato pozice udržována 2 sekundy a následně je volant vrácen do pozice 0° . Manévr je proveden 3x na pravou i levou stranu za účelem kalibrace přístrojů.



Obrázek 12 – Průběh pomalého náběhu úhlu zatačení ⁷

Manévr 2

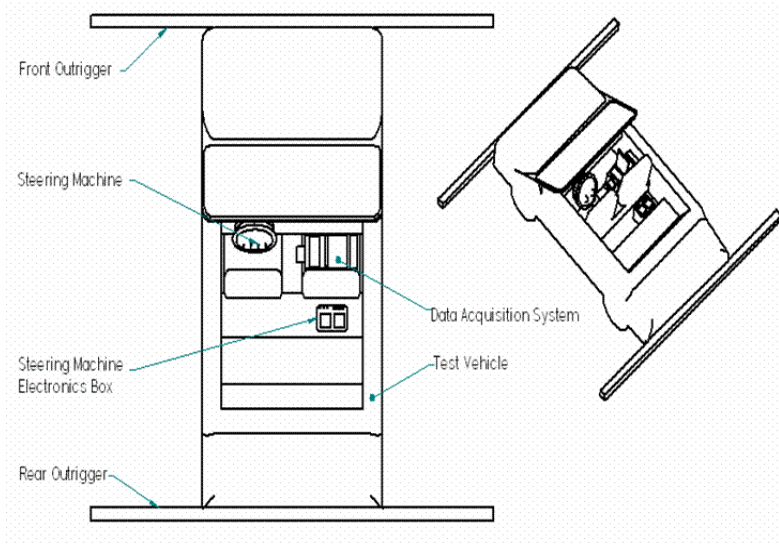
Fishhook test je závislý na naměřených datech z Manévru 1. Úhly natočení volantu pro Fishhook test jsou vypočteny z hodnot bočního zrychlení a úhlu na točení volantu, které byly získány ze série 6 - ti testů Pomalý náběh natočení volantu. Z každého provedeného pokusu se vyjme úhel natočení volantu $\beta_{V(0,3g)}$ odpovídající hodnotě bočního zrychlení 0,3 g a jejich absolutní hodnoty se zprůměrují ve výslednou hodnotu $\beta_{V(0,3g),overall}$.

Hodnota úhlu natočení volantu se následně vypočte vynásobením $\beta_{V(0,3g),overall}$ pomocí “konstanty řízení”, která odpovídá hodnotě 6,5. Následně úhel natočení volantu pro Fishhook odpovídá vztahu:

$$\beta_{V(Fishhook)} = 6,5 \times \beta_{V(0,3g),overall}^7$$

Rychlost jízdní zkoušky při prvním pokusu je 35 mil/h (přibližně 56,33 km/h) a je zvyšována na hodnoty 40, 45, 47,5 a 50 mil/h.

Vozidlo je při testu kromě řídicího robota a zaznamenávacího zařízení vybaveno tzv. bezpečnostními opěrami (Obrázek 13). Tyto opěry, které jsou umístěny v přední i zadní části vozidla detekují kontakt s vozovkou.



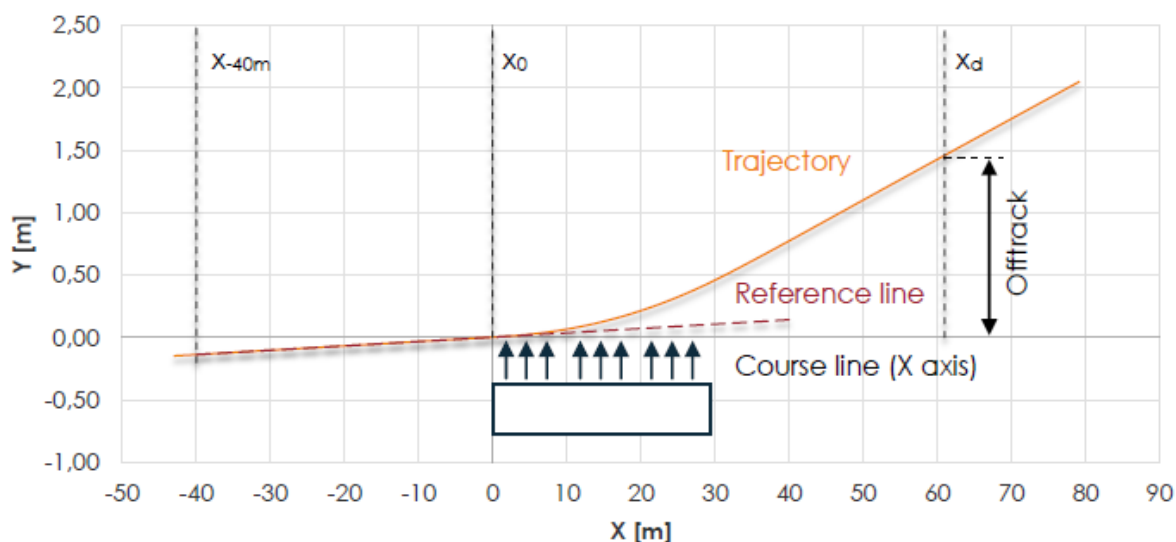
Obrázek 13 – Bezpečnostní opěry - schéma ⁷



Obrázek 14 – Bezpečnostní opěry při reálném testu¹⁵

3.2.3 Citlivost na boční vítr – zkouška CBV

Princip této zkoušky je založen na průjezdu vozidla napříč bočním poryvem větru vyvolaným řadou ventilátorů. Během testu je sledováno vybočení vozidla v daném čase od původního přímého směru. Pro zvýšení objektivity se tato zkouška provádí bez řidiče a volant je upevněn do statické polohy. Míru vybočení je možné měřit přímo, nebo ji nepřímě dopočítat z dalších veličin popisující příčný pohyb vozidla. Základní schéma, podle kterého probíhá zkouška CBV, je zobrazeno na Obrázku 15.



Obrázek 15 - Schéma CBV⁹

Dle normy ISO 12021 je podmínkou pro úspěšné provedení zkoušky vybočení na úseku mezi body x_{-40} a x_0 maximálně 2,5 %, čemuž odpovídá 1m. Tato hodnota může ale být velmi nepřesná (až z 50ti %) a mnohem vhodnější je použít integrální hodnoty bočního zrychlení a stáčivé rychlosti, které mnohem méně závisí na úhlu mezi Course line a Reference line. Tyto hodnoty se lehce získají z akcelerometrů a ze snímače úhlové rychlosti.

3.3 Počítačové simulace

Počítačové simulace mají oproti reálným jízdám několik výhod. Naplánované zkoušky je možné provést opakovaně za naprosto stejných podmínek a docílit tak velmi přesných dat. Další výhodou je ve spojitosti s dlouhodobými zkouškami, například zkoušky únavy materiálu. V počítačových simulacích se tento proces může několikanásobně urychlit a výrazně ovlivnit průběh vývoje. Neposlední výhodou je ušetření finančních zdrojů při destrukčních zkouškách komponentů nebo i celých vozidel.

3.3.1 CarMaker

Jedním z vhodných softwarů pro simulaci jízdám je software CarMaker od společnosti IPG. Tento software umožňuje plánovat a provádět jízdám manévry jednoho nebo i více automobilů, zjišťovat jejich jízdám vlastnosti anebo například simulovat různé jízdám stavy vozidel.

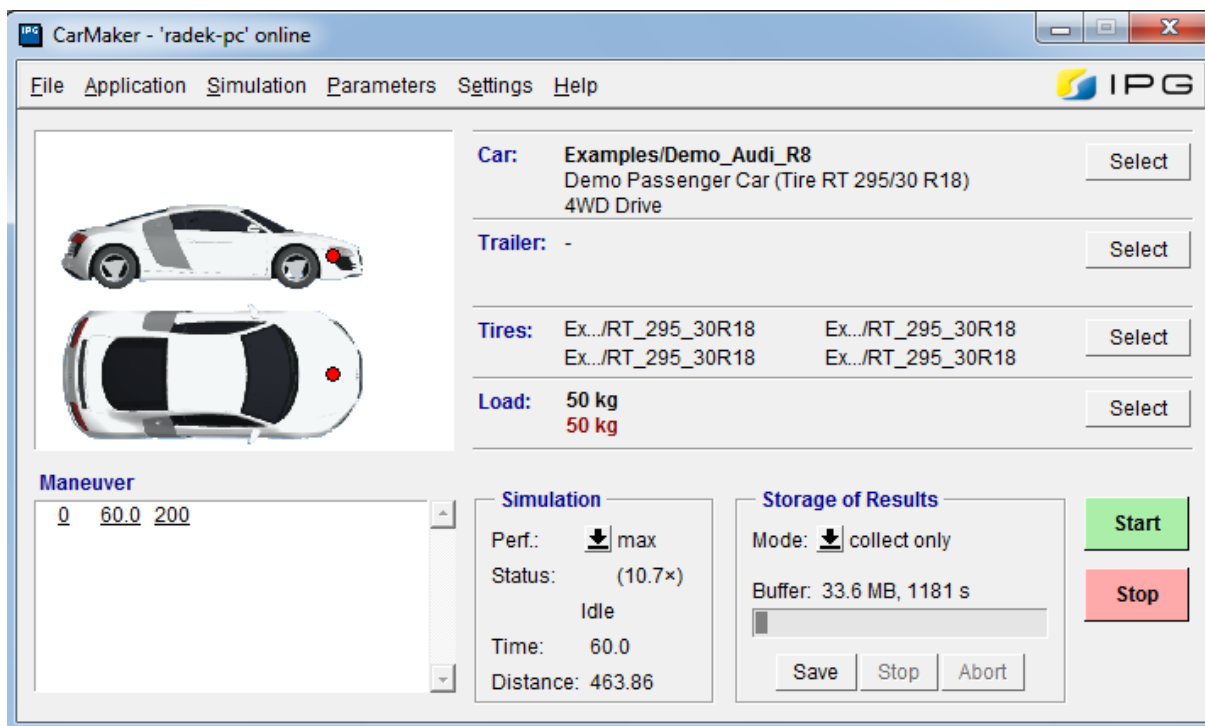
Nejdůležitější parametry potřebné k tomu, aby bylo možné spustit jízdám zkoušku, jsou:

- Vozidlo
- Dráha
- Manévr

Dále je možné nastavit také doplňkové parametry, které nejsou ovšem programem vyžadovány pro spuštění simulace. Řadí se mezi ně:

- Náklad automobilu
- Přívěs
- Pneumatiky
- Chování řidiče
- a další.

Prostředí Car makeru je zobrazeno na obrázku 16. Všechny potřebné parametry je možné nastavit v panelu Parameters. Ve spodní části obrázku je v okně Simulation možné nastavit rychlost simulace, která zejména u dlouhotrvajících zkoušek ušetří velké množství času.

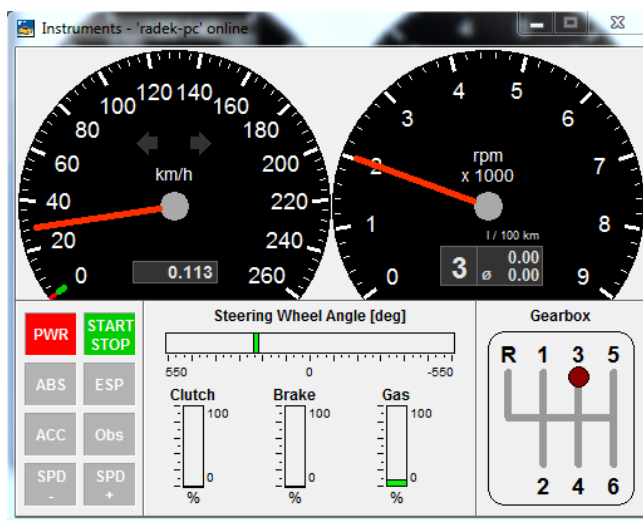


Obrázek 16 – Prostředí CarMakeru

Na obrázcích 17 a 18 jsou zobrazeny okna, ve kterých je možné sledovat průběh a správnost simulace a jízdního manévru.



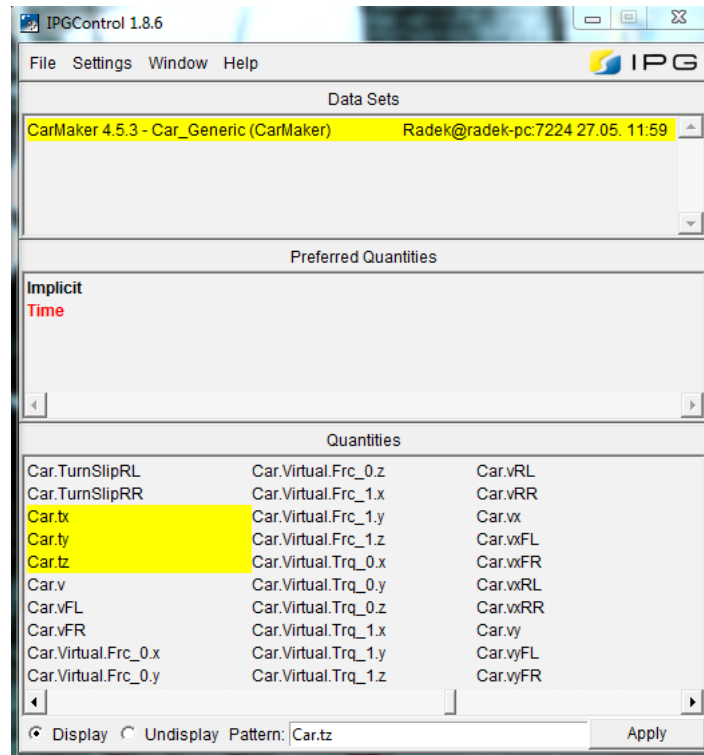
Obrázek 17 - IPGMovie



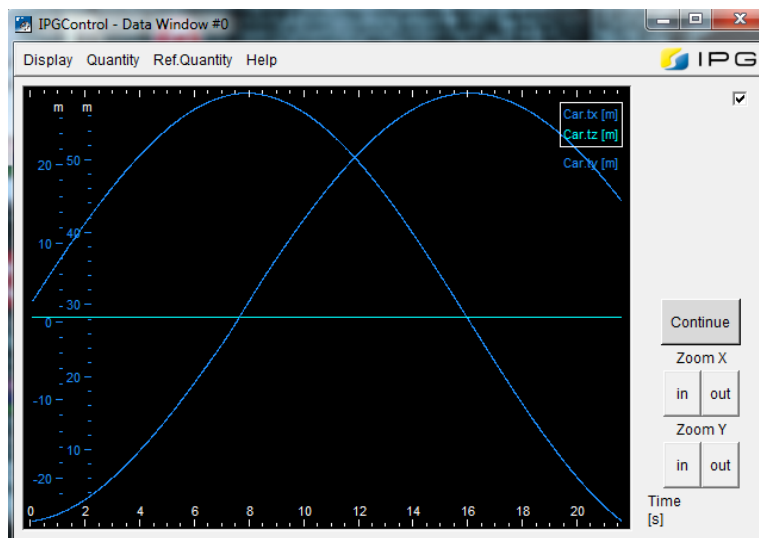
Obrázek 18 - Instruments

Mezi nejdůležitější panel z hlediska záznamu výsledků simulace patří IPGControl (Obrázky 19 a 20). Pomocí toho panelu si lze vybrat sledované veličiny v sekci Quantities a současně se

simulací sledovat průběh zaznamenávání v okně Data Window. Získané výsledky se následně dají exportovat například do formátu .xls.



Obrázek 19 - Výběr sledovaných veličin



Obrázek 20 - Grafické zobrazení

4 Popis a vyhodnocení zkoušky na FD

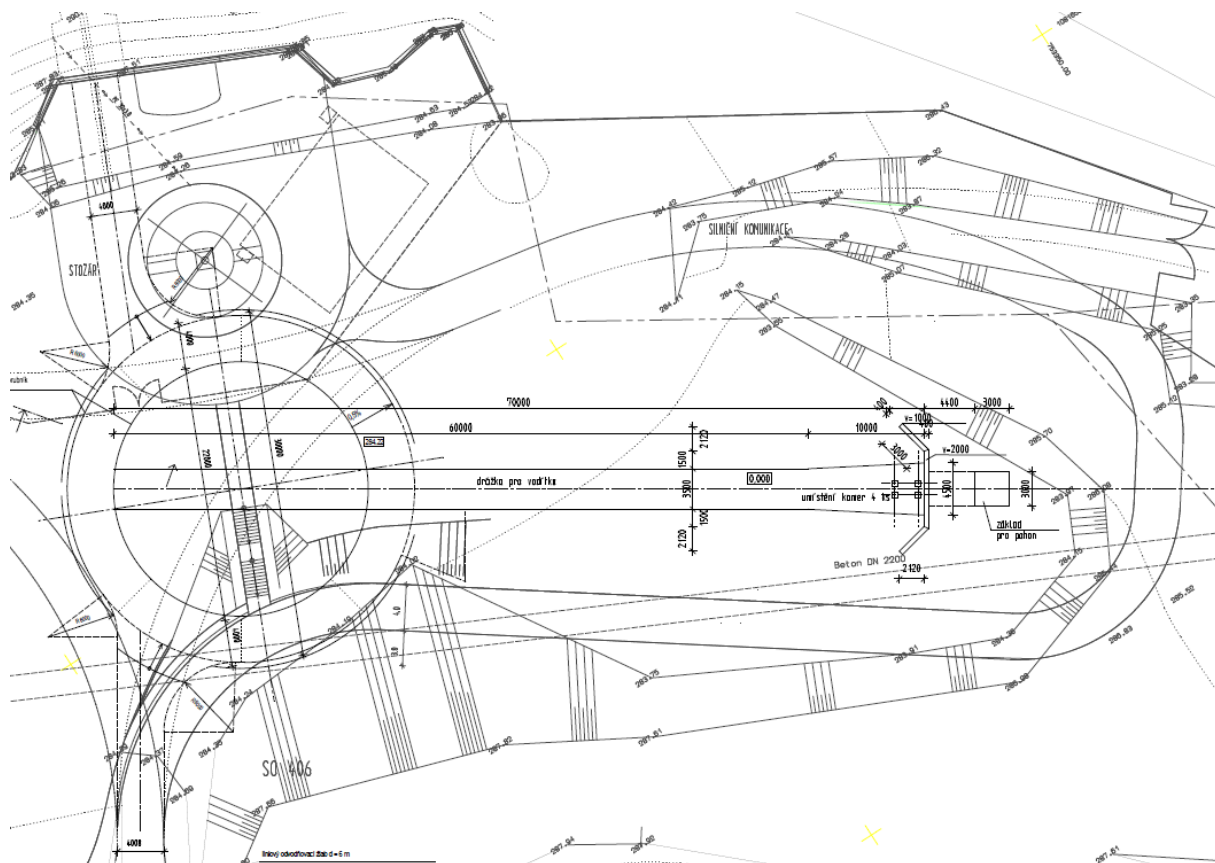
Dne 29.7.2014 byly na Štoly Josef provedeny jízdní zkoušky. Během těchto zkoušek byly testovány 3 automobily. Jednalo se o Škodu Rapid, Škodu Octavii II. generace a BMW 320d touring.

4.1 Popis jízdních zkoušek

Dohromady bylo provedeno 5 variant jízdních zkoušek s třemi modely automobilů.

4.1.1 Jízdní plocha

Jako jízdní plocha byl využit areál u Štoly Josef spadající pod ČVUT. Před vjezdem do štoly byla vybudována pojízdní plocha o průměru 30 metrů a šířkou jízdního pásu 4 metry.



Obrázek 21 – Půdorys jízdní dráhy ¹⁹

Na této jízdní dráze (Obrázek 21) byla pro daný experiment připevněna příčná překážka, přes kterou automobily přejížděly. Jednalo se o lať (Obrázek 22 a 23) o rozměrech 30x50 mm pevně připevněnou k jízdní dráze po celé šířce jízdního pruhu.



Obrázek 22 - Lať



Obrázek 23 - Lať

4.2 Jízdní zkoušky

Naplánováno a provedeno bylo celkem 5 variant jízdních zkoušek a všechny zkoušky byly provedeny v několika variantách rychlostí:

- Jízda v kruhu s vozidlem Škodou Rapid
 - 10 km/h
 - 20 km/h
 - 30 km/h
- Jízda v kruhu s vozidlem Škoda Octavia
 - 10 km/h
 - 20 km/h
 - 30 km/h
- Jízda v kruhu s vozidlem Škoda Octavia s naloženým zavazadlovým prostorem
 - 10 km/h
 - 20 km/h
 - 30 km/h
- Jízda v kruhu s vozidlem Škoda Octavia s přívěsem, na kterém byla Škoda Rapid
 - 10 km/h
 - 20 km/h
 - 28 km/h
- Jízda v kruhu s vozidlem BMW 320d Touring
 - 10 km/h
 - 20 km/h
 - 30 km/h

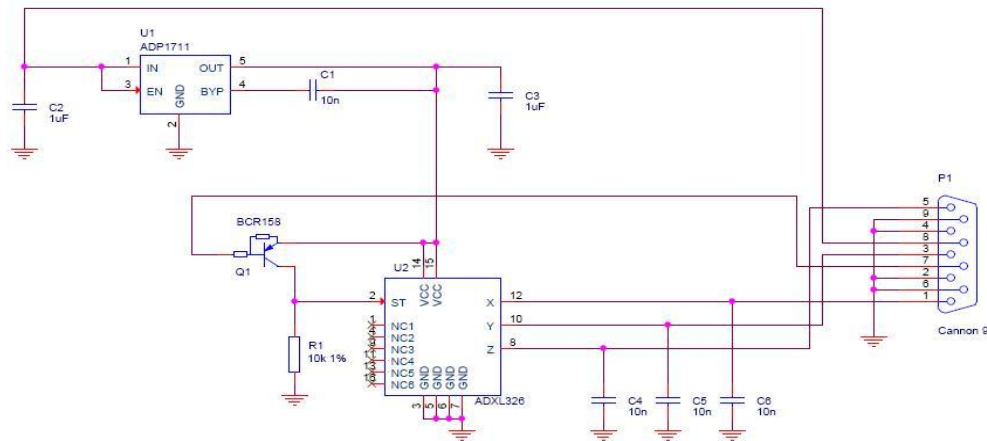
- 37 km/h

4.3 Měřící zařízení

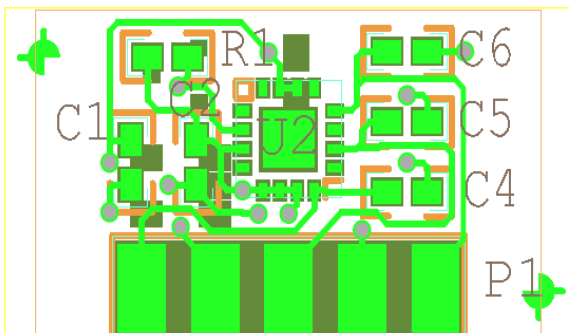
Během jízdních zkoušek byly testovány reakce automobilu na ustálenou jízdu v kruhu. Každé vozidlo bylo osazeno třemi akcelerometry s citlivostí 2 g a ty snímaly zrychlení ve 3 osách. Celý průběh zkoušek se zaznamenával pomocí hardwaru CopactRio a softwaru LabView.

4.3.1 Akcelerometry

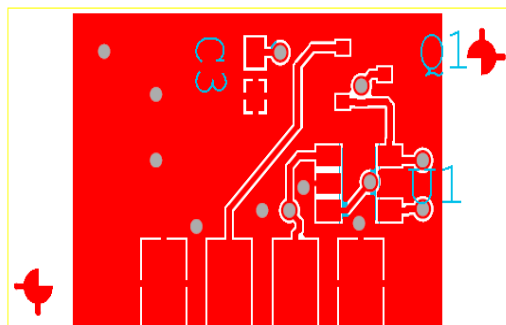
Akcelerometry (schéma na obrázku 24) použité během jízdních zkoušek jsem vyrobil za kontroly zkušných odborníků v laboratoři ústavu K623. Snímače od základu navrhnul pan doc. Ing. Václav Jirovský, CSc., který podrobně navrhl tištěné destičky i jejich osazení potřebnými komponenty, a podle tohoto návrhu byly budoucí senzory sestavovány. Základ tvoří deska s plošnými spoji tloušťky 1,55 mm, vzhledem k malému rozměru byla doporučena výroba v panelu 4 x 4 mm. Provedení v galvanickém cínu. Osazení čidla akcelerometru bylo provedeno strojovým způsobem, jelikož vzhledem k rozměrům senzoru by bylo osazování ručním způsobem s velkou pravděpodobností neúspěšné. Deska neobsahovala popisy součástek ani na jedné straně, proto bylo nutné osazovat podle osazovacího předpisu. Strana součástek a strana spojů je na obrázcích 25 a 26.



Obrázek 24 - Schéma akcelerometru ⁶

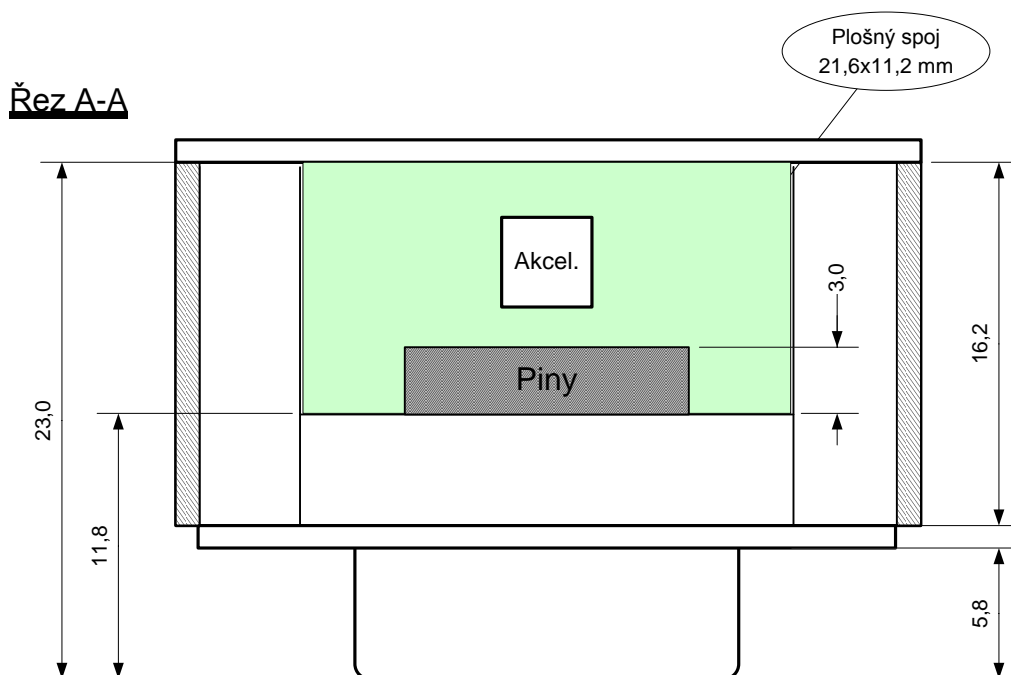


Obrázek 25 - Schéma strany spojů⁶



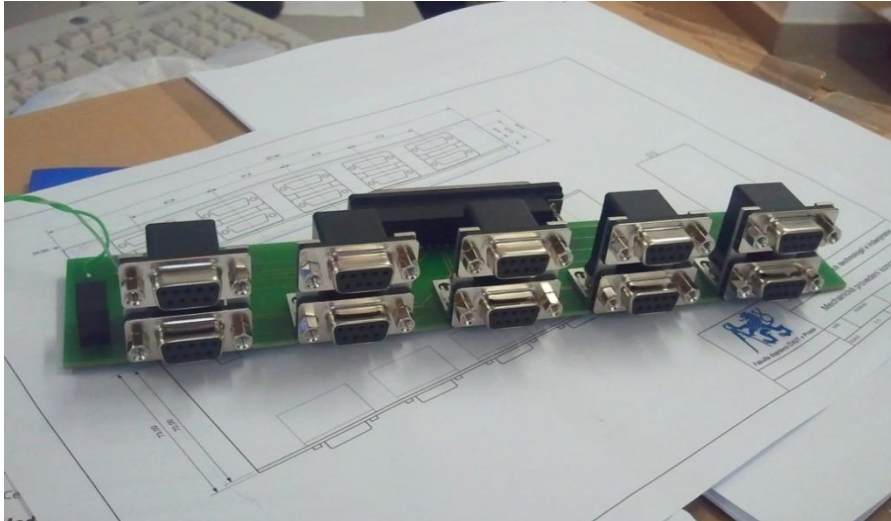
Obrázek 26 - Schéma strany součástek⁶

Po osazení je destička vložena do konektoru DB-9 a ručně zapájena. Označení pinů je nezaměnitelné. Takto již fungující senzor byl z důvodu bezpečnosti a spolehlivosti vložen do hliníkového profilu (Obrázek 27), ve kterém byl upevněn tavným lepidlem a spojen dvěma šrouby pomocí konektoru DB-9.



Obrázek 27 - Konektor v upraveném hliníkovém polotovaru Fischer.⁶

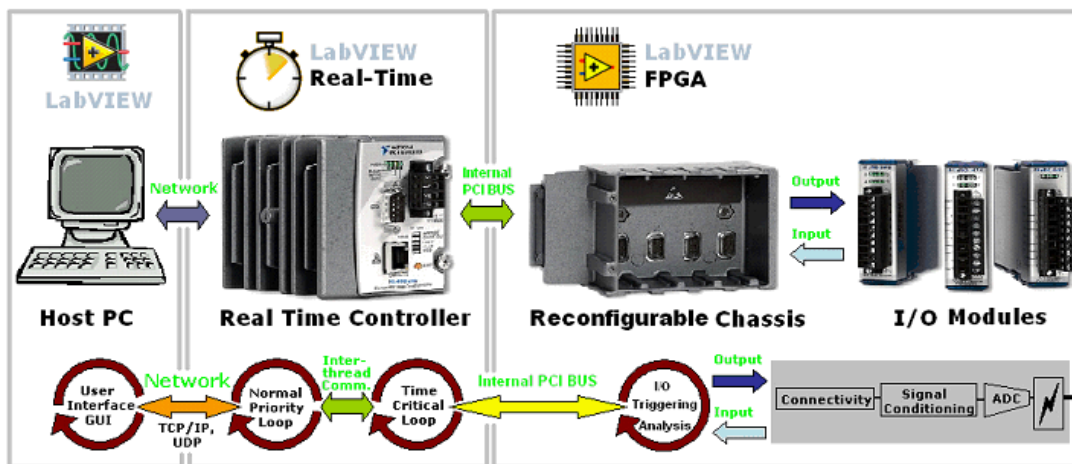
Po kompletaci byl akcelerometr propojen pomocí 9 ti žilového kabelu a konektorů DB-9 s tzv. koncentrátorem, do kterého byly napojeny všechny použité snímače. Koncentrátor je zobrazen na obrázku 28 a byl taktéž vyroben kompletně v laboratoři. Je tvořen základovou deskou s plošnými spoji, na tuto desku byly ručně doletovány konektory DB-9. Celá tato soustava byla uložena do hliníkového obalu a napojena do CompactRIA.



Obrázek 28 - Koncentrátor⁶

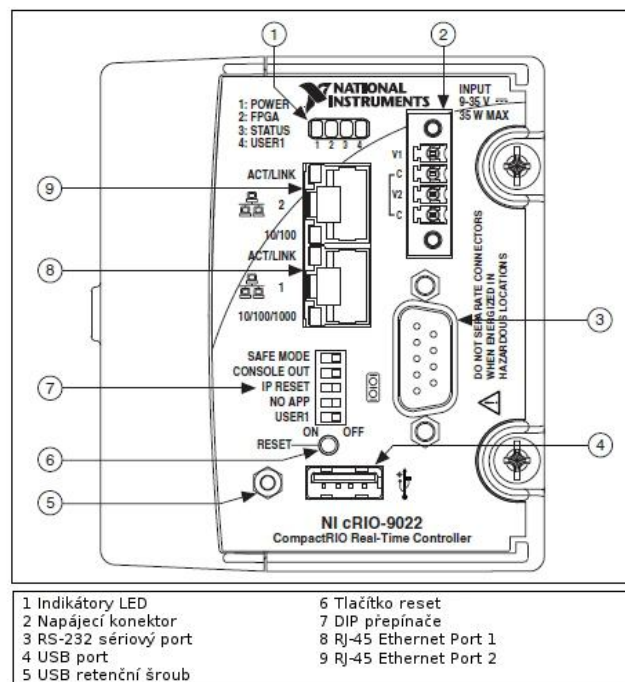
4.4 Snímání dat

Pro zaznamenávání dat z jízdních zkoušek byl využit software i hardware od firmy National Instrument. Jako hardware byl použit CompactRIO (cRIO), což je měřicí a řídicí systém o malých rozměrech. Jeho předností je také reálnový a rekonfigurovatelný integrovaný kontrolér (řadič). V grafickém programovacím prostředí LabVIEW (Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench) byl vytvořen program pro sběr dat a jejich následné uložení do cRia.⁶



Obrázek 29 - Architektura systému cRIO.⁶

System cRIA je tvořen procesorem a operačním systémem reálného času a šasi, které obsahuje programovatelné hradlové pole FPGA (Field Programmable Gate Array). Další jednotkou systému cRIO jsou I/O moduly (vstupní/výstupní), které je možné podle potřeby měnit a lze tedy využívat celou řadu modulů. CompactRIO je vestavný systém (embedded system), což znamená, že je používán jako součást většího systému, jelikož operuje v módu bez uživatelského rozhraní, jako je například klávesnice, monitor nebo myš. Šasi obsahuje nejen hradlové pole FPGA, ale také sloty pro řadič, I/O moduly, a PCI bus rozhraní mezi reálným řadičem a FPGA. ⁶

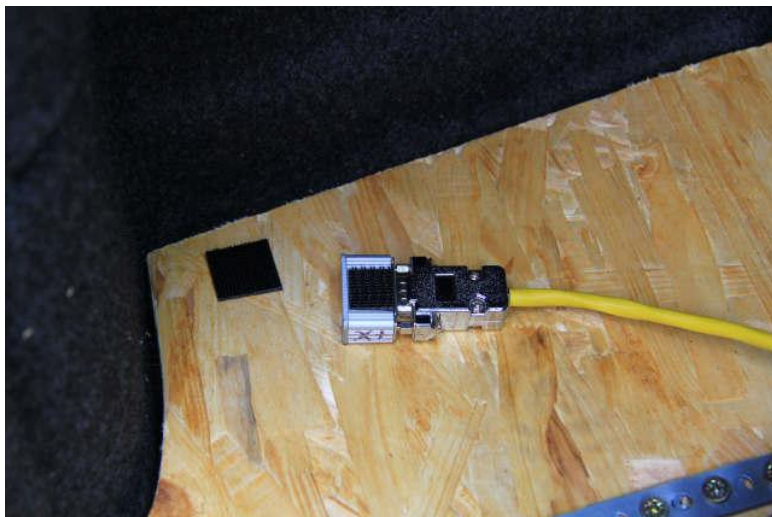


Obrázek 30 - Modul CRio ⁶

4.5 Umístění na vozidlech

Pro jízdní zkoušky bylo zapotřebí 3 akcelerometrů rozmístěných na specifických místech vozidla obrázky 33, 34 a 35. Jelikož byly použity tříosé akcelerometry, musí se dbát na správné umístění a natočení jednotlivých os. Pro lepší orientaci byly před instalací za pomoci počítače stanoveny jednotlivé osy a naznačeny na obal snímače. Názorná orientace os je na obr. 33, 34 a 35. Jednotná orientace os bohužel nebyla možná z důvodu různého upevnění senzorů ve vozidle. Z toho důvodu nebyla dodržena stanovená referenční soustava. Směry os se pečlivě zaznamenaly do dokumentace a následně byly osy přejmenovány ve vyhodnocovacím systému DIADem, tak aby odpovídali referenční soustavě.

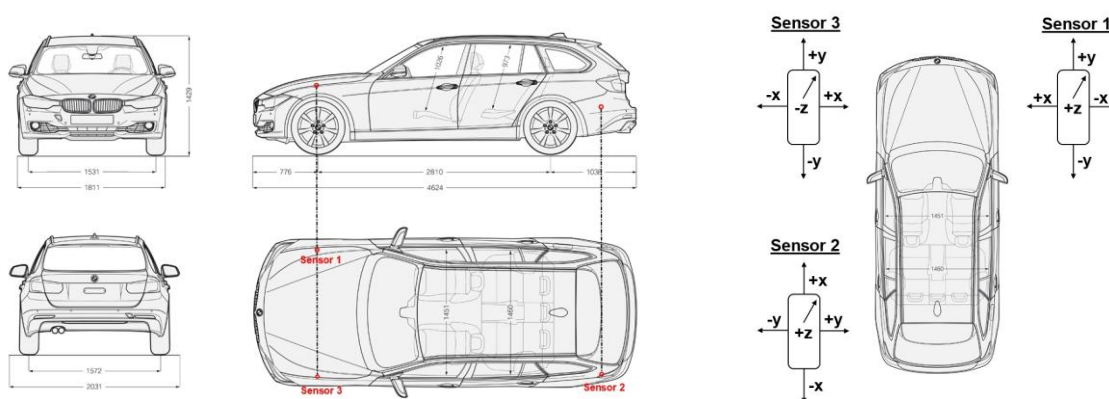
Akcelerometry byly připevněny speciálním suchým zipem 3M Dual-lock (Obrázek 31). Upevnění se podařilo i přímo na karoserii (BMW), nebo u Octavie jako na obrázku 32. I když byl tento spoj dostatečný, pro lepší uchycení byly senzory ještě překryté Power-Tapekou.



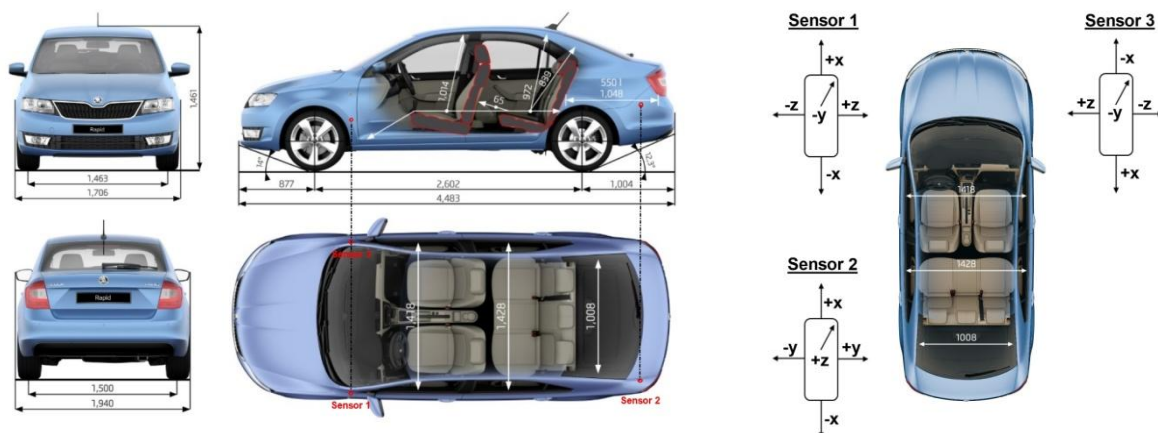
Obrázek 31 – Upevnění zipem



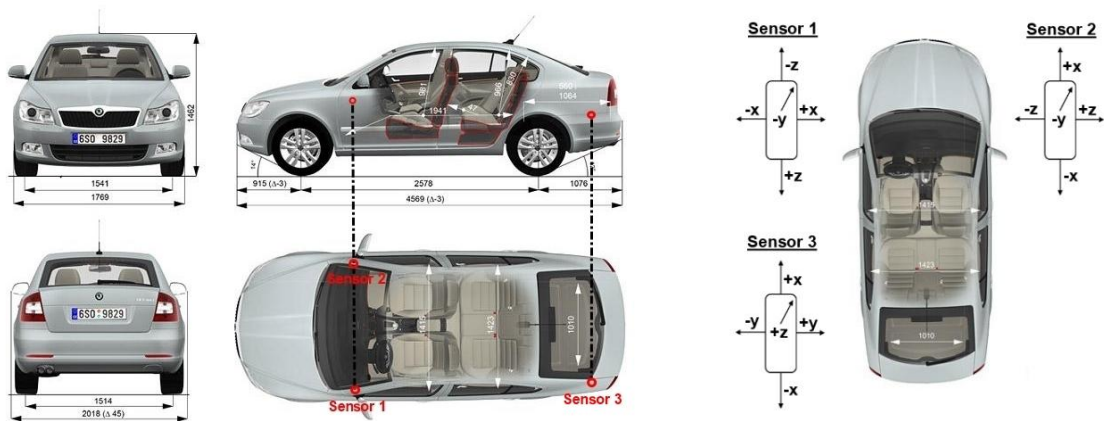
Obrázek 32 – Upevnění Octavia



Obrázek 33 – Umístění akcelerometrů a orientace os – BMW 320d¹⁶



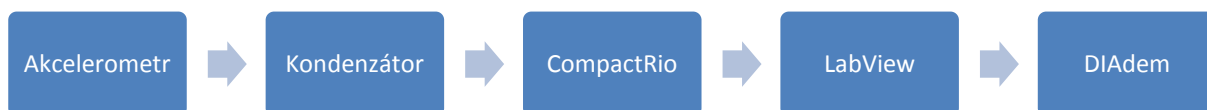
Obrázek 34 - Umístění akcelerometrů a orientace os – Škoda Rapid¹⁷



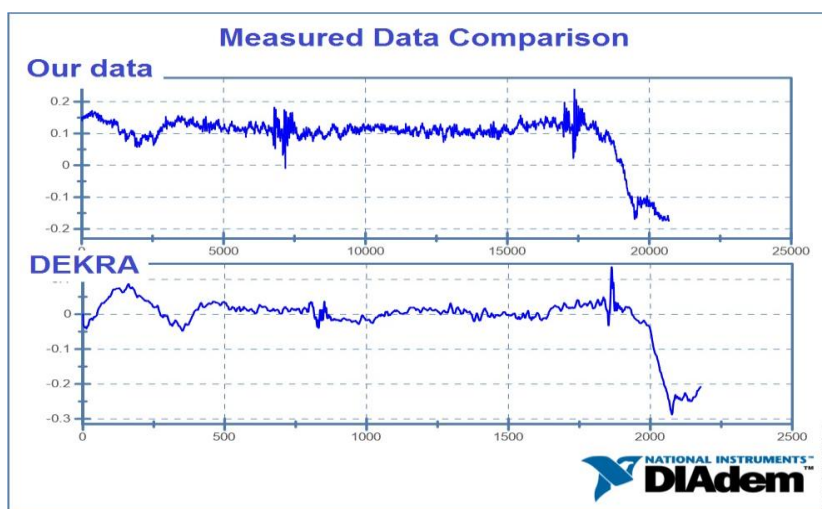
Obrázek 35 - Umístění akcelerometrů a orientace os – Škoda Octavia II¹⁸

4.6 Diagram měřícího zařízení

V blokovém schématu na obrázku 36 jsou znázorněny všechny komponenty použitého měřícího zařízení. Po neúspěšném měření na pracovišti DEKRA na jaře 2014, kdy došlo k selhání akcelerometru, naše soustava tentokrát naměřila potřebná data a díky možnosti porovnání s měřícím systémem DEKRA (Obrázek 37), můžeme naše data považovat za velmi přesná.



Obrázek 36 – Schéma měřící soustavy



Obrázek 37 – Porovnání dat se systémem DEKRA

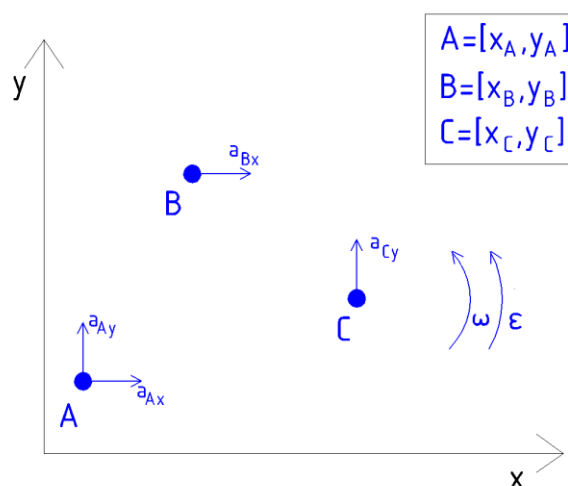
4.7 Metodika vyhodnocení experimentu

Naměřená data z akcelerometrů nám žádné informace o chování vozidla neposkytují. Akcelerometry totiž neměří zrychlení přímo, ale naměřená hodnota zrychlení je zaznamenána v mV a tudíž se musí převést na jednotku zrychlení. Naměřená data se nejprve přepočtem převedou z mV na hodnotu zrychlení G a následnou filtrací (5 Hz spodní hranice filtru a 15 Hz horní hranice filtru) se odstraní šum a vibrace zaznamenané z kmitání karoserie.

4.7.1 Výpočet stáčivé rychlosti a stáčivého zrychlení

Stáčivá rychlost a stáčivé zrychlení jsou veličiny, které už určitým způsobem vypovídají o chování vozidla při průjezdu zatáčkou. V případě, kdy je vozidlo vybaveno měřicí soustavou která zahrnuje snímač těchto veličin (gyroskop), tak není nutné tyto veličiny dopočítávat, ale jsou přímo zaznamenány a po filtraci je možné je prezentovat.

V našem případě, kdy je vozidlo vybaveno pouze soustavou zaznamenávající zrychlení dostředivé, je nutné rotační složky dopočítat. Jednoduchý způsob jak složky dopočítat je rozklad pohybu dle pana Prof. Ing. Kovandy, CSc. Je-li vozidlo vybaveno soustavou 3 akcelerometrů, kdy jeden z nich zaznamená zrychlení podélné a boční a zbylé dva každý alespoň jednu odlišnou složku zrychlení, je možné stáčivou rychlost i stáčivé zrychlení odvodit. Možnou variantou jsou 2 dvouosé akcelerometry. Důležité je mít možnost pracovat s jedním referenčním bodem a následně 2 složkami bodu dalšího.



Obrázek 38 – Rozklad pohybu

Dopočítání stáčivé rychlosti a stáčivého zrychlení se provede rozkladem sil. Víme, že zrychlení a každého bodu z obrázku 38 se skládá ze složky normálové a tečné, tedy:

$$a_d = a_n + a_t.$$

Normálová složka a_n působící kolmo na trajektorii pohybu je známa ze vztahu:

$$a_n = \omega^2 \cdot r.$$

Tečnou složku a_t , která působící ve směru tečny průsečíku křivky trajektorie pohybu a normálového zrychlení vypočteme ze vztahu:

$$a_t = \varepsilon \cdot r.$$

S aplikací těchto vzorců je možné sestavit rovnice pro výpočet zrychlení v libovolném bodě. Rozdělením zrychlení do složek získáme rovnice:

$$a_x = a_{Ax} - \omega^2(x - x_A) - \varepsilon(y - y_A),$$

$$a_y = a_{Ay} + \omega^2(y - y_A) + \varepsilon(x - x_A).$$

Použitím těchto rovnic na náš příklad získáme rovnice pro body B a C kdy:

$$B: a_{Bx} = a_{Ax} - \omega^2(x_B - x_A) - \varepsilon(y_B - y_A),$$

$$C: a_{Cy} = a_{Ay} + \omega^2(y_C - y_A) + \varepsilon(x_C - x_A).$$

Převedením složek zrychlení na pravou stranu rovnic získáme:

$$\omega^2(x_B - x_A) + \varepsilon(y_B - y_A) = a_{Ax} - a_{Bx},$$

$$\omega^2(y_C - y_A) + \varepsilon(x_C - x_A) = a_{Cy} - a_{Ay}.$$

Z těchto rovnic jsme schopni sestavit determinant, který následně použijeme k výpočtu stáčivé rychlosti a stáčivého zrychlení. Determinant:

$$D = \begin{vmatrix} x_B - x_A & y_B - y_A \\ y_C - y_A & x_C - x_A \end{vmatrix}.$$

Stáčivá rychlost se pak vypočte ze vztahu:

$$\omega = \sqrt{\frac{\begin{vmatrix} a_{Ax} - a_{Bx} & y_B - y_A \\ a_{Cy} - a_{Ay} & x_C - x_A \end{vmatrix}}{D}},$$

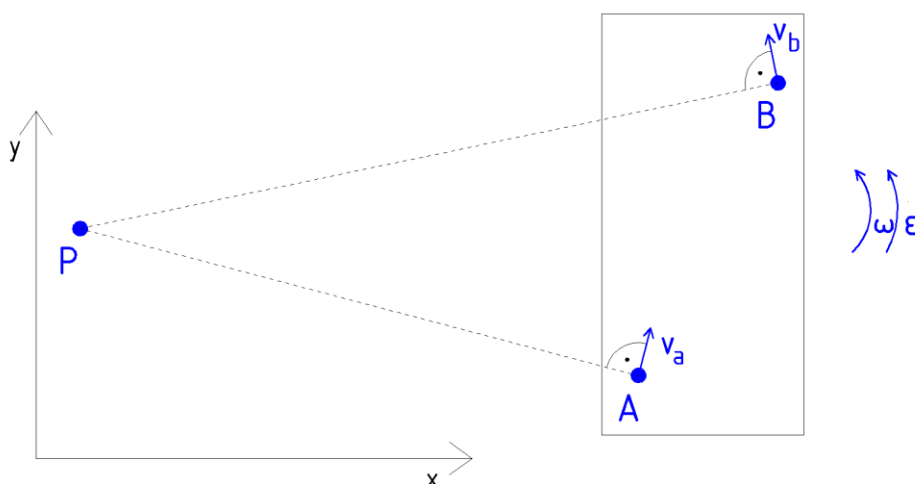
a stáčivé zrychlení ze vztahu:

$$\varepsilon = \frac{\begin{vmatrix} x_B - x_A & a_{Ax} - a_{Bx} \\ y_C - y_A & a_{Cy} - a_{Ay} \end{vmatrix}}{D}.$$

4.7.2 Výpočet umístění pólu pohybu

Jak je popsáno v kapitole 2.1.4, pomocí umístění pólu pohybu můžeme přímo určit jízdní chování automobilu. Se znalostí pólu pohybu a úhlem natočení kol se také dají s určitou přesností odhadnout směrové úchyly náprav.

Víme-li, že pól pohybu leží na průsečíku kolmic obvodových rychlostí jednotlivých bodů na vozidle (Obrázek 39), můžeme jednoduchým výpočtem zjistit jeho polohu.



Obrázek 39 – Určení pólu pohybu

Se znalostí úhlové rychlosti ω , kterou získáme dle postupu v kapitole 4.7.1, je možné sestavit rovnici rychlosti $\vec{v} = \vec{\omega} \cdot \vec{r}$. Při aplikaci tohoto vztahu na příklad na obrázku 37 můžeme vyjádřit rychlosti v_A a v_B vzhledem k pólu otáčení P vztahy:

$$v_A = \omega \cdot |PA|,$$

$$v_B = \omega \cdot |PB|.$$

Úpravou rovnic získáme vzdálenosti pólu pohybu od bodů A a B:

$$|PA| = \frac{v_A}{\omega},$$

$$|PB| = \frac{v_B}{\omega}.$$

Zanesením těchto vzdáleností $|PA|$ a $|PB|$ do roviny vozidla na kolmice rychlostí získáme polohu pólu otáčení.

4.8 Naměřené hodnoty

Při jízdách zkušebních byly zaznamenávány hodnoty zrychlení a byl pořizován videozáznam palubní desky a řidiče, ze kterého bylo i možné určit natočení volantu. Záznam z videokamery byl bohužel ztracen poruchou nahrávacího zařízení. Získaná data z měření jsou uvedeny v Tabulkách 2-6:

Tabulka 2 - Zrychlení Škoda Rapid

Rapid	Hodnoty bočního zrychlení [G]			Hodnoty podélného zrychlení [G]		
	Senzor 1 (LP)	Senzor 2 (LZ)	Senzor 3 (PP)	Senzor 1 (LP)	Senzor 2 (LZ)	Senzor 3 (PP)
10km/h	0,12	0,15	0,1	0,09	0,07	0,1
20km/h	0,16	0,13	0,51	0,19	0,15	0,17
30km/h	0,21	0,46	0,18	0,16	0,11	0,15

Tabulka 3 - Zrychlení Škoda Octavia II

Octavia	Hodnoty bočního zrychlení [G]			Hodnoty podélného zrychlení [G]		
	Senzor 1 (LP)	Senzor 2 (PP)	Senzor 3 (LZ)	Senzor 1 (LP)	Senzor 2 (PP)	Senzor 3 (LZ)
10km/h	0,06	0,04	0,08	0,06	0,07	0,05
20km/h	0,11	0,09	0,14	0,15	0,11	0,12
30km/h	0,12	0,14	0,21	0,12	0,12	0,1

Tabulka 4 - Zrychlení Škoda Octavia II s naloženým zavazadlovým prostorem

Octavia - zátěž v zavazadlovém prostoru						
	Hodnoty bočního zrychlení [G]			Hodnoty podélného zrychlení [G]		
	Senzor 1 (LP)	Senzor 2 (PP)	Senzor 3 (LZ)	Senzor 1 (LP)	Senzor 2 (PP)	Senzor 3 (LZ)
10km/h	0,08	0,05	0,09	0,06	0,7	0,4
20km/h	0,11	0,09	0,14	0,14	0,12	0,9
30km/h	0,11	0,14	0,22	0,14	0,13	0,9

Tabulka 5 - Zrychlení Škoda Octavia II s přívěsem

Octavia - přívěs s Rapidem						
	Hodnoty bočního zrychlení [G]			Hodnoty podélného zrychlení [G]		
	Senzor 1 (LP)	Senzor 2 (PP)	Senzor 3 (LZ)	Senzor 1 (LP)	Senzor 2 (PP)	Senzor 3 (LZ)
10km/h	0,07	0,04	0,15	0,09	0,1	0,08
20km/h	0,13	0,1	0,16	0,17	0,12	0,1
30km/h	0,12	0,18	0,19	0,16	0,15	0,12

Tabulka 6 - Zrychlení BMW 320d Touring

BMW	Hodnoty bočního zrychlení [G]			Hodnoty podélného zrychlení [G]		
	Senzor 1 (PP)	Senzor 2 (LZ)	Senzor 3 (LP)	Senzor 1 (PP)	Senzor 2 (LZ)	Senzor 3 (LP)
10km/h	0,1	0,7	0,11	0,12	0,06	0,11
20km/h	0,16	0,09	0,13	0,14	0,1	0,1
30km/h	0,13	0,12	0,15	0,08	0,08	0,11
37km/h	0,2	0,2	0,17	0,12	0,12	0,11

4.9 Výpočet stáčivé rychlosti a zrychlení

Už při prvotní analýze dat bylo patrné, že ač všechny akcelerometry v průběhu jízdních testů zaznamenávaly hodnoty, ne vždy to byly hodnoty správné. Bylo to patrné zejména díky tomu, že jedna naměřená hodnota byla výrazně odlišná od těch ostatních. Následně se tento fakt potvrdil při dosazení naměřených hodnot do algoritmu pro rozklad pohybu, kdy vypočtené hodnoty pod odmocninou nabývaly záporných hodnot. Tyto pokusy jsem byl nucen vynechat z následující analýzy a dalšího hodnocení a dále jsou použity pouze výsledky zkoušek se správně naměřenými hodnotami.

Doplněním naměřených hodnot podélných a bočních zrychlení do algoritmu pro rozklad pohybu jsem získal hodnoty stáčivé rychlosti a stáčivého zrychlení. Větší vypovídající

hodnotu o chování automobilu má veličina frekvence, takže poslední sloupec v tabulce 7 obsahuje tuto veličinu, která se jednoduše vypočte pomocí úhlové rychlosti ze vztahu:

$$f = \frac{\omega}{2\pi},$$

kde: π je Ludolfovo číslo s hodnotou přibližně 3,14159.

Tabulka 7 – Vypočtené hodnoty z naměřených zrychlení

Automobil	Rychlost jízdy	Úhlová rychlost	Úhlové zrychlení	Frekvence
	$v [km/h]$	$\omega [rad \cdot s^{-1}]$	$\epsilon [rad \cdot s^{-2}]$	$f [s^{-1}]$
Rapid	10km/h	0,003813803	0,106074999	0,000607293
	20km/h	0,013233206	-0,090938727	0,002107198
Octavia	10km/h	0,001925592	0,084857067	0,000306623
Octavia naložená	10km/h	1,315662754	0,144140771	0,209500439
Přívěs	20km/h	0,000730426	0,11275528	0,00011631
BMW	10km/h	0,012874098	0,176781095	0,002050016
	20km/h	0,025620934	-0,100969527	0,004079766
	30km/h	0,001002261	-0,082058846	0,000159596

4.10 Poloha pólu pohybu

Dle popisu v kapitole Určení polohy pólu pohybu je možné mapovat jeho polohu. Pro tento krok jsem si jednotlivá vozidla převedl do jednostopého modelu a určil jejich rychlosti středu přední i zadní nápravy. Jako rychlost vozidla jsem bral v úvahu polohu těžiště. Poloha těžiště u vozidla Škoda Octavia II byla přesně stanovena na základě měření na vahách ve společnosti DEKRA, kde bylo naměřeno následující rozložení hmoty:

- Právě přední kolo – 400 kg
- Právě zadní kolo – 270 kg
- Levé přední kolo – 427 kg
- Levé zadní kolo – 311 kg

Dosazením těchto hodnot společně s rozvorem $l = 2,578$ m do vztahu pro výpočet x-ové souřadnice těžiště:

$$t_x = \frac{m_z}{m} \cdot l = \frac{m_{pz} + m_{lz}}{m} \cdot l = \frac{270 + 311}{1408} \cdot 2,578 = 1,063m.$$

Vozidla Škoda Rapid a BMW nebylo možné zvážit a získat tak jejich přesnou polohu těžiště. Poloha těžiště u těchto vozidel je tedy odhadnuta, kdy u vozidla Škoda Rapid vycházím z podobnosti vozidel mladoboleslavské automobilky, zatímco u vozidla BMW uvažuji těžiště v půlce rozvoru mezi nápravami. Pro jednostopý model je rozhodující pouze x – ová složka souřadnice těžiště:

Tabulka 8 – Parametry vozidel

	Rozvor [m]	Vzdálenost těžiště od přední nápravy [m]
Rapid	2,602	1,000
Octavia II	2,578	1,063
320d Touring	2,810	1,405

Se znalostí rychlosti těžiště automobilu se následně určí rychlosti středu přední i zadní nápravy jednotlivých vozidel (Tabulka 9) pro jednotlivé rychlosti jízdy:

Tabulka 9 – Rychlosti středů náprav

	Rychlost jízdy [km/h]	Úhlová rychlost [h^{-1}]	Rychlost středu přední nápravy [km/h]	Rychlost středu zadní nápravy [km/h]
Rapid			10,02923077	10,07538462
Octavia II	10	0,76923	10,03307692	10,06769231
320d Touring			10,05769231	10,05769231
Rapid			20,05846154	20,15076923
Octavia II	20	1,53846	20,06615385	20,13538462
320d Touring			20,11538462	20,11538462
Rapid			30,08769231	30,22615385
Octavia II	30	2,30769	30,09923077	30,20307692
320d Touring			30,17307692	30,17307692
320d Touring	37	2,84615	37,21346154	37,21346154

Pomocí vypočtené délky ramen od přední a zadní nápravy se určí poloha pólu pohybu P. Střed zadní nápravy označíme bodem K, bod středu přední nápravy označíme bodem L. Pro ramena následně platí:

$$|PK| = \frac{v_k}{\omega} \text{ a } |PL| = \frac{v_l}{\omega},$$

kde v_k a v_l jsou rychlosti bodů K a L.

Vynesením těchto vzdáleností z bodů K a L a nalezením jejich průsečíku získáme polohu pólu pohybu P.

4.10.1 Pól pohybu u Škoda Rapid

Z vypočtených hodnot v tabulce 9 dosadíme do vzorců:

$$|PK| = \frac{v_k}{\omega} = \frac{10,02923077}{0,76923} = 13,038 \text{ m a}$$

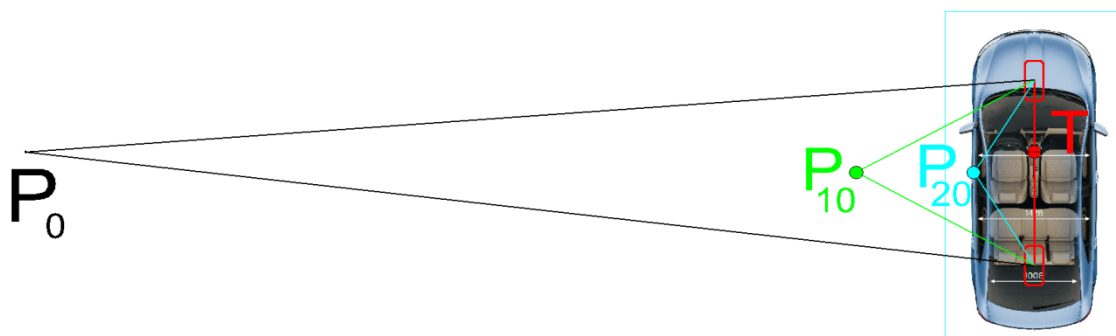
$$|PL| = \frac{v_l}{\omega} = \frac{10,07538462}{0,76923} = 13,098 \text{ m.}$$

Vypočtené hodnoty vzdáleností pólu pro rychlost těžiště 10 km/h platí při ustálené a lineární jízdě i pro rychlost 20 km/h. Určíme-li si, že T automobilu má souřadnice [0; 0], pak souřadnice pólu pohybu P_0 jsou [-12,998; -0,01], což je hodnota mírně za těžištěm vozidla.

Tabulka 10 – Rameno pólu pohybu Rapid

	Rychlost v [km/h]	Úhlová rychlost ω [h ⁻¹]	Rameno PK [m]	Rameno PL [m]
Rapid	10km/h	0,003813803	2,629	2,641
	20km/h	0,013233206	1,515	1,522

Stejným výpočtem získáme pomocí vypočtených úhlových rychlostí pólu pohybu v okamžiku přejetí latě. Pro rychlost přejezdu 10 km/h jsou souřadnice pólu P_{10} [-2,291; -0,289] a pro rychlost 20 km/h jsou souřadnice P_{20} [-0,783; -0,297].



Obrázek 40- Polohy pólu pohybu u Škody Rapid

4.10.2 Pól pohybu u Škoda Octavia

Pól pohybu pro ustálenou jízdu v kruhu dle hodnot v Tabulce 8:

$$|PK| = \frac{v_k}{\omega} = \frac{10,03307692}{0,76923} = 13,043 \text{ m a}$$

$$|PL| = \frac{v_l}{\omega} = \frac{10,6769231}{0,76923} = 13,888 \text{ m.}$$

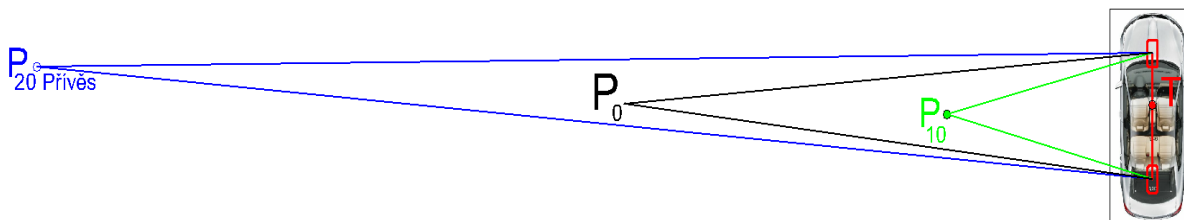
Vypočtené hodnoty vzdáleností pólu pro rychlost těžiště 10 km/h platí při ustálené a lineární jízdě i pro rychlost 20km/h. Uvážíme-li opět že těžiště T má souřadnice [0; 0], pak poloha pólu pohybu P₀ odpovídá souřadnicím [-12,997; 0,028].

Tabulka 11 - Rameno pólu pohybu Octavia

	Rychlost v [km/h]	Úhlová rychlost ω [h ⁻¹]	Rameno PK [m]	Rameno PL [m]
Octavia	10km/h	0,001925592	5,210	5,228
Octavia loaded	10km/h	1,315662754	0,076	0,076
Přívěs	20km/h	0,000730426	27,471	27,566

Pól pohybu při přejetí latě pro rychlost 10 km v hodině odpovídá souřadnicím P₁₀ [-5,057; 0,190], tedy mírně přetáčivé chování. Při výpočtech pólu pohybu Škody Octavie s naloženým

nákladovým prostorem vycházejí hodnoty délky ramen velmi malých hodnot, takže nelze najít jejich průsečík. Tato chyba je pravděpodobně způsobena chybou měření při jízdě zkoušce. Výpočet pólu pohybu P_{20} pro rychlost 20 km/h s připojeným přívěsem odpovídá souřadnicím [-27,469; 0,788], což představuje velmi nedotáčivý, ale tedy stabilní stav.



Obrázek 41 - Póly pohybu Škoda Octavia II

4.10.3 Pól pohybu u BMW 320d Touring

Pól pohybu vozidla BMW 320d Touring pro ustálenou jízdu v kruhu, dle hodnot v Tabulce 8:

$$|PK| = \frac{v_k}{\omega} = \frac{10,05769231}{0,76923} = 13,075 \text{ m a}$$

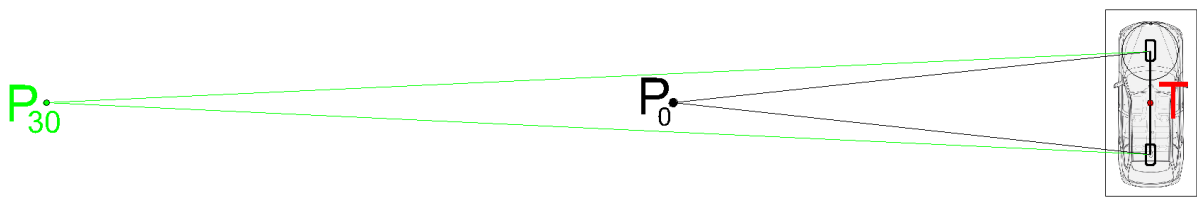
$$|PL| = \frac{v_l}{\omega} = \frac{10,05769231}{0,76923} = 13,075 \text{ m.}$$

Vypočtené hodnoty vzdáleností pólu pro rychlost těžiště 10 km/h platí při ustálené a lineární jízdě i pro rychlosti 20 a 30 km/h. Souřadnice pólu pohybu P_0 pro vypočtená ramena vycházejí [13,020; 0], což odpovídá neutrálnímu chování..

Tabulka 12 - Rameno pólu pohybu BMW

	Rychlost v [km/h]	Úhlová rychlost ω [h ⁻¹]	Rameno PK [m]	Rameno PL [m]
BMW	10km/h	0,012874098	0,781	0,781
	20km/h	0,025620934	0,785	0,785
	30km/h	0,001002261	30,105	30,105

Vypočtené délky ramen pro rychlosti 10 a 20 km/h opět vinou nepřesnosti měření vycházejí tak, že není možné naleznout jejich průsečík. Výpočet souřadnic pro rychlost 30km/h vychází neutrálně a poloha pólu P_{30} otáčení je [-30,072; 0].



Obrázek 42 - Póly pohybu BMW 320d Touring

5 Porovnání metodiky a výsledků testu s publikovanými zkouškami

Porovnání metodiky a výsledků s jinými reálnými zkouškami se ukázalo jako velmi problémové. Alespoň z části shodný test nebyl nikdy veřejně publikován. Z toho důvodu jsem vytvořil počítačovou simulaci v programu CarMaker, kterou lze s naším provedeným testem porovnat.

5.1 Návrh a průběh simulace

Aby byla simulace přínosná zároveň pro analýzu bezpečnosti silničního provozu, rozhodl jsem se pro simulaci navrhnout kruhovou dráhu o průměru 30m a vybavit ji standardizovanými zklidňujícími prvky dopravy. Pro simulaci byly zvoleny zklidňující prvky dle technických podmínek TP 85, schválené MD ČR pod č. j. 22788/96-230 ze dne 27. 9. 1996 s účinností od 1. října 1996. Rozměry zklidňujících prvků jsou uvedeny v Tabulce 13.

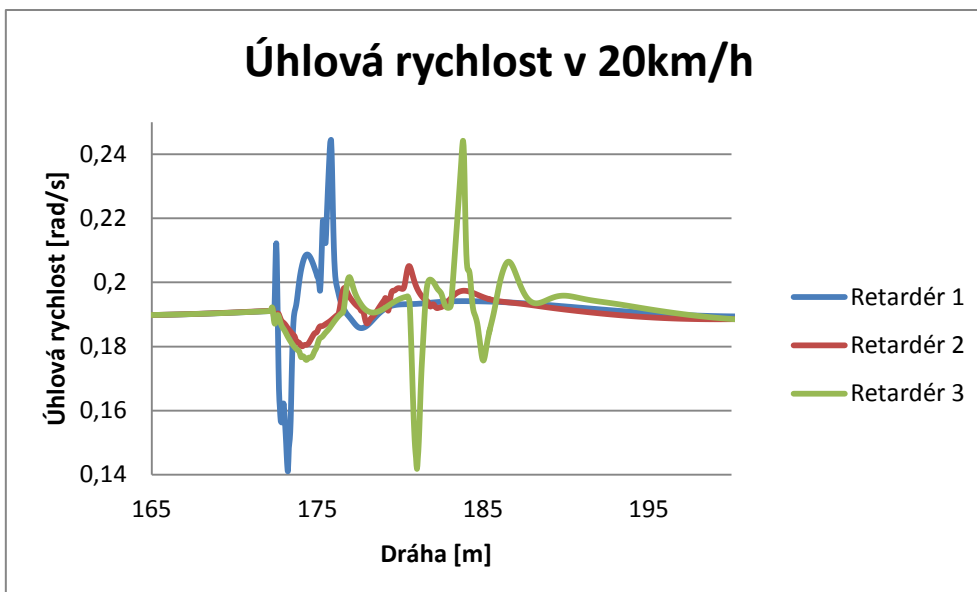
Tabulka 13 – Parametry zklidňujících prvků

	Retardér 1	Retardér 2	Retardér 3
Délka [m]	0,3	7	13,6
Šířka [m]	5	5	5
Výška [cm]	7	10	15
Délka nájezdové hrany [m]	-	1,5	1,8
Délka středové části [m]	-	4	10
Délka sjezdové hrany [m]	-	1,5	1,8

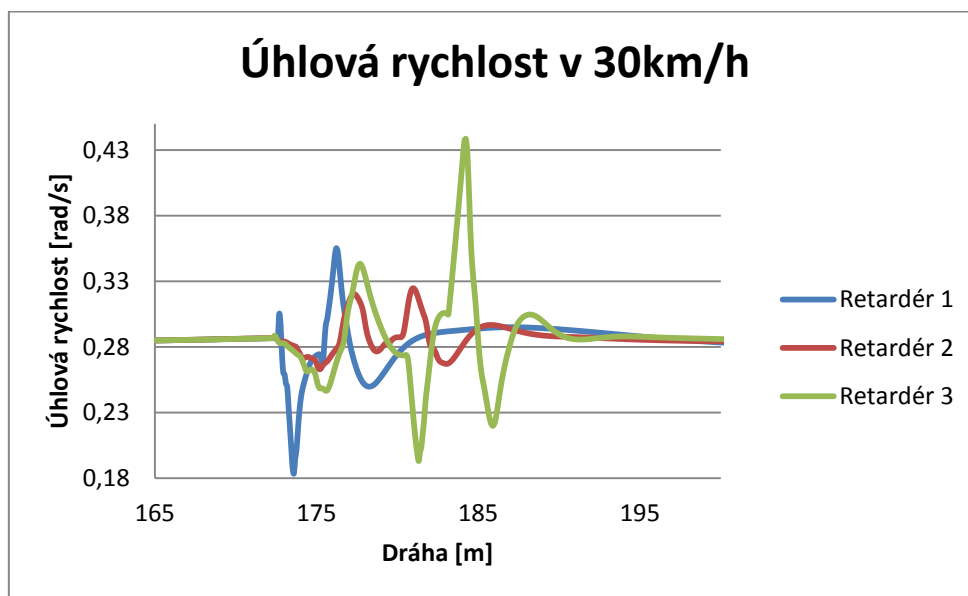
Pro danou simulaci jsem navrhl kruhovou dráhu o průměru 30 m, na které byly umístěny retardéry v pořadí 1, 2 a 3. Návrhová rychlost vzhledem k přihlídnutí reálnému provozu, ve kterém vozidla přes příčné prahy jezdí přiměřenou rychlostí a zpravidla bývá u příčných prahů rychlost omezena, byla stanovena na 20 km/h a následně navýšena na 30 km/h a 37 km/h což byla nejvyšší možná udržitelná hodnota rychlosti za dané konfigurace dráhy a vozidla.

Vozidlo použité při simulaci je model VW Golf V generace vybaven širokým spektrem senzorů. Pro mou simulaci jsem zaznamenal hodnoty bočního zrychlení a stáčivé rychlosti.

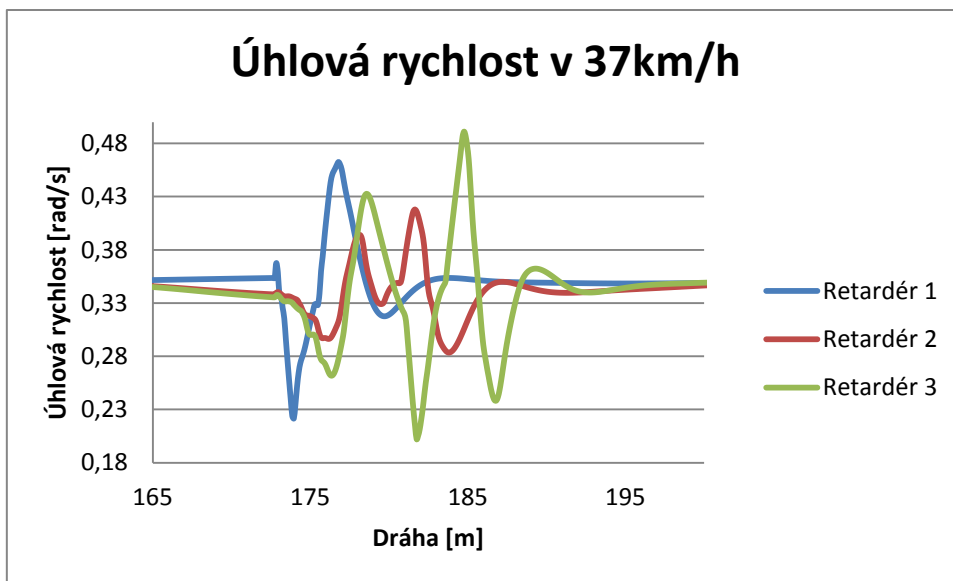
Grafické znázornění přejezdů pro všechny rychlosti je patrné z grafů 1, 2 a 3.



Graf 1 - Závislost úhlové rychlosti na dráze při přejezdu retardérů v rychlosti 20km/h

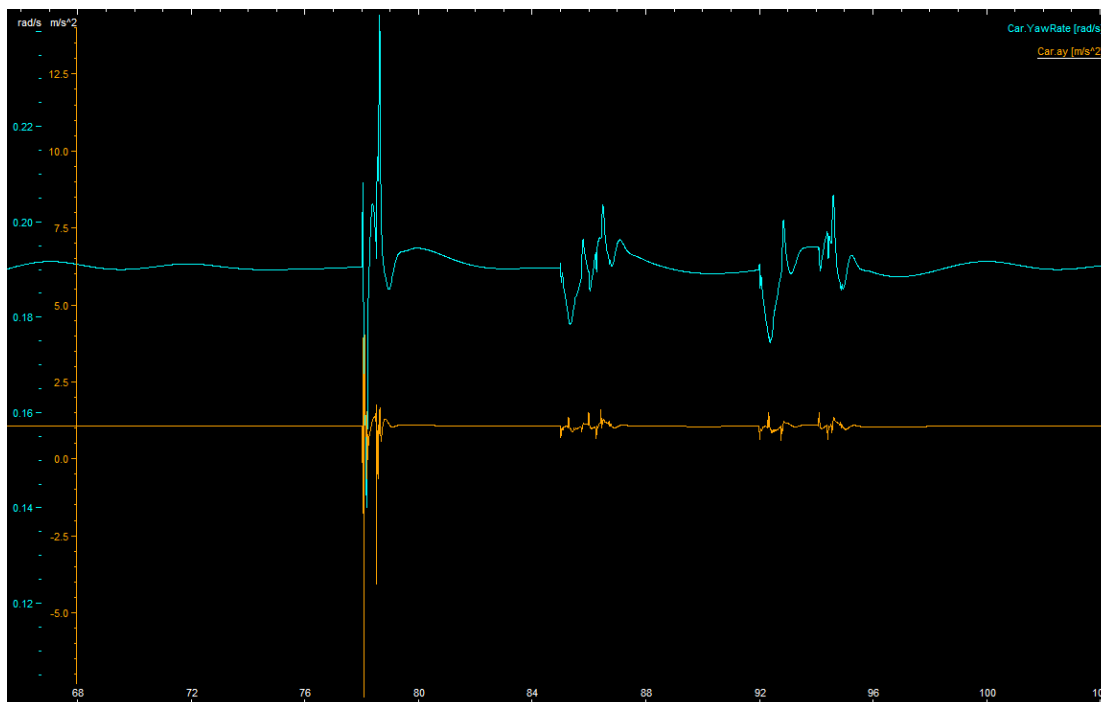


Graf 2 - Závislost úhlové rychlosti na dráze při přejezdu retardérů v rychlosti 30km/h



Graf - 3 Závislost úhlové rychlosti na dráze při přejezdu retardérů v rychlosti 37km/h

Pro příklad je pak znázorněn průběh stáčivé rychlosti a bočního zrychlení v závislosti na čase uvedený v grafu 4. Tento graf je přímý neupravený výstup z programu CarMaker.



Graf 4 Průběh stáčivé rychlosti a zrychlení při rychlosti 20 km/h.

5.2 Zhodnocení simulace

Z uvedených grafů je patrné, že při všech třech testovaných rychlostech vykazuje nejnižší vliv na stabilitu vozidla retardér č. 2. Usuzuji, že to je díky jeho nižší výšce oproti retardéru č. 3 a zároveň díky nájezdové hraně, kterou disponuje oproti retardéru č. 1. Při rychlostech 20 a 37

km/h dosahují hodnoty stáčivé rychlosti u retardéru č. 1 a č. 3 velmi podobných výsledků i přes jejich velmi rozdílné rozměry a tvar. U retardéru č. 1 dochází k silnému krátkému impulsu, zatímco u retardéru č. 3 k impulsu dvojitému a to jak při vjezdu na tento zpomalovací prvek, tak i při jeho opouštění. Úplnou shodu těchto dvou retardérů ovšem vyvrací simulace v rychlosti 30 km/h, kdy má jasně vyšší vliv na jízdu retardér č. 3.

5.3 Porovnání simulace a reálné zkoušky

Při porovnání provedených jízdních zkoušek na štolě Josef byly omezené možnosti z hlediska měřicí techniky. Měřilo se pouze zrychlení ve třech osách. U simulace v CarMakeru je možné si zvolit libovolný počet a druh senzorů, které budou zaznamenávat potřebné veličiny.

Další výhodou, kterou disponuje CarMaker je větší objektivita při průběhu jízdní zkoušky. Dané vozidlo drží požadovaný směr manévru a oproti lidskému faktoru je daleko přesnější i při několikanásobném projetí dráhy. V případě lidského faktoru při reálné zkoušce je třeba počítat s drobnými odchylkami mezi jednotlivými jízdami.

Během vyhodnocovací fáze je nesmírnou výhodou CarMakeru možnost okamžitě nahlédnout na výsledky měřených hodnot, ať už grafické, nebo tabulkové. Všechny veličiny jsou dle nastavených senzorů zaznamenány přímo a tím pádem odpadá riziko nepřesností při jejich výpočtu, jako to bylo v mém případě při vyhodnocování jízdních zkoušek.

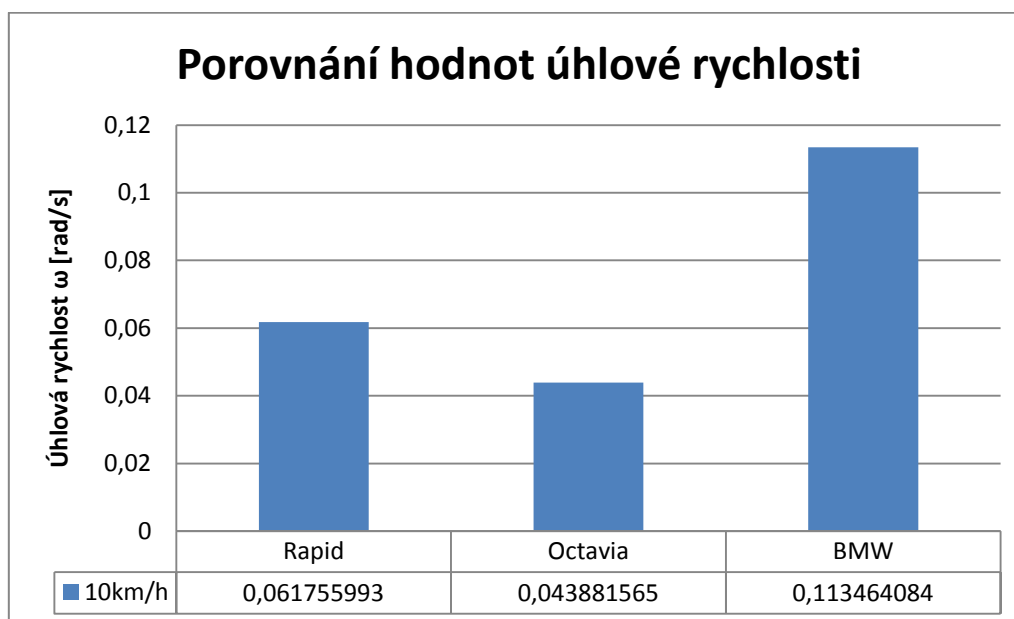
6 Zhodnocení sil působících na vozidlo při průjezdu zatáčkou

Po vyhodnocení experimentu jsem získal výsledky v podobě:

- zrychlení
- úhlové rychlosti
- úhlového zrychlení
- frekvence
- polohy pólu pohybu

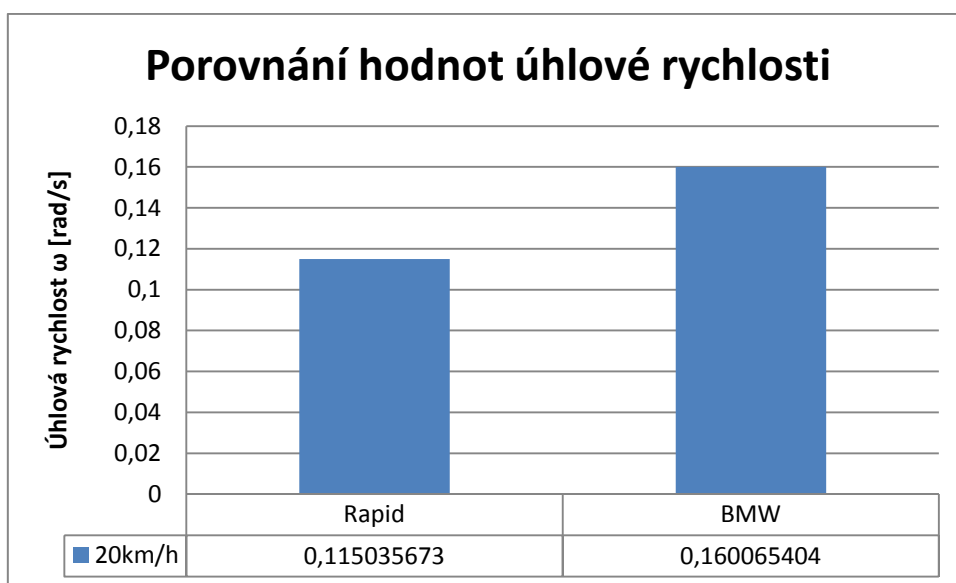
Porovnání hodnot úhlové rychlosti ω

Při porovnání úhlové rychlosti jsem dospěl k velmi odlišným výsledkům testovaných vozidel. Porovnání všech tří automobilů je možné pouze v rychlosti 10 km/h (Graf 5). Mezi vozidly značky Škoda je rozdíl hodnot nižší oproti rozdílu těchto vozidel s porovnáním vozidla BMW. Hodnota úhlové rychlosti vozidla BMW nabývá hodnot přibližně 3x vyšších než u vozidla Škoda Octavia II a přibližně 2x vyšší než u vozidla Škoda Rapid.



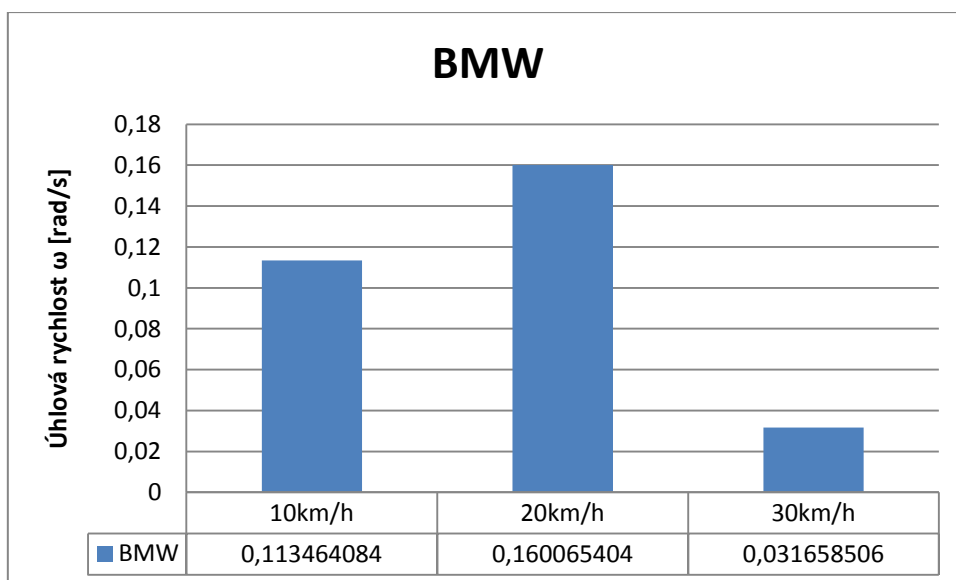
Graf 5 – Porovnání úhlové rychlosti v 10 km/h

Porovnání hodnot úhlové rychlosti v rychlosti 20 km/h (Graf 6) je možné u vozidel Škoda Rapid a vozidlem BMW. V tomto případě hodnota ω u Škody Rapid nabývá téměř dvojnásobku oproti rychlosti 10 km/h. U vozidla BMW tento nárůst není tak razantní a hodnota je vyšší přibližně o třetinu. Díky tomu usuzuji, že vozidlo BMW je schopno lépe reagovat na přejezd překážky za zvyšující se rychlosti.



Graf 6 – Porovnání hodnot úhlové rychlosti v 20 km/h

Vzestupnou tendenci hodnoty ω nepotvrzuje porovnání u vozidla BMW (Graf 7), u kterého se povedlo vypočítat tyto hodnoty i v rychlosti 30 km/h. Tento fakt může být následkem nepřesného měření. Druhým vysvětlením může být nižší reakce automobilu při rychlejším přejetí překážky.



Graf 7 – Porovnání hodnot úhlové rychlosti u vozidla BMW

7 Závěr

Cílem mé diplomové práce bylo provést a vyhodnotit nestandardní jízdní manévr navržený na fakultě dopravní. Tento experiment byl velmi náročný z hlediska přípravy. Výroba akcelerometrů v odborné laboratoři vyžadovala znalosti elektrotechniky, ale zároveň určitou zdatnost při letování spojů a celkové montáži. Celý proces ale díky zkušenostem z předchozích zkušeností proběhl dobře a měřicí soustavu se podařilo zprovoznit.

Jízdní zkoušky provedené v areálu ČVUT na štole Josef, skládající se z jízdy po kruhové dráze s příčnou nerovností se podařilo realizovat a naměřit data z akcelerometrů pro následné vyhodnocení.

Bohužel během části testů došlo k selhání akcelerometrů, které naměřily špatné hodnoty, a tudíž nebylo možné tyto testy vyhodnotit. Jako velkou ztrátu považuji poruchu videokamery, pomocí níž se snímala přístrojová deska spolu s přibližným úhlem natočení volantu.

Správně naměřená data se podařilo vyfiltrovat a zaznamenaná data aplikovat na rozklad pohybu. Tímto způsobem byla postupně zjištěna stáčivá rychlost, stáčivé zrychlení a frekvence vozidla v okamžiku přejetí příčné latě. Dalším výsledkem mé diplomové práce je výpočty pólu otáčení testovaných vozidel, tedy bodu, pomocí něhož je možné určit jízdní chování automobilu. Toho jsem dosáhl díky znalosti úhlové rychlosti, jak při ustálené jízdě po kruhové dráze, tak i v okamžiku přejetí příčné latě, kdy úhlové rychlosti vozidel výrazně měnily svou hodnotu a s tou se také výrazně měnila poloha pólu pohybu.

Následně jsem měl provést porovnání metodiky a výsledků mnou provedené s obdobným typem publikované zkoušky. Tuto část jsem nahradil počítačovou simulací v programu CarMaker, kdy jsem porovnal reakci automobilu, při jízdě na kruhové dráze, na tři typy zklidňujících prvků dopravy používaných v České republice na pozemních komunikacích. Tato simulace je zajímavá tím, že je typově podobná provedenému experimentu a zároveň se jedná o simulaci situací z reálného provozu. Výstupem této simulace je grafické znázornění stáčivé rychlosti při přejetí těchto tří typů zklidňujících prvků. Závěrem simulace je zhodnocení kladů a záporů simulovaného testu, oproti reálným jízdním zkouškám.

Práci na této diplomové práci jsem nahlédl do problematiky testování dynamiky automobilů a objevil úskalí, která tato oblast dopravního inženýrství přináší. Jako nejdůležitější část se mi zpětně jeví přípravná fáze. Plánování jízdního manévru, příprava snímacího zařízení. V této

fázi je možné provádět změny, úpravy a tím se kvalitně připravit na plánovanou zkoušku, kde už vše musí fungovat tak jak má a na nějaké výraznější změny není čas ani prostředky.

Mnou zvolený způsob vyhodnocení pomocí rozkladu pohybu je jednoduchá matematická metoda, která ovšem vyžaduje přesně naměřená data, abychom pomocí ní byli schopni vypočítat hledané veličiny. Obdobnou metodou je určení pólu pohybu, která vychází ze znalosti úhlové rychlosti a rychlosti jízdy. Tento bod by se dal výrazně zpřesnit se znalostí úhlu natočení volantu, popřípadě předních kol. Proto absenci videozáznamu považuji za velkou ztrátu.

Pro budoucí obdobné experimenty na fakultě dopravní bych doporučil rozšířit měřicí techniku o snímač úhlové rychlosti, který by sloužil i jako kontrolní a doplňující prvek současného vybavení laboratoře. Vhodným doplňkem při jízdách zkouškách by bylo monitorování vozidla signálem GPS, ze kterého se dá následně určit přesná rychlost jízdy v určitých bodech dráhy. Další podmínkou pro realizování kvalitních jízd zkoušek by byl vývoj řídicího robota, pomocí něhož by bylo možné provádět opakovaně objektivní jízd zkoušky a přesněji tak zhodnotit jízd vlastnosti vozidel.

Práci na mé diplomové práci, zejména příprava experimentu a práce v laboratoři považuji za velmi cennou zkušenost, kterou jak doufám, budu moci využít v i praxi při účasti na obdobných testech vozidel.

8 Zdroje

- [1] GILLESPIE, T. Fundamentals of vehicle dynamics: jízdní odpory, hnací charakteristika, brzdění, odpružení, říditelnost, ovladatelnost, stabilita. 1. vyd. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 1992, xxii, 495 p. ISBN 15-609-1199-9.
- [2] FIRST J. a kol.: Zkoušení automobilů a motocyklů, Vydavatelství S&T CZ s.r.o., Praha, 2008, ISBN 978-80-254-1805-5.
- [3] MALÁ Z., NOVÁKOVÁ D., VÍTŮ T., Fyzika I, Vydavatelství ČVUT, Praha, 2009
- [4] VLK, František. Dynamika motorových vozidel: jízdní odpory, hnací charakteristika, brzdění, odpružení, říditelnost, ovladatelnost, stabilita. 1. vyd. Brno: Nakladatelství a vydavatelství Vlk, 2000, 434 s. ISBN 80-238-5273-6.
- [5] VLK F.: Zkoušení a diagnostika motorových vozidel, Vydavatelství Prof. Ing. František Vlk, DrSc., Brno, 2006
- [6] KOVANDA J., V. JIROVSKÝ, H. KOVANDOVÁ, J. KOLOC, S. VONDRÁČEK, S. VONDRÁČEK, Z. MALKOVSKÝ, M. ANDRŠOVÁ, H. NAJZAROVÁ, T. DLASK, R. DVOŘÁČEK, J. GVUZD, M. TALARICO, M. ŘEZNÍČEK: Kolize segmentu kolejového vozidla s automobilem. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta Dopravní, Ústav bezpečnostních technologií, 2013. Výzkumná zpráva č. 77/2012.
- [7] NEW CAR ASSESSMENT PROGRAM (NCAP). The Fishhook Maneuver Test Procedure. *Laboratory Test Procedure for Dynamic Rollover* [online]. 2013 [cit. 2015-03-09]. Dostupné z: http://www.safercar.gov/staticfiles/safercar/NCAP/NCAP_Fishhook_Test_March_2013.pdf
- [8] ŠKODA AUTO a.s.: Brake and stabilisation systems, Vydavatelství ŠKODA AUTO a.s., Mladá Boleslav, 2010.
- [9] VANČURA, Jan. *Citlivost vozidel na boční vítr* [online]. Brno, 2013 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=62903 . Dizertační. VUT Brno. Vedoucí práce Prof. Ing. VÁCLAV PÍŠTĚK, DrSc.

- [10] KOVANDA, Jan. Bezpečnostní aspekty návrhu dopravních prostředků. [přednáška]. Praha: ČVUT, 2014.
- [11] ISO 3888-1:1999. *Passenger cars – Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part 1*. 1. vyd. Ženeva: International Organization for Standardization, 1999.
- [12] Nedotáčivost. *Wikipedia* [online]. 2007 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Nedot%C3%A1%C4%8Divost#/media/File:Understeer.svg>
- [13] Přetáčivost. *Wikipedia* [online]. 2007 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/P%C5%99et%C3%A1%C4%8Divost#/media/File:Oversteer.svg>
- [14] Škoda Rapid Sport. *Autoforum.cz* [online]. 2013 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: http://www.autoforum.cz/tmp/magazin/sr/Skoda_Rapid_Sport_oficialni_nove_01a_503_0.jpg
- [15] Training wheels!. *Freerepublic.com* [online]. 2006 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: http://graphics.boston.com/bonzai-fba/Original_Photo/2006/03/20/1142870721_2667.jpg
- [16] Build your BMW. *BMW.co.uk* [online]. 2014 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: https://www.bmw.co.uk/dam/brandBM/marketGB/countryGB/newvehicles/3-series/touring/2012/data/blueprint-profil-front-top-rear_F311.jpg.resource.1382716000100.jpg
- [17] Škoda Rapid. *Škoda Auto* [online]. 2013 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.skoda-auto.cz/SiteCollectionDocuments/skoda-auto/ke-stazeni/rapid-katalog.pdf>
- [18] Škoda Octavia. *Auto.cz* [online]. 2013 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://img.auto.cz/moje.auto.cz/img/galleries/4d011a014e74c/4d627d83d44b7.jpg>
- [19] ČVUT - FAKULTA STAVEBNÍ. *Štola Josef - Půdorys*. Praha, 2014.

9 Seznam Obrázků

Obrázek 1 - Síly působící na těleso při pohybu na kružnici ^{3(upraveno)}	13
Obrázek 2 – Referenční soustava ¹⁴	17
Obrázek 3 – Jednostopý model automobilu ¹⁰	18
Obrázek 4 - Nedotáčivost ¹²	20
Obrázek 5 - Přetáčivost ¹³	21
Obrázek 6 – Jednostopý nedotáčivý model ^{10(upraveno)}	22
Obrázek 7 – Jednostopý přetáčivý model ^{10(upraveno)}	22
Obrázek 8 – Model ESP ⁸	23
Obrázek 9 – Komponenty ESP ⁸	24
Obrázek 10 - Zkušební dráha pro předjížděcí manévr ^{11(upraveno)}	26
Obrázek 11 – Závislost bočního zrychlení na úhlu natočení volantu a rozdílnost sil působící na nápravu ²	27
Obrázek 12 – Průběh pomalého náběhu úhlu zatáčení ⁷	28
Obrázek 13 – Bezpečnostní opěry - schéma ⁷	29
Obrázek 14 – Bezpečnostní opěry při reálném testu ¹⁵	30
Obrázek 15 - Schéma CBV ⁹	30
Obrázek 16 – Prostředí CarMakeru.....	32
Obrázek 17 - IPGMovie	32
Obrázek 18 - Instruments	32
Obrázek 19 - Výběr sledovaných veličin	33
Obrázek 20 - Grafické zobrazení.....	33
Obrázek 21 – Půdorys jízdní dráhy ¹⁹	34
Obrázek 22 - Lat'	35
Obrázek 23 - Lat'	35
Obrázek 24 - Schéma akcelerometru ⁶	36
Obrázek 25 - Schéma strany spojů ⁶	37
Obrázek 26 - Schéma strany součástek ⁶	37
Obrázek 27 - Konektor v upraveném hliníkovém polotovaru Fischer. ⁶	37
Obrázek 28 - Koncentrátor ⁶	38
Obrázek 29 - Architektura systému cRIO. ⁶	38

Obrázek 30 - Modul CRio ⁶	39
Obrázek 31 – Upevnění zipem	40
Obrázek 32 – Upevnění Octavia	40
Obrázek 33 – Umístění akcelerometrů a orientace os – BMW 320d ¹⁶	40
Obrázek 34 - Umístění akcelerometrů a orientace os – Škoda Rapid ¹⁷	40
Obrázek 35 - Umístění akcelerometrů a orientace os – Škoda Octavia II ¹⁸	41
Obrázek 36 – Schéma měřicí soustavy	41
Obrázek 37 – Porovnání dat se systémem DEKRA	41
Obrázek 38 – Rozklad pohybu	42
Obrázek 39 – Určení pólu pohybu	44
Obrázek 40- Polohy pólu pohybu u Škody Rapid.....	50
Obrázek 41 - Póly pohybu Škoda Octavia II.....	51
Obrázek 42 - Póly pohybu BMW 320d Touring.....	52

10 Seznam Tabulek

Tabulka 1 - Rozměry dráhy ¹¹	26
Tabulka 2 - Zrychlení Škoda Rapid	45
Tabulka 3 - Zrychlení Škoda Octavia II.....	45
Tabulka 4 - Zrychlení Škoda Octavia II s naloženým zavazadlovém prostoru.....	46
Tabulka 5 - Zrychlení Škoda Octavia II s přívěsem.....	46
Tabulka 6 - Zrychlení BMW 320d Touring	46
Tabulka 7 – Vypočtené hodnoty z naměřených zrychlení	47
Tabulka 8 – Parametry vozidel.....	48
Tabulka 9 – Rychlosti středů náprav	48
Tabulka 10 – Rameno pólu pohybu Rapid.....	49
Tabulka 11 - Rameno pólu pohybu Octavia.....	50
Tabulka 12 - Rameno pólu pohybu BMW	51
Tabulka 13 – Parametry zklidňujících prvků	53

11 Seznam Grafů

Graf 1 - Závislost úhlové rychlosti na dráze při přejezdu retardérů v rychlosti 20km/h	54
--	----

Graf 2 - Závislost úhlové rychlosti na dráze při přejezdu retardérů v rychlosti 30km/h	54
Graf - 3 Závislost úhlové rychlosti na dráze při přejezdu retardérů v rychlosti 37km/h	55
Graf 4 Průběh stáčivé rychlosti a zrychlení při rychlosti 20 km/h.....	55
Graf 5 – Porovnání úhlové rychlosti v 10 km/h.....	57
Graf 6 – Porovnání hodnot úhlové rychlosti v 20 km/h.....	58
Graf 7 – Porovnání hodnot úhlové rychlosti u vozidla BMW	58

