



FAKULTA STROJNÍ

**ÚSTAV AUTOMOBILŮ, SPALOVACÍCH MOTORŮ
A KOLEJOVÝCH VOZIDEL**

**ÚPRAVA SIMULAČNÍHO MODELU VOZU NA
ZÁKLADĚ SKUTEČNÝCH PARAMETRŮ
VOZIDLA**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor: Filip Dostálek

Studijní obor: Dopravní, letadlová a transportní technika

Vedoucí práce: Ing. Michal Vašíček, Ph.D.

Praha 2019

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

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

.....

podpis

Poděkování

V první řadě děkuji mému vedoucímu práce Michalu Vašíčkovi za umožnění zabývat se problematikou simulátorů v rámci mé diplomové práce

Dále bych chtěl poděkovat majiteli týmu I.S.R.Racing Igoru Salaquardovi, jeho synovi, profesionálnímu jezdcovi, Filipu Salaquardovi a samozřejmě celému týmu za možnost měřit na skutečném voze, dále za pomoc při úpravě modelu, jeho testování a porovnání.

Velký dík patří také mé rodině za jejich podporu a pochopení při psaní této práce.

Anotační list

Autor:	Bc. Filip Dostálek
Název práce:	Úprava simulačního modelu na základě skutečných parametrů vozidla
Title:	Modification of a racing simulator model setup according to the real parameters of a vehicle
Akademický rok:	2018/2019
Ústav:	Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel
Program:	Dopravní, letadlová a transportní technika
Obor:	Motorová vozidla
Vedoucí práce:	Ing. Michal Vašíček, Ph.D.
Klíčová slova:	simulátor, Audi R8 LMS, závodní vůz, závodní okruh, aerodynamický přítlak, tlumiče
Keywords:	simulator, Audi R8 LMS, race car, race track, aerodynamic force, dampers
Počet stran:	79
Počet obrázků:	42
Počet grafů:	12
Počet tabulek:	15

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na úpravu simulačního modelu simulátoru rFactor na základě skutečných parametrů vozu Audi R8 LMS týmu I.S.R. Racing a je zde uveden popis hardwaru a softwaru simulátoru. Nejprve byl zkalibrován obraz projektorů. Dále byly na skutečném voze naměřeny hmotnostní a délkové parametry pro výpočty momentů setrvačnosti. Byly zjištěny polohy kinematických bodů a vypočítán aerodynamický přítlak ze signálu polohy tlumičů. Naměřené a vypočtené hodnoty byly poté pomocí Generátoru souborů vloženy do pěti textových souborů. Model byl otestován profesionálním jezdcem Filipem Salaquardou a byly porovnány hodnoty mezi skutečným vozem a simulátorem. Porovnávala se podélná a příčná dynamika vozu, přičemž chyba mezi simulátorem a skutečným vozem ať už v rychlosti či v příčném zrychlení byla maximálně 5 %. Pro porovnání byly použity tratě, které jsou v simulátoru kvalitně zpracované, aby výsledky byly co nejpřesnější. Simulační model bude tým I.S.R.Racing používat pro trénink jezdců před jednotlivými závody.

Abstract

This diploma thesis is focused on modifying of a physical model in the rFactor simulator based on real parameters of the I.S.R. Racing car - Audi R8 LMS, as well as the description of the used hardware and software. First, the projector screen was calibrated. Afterwards, the weight and other measurements of interest were taken from the real car to calculate the moments of inertia. The positions of kinematic points were located and aerodynamic downforce was calculated from the signal of damper position. All measured and calculated values were imported using the Files generator into five separate text files. The model was tested by a professional driver Mr. Filip Salaquarda and the real and simulated values were compared. The longitudinal and transverse dynamics of car have been compared, finding the deviation between the real and simulated values in both speed and transverse acceleration not exceeding 5 %. For reliability concerns, only well designed tracks were used to achieve more precise results. I.S.R.Racing will further use the simulation model for the training of their drivers before individual races.

Obsah

1	Úvod	1
2	Teoretická část - popis simulátoru	3
2.1	Software.....	3
2.1.1	Simulátor	3
2.1.2	Zobrazení.....	4
2.1.3	Volant	6
2.1.4	Data	6
2.2	Hardware	7
2.2.1	Počítač	7
2.2.2	Zobrazovací jednotky	8
2.2.3	Šasi simulátoru	8
2.2.4	Sedačka.....	9
2.2.5	Volant	10
2.2.6	Pedály	12
3	Popis vozu	14
3.1	Motor	15
3.2	Převodovka	16
3.3	Podvozek	18
4	Praktická část - získání hodnot.....	22
4.1	Měření délkových a hmotnostních parametrů	23
4.2	Měření kinematických bodů	37
4.3	Zjištění aerodynamického přítlaku	41
5	Vkládání hodnot do simulátoru	47
5.1	Základ	48
5.2	Pneumatiky	48
5.3	Ráfky	49
5.4	Brzdy	50
5.5	Zavěšení	50
5.6	Zavěšení – výpočty.....	51

5.7	Pružiny	52
5.8	Tlumiče	52
5.9	Bumpstop	53
5.10	Motor + palivo	54
5.11	Aerodynamika	54
5.12	Převodovka	55
6	Porovnání jízdních výkonů v simulaci a v reálných podmínkách	56
6.1	Podélná dynamika vozu	57
6.1.1	Zrychlení	57
6.1.2	Zpomalení	61
6.2	Příčná dynamika vozidla	64
7	Závěr	69
	Seznam obrázků	70
	Seznam grafů	71
	Seznam tabulek	71
	Seznam použité literatury	72

1 Úvod

Automobilové simulátory jsou v dnešní době pro závodní týmy velmi důležité. Hlavní výhodou simulátoru je, že za nízké náklady se jezdec rychle naučí závodní trať a pozná svůj vůz. Poté po příjezdu na reálný okruh nemá problém hned od začátku zajíždět konkurence schopné časy. Neztrácí čas, palivo ani pneumatiky svého týmu. Samozřejmě důležitá je i bezpečnost jezdce.

V simulaci může jet jezdec naplno a testovat limity vozu. Může posunovat své brzdné body dál, zatáčky projíždět rychleji, využívat celý prostor tratě, a to vše z bezpečí kokpitu simulátoru. V případě kolize zařadí první převodový stupeň a pokračuje v jízdě. Kdyby se tato situace stala ve skutečných podmínkách, v nejlepším případě dojde pouze k poškození vozu. V horším případě může dojít i ke zranění jezdce. V obou případech však oprava škod kromě peněz bude stát i čas, který je mezi jednotlivými závodními víkendy velmi krátký. Proto jsou simulátory tak rozšířené a má je téměř každý profesionální závodní tým.

Aby simulátor jezdcovi pomohl, je nutné zajistit dvě hlavní složky. Hardware a software. Pro co nejreálnější pocit z jízdy musí být obě tyto složky kvalitní. Lepší software zajistí téměř stejné chování vozu v simulaci jako ve skutečných podmínkách, avšak jezdec nemá například ve volantu a v pedálech správný cit. Proto si při řízení skutečného vozu musí ještě zvykat na jinou sílu potřebnou pro sešlápnutí pedálů nebo otočení volantem. Lepší hardware, kdy volant a pedály mají správnou odezvu, ale chování vozu neodpovídá realitě také není ideální. Jezdec najezdí stovky hodin v simulátoru, pozná limity vozu a poté ve skutečnosti je vůz odlišný. Například má jinak poskládané převodové stupně, větší přítlak, tudíž rychleji projíždí zatáčkami, jiné rozložení hmotnosti a podobně.

Tyto rozdíly na simulátoru oproti realitě jezdce zbytečně rozptylují. Nejdříve však je nutné uvést, jaké důležité části by měl mít kvalitní software, hardware, a především vysvětlit termín simulace.

Termín simulace v oblasti jízdního modelu znamená snahu se co nejvíce přiblížit chování vozu reálnému vozu na trati. Avšak samotný jízdní model nestačí. Velmi důležitý jsou také další aspekty:

- Model pneumatik, tzn. přilnavost, zahřívání a opotřebení pneumatik v závislosti na nastavení vozu a okolních podmínkách.
- Teplota a její dopad na části vozu, například motoru.
- Přilnavost tratě, která v důsledku zahřívání stoupá.
- Síly, které na vůz působí.
- Setrvačnost nejen samotného vozu, ale i jednotlivých součástí, například pneumatik, převodovky nebo zavěšení.
- Závislost rychlosti a směru větru na výslednou aerodynamiku vozu.

Všechny výše uvedené vlastnosti jsou pro výsledný model velmi důležité a dobrý software simulátoru by je měl všechny obsahovat. Pokud software obsahuje pouze některé ze zmíněných vlastností, nazývá se polosimulátor. Pokud obsahuje minimum vlastností a záleží pouze na jízdním modelu, nazývá se arkáda. V arkádě však nejde o pocit z jízdy, spíše jen o zábavu.

Základní hardware pro dobrý simulátor představuje volant, pedály, sedadlo, výkonný počítač a dobré zobrazovací zařízení. Z těchto komponentů je však nejdůležitější právě volant a pedály, respektive jejich odezva. Detailním popisem hardwaru simulátoru, který se nachází v týmu I.S.R. Racing, bude věnována první kapitola. Je nutné však zmínit, že úprava hardwaru nebyla náplň diplomové práce.

Hlavním úkolem byla úprava simulačního modelu vozu v simulátoru rFactor na základě skutečných hodnot. Cílem bylo upravit model tak, aby pokud možno co nejvíce kopíroval chování reálného vozu. Výchozí data byla naměřena na voze Audi R8 LMS na skutečných okruzích. Je zde porovnávána podélná dynamika, příčná dynamika příčné zrychlení mezi simulačním modelem a skutečným vozem vozem. Dílčí kroky práce jsou podrobně vysvětleny v jednotlivých kapitolách. Po přečtení této práce čtenář bude schopen naměřit a získat data, která jsou potřebná pro samotnou úpravu simulátoru, dále upravit simulační model a následně ho porovnat se skutečným vozem.

2 Teoretická část - popis simulátoru

2.1 Software

Do softwaru simulátoru patří kromě samotného simulátoru i programy, které jsou použity pro provoz. Jedná se hlavně o programy zajišťující zobrazení simulátoru, podporu volantu či o sběr dat ze simulátoru a následnou analýzu.

2.1.1 Simulátor

Simulátor rFactor je jedním z nejlepších komerčních simulátorů současnosti. Používají ho profesionálními týmy napříč celým motorismem, ať se jedná o cestovní vozy, rally či Formuli 1. Týmy ho volí především z důvodu komplexnosti, kterou software nabízí. Dokáží si upravit simulační model přesně pro svůj vůz a pro danou kategorii. Je zde velký výběr tratí, které si týmy buď vytváří samy nebo si najímají specializované firmy, které trať vytvoří na základě laserového skenování.

RFactor byl vydán v roce 2005 firmou Image Space Incorporated (ISI), která vyvíjela simulátory již od roku 1990 (Obr.1). Fyzika modelu evolučně vychází ze simulátoru F1 Challenge '99-'02. Samotná fyzika nese název isiMotor2. Komplexnost tohoto nástroje umocňuje fakt, že fyzika byla použita v dalších simulátorech i několik let po vydání rFactoru, například v GTR 2, GT Legends apod. [3]



Obr. 1 Model vozu Audi R8 LMS v simulátoru rFactor

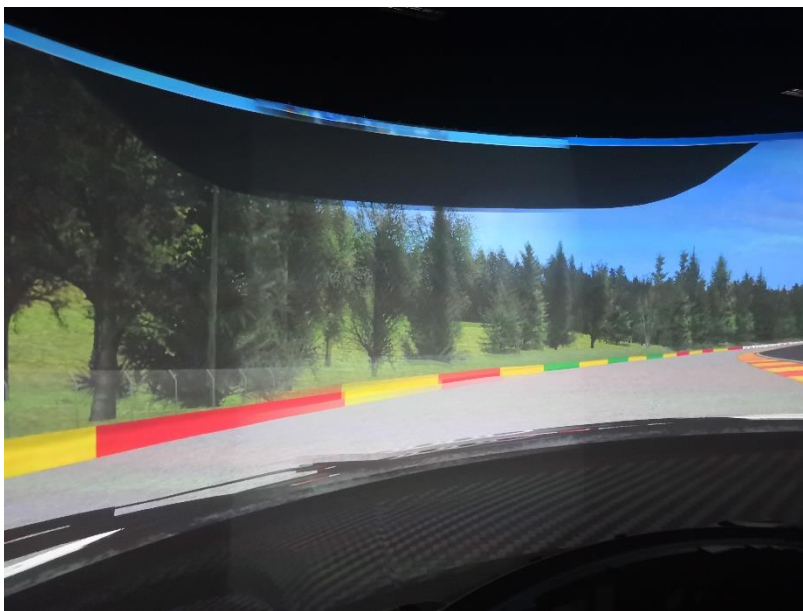
Hlavní výhodou rFactoru je jednoduchost. Kdokoliv si může upravit simulační model tak, aby se choval stejně jako vůz, se kterým každý den dojíždí do práce. Pokud ale je požadován co nejpřesnější výsledek, tedy aby se chování vozu v simulaci rovnalo chování ve skutečných podmínkách, je nutné provést mnoho detailních měření a výpočtů. Nicméně následné vložení do simulátoru není složité. Samozřejmě je po vložení nutné model otestovat, ale vkládání dat do simulátoru je srozumitelné a rychlé. Jedná se o pět textových souborů určitého formátu, ze kterých si poté fyzika isiMotors2 odebírá data a vytváří model chování vozu.

Je nutné říci, že v textových souborech ve většině případů není vysvětleno, co jednotlivé parametry představují, popřípadě jaká by měla být jejich velikost. Proto v rámci diplomové práce byl vytvořen Generátor souborů, kde je vše vysvětleno a stačí pouze zadávat hodnoty. Samotným vkládáním a Generátorem souborů je věnována kapitola 5.

Simulátor rFactor má mnoho výhod a jen málo nedostatků. Jmenujme například nepříliš dobré chování vozu v dešti nebo občasné chyby v modelech tratí. Tyto nedostatky však pro účely diplomové práce a pro trénování jezdců můžeme zanedbat. Samozřejmě byla volba simulátoru konzultována spolu s Filipem Salaquardou, závodním jezdcem týmu I.S.R. Racing. Pan Salaquarda testoval i další simulátory, například Assetto Corsa nebo rFactor 2. Ani jeden z těchto simulátorů však bohužel nevyhovoval. Problémem byl hlavně pocit za volantem a odlišný profil tratí. Je nutné zmínit, že rFactor pan Salaquarda používal a byl tedy na něj zvyklý. Tento fakt však nemění nic na kvalitách simulátoru.

2.1.2 Zobrazení

Další velmi důležitý software je software zajišťující zobrazení a prolnutí dvou projektorů na zakřiveném plátně. Obraz simulátoru musí splňovat dva požadavky. Musí být ostrý a bez zbytečného rozmazání. Právě rozmazání obrazu byl hlavní problém na počátku prací na simulátoru, neboť projektory nepatrně změnily svou pozici. Tato změna poté vyústila v nedokonalém prolnutí obou projektorů a následnému rozmazání a zdvojení, jak je zobrazeno na Obr. 2. Tento problém byl pravděpodobně způsoben neopatrnou údržbou. Jezdci měli rozmazaný obraz přímo v zorném poli. To způsobovalo problémy především při brždění, kdy se jezdcům špatně odhadovaly brzdné body a jezdcí neustále končili mimo okruh.



Obr. 2 Nesprávné prolnutí projektorů

Nejekonomičtější řešení bylo najít software, který je zdarma. Ovšem takový software na trhu bohužel není. Každá z nalezených možností byla pouhá demoverze, přičemž cena plné verze se pohybovala v řádech stovek či dokonce tisíců Euro. Proto bylo nutné řešení hledat již v nainstalovaném softwaru, který nesl název Immersive Display Pro od firmy Fly Elise-ng, ke kterému měl tým I.S.R. Racing licenci. Tento software využívá pro výpočet prolnutí kameru, která při kalibraci snímá plátno.

Toto řešení bylo levné a především účinné, nicméně nastaly komplikace. Pro snímání celého plátna se muselo přesunout celé šasi simulátoru. To samozřejmě nebylo možné, proto bylo potřeba kameru pro snímání umístit výše a naklopit ji tak, aby snímala hlavně prostor před jezdce. Kamera, kterou tým vlastnil však nedokázala nasnímat v této poloze celé plátno. Řešení tedy bylo pořídit kameru se širokoúhlým objektivem. Obraz po první kalibraci byl čistý a správně prolnutý. (Obr.3).



Obr. 3 Správné prolnutí projektorů

2.1.3 Volant

Pro správnou funkci volantu jsou v počítači nainstalovány 2 podpůrné aplikace. Aplikace, zajišťující správnou sekvenci a barvu LED osvětlení pro otáčky motoru, dále zobrazující na LCD displeji zařazený stupeň, čas kola a časový rozdíl oproti nejrychlejšímu kolu jezdce nese jméno SLI Max Manager III. Pro jezdce jsou výše zmíněné funkce volantu velmi důležité, neboť v zorném poli na plátně tyto údaje nemají. Aplikace pro odezvu volantu pochází od anglické firmy SimSteering a jedná se o špičku v oboru. Umožňuje nastavení rozsahu otáček volantu, kalibraci nebo změnu intenzity odezvy.

2.1.4 Data

Poslední podpůrný software nese název Motec i2. Jedná se o profesionální software, který zajišťuje sběr dat a jejich analýzu. Nabízí kompletní přehled všech naměřených hodnot ze simulátoru. Z tohoto softwaru lze zjistit všechny důležité údaje o chování vozu, proto je v kapitole 6 používán pro porovnání mezi simulátorem a skutečným vozem.

2.2 Hardware

Jak je uvedeno v úvodu, úprava hardwaru simulátoru v I.S.R. Racing nebyla náplň diplomové práce. Přesto je samotný hardware velmi důležitou složkou a bez správného hardwaru by simulátor rFactor nemohl fungovat, protože by výsledky mohly být diametrálně odlišné. Z toho důvodu má tým I.S.R. Racing k dispozici jedny z nejlepších komponentů, které zajistí jezdcům co nejreálnější pocit za volantem. Dále budou popsány jednotlivé komponenty hardwaru, tedy:

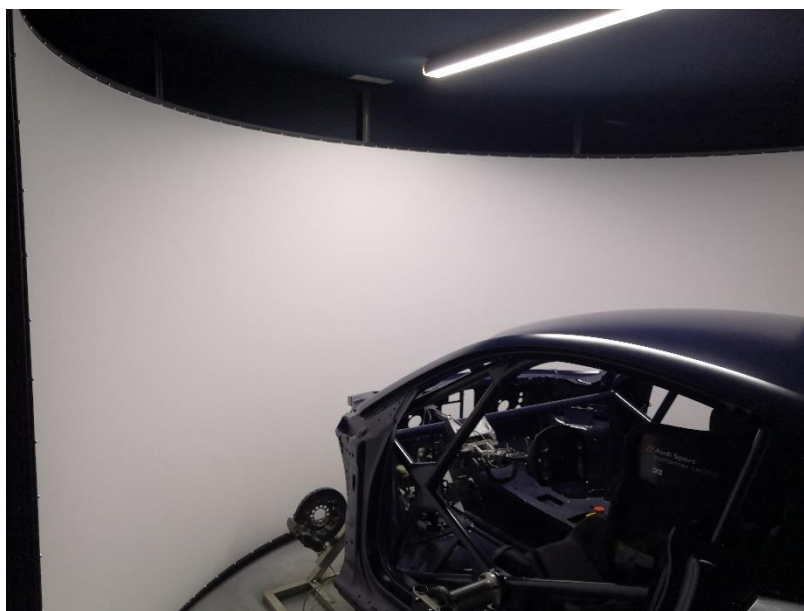
- Počítač
- Zobrazovací jednotky
- Šasi simulátoru
- Sedačka
- Volant
- Pedály

2.2.1 Počítač

Počítač obsahuje takové díly, aby zajistily plynulý obraz a stabilní provoz simulátoru. Procesor dosahuje dostatečného výkonu a zajišťuje jej značka AMD typ FX – 4350 s frekvencí 4,2 GHz. Dále počítač obsahuje velmi výkonnou grafickou kartu Nvidia GeForce GTX 980 se 4 Gb paměti. Tato karta umožňuje zobrazit plné grafické detaily simulátoru rFactor. Plné detaily samozřejmě mají vliv pouze na estetickou stránku simulátoru, avšak i to pomáhá jezdcům navodit pocit, že řídí skutečný vůz. Operační paměť značky Corsair má velikost 8 Gb a zaručuje rychlou odezvu při potřebě mít spuštěných více programů zároveň. Tedy například rFactor a software pro analýzu dat. Pevný disk Samsung SSD má dostatečnou velikost 120 Gb pro software a data.

2.2.2 Zobrazovací jednotky

Pro zobrazení je použit jeden monitor o velikosti 24 palců pro správu operačního systému a analýzu dat. Pro simulátor jsou určeny dva projektory značky BENQ typ W1080ST. Tyto projektory, jak je napsáno výše, jsou natočeny tak, aby se prolínaly a promítaly obraz na zakřivené plátno. Při spojení obou projektorů dosahuje obraz rozlišení 3840 x 2160 pixelů a je tedy dostatečně ostrý. Zakřivené plátno má poloměr 2 m a zaručuje, že jezdec vidí i do velmi ostrých zatáček (Obr.4).



Obr. 4 Zakřivené plátno simulátoru

2.2.3 Šasi simulátoru

Šasi simulátoru pochází z reálného závodního vozu Audi R8 předchozí generace, které tým I.S.R. Racing vlastnil (Obr.5). Jezdec tudíž sedí v reálném voze. Původně mělo tři stupně volnosti. Pohybovalo se na čtyřech pístech a rotačním modulu. Pohyb se tedy skládal z rotace, náklonu a vertikálního pohybu. Tyto komponenty však byly navrženy pro šasi formule World Series, kterou tým absolvoval v dřívějších letech. Tato šasi samozřejmě byla lehčí a jednotlivé pohyby odpovídaly pohybu vozu na trati.



Obr. 5 Šasi simulátoru

Po vložení šasi Audi R8, byl pohyb velice pomalý, neboť píсты nebyly dostatečně výkonné pro takovou hmotnost. Šasi váží okolo 150 kg. Tyto pomalé pohyby jezdce spíše rozptylovaly. Za výkonné písty by tým I.S.R. Racing utratil nemalé peníze a především realizace takového řešení by stála spoustu času, kdy by byl simulátor nefunkční. Proto se tým rozhodl, že šasi bude statická. To však není problém, neboť jezdci se mohou více soustředit na dění na trati.

2.2.4 Sedačka

Sedačka umístěná v šasi simulátoru také pochází z předchozí generace Audi R8 (Obr. 6). Umožňuje nastavení v podélném směru, takže i vyšší jezdec najde ideální pozici za volantem. Bezpečnostní pásy, konkrétně tříbodové, jsou připevněny k samotné šasi. Nutno podotknout, že jízda bez pásů, je mnohem jednodušší, proto v profesionálním simulátoru nesmějí chybět.



Obr. 6 Sedačka simulátoru

2.2.5 Volant

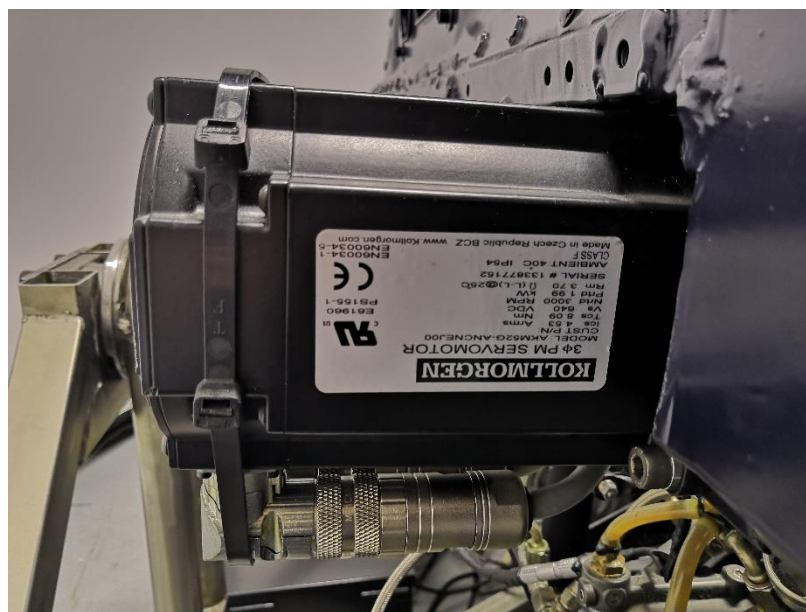
Volant si tým nechal vyrobiť na zakázku a pochádza z pôvodného simulátoru pro formule World Series (Obr.7). Tvar je ovšem velmi podobný tomu ve voze Audi R8 LMS. Na volantu je, jak je uvedeno výše, soustava LED diod pro zobrazení otáček motoru a LCD displej. Dále pět tlačítek pro ovládání například omezovače rychlosti a jeden otočný ovladač pro úpravu rozložení brzd.



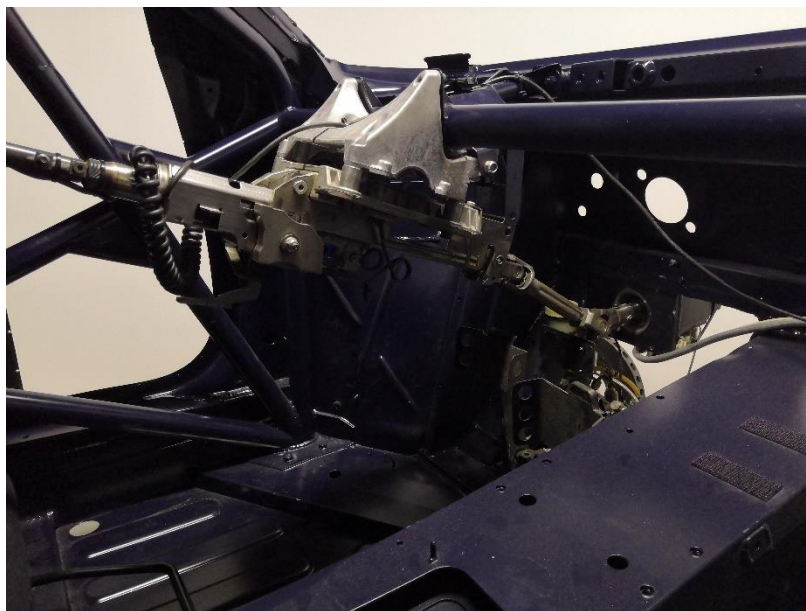
Obr. 7 Volant simulátoru

Odezvu volantu zajišťuje synchronní elektromotor od české firmy Kollmorgen s výkonem 1.99 kW a maximálním točivým momentem 6 Nm (Obr.8). S hřídelí elektromotoru je volant spojen rychlospojkou jako v reálném voze, neboť nasazení do kokpitu s nasazeným volantem je velmi obtížné.

Avšak není spojen jen jednou hřídelí z důvodu nedostatku místa v šasi. Elektromotor musel být umístěn pod rámem předního okna, tedy níže než volant, a proto je spojen s volantem pomocí hřídele s křížovým kloubem a dvěma pomocnými hřídeli, jak je zobrazeno na Obr.9. Avšak na účinnosti elektromotoru se toto řešení negativně neprojeví. Volant je výškově nastavitelný a vedle jezdce je připevněn k šasi výše zmíněný hardware od anglické firmy SimSteering pro odezvu volantu, tedy pro samotný elektromotor. Jedná se o skříň umožňující správný chod a řízení elektromotoru.



Obr. 8 Elektromotor simulátoru



Obr. 9 Hřídele volantu

2.2.6 Pedály

Pedály simulátoru jsou vyrobeny z kvalitní oceli a snímání jejich pohybu zajišťují lineární potenciometry (Obr.10). Odporů pro pedály jsou jak u plynu, tak u brzdy řešeny hydraulicky. Avšak aby jezdec měl stejný pocit při brždění jako v reálném voze, má brzdový pedál místo jednoho pístu dva. Pedál je také spojen se skutečným kotoučem a třmenem s destičkami. Takže jezdec opravdu stlačuje pomocí brzdových destiček brzdový disk (Obr.11). Síla, kterou potřebuje pro maximální sešlápnutí, je prakticky totožná jako ve skutečném závodním voze, tedy kolem 800 N. Nevýhoda tohoto řešení je, že se systém musí minimálně jednou za rok odvzdušnit. Jinak se do systému dostává vzduch a pohyb pedálu již neklade potřebný odpor. Jezdec to samozřejmě ihned pocítí.



Obr. 10 Pedály simulátoru

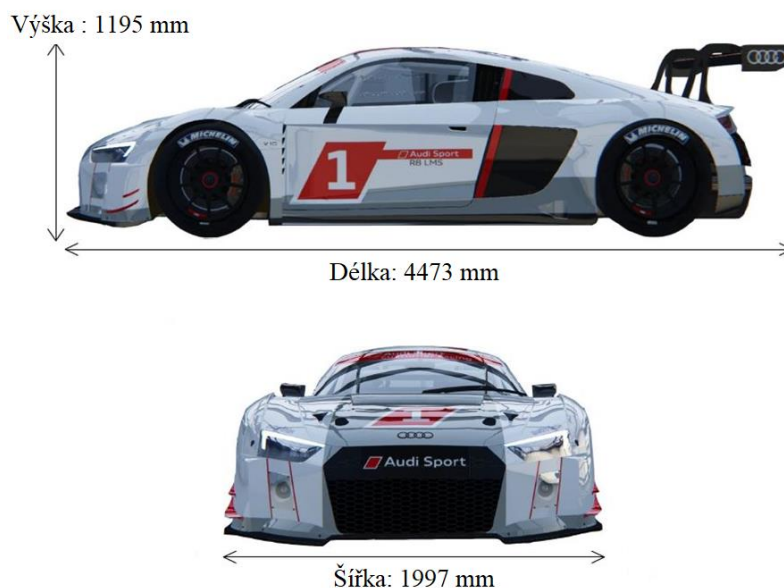


Obr. 11 Brzdový disk se třmenem a destičkami

3 Popis vozu

Audi R8 LMS je úspěšný nástupce vozu Audi R8 LMS Ultra a oproti tomuto modelu, kde se provedla pouze úprava sériového vozu, inženýři Audi sestrojili kompletně nový závodní vůz. Výsledkem je velmi rychlý a konkurenceschopný vůz. Největší změnu oproti starému modelu prodělala aerodynamika. Audi R8 LMS má zcela nově sestrojenou podlahu a difuzor. Podlaha je nyní kompletně rovná. To způsobilo, že více než 50 % přítlaku jde právě přes difuzor. Úprava přítlaku se tedy soustředila víceméně pouze na výšku vozu, neboť zadní křídlo zůstává ve většině případů ve stejné poloze. Pro oficiální závody s tímto vozem je však nutná homologace. Homologovaná je každá součást tohoto vozidla, ať se jedná o těsnění nebo například průměr ramen zavěšení.

Tato kapitola je zaměřena především na popis částí, které se týkají samotného měření a jsou nezbytné pro simulátor. Jedná se o motor, převodovku, podvozek a nakonec brzdy. Základní délkové údaje vozidla jsou uvedeny na Obr. 12.



Obr. 12 Základní délkové údaje

Další důležité údaje jsou:

Rozvor: 2700 mm

Rozchod vpředu: 1680 mm

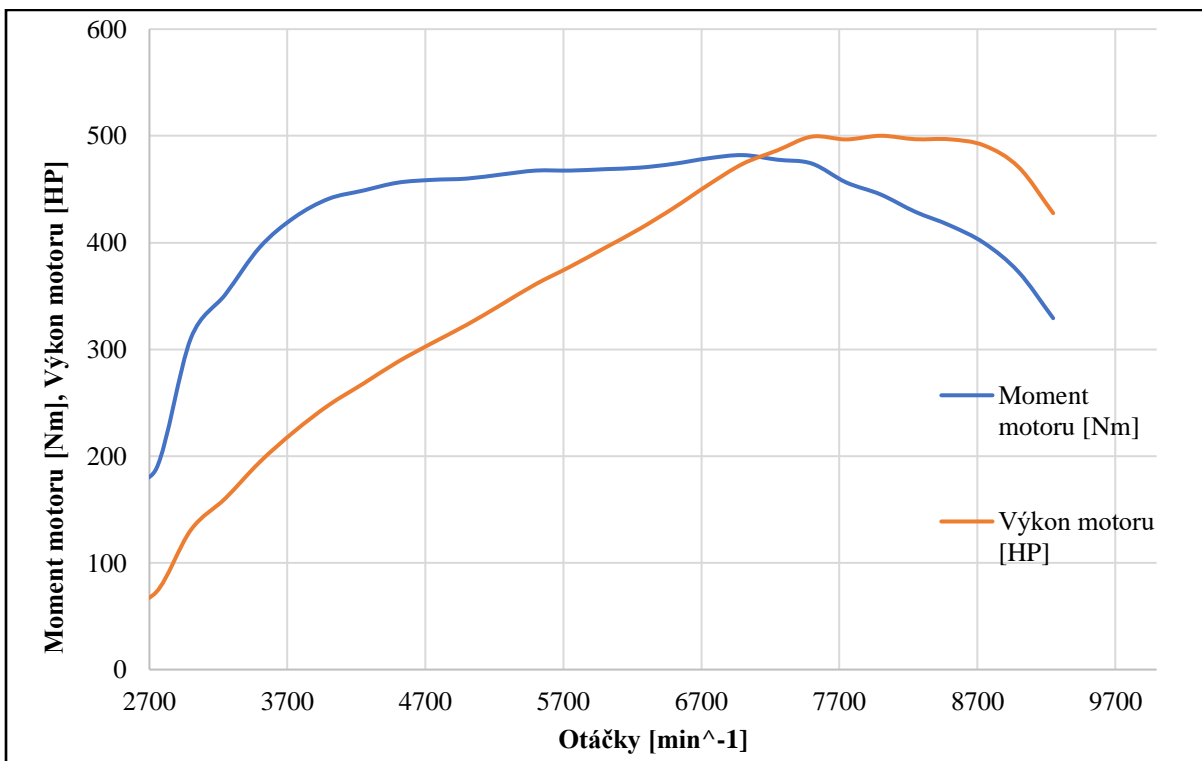
Rozchod vzadu 1685 mm.

Hmotnost: 1225 kg

3.1 Motor

Konstrukčně se jedná o stejný motor jako v předešlém vozu Audi R8 LMS Ultra a aktuální verzi sériového modelu Audi R8. Volba tohoto motoru do aktuální specifikace snižuje náklady na výrobu i cenu náhradních dílů, tudíž je výhodná jak pro automobilku, tak pro zákazníky. Je důležité také interval pro servis motoru, který je nastaven po ujetí 15000 km. Protože třída závodních vozů GT3, do které Audi R8 LMS spadá, nemá povolený pohon všech čtyř kol, jako má sériová verze, motor pohání pouze zadní nápravu. Motor je atmosférický desetiválec o objemu 5,2 l s válci natočenými naproti sobě o 90° [4]. Je uložen podélně uprostřed před zadní nápravou tedy, pro závodní vůz, v ideální poloze pro rozložení váhy. Ventilový rozvod zajišťuje systém DOHC a na válec jsou celkem 4 ventily. Maximální výkon se pohybuje v rozmezí 365-412 kW v závislosti na velikosti restriktoru a maximální točivý moment je 500 Nm. Velikost restriktoru je homologována. Pro závody GT3 vozů má aktuálně velikost 32 mm je volena tak, aby výkon motoru byl 500 koní tedy 373 kW.

Výkonovou a momentovou charakteristiku Audi tají a týmům ji k dispozici nedává. Pokud tedy tým chce vědět průběh točivého momentu a výkonu svého vozu, musí ho poslat na válcovou zkušebnu. Tým I.S.R. Racing, ji k dispozici bohužel také nemá, ovšem do simulátoru je potřeba, neboť se vkládá do jednoho z pěti textových souborů. Nicméně závodní tým K&K Racing team, vlastníci předchozí model Audi R8 LMS Ultra, vůz na válcovou zkušebnu poslal, proto obě charakteristiky jsou známy. Tento tým spolupracuje s týmem I.S.R. Racing. Jelikož se jedná o prakticky stejný motor, můžeme tuto křivku do simulátoru použít. Charakteristiky jsou zobrazeny v Grafu č. 1



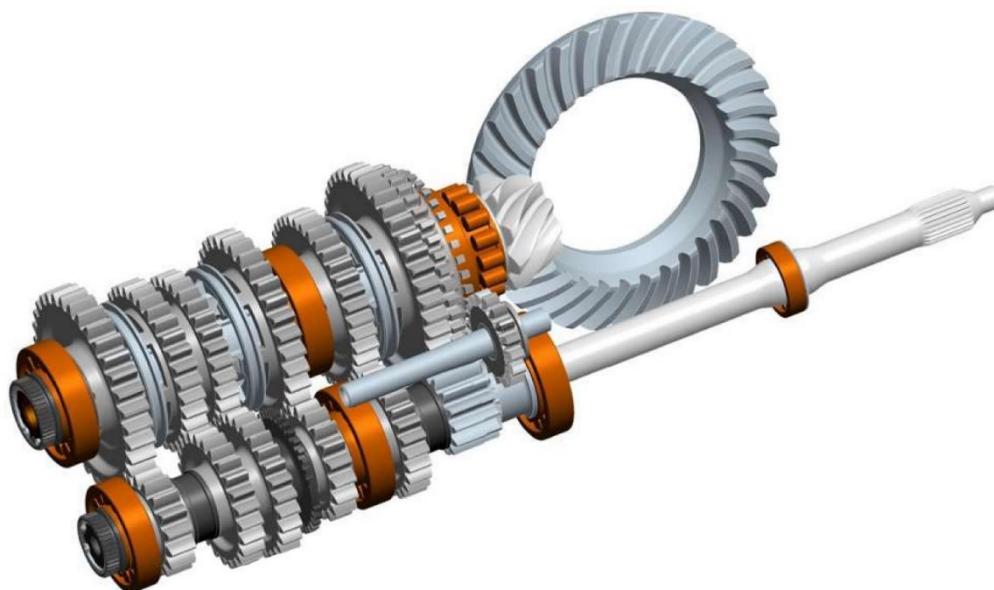
Graf č. 1 Výkonová a momentová charakteristika motoru

3.2 Převodovka

Převodovka v tomto modelu je úplně nová. Jedná se o elektro – hydraulickou šestistupňovou převodovku řazenou sekvenčně pádly pod volantem [4]. Řazení probíhá tak, že po stisknutí pádla pod volantem spínač vydá signál řídicí jednotce, která pomocí stlačeného vzduchu z kompresoru, uloženého vedle řidiče, pneumaticky přeřadí ovládacím systémem další převodový stupeň. Spojka je sepnutá pouze ve chvíli přeřazení z neutrálu na první převodový stupeň a při rozjezdu. Při samotném řazení jednotlivých stupňů je spojka rozepnutá. Převodovka je uložena za motorem podélně opět z důvodu ideálního rozložení váhy. U všech převodových stupňů se jedná o čelní soukolí s přímými zuby a řadí se pomocí zubových spojek pro úsporu hmotnosti a rozměrů. Jedinou výjimku tvoří konečný převod, kde se jedná o hypoidní soukolí se zakřivenými zuby, které má převodový poměr 3,556. Jednotlivé stupně a jejich poměry jsou uvedeny v Tab. č. 1. a schéma samotné převodovky na Obr. 13.

Převodový stupeň	Počet zubů Malé: Velké kolo	Převodový poměr
R	14:39	2,786
1.	14:39	2,786
2.	16:34	2,125
3.	18:31	18:31
4.	25:36	1,440
5.	25:31	1,240
6.	27:29	1,074

Tab. č. 1 Převodové poměry [1]



Obr. 13 Schéma převodového ústrojí [1]

3.3 Podvozek

Zavěšení vozu Audi R8 LMS je nezávislé na obou nápravách. Jedná se o nápravy lichoběžníkové. Tlumiče dodala firma KW a jejich tlumení je plně nastavitelné. Pružiny pochází z firmy Eibach a tým jich má na výběr pět podle tuhosti. Samozřejmostí je příčný stabilizátor a to na přední i zadní nápravě.

Ramena náprav jsou ukotvena na karoserii a těhlici pomocí kulových čepů. Tyto čepy mají přesně danou polohu tzv. kinematický bod. Kromě náprav mají kinematické body i tlumiče, tyč řízení a spojovací tyč na zadní nápravě. Kinematické body jsou pro tým a pro simulátor velmi důležité. V simulátoru se zadávají do jednoho z pěti textových souborů a z těchto bodů poté simulátor vytváří jednotlivá ramena a kinematiku zavěšení. Pro tým jsou důležité především pro kontrolu správného uložení částí podvozku. Jestliže vůz bude mít vážnější havárii a poloha těchto bodů by se nekontrolovala, je možné, že by se vůz choval odlišně. Jednotlivá ukotvení jsou totiž navrhována tak, aby vůz měl určitý předklon karoserie nebo střed klopení. Při změně polohy těchto ukotvení by se vůz mohl například při brždění více klopit na přední kola, což by způsobovalo nečekané změny váhy a mohlo by dojít až ke smyku.

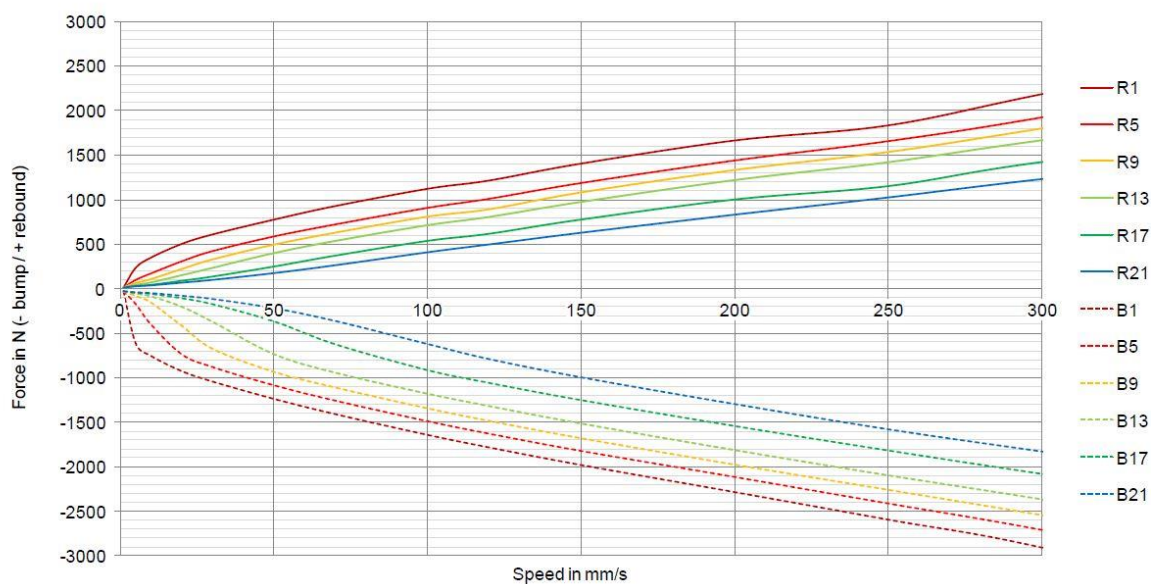
Tlumiče a jejich nastavení výrazně ovlivňují chování vozu, ať se jedná o zrychlení, brždění či o zatáčení vozu. Dokáží výrazně eliminovat pohyb karoserie, změny váhy a při nájezdu na obrubník rychle utlumit následné kmitání. Nastavení tlumičů definuje jejich charakteristika. Ta je samozřejmě nelineární, tedy s rostoucí rychlostí tlumiče roste nelineárně i síla potřebná ke stlačení. Avšak pro zjednodušení zadávání v simulátoru rFactor se tvůrci rozhodli pro charakteristiku lineární. Jak takové zadávání vypadá je upřesněno v kapitole 5.

Tým získá tovární charakteristiku přímo od Audi při koupi vozu a je na něm, jestli ji ponechá, nebo ji změní. Je nutno říci, že pro úpravu tlumičů je potřebný tester tlumičů. Ten I.S.R. Racing vlastní, proto si charakteristiku tvoří sami (Obr. 14). Úprava tlumiče probíhá uvnitř tlumiče změnou velikosti ventilů, změnou počtu vložek či na hřídeli tlumiče změnou počtu Bumpstopů [5]. Ukázka tovární charakteristiky pro přední tlumič je na Obr.15, kde na ose x je rychlost tlumiče v mm/s a na ose y je v kladné polorovině síla potřebná k roztáhnutí tlumiče, a na záporné naopak síla potřebná ke stlačení tlumiče. Jak je z charakteristiky vidět, tento typ tlumiče má 11 nastavení pro Bump, neboli stlačení, a 11 nastavení pro Rebound, neboli roztáhnutí tlumiče. Tato nastavení se volí pomocí otočného ovladače na nádrži tlumiče. Otáčení ovladačem doleva, jak u stlačení, tak

roztažení, změkčuje nastavení tlumiče, doprava naopak tvrdne. Při každém otočení ovladače se ozve kliknutí. Proto se počítá počet těchto kliknutí od krajní polohy tzv. „Click“.



Obr. 14 Tester tlumičů



Obr. 15 Charakteristika předního tlumiče [1]

Senzory pro snímání pohybu tlumičů jsou od značky Variohm a jedná se o lineární potenciometry. Jejich specifikace je v Tab. č. 2 a samotné senzory na Obr. 15. Data z těchto snímačů tým používá především k určení četnosti nárazu tlumiče na doraz neboli Bumpstop. Jedná se o velmi důležitý údaj, neboť po tomto nárazu tlumič mění svou charakteristiku, a to je samozřejmě nežádoucí. V diplomové práci jsou data z těchto senzorů použita pro výpočet aerodynamického přítlaku.

Elektrický zdvih	25 - 250 mm (8 nastavení)
Mechanický zdvih	+ 1,5 mm elektrického zdvihu
Linearita	Až +/- 0.1 %
Rozlišení	Nekonečné
Max. operační rychlost	10 m/sec
Náraz	50g, 10 ms
Provozní teploty	-40 + 100 °C
Maximální napájecí napětí	42 V DC
Životnost	> 25 x10 ⁶ Cyklů

Tab. č. 2 Specifikace senzoru VLP 100 [6]



Obr. 16 Senzor polohy tlumiče [6]

Rozlišení, tedy vzorkovací frekvenci, si volí každý tým zvlášť. Pro přesnější data je samozřejmě lepší menší vzorkovací frekvence. To však znamená více dat a pro vytrvalostní závody toto řešení není vhodné, neboť by tato data zbytečně zabírala místo. Mohlo by tedy dojít až k zaplnění paměti a řídicí jednotka by přestala data zaznamenávat. Nejběžněji se volí frekvence 10 ms.

Příčné stabilizátory jsou přes jednoduchý mechanismus uchyceny na spodních ramenech obou náprav. Každé uchycení má celkově tři nastavení: měkké, střední a tvrdé. Tuhost v krutu jednotlivých nastavení je pro přední stabilizátor 776, 1358, 1940 Nm/° a pro zadní 2385,2921,3359 Nm/° [1]. Příčný stabilizátor redukuje náklon karoserie v zatáčce a pomocí těchto šesti nastavení lze velice jednoduše měnit nastavení vozu na přetáčivé či nedotáčivé. Tvrdší přední stabilizátor způsobuje nedotáčivost vozu, tvrdší zadní stabilizátor naopak přetáčivost vozu.

Brzdy jsou kotoučové s pevným třmenem na obou nápravách. Liší se však jak velikostí kotoučů a třmenů, tak počtem pístů. Vpředu je třmen a kotouč větší a brzdy jsou šesti-písté. Vzadu jsou brzdy pouze čtyř-písté. Při brždění na jezdcе působí podélné přetížení více 2 G. Průměry pístů, hmotnosti a velikosti kotoučů a třmenů budou rozebrány v kapitole 4. Nechybí ani vrtání kotoučů a jejich větrání, které napomáhá jejich chlazení a dále nasávací otvory v přední a boční části, které ženou studený vzduch na kotouče. Aby se brzdy zahřály dříve, na provozní teplotu, například pro kvalifikaci, kdy na zahřátí má jezdec ani ne celé kolo, tyto průduchy se zčásti uzavírají. Ovšem maximální výška uzavření je homologována a přísně se kontroluje. Pro zjištění teploty brzd tým používá speciální barvy, které se nanáší na obvod kotouče. Každá z těchto barev se vypařuje při určité teplotě.

4 Praktická část - získání hodnot

V této kapitole je uvedena hlavní náplň diplomové práce, tedy získání hodnot ze skutečného vozu. Nejde samozřejmě jen o měření délkových a hmotnostních parametrů, ale i o výpočet momentů setrvačnosti, dále výpočet aerodynamického přítlaku a zjištění poloh kinematických bodů.

Nejdříve je však nutné znát, co přesně se do simulátoru zadává, to znamená popsat, alespoň stručně, pět textových souborů, ze kterých simulátor získává data. Většina parametrů v textových souborech jsou buď polohy, momenty setrvačnosti k jednotlivým osám, nebo hmotnosti. Dále pak rozsah nastavení například odklonu nebo optimální teploty brzd, motoru atd. Jednotlivé soubory se liší příponou a jména těchto souborů musí mít přesně daný formát, který vypadá následovně: „Jméno vozu.přípona“. Jméno vozu se nemění a mění se pouze přípona. Pro vůz Audi R8 LMS a například soubor s příponou .PM vypadá tedy formát: AudiR8LMS.PM, pro soubor HDV vypadá AudiR8LMS.HDV atd.

Nejdůležitější soubor má příponu .HDV. Jedná se o hlavičkový soubor, který obsahuje nejvíce parametrů. Zde se zadává například hmotnost celého vozu, jeho moment setrvačnosti dále rozsahy nastavení, přítlak všech částí vozu, tedy karoserie, předního křídla, zadního křídla a difuzoru, teploty atd. Druhý soubor má příponu .PM. Zde se zadávají hlavně polohy kinematických bodů a z tohoto souboru simulátor vytváří podvozek vozidla. Třetí soubor má příponu .TBC a jedná se o soubor pro pneumatiky. Zadává se zde křivka opotřebení v závislosti na aktuálním stavu pneumatiky, dále celková přilnavost, velikost, hmotnost, moment setrvačnosti pneumatiky a ráfku atd. Čtvrtý a pátý soubor má příponu .INI a jedná se o soubory pro převodovku a motor. V souboru pro převodovku se zadává pouze počet zubů jednotlivých převodů. V souboru pro motor se zadává momentová křivka, dále například poloha omezovače nebo optimální teplota motoru.

4.1 Měření délkových a hmotnostních parametrů

V této části jsou uvedeny, kromě samotných výsledků z měření, i momenty setrvačnosti k jednotlivým osám. V celé diplomové práci je používán klasický kartézský souřadnicový systém, tedy podélná osa je X, vertikální Z a příčná Y.

Pneumatiky

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab.č.3. V závorkách je uvedeno označení příslušného parametru pro další výpočtu.

	Přední	Zadní	
Hmotnost (m)	11	11	kg
Poloměr (r_p)	0,336	0,347	m
Jmenovitá šířka (b_1)	0,330	0,355	m
Šířka běhounu (b_2)	0,32	0,345	m
Tloušťka běhounu (t_1)	0,010	0,010	m
Tloušťka bočnice (t_2)	0,015	0,015	mm

Tab. č. 3 Naměřené hodnoty pneumatik

Výpočet momentů setrvačnosti:

Výpočet momentů setrvačností vychází pouze z naměřených hodnot. Postup výpočtu pro přední pneumatiky je uveden v rovnicích 4.1 – 4.15.

Poloměr poloviny bočnice:

$$r_b = \left(\frac{r_p - r_{ráfku}}{2} \right) + r_{ráfku} = \left(\frac{(0,336 - 0,229)}{2} \right) + 0,229 = 0,283 \text{ m} \quad (4.1)$$

Plocha dezénu:

$$S_d = (2 * r_p * \pi) * b_2 = (2 * 0,336 * \pi) * 0,32 = 0,676 \text{ m}^2 \quad (4.2)$$

Plocha bočnic:

$$S_b = 2 * \pi * r_p^2 - \pi * r_{ráfku}^2 = 2 * ((\pi * 0,336^2) - (\pi * 0,229^2)) = 0,380 \text{ m}^2 \quad (4.3)$$

Plocha vnitřní bočnice:

$$S_{vb} = \pi * r_b^2 - \pi * r_{ráfku}^2 = \pi * 0,283^2 - \pi * 0,229^2 = 0,086 \text{ m}^2 \quad (4.4)$$

Plocha vnější bočnice:

$$S_{vnb} = \pi * r_p^2 - \pi * r_b^2 = \pi * 0,336^2 - \pi * 0,283^2 = 0,104 \text{ m}^2 \quad (4.5)$$

Hmotnost bočnic:

$$m_b = \frac{m}{\left(\frac{t_1}{t_2}\right) * \left(\frac{S_d}{S_b}\right) + 1} = \frac{11}{\left(\frac{0,010}{0,015}\right) * \left(\frac{0,676}{0,38}\right) + 1} = 5,033 \text{ kg} \quad (4.6)$$

Hmotnost vnější bočnice:

$$m_{vnb} = \frac{S_{vnb}}{S_{vnb} + S_{vn}} * m_b = \frac{0,104}{0,104 + 0,086} * 5,033 = 2,755 \text{ kg} \quad (4.7)$$

Hmotnost vnitřní bočnice:

$$m_{vb} = \frac{S_{vn}}{S_{vnb} + S_{vn}} * m_b = \frac{0,086}{0,104 + 0,086} * 5,033 = 2,278 \text{ kg} \quad (4.8)$$

Hmotnost běhounu:

$$m_{be} = m - m_b = 11 - 5,033 = 5,967 \text{ kg} \quad (4.9)$$

Moment setrvačnosti běhounu k ose Y:

$$I_{by} = \frac{1}{2} * m_{be} * \left(r_p^2 + (r_p - t_1)^2\right) = \frac{1}{2} * 5,97 * \left(0,336^2 + (0,336 - 0,010)^2\right) = 0,654 \text{ kg} * \text{m}^2 \quad (4.10)$$

Moment setrvačnosti běhounu v ose X, Z:

$$I_{bxz} = \frac{1}{12} * m_{be} * \left(3 * (r_p^2 + (r_p - t_1)^2) + b_2^2\right) = \frac{1}{12} * 5,97 * \left(3 * (0,336^2 + (0,336 - 0,010)^2) + 0,32^2\right) = 0,378 \text{ kg} * \text{m}^2 \quad (4.11)$$

Moment setrvačnosti vnější bočnice k ose Y:

$$I_{vnb_y} = \frac{1}{2} * m_{vnb} * (r_p^2 + r_b^2) = \frac{1}{2} * 2,755 * (0,336^2 + 0,2825^2) = 0,265 \text{ kg} * \text{m}^2 \quad (4.12)$$

Moment setrvačnosti vnější bočnice k ose X, Z:

$$I_{vnb_{xz}} = \frac{1}{2} * I_{vnb_y} + \frac{1}{2} * b_2^2 = \frac{1}{2} * 0,265 + \frac{1}{2} * 0,32^2 = 0,183 \text{ kg} * \text{m}^2 \quad (4.13)$$

Moment setrvačnosti vnitřní bočnice k ose Y:

$$I_{vby} = \frac{1}{2} * m_{vb} * (r_{ráfku}^2 + r_b^2) = I_{vby} = \frac{1}{2} * 2,278 * (0,229^2 + 0,283^2) = 0,151 \text{ kg} * m^2 \quad (4.14)$$

Moment setrvačnosti vnější bočnice k ose X, Z:

$$\frac{1}{2} * I_{vby} + \frac{1}{2} * b_1^2 = \frac{1}{2} * 0,151 + \frac{1}{2} * 0,33^2 = 0,129 \text{ kg} * m^2 \quad (4.15)$$

Celkový moment setrvačnosti předních pneumatik je poté součet momentů setrvačnosti všech částí pneumatiky jak k ose Y, tak k ose X, Z. Platí tedy:

$$I_{ppy} = I_{by} + I_{vnby} + I_{vby} = 0,6539 + 0,265 + 0,151 = 1,07 \text{ kg} * m^2 \quad (4.16)$$

$$I_{ppxz} = I_{bxz} + I_{vnxz} + I_{vbxz} = 0,378 + 0,183 + 0,129 = 0,691 \text{ kg} * m^2 \quad (4.17)$$

Jelikož postup výpočtu momentů setrvačnosti pro zadní pneumatiky je totožný s předními, jsou v Tab.č.4 uvedeny pouze výsledky rovnic 4.1–17. Ukázka měření je poté na Obr. č. 17. Je zde však zobrazeno měření celkové hmotnosti jak pneumatiky, tak i ráfku. V dalším měření je změřena pouze hmotnost ráfku, takže hmotnost pneumatiky je vypočtena odečtem hmotnosti ráfku od celkové.

Plochy a poloměr

Plocha dezénu	0,752	m^2
Plocha bočnic	0,427	m^2
Plocha vnitřní bočnice	0,096	m^2
Plocha vnější bočnice	0,118	m^2
Poloměr poloviny bočnice	0,288	m

Hmotnosti

Vnitřní bočnice	2,271	kg
Vnější bočnice	2,789	kg
Bočnic	5,059	kg
Běhounu	5,941	kg

Momenty setrvačnosti k ose Y

Běhoun	0,695	$kg * m^2$
Vnější bočnice	0,284	$kg * m^2$
Vnitřní bočnice	0,154	$kg * m^2$
Moment setrvačnosti	1,132	$kg * m^2$

Momenty setrvačnosti k ose X, Z

Běhoun	0,406	$kg * m^2$
Vnější bočnice	0,201	$kg * m^2$
Vnitřní bočnice	0,139	$kg * m^2$
Moment setrvačnosti	0,748	$kg * m^2$

Tab. č. 4 Výsledky pro zadní pneumatiky



Obr. 17 Měření hmotnosti pneumatiky a ráfku

Kromě pneumatiky musely být změřeny také ráfky. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab.č.5.

Ráfky

		Přední	Zadní	
Ráfky	Hmotnost (m)	11	11,3	kg
	Průměr (d_p)	18	18	palců
	Šířka (b_r)	0,3175	0,3302	m
	Počet paprsků (n)	9	9	
Tělo ráfku	Tloušťka (t_r)	0,0075	0,0075	m
	Vnitřní průměr upevnění (d_u)	0,16	0,08	m
	Průměr náboje (d_n)	0,1	0,05	m
	Šířka náboje (b_n)	0,03	0,03	m
Paprsky	Poloměr (r_{pa})	0,023	0,023	m
	Tloušťka (t_p)	0,0225	0,0225	m
Okraj ráfku	Tloušťka (t_{ra})	0,0075	0,0075	m
	Výška (h_r)	0,022	0,022	m
	Vnější poloměr (r_v)	0,251	0,251	m

Tab. č. 5 Naměřené hodnoty ráfků

Je nutné však uvést také výsledky pomocných rozměrů, neboť tyto rozměry jsou použity k dalším výpočtům. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 6. Samozřejmě jako u pneumatik je potřeba vypočítat momenty setrvačnosti k jednotlivým osám. Pro přední ráfky je postup uveden v rovnicích 4.18 – 4.31. Jelikož materiál ráfků (Hořčík) je znám, vynásobením objemu hustotou tohoto materiálu, která je 1740 kg/m^3 , lze jednoduše zjistit hmotnost částí, která je uvedena v Tab. č.7. Ukázka měření je zobrazena na Obr. č. 18

Tělo ráfku	Poloměr (r_r)	0,229	0,229	m
	Vnější poloměr (r_{vn})	0,251	0,251	m
	Vnitřní poloměr (r_v)	0,2215	0,2215	m
Paprsky	Průřez (A)	0,00166	0,00166	m^2
	Délka (l)	0,1415	0,1415	m

Tab. č. 6 Pomocné rozměry

Objem okraje ráfku:

$$V_o = 2 * t_r * (\pi * r_{vn}^2 - r_r^2) = 2 * 0,0075 * (\pi * (0,251^2 - 0,229^2)) = 0,0005 \text{ m}^3 \quad (4.18)$$

Objem těla ráfku

$$V_t = \pi * (r_{vn}^2 - r_r^2) * b_r = \pi * (0,251^2 - 0,229^2) = 0,0034 \text{ m}^3 \quad (4.19)$$

Objem paprsků

$$V_p = n * A * l = 9 * 0,0016611 * 0,1415 = 0,0021 \text{ m}^3 \quad (4.20)$$

Objem upevnění

$$V_u = \pi * \left(\left(\frac{d_u}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_n}{2} \right)^2 \right) * b_n = \pi * \left(\left(\frac{0,16}{2} \right)^2 - \left(\frac{0,1}{2} \right)^2 \right) * 0,03 = 0,0004 \text{ m}^3 \quad (4.21)$$

Okraj (m_o)	0,866	kg
Tělo ráfku (m_t)	5,864	kg
Paprsky ráfku (m_p)	3,681	kg
Upevnění (m_u)	0,640	kg

Tab. č. 7 Hmotnosti částí ráfků

Moment setrvačnosti okraje ráfku k ose Y

$$I_{oy} = \frac{1}{2} * m_o * (r_v^2 + r_{vn}^2) = \frac{1}{2} * 0,866 * (0,2215^2 + 0,251^2) = 0,05 \text{ kg} * \text{m}^2 \quad (4.22)$$

Moment setrvačnosti okraje ráfku k ose X, Z

$$I_{oxz} = m_o * \left(\frac{1}{2} * r_v + \frac{1}{2} * t_r \right)^2 + \frac{m_o}{12} * (3 * (r_v^2 + r_{vn}^2) + t_{ra}^2) = 0,866 * \left(\frac{1}{2} * 0,2215 + \frac{1}{2} * 0,0075 \right)^2 + \frac{0,866}{12} * (3 * (0,2215^2 + 0,251^2) + 0,0075^2) = 0,036 \text{ kg} * \text{m}^2 \quad (4.23)$$

Moment setrvačnosti těla ráfku k ose Y

$$I_{ty} = \frac{1}{2} * m_t * (r_v^2 + r_{vn}^2) = \frac{1}{2} * 5,864 * (0,229^2 + 0,2215^2) = 0,298 \text{ kg} * \text{m}^2 \quad (4.24)$$

Moment setrvačnosti těla ráfku k ose X, Z

$$I_{txz} = \frac{1}{12} * m_t * (3 * (r_v^2 + r_{vn}^2) + b_r^2) = \frac{1}{12} * 5,864 * (3 * (0,229^2 + 0,2215^2) + 0,3175^2) = 0,198 \text{ kg} * \text{m}^2 \quad (4.25)$$

Moment setrvačnosti paprsků ráfku k ose Y

$$I_{py} = \frac{1}{2} * m_p * \left(\left(\frac{d_u}{2} \right)^2 + \left(\frac{d_u}{2} + l \right)^2 \right) = \frac{1}{2} * 3,681 * \left(\left(\frac{0,16}{2} \right)^2 + \left(\frac{0,16}{2} + 0,1415 \right)^2 \right) = 0,102 \text{ kg} * \text{m}^2 \quad (4.26)$$

Moment setrvačnosti paprsků ráfku k ose X, Z

$$I_{pxz} = \frac{1}{12} * m_p *$$

$$(3 * (l^2 + r_{pa}^2) + t_{pa}^2) = \frac{1}{12} * 3,681 * (3 * (0,1415^2 + 0,023^2) + 0,0225^2) = 0,019 \text{ kg} * m^2 \quad (4.27)$$

Moment setrvačnosti upevnění ráfku k ose Y

$$I_{uy} = \frac{1}{2} * m_u * \left(\left(\frac{d_u}{2} \right)^2 + \left(\frac{d_n}{2} \right)^2 \right) = \frac{1}{2} * 0,640 * \left(\left(\frac{0,16}{2} \right)^2 + \left(\frac{0,1}{2} \right)^2 \right) = 0,0028 \text{ kg} * m^2 \quad (4.28)$$

Moment setrvačnosti upevnění ráfku k ose X, Z

$$I_{uxz} = \frac{1}{12} * m_u * \left(3 * \left(\left(\frac{d_u}{2} \right)^2 + \left(\frac{d_n}{2} \right)^2 \right) + b_n^2 \right) = \frac{1}{12} * 0,640 * \left(3 * \left(\left(\frac{0,16}{2} \right)^2 + \left(\frac{0,1}{2} \right)^2 \right) + 0,03^2 \right) = 0,002 \text{ kg} * m^2 \quad (4.29)$$



Obr. 18 Kontrolní měření hmotnosti ráfku

Celkový moment setrvačnosti předních ráfků je poté opět součtem momentů setrvačnosti všech částí. Platí tedy:

$$I_{pry} = I_{oy} + I_{ty} + I_{py} + I_{uy} = 0,05 + 0,298 + 0,102 + 0,0028 = 0,453 \text{ kg} * m^2 \quad (4.30)$$

$$I_{prxz} = I_{oxz} + I_{txz} + I_{pxz} + I_{uxz} = 0,036 + 0,198 + 0,019 + 0,002 = 0,255 \text{ kg} * m^2 \quad (4.31)$$

Pro zadní ráfky jsou v Tab. č. 8. uvedeny stejně jako pro pneumatiky pouze výsledky jednotlivých vztahů.

Objemy

Okraj	0,001	m^3
Tělo	0,004	m^3
Paprsky	0,002	m^3
Centrální upevnění	0,0003	m^3

Hmotnosti

Okraj	0,866	kg
Tělo	6,099	kg
Paprsky	3,681	kg
Centrální upevnění	0,640	kg

Momenty setrvačnosti k ose Y

Okraj	0,050	$kg * m^2$
Tělo	0,310	$kg * m^2$
Paprsky	0,103	$kg * m^2$
Centrální upevnění	0,003	$kg * m^2$
Moment setrvačnosti	0,464	$kg * m^2$

Momenty setrvačnosti k ose X, Z

Okraj	0,036	$kg * m^2$
Tělo	0,210	$kg * m^2$
Paprsky	0,019	$kg * m^2$
Centrální upevnění	0,001	$kg * m^2$
Moment setrvačnosti	0,267	$kg * m^2$

Tab. č. 8 Výsledky pro zadní ráfky

Poslední rotační součást, jejíž měření je nutné pro simulátor je samozřejmě brzda. Opět nejdříve však naměřené hodnoty, které jsou uvedeny v Tab.č.9.

Brzdy

	Přední	Zadní	
Disk	Hmotnost (m_d)	10	6,5 kg
	Celkový průměr (d_c)	0,38	0,355 m
	Vnitřní průměr (d_v)	0,247	0,255 m
	Průměr upínání (d_u)	0,22	0,225 m
	Šířka disku (b_d)	0,034	0,032 m
	Šířka větrání (b_v)	0,018	0,019 m
	Tloušťka příruby (t_p)	0,008	0,008 m
	Počet lopatek	72	48
Brzdové upínání	Hmotnost (m_{up})	0,6	0,5 kg
	Vnější průměr (d_{vup})	0,235	0,24 m
	Průměr náboje (d_n)	0,068	0,073 m
	Tloušťka (t_{up})	0,008	0,0075 m
Brzdový třmen	Hmotnost	3,5	2,5 kg
	Průměr hlavního válce	0,015875	0,0206 m
	Průměr prvního pístu	0,036	0,03 m
	Průměr druhého pístu	0,03	0,028 m
	Průměr třetího pístu	0,028	m

Tab. č. 9 Naměřené hodnoty brzd

V Tab.č. 9 chybí dva důležité údaje, které však nelze změřit. Jedná se o relativní objem ventilace a příruby, tedy poměr, jaký objem zaujímá ventilace a příruba v kotouči vůči celkovému objemu. Tyto hodnoty jsou důležité pro výpočet objemů jak ventilace, tak příruby. Velikost těchto poměrů je na základě předchozích měření odhadnutá. Tudiž relativní objem ventilace V'_v má velikost 0,55 a relativní objem příruby V'_p má velikost 0,6. Tak jako u pneumatik a ráfků i zde je uveden postup výpočtu momentů setrvačností k jednotlivým osám přední brzdy, a to v rovnicích 4.32 – 4.46.

Plocha kotouče

$$S_k = \pi * \left(\left(\frac{d_c}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_v}{2} \right)^2 \right) = \pi * \left(\left(\frac{0,38}{2} \right)^2 - \left(\frac{0,247}{2} \right)^2 \right) = 0,065 \text{ m}^2 \quad (4.32)$$

Objem kotouče

$$V_k = S_p * (b_d - b_v) = 0,065 * (0,034 - 0,018) = 0,001 \text{ m}^3 \quad (4.34)$$

Objem ventilace

$$V_v = S_p * b_v * V'_v = 0,065 * 0,018 * 0,55 = 0,00065 \text{ m}^3 \quad (4.35)$$

Objem příruby

$$V_p = b_v * V'_p * \pi * \left(\left(\frac{d_v}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_u}{2} \right)^2 \right) = 0,018 * 0,6 * \pi * \left(\left(\frac{0,247}{2} \right)^2 - \left(\frac{0,22}{2} \right)^2 \right) = 0,00011 \text{ m}^3 \quad (4.36)$$

Hmotnosti jednotlivých částí jsou určeny vynásobením hmotnosti celého disku poměry objemů. Tedy pro hmotnost kotouče platí rovnice 4.37, pro hmotnost ventilace rovnice 4.38 a pro hmotnost rovnice vztah 4.39.

$$m_k = \frac{V_d}{V_v + V_d + V_p} * m_d = \frac{0,001}{0,00065 + 0,00011 + 0,001} * 10 = 5,81 \text{ kg} \quad (4.37)$$

$$m_v = \frac{V_v}{V_v + V_d + V_p} * m_d = \frac{0,00065}{0,00065 + 0,00011 + 0,001} * 10 = 3,596 \text{ kg} \quad (4.38)$$

$$m_p = \frac{V_p}{V_v + V_d + V_p} * m_d = \frac{0,00011}{0,00065 + 0,00011 + 0,001} * 10 = 0,593 \text{ kg} \quad (4.39)$$

Moment setrvačnosti kotouče a ventilace k ose Y

$$I_{kvy} = \frac{m_k + m_v}{2} * \left(\left(\frac{d_c}{2} \right)^2 + \left(\frac{d_v}{2} \right)^2 \right) = \frac{5,81 + 3,596}{2} * \left(\left(\frac{0,38}{2} \right)^2 + \left(\frac{0,247}{2} \right)^2 \right) = 0,241 \text{ kg} * \text{m}^2 \quad (4.40)$$

Moment setrvačnosti kotouče k ose X, Z

$$I_{kxz} = \frac{1}{12} * m_k * \left(3 * \left(\left(\frac{d_c}{2} \right)^2 + \left(\frac{d_v}{2} \right)^2 \right) + (b_d - b_v)^2 \right) + m_k * \left(\frac{b_d - b_v}{2} + t_p \right)^2 = \frac{1}{12} * 5,81 * \left(3 * \left(\left(\frac{0,38}{2} \right)^2 + \left(\frac{0,247}{2} \right)^2 \right) + (0,034 - 0,18)^2 \right) + 5,81 * \left(\frac{0,034 - 0,018}{2} + 0,008 \right)^2 = 0,0762 \text{ kg} * \text{m}^2 \quad (4.41)$$

Moment setrvačnosti ventilace k ose X, Z

$$I_{vzx} = \frac{1}{12} * m_v * \left(3 * \left(\left(\frac{d_v}{2} \right)^2 + \left(\frac{d_c}{2} \right)^2 \right) + b_v^2 \right) = \frac{1}{12} * 3,596 * \left(3 * \left(\left(\frac{0,247}{2} \right)^2 + \left(\frac{0,38}{2} \right)^2 \right) + 0,018^2 \right) = 0,046 \text{ kg} * \text{m}^2 \quad (4.42)$$

Moment setrvačnosti příruby k ose Y

$$I_{py} = \frac{m_p}{2} * \left(\left(\frac{d_v}{2} \right)^2 + \left(\frac{d_u}{2} \right)^2 \right) = \frac{0,593}{2} * \left(\left(\frac{0,247}{2} \right)^2 + \left(\frac{0,22}{2} \right)^2 \right) = 0,0081 \text{ kg} * \text{m}^2 \quad (4.43)$$

Moment setrvačnosti příruby k ose X, Z

$$I_{pxz} = \frac{1}{12} * m_p * \left(3 * \left(\left(\frac{d_u}{2} \right)^2 + \left(\frac{d_v}{2} \right)^2 \right) + b_d^2 \right) = \frac{1}{12} * 0,593 * \left(3 * \left(\left(\frac{0,22}{2} \right)^2 + \left(\frac{0,247}{2} \right)^2 \right) + 0,034^2 \right) = 0,0041 \text{ kg} * \text{m}^2 \quad (4.44)$$

Celkový momenty setrvačnosti předního brzdového disku k osám X, Y, Z je opět roven součtu momentů setrvačnosti jednotlivých částí. Platí tedy:

$$I_{dy} = I_{kvy} + I_{py} = 0,241 + 0,0081 = 0,25 \text{ kg} * \text{m}^2 \quad (4.45)$$

$$I_{dxz} = I_{kxz} + I_{vxz} + I_{pxz} = 0,046 + 0,0041 + 0,0762 = 0,127 \text{ kg} * \text{m}^2 \quad (4.46)$$



Obr. 19 Měření průměru kotouče

Pro zadní disk je uvedena opět pouze tabulka (Tab.č. s výsledky jako v předchozích případech.

Objemy a plocha

Plocha kotouče	0,048	m^2
Objem kotouče	0,001	m^3
Objem ventilace	0,0005	m^3
Objem příruby	0,00013	m^3

Hmotnosti

Kotouč	3,737	kg
Větilace	2,200	kg
Příruba	0,566	kg

Momenty setrvačnosti k ose Y

Kotouč	0,175	$kg * m^2$
Větilace	0,175	$kg * m^2$
Příruba	0,01	$kg * m^2$
Moment setrvačnosti	0,185kg	$* m^2$

Momenty setrvačnosti k ose X, Z

Kotouč	0,036	$kg * m^2$
Větilace	0,026	$kg * m^2$
Příruba	0,004	$kg * m^2$
Moment setrvačnosti	0,076kg	$* m^2$

Tab. č. 10 Výsledky pro zadní brzdy

Dále bylo potřeba změřit rozměry a vypočítat momenty setrvačnosti těhlice a příčných stabilizátorů. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. č. 11.

		Přední	Zadní	
Stabilizátor	Hmotnost (m_s)	4,5	6,2	kg
	Průměr (d_s)	0,038	0,04	m
	Délka (l_s)	0,9	0,92	m
Těhlice	Hmotnost (m_t)	6	9	kg
	Šířka (b_t)	0,22	0,225	m
	Výška (h_t)	0,213	0,267	m
	Délka (l_t)	0,131	0,197	m

Tab. č. 11 Výsledky měření stabilizátorů a těhlic

Postup výpočtu momentů setrvačnosti k jednotlivým osám předního stabilizátoru a těhlice zobrazují rovnice 4.47- 4.51.

Moment setrvačnosti stabilizátoru k ose Y

$$I_{sy} = \frac{1}{2} * m_s * \left(\frac{d_s}{2}\right)^2 = \frac{1}{2} * 4,5 * \left(\frac{0,038}{2}\right)^2 = 0,0008 \text{ kg} * \text{m}^2 \quad (4.47)$$

Moment setrvačnosti stabilizátoru k ose X,Z

$$I_{sxz} = \frac{1}{12} * m_s * \left(\left(\frac{d_s}{2}\right)^2 * l_s^2\right) = \frac{1}{12} * 4,5 * \left(\left(\frac{0,038}{2}\right)^2 + 0,9^2\right) = 0,304 \text{ kg} * \text{m}^2 \quad (4.48)$$

Moment setrvačnosti těhlice k ose X

$$I_{tx} = \frac{1}{12} * m_t * (b_t^2 + h_t^2) = \frac{1}{12} * 6 * (0,22^2 + 0,213^2) = 0,029 \text{ kg} * \text{m}^2 \quad (4.49)$$

Moment setrvačnosti těhlice k ose Y

$$I_{ty} = \frac{1}{12} * m_t * ((l_t^2 * h_t^2)) = \frac{1}{12} * 6 * (0,131^2 * 0,213^2) = 0,031 \text{ kg} * \text{m}^2 \quad (4.50)$$

Moment setrvačnosti těhlice k ose Z

$$I_{tz} = \frac{1}{12} * m_t * ((b_t^2 * l_t^2)) = \frac{1}{12} * 6 * (0,131^2 * 0,22^2) = 0,015 \text{ kg} * \text{m}^2 \quad (4.51)$$

Pro zadní stabilizátor a těhlici jsou v Tab.č.12 uvedeny opět pouze jen výsledky

Stabilizátor	Moment setrvačnosti k ose Y	6,2	kg * m ²
	Moment setrvačnosti k ose X, Z	0,04	kg * m ²
Těhlice	Moment setrvačnosti k ose X	0,0700	kg * m ²
	Moment setrvačnosti k ose Y	0,0825	kg * m ²
	Moment setrvačnosti k ose Z	0,0462	kg * m ²

Tab. č. 12 Výsledky pro zadní těhlici a příčný stabilizátor

Všechny dosavadní výsledky vedly kromě výpočtu momentů setrvačnosti i k výpočtu neodpružených hmot. Jediné, co nyní chybí, jsou výsledky měření hmotností ramen, tyče řízení, spojovací tyče, tlumiče a pružiny. Tyto výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 13. Výsledky jsou však pouze pro jednu stranu vozidla, neboť druhá strana samozřejmě váží stejně. Avšak je důležité, že hmotnost těchto komponent se plně neprojeví do neodpružených hmot, neboť část jejich hmotnosti nesou hmoty odpružené. Je nutné tedy tyto hmotnosti vynásobit tzv. Poměrem pohybů (anglicky: Motion ratio), který tuto hmotnost rozdělí.

Pro ramena je velikost tohoto poměru 0,5, pro tlumič s pružinou je vypočten ze znalosti úhlu tlumiče. Pro náš případ je poměr pohybů přední nápravy 0,8885 a zadní nápravy 0,903. Výsledky tohoto výpočtu jsou uvedeny taktéž v Tab. č. 13 ve sloupci Neodpružené hmoty.

		Hmotnost	Neodpružené hmoty	
Přední zavěšení	Spodní rameno	1,9	0,95	kg
	Horní rameno	1	0,5	kg
	Tyč řízení	0,7	0,35	kg
	Tlumič	3,8	3,3763	kg
	Pružina	0,9	0,79965	kg
Zadní zavěšení	Spodní rameno	1,6	0,8	kg
	Horní rameno	1,7	0,85	kg
	Spojovací tyč	0,6	0,31871	kg
	Tlumič	3,8	3,43444	kg
	Pružina	0,9	0,84409	kg

Tab. č. 13 Výsledky měření a výpočtu neodpružených hmot

Velikost neodpružených hmot je tedy po součtu všech dosud uvedených hmotností pro celou přední nápravu 96 kg a pro zadní nápravu 94 kg.

4.2 Měření kinematických bodů

V následující části je popsán postup, jakým byly změřeny kinematické body zavěšení. Jak je uvedeno výše tyto body jsou velmi důležité jak pro simulátor, tak pro tým I.S.R. Racing. Horní a spodní A rameno zavěšení má celkem 3 kinematické body. Tedy dva kulové čepy na šasi a jeden na těhlici. Tyč řízení a tlumič mají celkem dva body, opět jeden na šasi a jeden na těhlici. Další důležité body jsou pozice těhlice a kola vozu. Pozice středu souřadnicového systému, tedy místa, od kterého jsou body měřeny, je v simulátoru pro osu X těžiště vozu pro osu Y jeho polovina a pro osu Z vozovka. Kladné hodnoty osy X jsou od středu osy směrem k přední části vozu, kladné hodnoty osy Y jsou od středu osy k levé části vozu a samozřejmě kladné hodnoty osy Z jsou směrem nahoru od roviny.

Je nutné uvést také nastavení vozu, při kterém probíhalo měření. Přední kola měla odklon -3° a výška vozu byla 55 mm. Zadní kola měla odklon $-2,75^\circ$ a výška vozu byla 75 mm. Sbíhavost předních a zadních kol byla nulová.

A nyní již samotný postup. Na měřicí desku, kterou tým získal od firmy Air Design od pana Aleše Jiráska, byly našroubovány tři měřicí tyče. Jedna doprostřed desky a dvě ve vzdálenosti jeden metr, tedy polovina vozu, od střední tyče na obě strany (Obr. 20). Měřicí deska mimo jiné posloužila i jako ideální rovina. Deska je frézovaná a díry jsou přesně vyvrtané, proto pro vzdálenost jeden metr stačilo použít řadu děr. Vůz byl přesunut na měřicí desku přesně mezi obě krajní tyče a byl postaven na kola.



Obr. 20 Měřicí deska

Nejdříve bylo nutné na tyčích označit střed souřadnicového systému. Střed osy Y představovala střední tyč, střed osy Z představovala samotná deska. Střed osy X se musel vypočítat. Střed osy X v simulátoru, jak je zmíněno výše, představuje těžiště vozu. Z předchozích měření bylo známé rozložení váhy vozu, 43,7 % na přední část a 56,3 na zadní část. Při přepočtu tohoto rozložení na délku vozu a při znalosti rozvoru náprav, vyšlo těžiště 1,5255 m od středu předních kol. Poté již nebyl problém změřit od středu osy X pozice zadních kol. Výška kol byla změřena stojanovým mikrometrem od měřicí desky a poté se kola sundala, aby bylo možné změřit vzdálenost od krajní tyče pomocí nástavce, který se upevnil na stojanový mikrometr. Při sundaných kolech stál vůz na třech podpěrách o výšce 24 cm.

Na podpěrách poté již nebyl problém dostat k ostatním kinematickým bodům a výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 14 a ukázka měření poté na Obr. 21.

Levý přední roh vozu

	Upevnění	X	Y	Z
Spodní A rameno	Přední	-1,7685	0,375	0,0774
	U kola	-1,5227	0,7727	0,104
	Zadní	-1,4405	0,348	0,103
Horní A rameno	Přední	-1,6117	0,4957	0,2913
	U kola	-1,484	0,7188	0,3168
	Zadní	-1,3856	0,4957	0,2716
Tyč řízení	Uvnitř	-1,6455	0,436	0,17
	U kola	-1,6375	0,775	0,194
Tlumič	Na karoserii	-1,4581	0,524	0,543
	U kola	-1,5185	0,715	0,155
Pozice těhlice		-1,5255	0,8159	0,2585
Pozice středu kola		-1,5255	0,8159	0,2585

Pravý přední roh vozu

	Upevnění	X	Y	Z
Spodní A rameno	Přední	-1,7685	-0,375	0,0774
	U kola	-1,5227	-0,7727	0,104
	Zadní	-1,4405	-0,348	0,103
Horní A rameno	Přední	-1,6117	-0,4957	0,2913
	U kola	-1,484	-0,7188	0,3168
	Zadní	-1,3856	-0,4957	0,2716
Tyč řízení	Uvnitř	-1,6455	-0,436	0,17
	U kola	-1,6375	-0,775	0,194
Tlumič	Na karoserii	-1,4581	-0,524	0,543
	U kola	-1,5185	-0,715	0,155
Pozice těhlice		-1,5255	-0,8159	0,2585
Pozice středu kola		-1,5255	-0,8159	0,2585

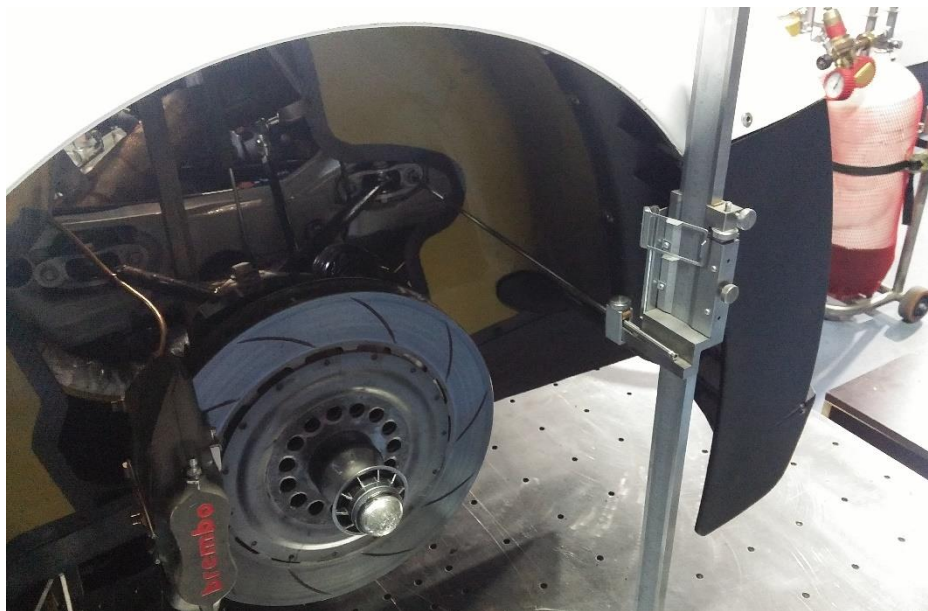
Levý zadní roh vozu

	Upevnění	X	Y	Z
Spodní A rameno	Přední	-1,7685	0,375	0,0774
	U kola	-1,5227	0,7727	0,104
	Zadní	-1,4405	0,348	0,103
Horní A rameno	Přední	-1,6117	0,4957	0,2913
	U kola	-1,484	0,7188	0,3168
	Zadní	-1,3856	0,4957	0,2716
Spojovací tyč	Uvnitř	-1,6455	0,436	0,17
	U kola	-1,6375	0,775	0,194
Tlumič	Na karoserii	-1,4581	0,524	0,543
	U kola	-1,5185	0,715	0,155
Pozice těhlice		-1,5255	0,8159	0,2585
Pozice středu kola		-1,5255	0,8159	0,2585

Pravý zadní roh vozu

	Upevnění	X	Y	Z
Spodní A rameno	Přední	1,3051	-0,409	0,1099
	U kola	1,0921	-0,7409	0,1037
	Zadní	0,9425	-0,3948	0,0772
Horní A rameno	Přední	1,6905	-0,5121	0,3147
	U kola	1,1486	-0,7103	0,3699
	Zadní	1,0265	-0,5121	0,336
Spojovací tyč	U kola	1,3275	-0,435	0,16
	Uvnitř	1,3075	-0,746	0,18668
Tlumič	Na karoserii	1,1395	-0,481	0,615
	U kola	1,0915	-0,691	0,16
Pozice těhlice		1,1745	-0,8183	0,2496
Pozice středu kola		1,1745	-0,8183	0,2496

Tab. č. 14 Souřadnice kinematických bodů

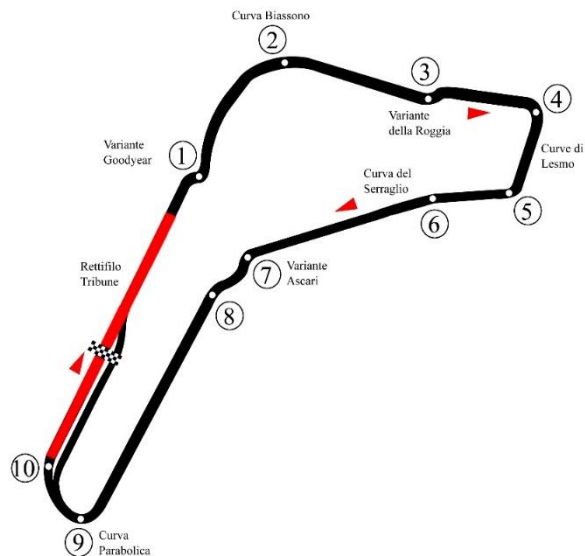


Obr. 21 Měření kinematických bodů

4.3 Zjištění aerodynamického přítlaku

V tuto chvíli již jsou změřena všechna potřebná data pro vložení do simulátoru, co se týče hmotností a momentů setrvačnosti. V poslední části této kapitoly je potřeba zjistit aerodynamický přítlak, avšak nyní již je nutné vycházet z dat, která byla naměřena na závodním okruhu.

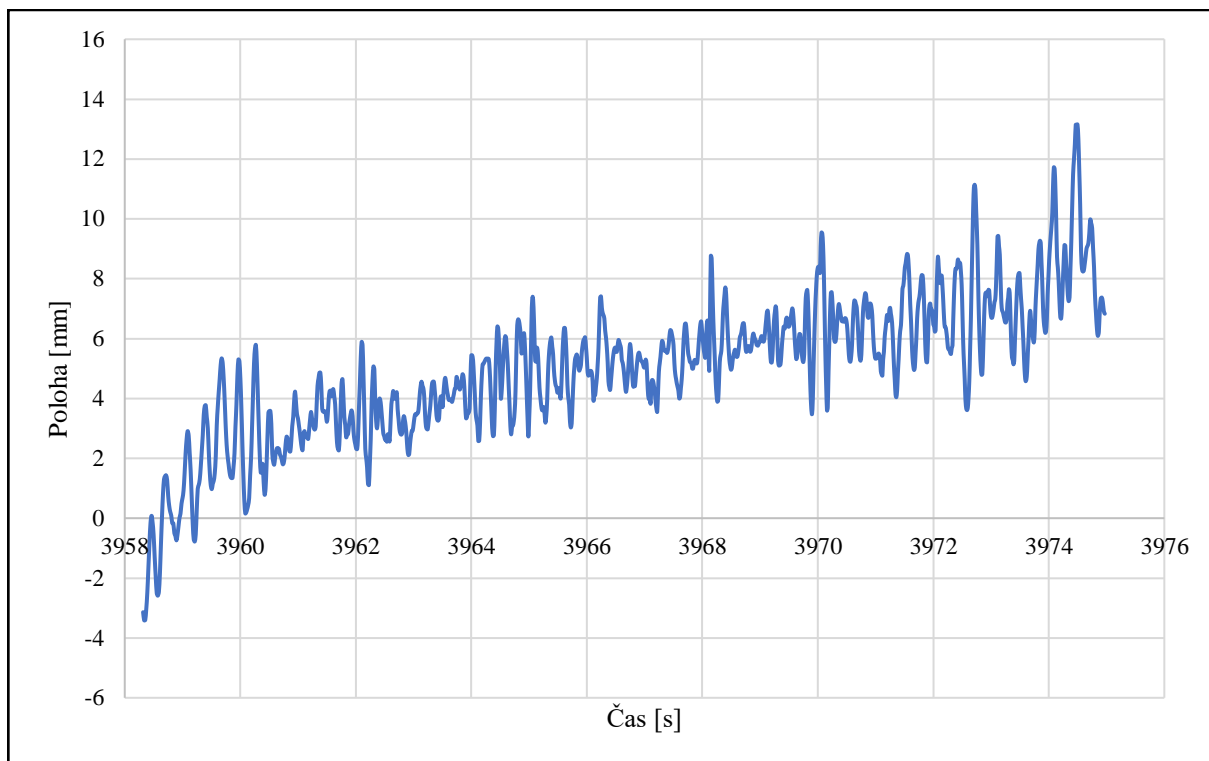
Data, pochází z roku 2017, kdy tým I.S.R. Racing dvakrát navštívil okruh v Monze. Poprvé při privátním testu a podruhé při tříhodinovém vytrvalostním závodě. Jedná se o nejrychlejší trať v šampionátu, neboť vůz zde dosahuje téměř maximální rychlosti. A právě toto je žádoucí pro zjištění přítlaku. Čím rychleji totiž vůz jede, tím více ho aerodynamický přítlak tlačí k zemi a tím více se stlačuje tlumič. Především jde o část tratě červeně zvýrazněnou na Obr. 22. Tato část totiž je ideální pro měření, neboť vůz zde totiž jede rovně a přitom dosahuje velké rychlosti.



Obr. 22 Část tratě pro měření [7]

Data, pocházejí z nejrychlejšího kola z celého závodního víkendu a privátního testu. Bohužel však informace o pneumatikách, tedy závislost statického zatížení na deformaci pneumatiky, nejsou známé. To znamená, že data budou zkeslena právě o tuto deformaci. Nicméně pro hrubý odhad přítlaku jsou data dostačující. Pro přesnější výsledky by tým musel vůz poslat do aerodynamického tunelu. To je však velmi drahé.

Jak je napsáno výše, jde pouze o určitou část tratě, tudíž bylo potřeba vyříznout pouze data, která odpovídají této části. Ukázka těchto dat pro levý přední tlumič je zobrazena v Grafu č. 2.



Graf č. 2 Průběh levého předního tlumiče

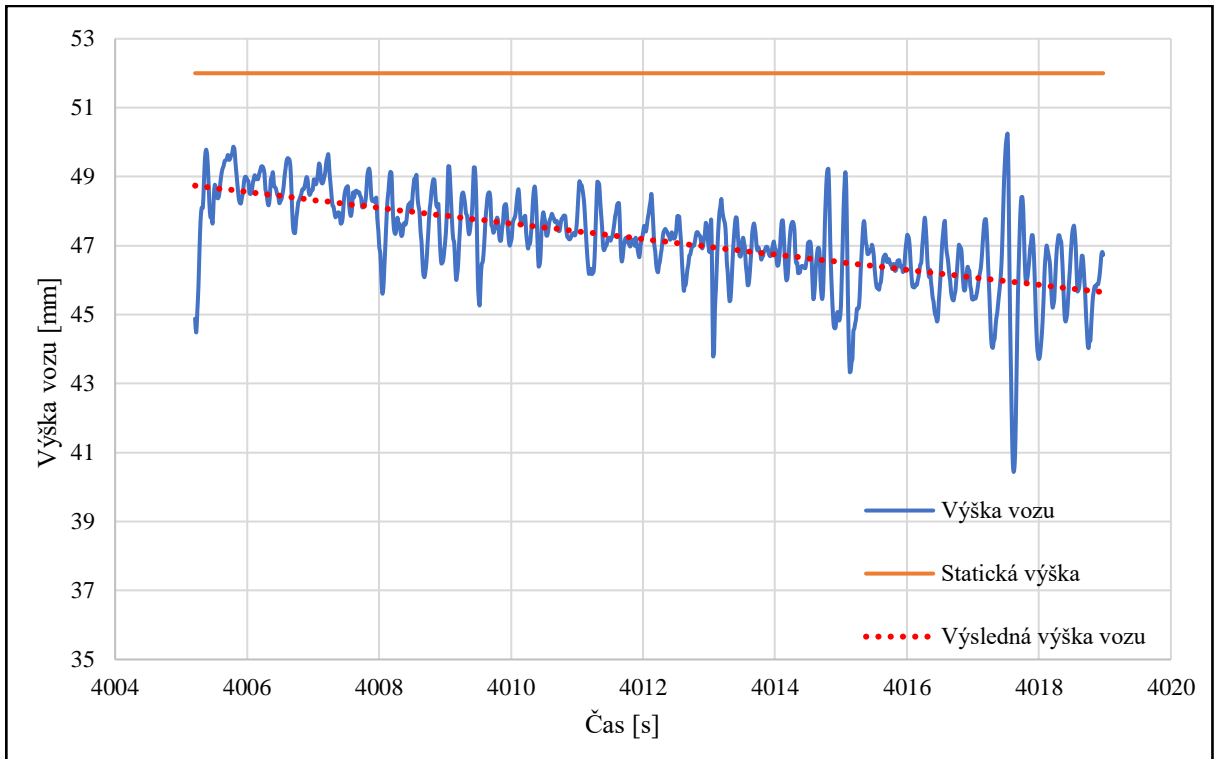
Výšku vozu je získána na základě vztahů 4.52 a 4.53 a výška přední části vozu je poté v Grafu č. 3 a zadní části poté v Grafu č.4. Po vytvoření grafu je křivka proložena mocninnou křivkou, neboť přítlak roste s druhou mocninnou rychlosti, čímž je získána výsledná výška vozu přední a zadní části. Statická výška je v grafu zobrazena oranžovou čarou, výsledná výška červenou. Nutno uvést, že počáteční rychlost vozu byla 216 km/h a dále, že statická výška vozu byla vepředu 52 mm a vzadu 144 mm. Výška pro přední část vozu se měřila pod přední nápravou, zadní část poté za zadní poloosou.

$$\text{Výška vozu přední části} = \text{Statický výška} - \frac{\text{Pozice LP tlumiče} - \text{Pozice PP tlumiče}}{2} *$$

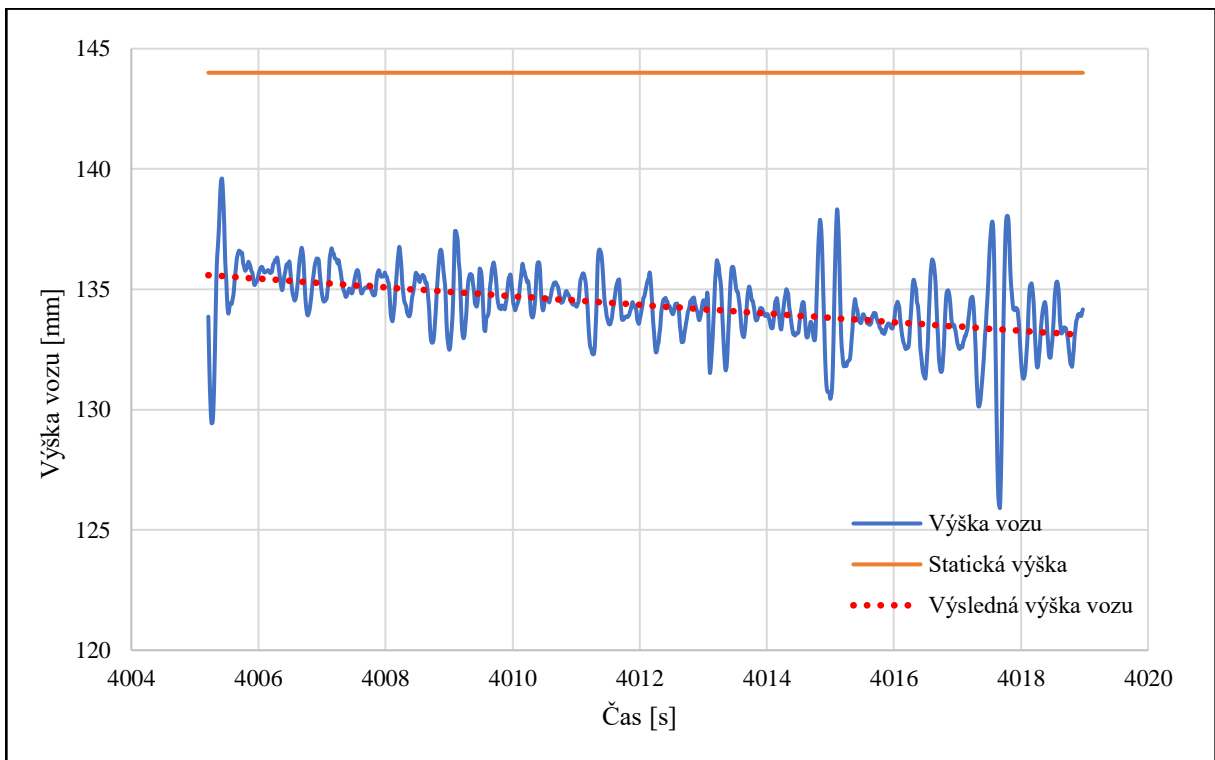
$$\text{Poměr pohybů} \tag{4.52}$$

$$\text{Výška vozu zadní části} = \text{Statický výška} - \frac{\text{Pozice LZ tlumiče} - \text{Pozice PZ tlumiče}}{2} *$$

$$\text{Poměr pohybů} \tag{4.53}$$



Graf č. 3 Výška přední části vozu



Graf č. 4 Výška zadní části vozu

Výšku vozu je tedy známá a je potřeba vypočítat sílu, která tlačí vůz k zemi. Díky znalosti tuhosti pružin, není tedy problém dle jednoduchého vztahu 4.54 tuto sílu vypočítat. Tuhost předních pružin byla v tomto měření 220 N/mm a zadních 280 N/mm.

$$F = k * \Delta l \quad (4.54)$$

kde: F = přitlačná síla [N]

k = tuhost pružiny [N/mm]

Δl = rozdíl délek před deformací a po deformaci [mm]

Pro přední a zadní část vozu při rychlosti 216 km/h tedy platí:

$$F_p = 220 * (52 - 48,74) = 717,1 \text{ N} \quad (4.55)$$

$$F_z = 280 * (144 - 135,59) = 2355,9 \text{ N} \quad (4.56)$$

Celková přitlačná síla je tedy součet obou sil tzn.

$$F_c = F_p + F_z = 3073 \text{ N} \quad (4.57)$$

Tuto sílu nyní je použita pro výpočet koeficientu přitlaku C_p podle vztahu 4.58

$$C_p = \frac{F_c}{A * P_d} \quad (4.58)$$

kde: F_c = Celková přitlačná síla [N]

A = Plocha přední části vozu [m^2]

P_d = Dynamický tlak [Pa]

Výpočet dynamického tlaku je počtán dle vztahu 4.59

$$P_d = 0,001741 * \frac{P_{okolí}}{T_{okolí}} * v^2 \quad (4.59)$$

kde: $P_{okolí}$ = Tlak okolí [Pa]

$T_{okolí}$ = Teplota okolí [K]

v = Rychlost [m/s]

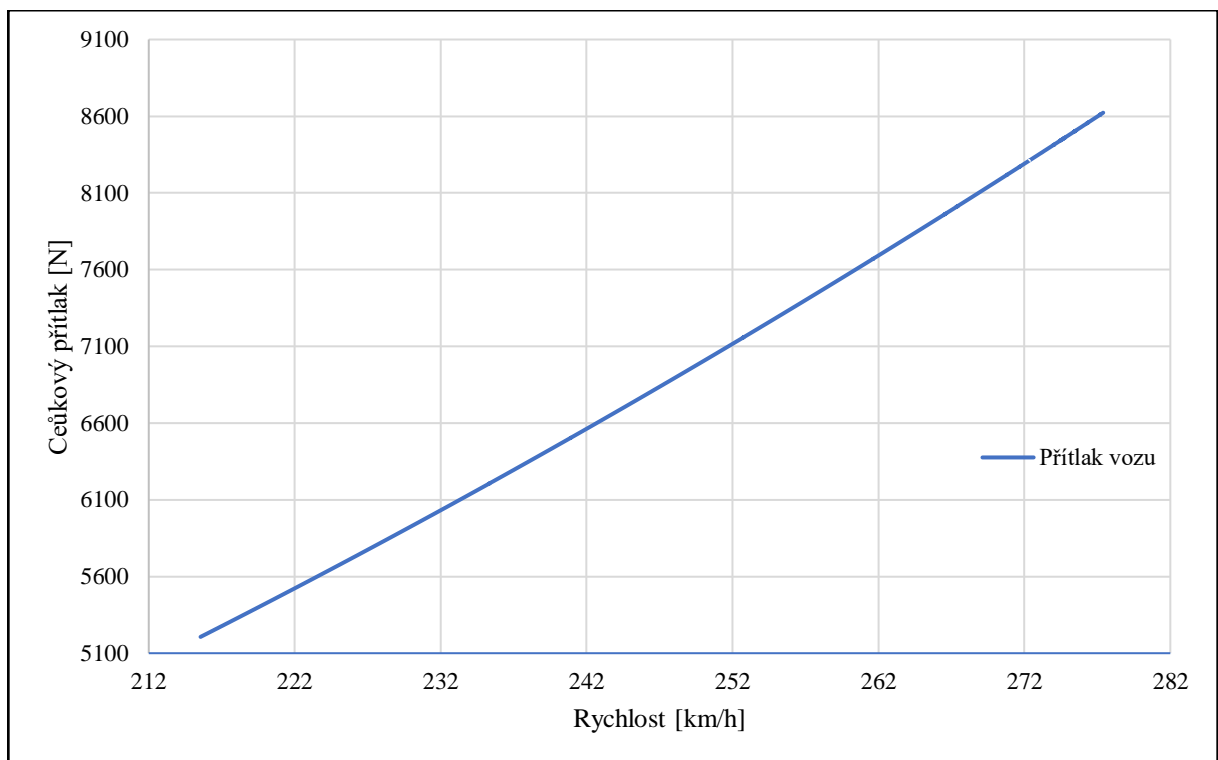
Tedy pro rychlost 216 km/h, tlaku okolí 101325 Pa a teploty okolí 20 °C vychází velikost dynamického tlaku 2157,33 Pa. Po dosazení do vztahu 4.59 vychází koeficient přitlaku 0,99.

Celkový přitlak vozu v rychlosti 216 km/h z rovnice 4.52.

$$Přitlak = \frac{1}{2} * \rho * v^2 * C_p * A \quad (4.60)$$

$$Přitlak = \frac{1}{2} * 1,25 * 59,88^2 * 0,99 * 2,38 = 5206,4 \text{ N} \quad (4.61)$$

Celkový přitlak vozu při rychlosti 216 km/h je tedy uveden po dosazení do rovnice 4.60. Toto je hrubý výpočet přitlaku. Jak stoupá celkový přitlak s rychlostí je zobrazeno v Grafu č.5



Graf č. 5 Závislost přitlaku na rychlosti

5 Vkládání hodnot do simulátoru

Vkládání hodnot do simulátoru, jak je zmíněno výše, není nic komplikovaného. Jedná se o pět textových souborů, přičemž jejich stručný obsah je naznačen již v kapitole 4. Ukázka textového souboru HDV, tedy hlavičkového, je na Obr. 23. Jak je však na obrázku vidět, význam hodnot není uveden, ani jejich velikost, pouze čísla. To velmi stěžuje práci, neboť poté není jasné, co která hodnota udává a v jakých je jednotkách.

```
ABSGrip=(1.5, 0.18)
ABSLevel=(0.65, 0.95)

[ENGINE]
SpeedLimiter=1
Normal=Audi_R8LMS15_Engine
RestrictorPlate=Audi_R8LMS15_Engine

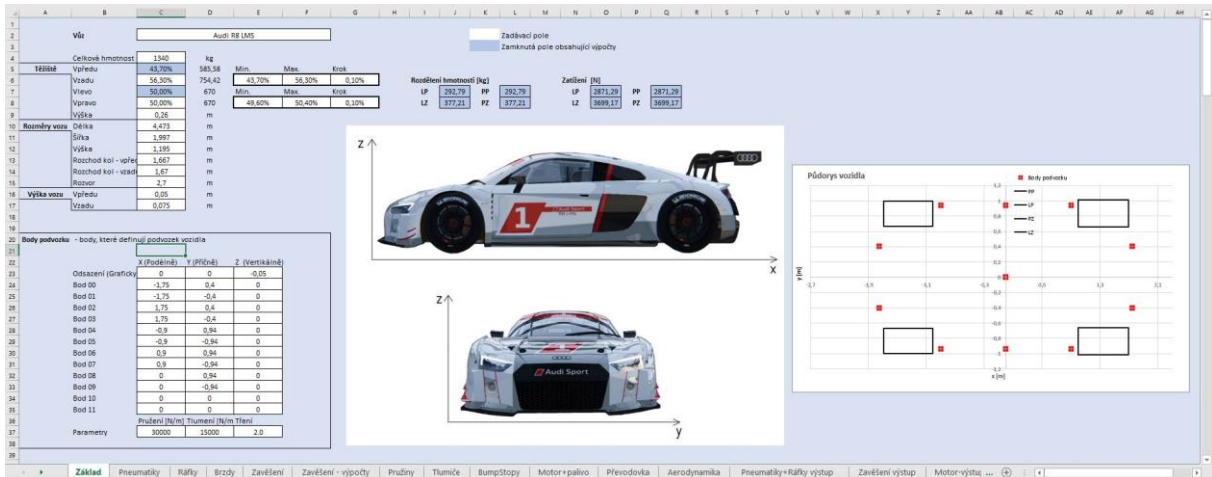
[DRIVELINE]
ClutchEngageRate=0.8
ClutchInertia=0.0108
ClutchTorque=1050.0
ClutchWear=0.0
ClutchFriction=12.5
BaulkTorque=950.0
SemiAutomatic=1
UpshiftDelay=0.070
UpshiftClutchTime=0.0
DownshiftDelay=0.100
DownshiftClutchTime=0.25
DownshiftBlipThrottle=0.55
WheelDrive=REAR
GearFile=Audi_R8LMS15_Gears.ini
AllowGearingChanges=1
AllowFinalDriveChanges=1
FinalDriveSetting=2
ReverseSetting=0
ForwardGears=6
Gear1Setting=1
Gear2Setting=2
Gear3Setting=3
Gear4Setting=4
Gear5Setting=5
Gear6Setting=6
DiffPumpTorque=250.0
DiffPumpRange=(0.00, 0.05, 10)
DiffPumpSetting=2
DiffPoweRange=(0.2,0.05,10)
```

Obr. 23 Textový soubor s koncovkou HDV

Proto byl v rámci diplomové práce vytvořen Generátor souborů. Jedná se o excelový soubor, který obsahuje jak samozřejmě výpočty uvedené v kapitole 4, tak i jednotlivé grafy a diagramy. Hlavní výhodou tohoto softwaru je to, že po vložení všech potřebných hodnot, Generátor vygeneruje textové soubory v potřebném formátu. Uživatel poté pouze označí jednotlivé buňky a zkopíruje je do příslušného textového souboru. Další nespornou výhodou je, že jednotlivé parametry obsahují vysvětlení, včetně jednotek a velikostí. Avšak tento soubor je pouze pro tým I.S.R. Racing, neboť když Audi navrhne nový vůz, bude člověk, odpovědný za novou úpravu simulátoru, mít rychle úpravu hotovou a nebude se tedy zdržovat zjišťováním, co který parametr znamená. Nyní je uveden stručný popis jednotlivých šablon Generátoru.

5.1 Základ

Zde se zadávají základní délkové a hmotnostní údaje, jako jsou rozměry vozu, dále rozložení váhy a souřadnice bodů, které definují podvozek vozidla. Je zde uveden souřadnicový systém používaný v celém souboru, vysvětlivky polí a vypočteno statické zatížení na jednotlivé nápravy na základě rozložení hmotnosti. Ukázka této šablony je na Obr. 24.



Obr. 24 Šablona Základ

5.2 Pneumatiky

Zde uživatel zadává rozměry a hmotnosti pneumatiky, dále minimální a maximální tlak v pneumatikách, tuhost, koeficient odporu valení, tlumení a další parametry. Všechny parametry v této šabloně obsahují vysvětlení a velikost. Je zde mimo jiné také počítán moment setrvačnosti, a to na základě rovnic uvedených v kapitole č. 4. Ukázka šablony je na Obr. 25.

Pneumatiky		Levá přední	Prává přední	Levá zadní	Prává zadní	
Proměnné						
Pneumatiky	Hmotnost	11	11	11	11	kg
	Poloměr	0,336	0,336	0,347	0,347	m
	Obvod	2,11150263	2,11150263	2,180265302	2,180265302	m
	Statický zatížený poloměr	0,3257	0,3257	0,3338	0,3338	m
	Imenovitá šířka	0,33	0,33	0,355	0,355	m
	Šířka běhounu pneumatiky	0,32	0,32	0,345	0,345	m
	Tloušťka běhounu	0,01	0,01	0,01	0,01	m
	Tloušťka bočnice	0,015	0,015	0,015	0,015	m
	Tlak - Min	145	145	145	145	kpa
	Tlak - Max	195	195	195	195	kpa
	Tlak-Test	180	180	180	180	kpa
	Tuhost - základní	82000	82000	82000	82000	N/m (80-90 e3)
	Tuhost v závislosti na tlaku pneu	1100	1100	1100	1100	N/m (0,8-1,1 e3)
	Tuhost celková	280000	280000	280000	280000	N/m (250-300 e3)
	Statické zatížení	2871,289054	2871,289054	3699,166447	3699,166447	N
	Deformace pneumatiky	0,010254604	0,010254604	0,013211309	0,013211309	m
	Odpor pneumatiky	57,42578107	57,42578107	73,98332893	73,98332893	N
	Točivý moment pneumatiky	18,70357689	18,70357689	24,6956352	24,6956352	Nm
	Koeficient odporu valení	0,02	0,02	0,02	0,02	
	Odpor valení	1824	1824	1869	1869	N/m/s
	Utlumení	2000	2000	2000	2000	N/m/s (1,9-2 e3)
	Třecí moment	1,15	1,15	4,3	4,3	Nm (1,154,3)
	Třecí odpor	3,5309	3,5309	12,882	12,882	N
	Přední :	Příčný směr	Podélný směr			
	Přilnavost na suchu	1,8	1,8	(1,8)		

Obr. 25 Šablona Pneumatiky

5.3 Ráfky

Opět se zde zadávají délkové, hmotnostní parametry a je zde počítán moment setrvačnosti opět podle rovnic z kapitoly 4. Náhled šablony je zobrazen na Obr. 26.

Ráfky		Přední	Zadní	
Proměnné				
Ráfky	Hmotnost	11,05	11,28	kg
	Průměr	18	18	in
	Šířka	12,5	13	in
	Počet paprsků	9	9	
	Material	Hořčík	Hořčík	
	Korekce setrvačnosti	0,96	0,96	
Ráfky v m				
	Poloměr	0,229	0,229	m
	Šířka	0,3175	0,3302	m
	Hustota materiálu	1740	1740	kg/m ³
	Modul pružnosti materiálu	45	45	Gpa
Komponenty ráfku				
	Tloušťka	0,0075	0,0075	m
	Vnitřní průměr upevnění	0,08	0,08	m
	Průměr náboje	0,05	0,05	m
	Šířka náboje	0,03	0,03	m
Paprsky				
	Poloměr	0,023	0,023	m
	Tloušťka	0,0225	0,0225	m
Okraj ráfku				
	Tloušťka	0,0075	0,0075	m
	Výška	0,022	0,022	m
	Vnější poloměr	0,251	0,251	m
	Tuhost	1,00E+06	1,00E+06	N/m (1 e6)
	Tlumení	2,00E+04	2,00E+04	N/m/s (2 e4)

Obr. 26 Šablona Ráfky

5.4 Brzdy

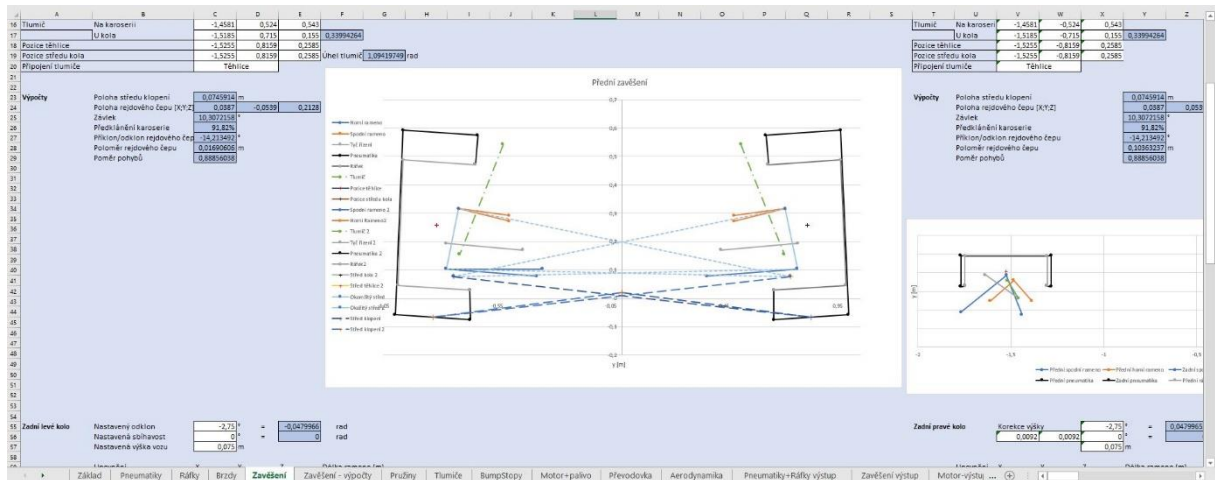
Do této šablony se kromě hmotnostních a délkových parametrů zadávají tepelné údaje o brzdových destičkách, součinitel tření mezi diskem a destičkami, maximální síla na brzdový pedál, rozložení brzd nebo poměr pedálu. Údaje o destičkách jsou dostupné v manuálu od vozu. Je zde uvedeno schéma brzdového disku s vysvětlivkami, co který rozměr představuje, dále grafický náhled kotoučů po zadání parametrů a počítá se zde kromě momentů setrvačnosti především brzdný moment a teoretické brzdné přetížení. Náhled šablony je na Obr. 27.

Brzdy		Přední	Zadní	
Disk	Hmotnost	10	6,5	kg
	Celkový průměr	0,38	0,355	m
	Vnitřní průměr	0,247	0,255	m
	Průměr upínání	0,22	0,225	m
	Maximální šířka	0,034	0,032	m
	Šířka větrání	0,018	0,019	m
	Tloušťka příruby	0,008	0,008	m
	Relativní objem ventilace	0,55	0,55	-1
	Relativní objem příruby	0,6	0,6	-1
	Výška brzdící plochy	0,133	0,1	m
	Hustota materiálu	4388,867669	4388,867669	kg/m ³
	Počet lopatek	72	48	
	Minimální tloušťka	0,033	0,031	m
	Krok tloušťky	0,0005	0,0005	m
Poruchová tloušťka	0,028	0,028	m	
Konstanta náhodné poruchy				
Brzdové upevnění	Hmotnost	0,6	0,5	kg
	Vnější průměr	0,235	0,24	m
	Průměr upevnění	0,22	0,225	m
	Průměr náboje	0,068	0,073	m
	Tloušťka	0,008	0,0075	m
Brzdové destičky	Moment setrvačnosti v ose Y	0,004488675	0,003933063	kg*m ²
	Moment setrvačnosti v ose X/Z	0,002247538	0,001968875	kg*m ²
Brzdové destičky	Typ	RB340	RB340	
	Min teplota slábnutí brzd	-50	-50	°C
	Spodní hranice optimální Teploty	425	425	°C
	Horní hranice optimální Teploty	650	650	°C
	Max teplota slábnutí brzd	1500	1500	°C
Součinitel tření mezi diskem a destičkami	0,55	0,55		

Obr. 27 Šablona Brzdy

5.5 Zavěšení

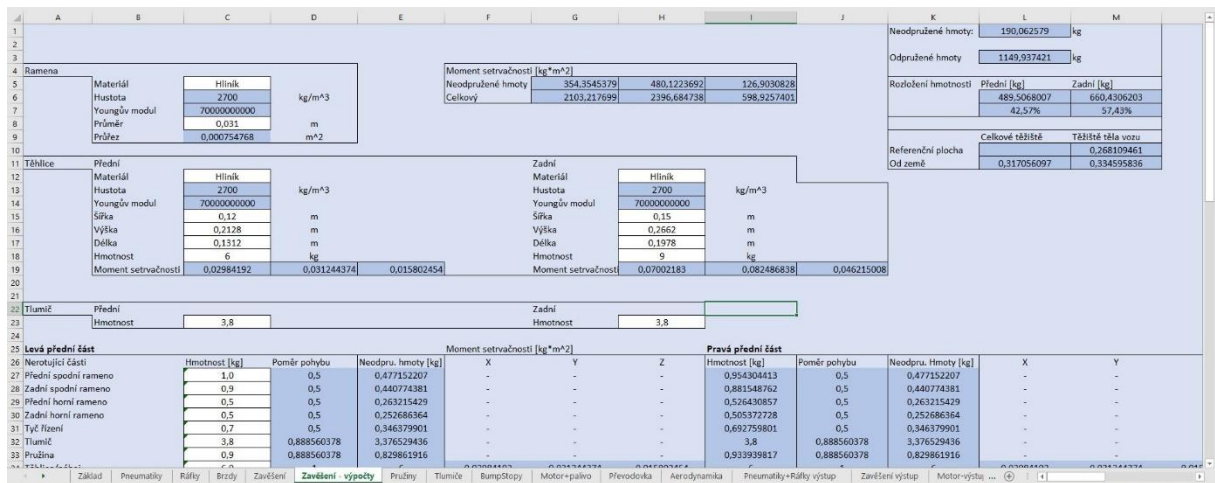
Do této šablony jsou zadávány kinematické body a vedle grafu je zobrazeno schéma zadaného zavěšení (Obr. 28). Je zde nutné uvést nastavení vozu, při kterém bylo měření provedeno a je zde vypočtena poloha rejdového čepu, jeho odklon či například střed klopení karoserie. Vedle nárysu je zde zobrazen i bokorys a půdorys pro úplný přehled pozic zadaného zavěšení.



Obr. 28 Šablona Zavěšení

5.6 Zavěšení – výpočty

Tato šablona obsahuje, jak je v názvu uvedeno, všechny výpočty zavěšení, tedy výpočty odpružených a neodpružených hmot a momentů setrvačnosti. Jsou zde zadávány hmotnosti, rozměry ramen a těhlice nebo tlumiče. Všechny výpočty jsou na základě kapitole č.4. Ukázka je zobrazena na Obr. 29.



Obr. 29 Šablona Zavěšení-výpočty

5.7 Pružiny

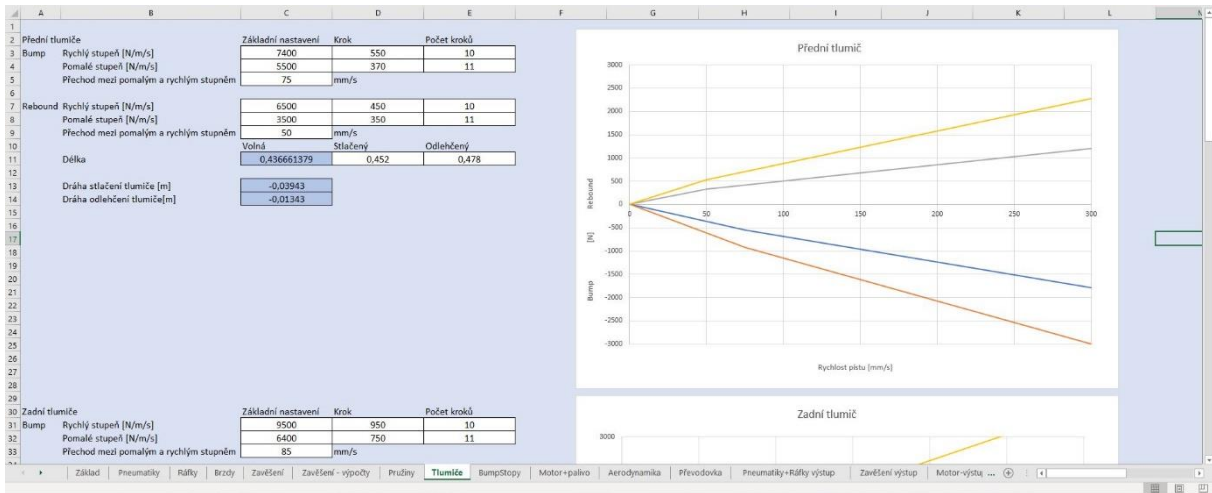
Šablona Pružiny obsahuje především výpočty frekvence při jednotlivých tuhostích pružiny a rozsah nastavení, tedy jaká minimální a maximální tuhost může být zvolena. Dále zadávání hmotnostních a délkových parametrů pro stabilizátor z důvodu výpočtu momentu setrvačnosti a také rozsah nastavení tuhosti. Náhled je zobrazen na Obr. 30

Levá přední		Pravá přední		Levá zadní	
Poměr pohybu	0,888560378	Poměr pohybu	0,888560378	Poměr pohybu	0,888560378
Odpružené hmoty [kg]	244,75	Odpružené hmoty [kg]	244,75	Odpružené hmoty [kg]	244,75
Minimální nastavení [N/m]	160000	Minimální nastavení [N/m]	160000	Minimální nastavení [N/m]	160000
Maximální nastavení [N/m]	310000	Maximální nastavení [N/m]	310000	Maximální nastavení [N/m]	310000
Krok [N/m]	30000	Krok [N/m]	30000	Krok [N/m]	30000
Tovární nastavení		Tovární nastavení		Tovární nastavení	
Celkem nastavení		Celkem nastavení		Celkem nastavení	
Tuhost [N/m]	Frekvence [Hz]	Tuhost [N/m]	Frekvence [Hz]	Tuhost [N/m]	Frekvence [Hz]
0	3,615810955	0	3,615810955	0	3,615810955
1	3,940238638	1	3,940238638	1	3,940238638
2	4,239914172	2	4,239914172	2	4,239914172
3	4,519763694	3	4,519763694	3	4,519763694
4	4,783268288	4	4,783268288	4	4,783268288
5	5,032995845	5	5,032995845	5	5,032995845

Obr. 30 Šablona Pružiny

5.8 Tlumiče

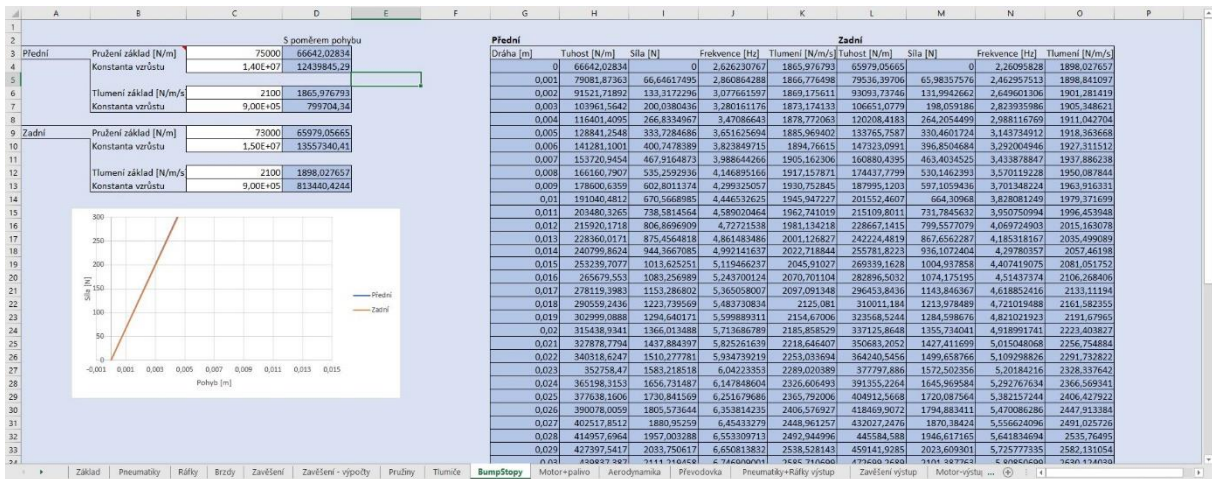
Jak je již v kapitole 2 zmíněno, tlumiče mají v simulátoru charakteristiku lineární. Tudíž křivka závislosti síly potřebné ke stlačení tlumiče na rychlosti tlumiče je přímka. V simulátoru má také stlačení a roztáhnutí tlumiče dva stupně, rychlý a pomalý. Rychlý stupeň znamená, že se tlumič pohybuje velkou rychlostí. Je to především při nájezdu na obrubník, nebo při nájezdu kola na překážku. Změny váhy či ponoření vozu při brždění na přední část naopak ovlivňuje nastavení pomalého stupně. Proto křivka v simulátoru má dva sklony právě v závislosti na tomto stupni. Tato šablona tedy slouží pro zadávání tedy hodnot rychlého, pomalého stupně stlačení a roztáhnutí tlumiče. Jednotky jsou N/mm/s. Dále se zde zadává rychlost, při které rychlý stupeň přechází v pomalý a je zde vypočítána dráha stlačení a roztáhnutí tlumiče, na základě polohy ze šablony Zavěšení. Šablona je zobrazena na Obr. 31.



Obr. 31 Šablona Tlumiče

5.9 Bumpstop

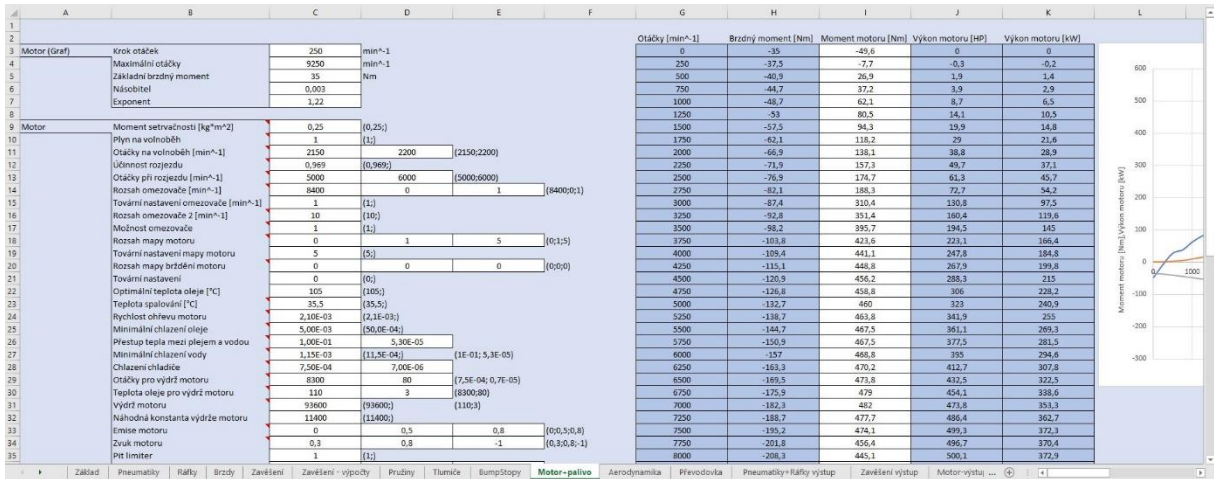
Šablona Bumstop obsahuje nastavení parametrů pružení a tlumení předního a zadního dorazu tlumičů. Je zde obsažen graf závislosti síly potřebné ke stlačení na délce a výpočet frekvencí. Náhled je zobrazen na Obr. 32



Obr. 32 Šablona BumpStop

5.10 Motor + palivo

Šablona slouží především pro zadávání momentové charakteristiky, tedy závislosti momentu motoru na otáčkách. Uživatel zvolí krok otáček a v každém kroku zadá příslušný moment motoru. Mimo momentové je však také vypočtena a uvedena rychlostní charakteristika, tedy závislost výkonu motoru na otáčkách. Další zadávané parametry motoru nebo paliva obsahují vysvětlení a původní velikost parametru. Šablona je zobrazena na Obr.33.



Obr. 33 Šablona Motor + palivo

5.11 Aerodynamika

Tato šablona obsahuje nastavení celkové aerodynamiky vozidla. Zadávají se zde koeficienty odporu, přitlaku pro přední a zadní křídlo, dále karoserii a samozřejmě difuzor. Jednotlivé parametry jsou opět vysvětleny a je zde počítán výsledný přitlak celého vozu při zvolené rychlosti. Šablona je zobrazena na Obr. 34.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
3	Výška vozu [Přední/Zadní]	0,055	0,075	Sklon	0,02	Min. výška		Podmínky:		X	Z
4	Přední difuzor [Z>X]	0	-1,75	Výška p. difuzoru [m]	0,052037037	Sklon difuzoru		Rychlost vozu [km/h]	200	55,55403138	0,411522634
5	Zadní difuzor [Z>X]	0	0	Výška z. difuzoru [m]	0,065						
7	Úhel sklonu	Radiální [rad]	Stupně [°]			Celkový přítlak [N]	7178,652163				
		0,007407475	0,424417063			Celkový odpor [N]	2134,795806				
10	Přední křídlo	Základ	Rozsah nastavení	1	1	1	1	(0,0;1;1)			
			Tovární nastavení	1	(1;)						
			Maximální výška	0,3	(0,3;)						
			Parametry odporu	0,048	0	0	0	(0,048;0,0;0,0)			
			Parametry přítlaku	-0,41	0	0	-0,004	(-0,410;0,0;-0,004)			
			Konstanta vodorovné kapsy	1,35	(1,35;)						
			Konstanta výšky vozu	0,5	(0,5;)						
			Konstanta propadu přítlaku	0,34	(0,34;0-žádný 1,0-max)						
			Úhel maximálního přítlaku	0	1,1001	(0;1,1001)					
			Směry [X:Z:Y]	Vlevo	-0,19	0	0	(-0,19;0;0)			
				Vpravo	0,19	0	0	(0,19;0;0)			
				Nahoru	0	-0,3	0,01	(0;-0,3;-0,01)			
				Dolů	0	0,3	-0,01	(0;0,3;-0,01)			
				Dozadu	0	0,07	-0,07	(0;0,07;-0,07)			
				Dopředu	0	0	0	(0;0;0)			
				Ostřeni	0,05	0,05	0	(0,05;0,05;0,0)			
				Sřad	0	0,02	-0,64	(0,0;0,02;-0,64)			
28	Vypočty	Úhel křídla		1		Převod na N					
			Celkový odpor předního křídla	0,04799672		148,1298966					
			Celkový přítlak předního křídla	-0,413962388		-1277,653295					
32	Zadní křídlo	Základ	Rozsah nastavení	1	1	45	(0,0;1;1)				
			Tovární nastavení	1	(1;)						
			Parametry odporu	0,05	0,0138	0	0	(0,05;0,0138;0,0)			
			Parametry přítlaku	-0,131	-0,05	-0,0001	-0,0001	(-0,131;-0,05;-0,0001)			

Obr. 34 Šablona Aerodynamika

5.12 Převodovka

Poslední šablona pro vytvoření výstupních souborů obsahuje kromě zadání počtu převodových stupňů a jejich poměry také pilový diagram, nastavení diferenciálu, či nastavení spojky, její velikost a moment setrvačnosti (Obr. 35). Parametry obsahují vysvětlení.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
3	Řazení	Počet dopředných stupňů	6			Zařazený stupeň	Počet zubů	Výstupní hřídel	Výstupní hřídel	Omezovač:	8400	min ⁻¹
4		Prodlévka při přeřazení [s]	0,07	(0,07)		R	14	39		Otáčky pro zařazení	8350	min ⁻¹
5		Sepnutí spojky při přeřazení [s]	0	(0;)		1	14	39				
6		Prodlévka při podřazení [s]	0,1	(0,1)		2	15	34				
7		Sepnutí spojky při podřazení [s]	0,25	(0,25)		3	18	31				
8		Mezipřímý při podřazení	0,55	(0,55)		4	25	36				
9		Pobíhání kola	Zadní			5	27	31				
10		Povolení změny převodový poměr	1	(1;)		6	27	29				
11		Povolení změny konečný převodový poměr	1	(1;)								
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19	Diferenciál	Množství kroužkového momentu pro rozdělení mezi koly [Nm]	350	(350;)								
20		Rozsah rozdělení momentu [%]	0	(0;)	0,1	9	(0,0;1,9)					
21		Tovární nastavení rozdělení momentu	2	(2;)								
22		Rozsah rozdělení výkonu motoru diferenciálem mezi koly [%]	0,2	(0,2;)	0,01	70	(0,2;0,01;70)					
23		Tovární nastavení rozdělení výkonu	25	(25;)								
24		Rozsah volnoběhu diferenciálu [%]	0,2	(0,2;)	0,1	7	(0,2;0,1;7)					
25		Tovární nastavení volnoběhu	4	(4;)								
26		Rozsah předpětí diferenciálu [Nm]	50	(50;)	10	10	(50;10;10)					
27		Tovární nastavení předpětí	2	(2;)								
28												
29												
30	Spojka	Hmotnost	6,5	kg								
31		Průměr	0,18	m								
32		Vnitřní průměr	0,08	m								
33		Moment setrvačnosti	0,021325	kg ² m ²								
34		Největší moment spojky [Nm]	1000	(1000;)								
35		Koeficient tření [μ]	0,12	(0,12;)								

Obr. 35 Šablona Převodovka

Po zadání hodnot do všech příslušných šablon Generátoru souborů se v šablonách s koncovkou „výstup“ vygenerují jednotlivé buňky daného formátu a stačí pouze přepírovat hodnoty v těchto buňkách do příslušného textového souboru.

6 Porovnání jízdních výkonů v simulaci a v reálných podmínkách

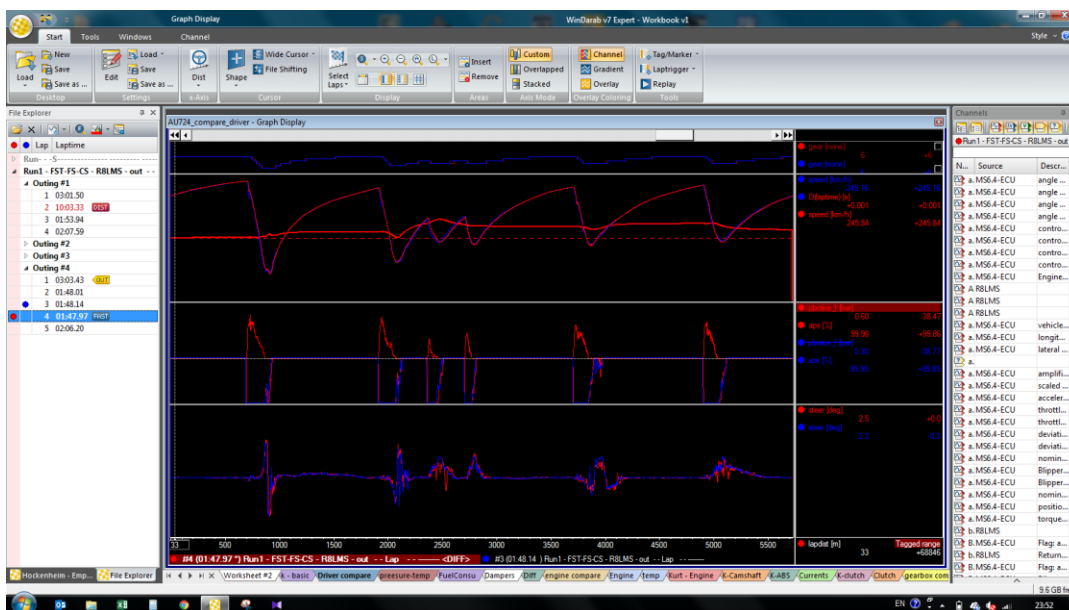
Po naměření, vypočtení a vložení hodnot do simulátoru je nyní potřeba model otestovat a porovnat jízdní výkony se skutečnými hodnotami. Je nutné porovnat především podélnou dynamiku vozu, tudíž zrychlení i brždění a příčnou dynamiku, tedy hodnoty přetížení v zatáčkách a rychlost. Je důležité uvést za jakých podmínek probíhalo měření v simulátoru. Teplota byla vždy 21 °C, tlak 101 kPa slunečno. Bylo vypnuto opotřebení pneumatik pro dosažení totožných výsledků v každém kole. Nastavení vozu je uvedeno v Tab. č. 15:

	Přední	Zadní	Jednotky
Pozice křídla	1	7	
Rozložení váhy	44,2	55,8	
Rozložení brzd	57,2	42,8	
Tlak pneumatik	180	182	kPa
Tuhost pružin	220	250	N/mm
Tlumič - Bump	5	5	
Tlumič - Rebound	5	5	
Výška vozu	52	62	mm
Odklon kola	-3,5	-3,7	°
Příčný stabilizátor	Střední	Střední	
Sbíhavost	-0,17	0,02	°

Tab. č. 15 Nastavení vozu

Jak je již v kapitole 2 zmíněno, hodnoty ze simulátoru budou exportovány z analyzačního softwaru Motec I2. Ze skutečného vozu Audi R8 LMS jsou data exportovány ze softwaru Windarab (Obr. 36). Tento analyzační software vyvinula společnost Bosch Motorsport. Pro současný vůz je určena již verze 7. Oproti verzi 6, určené pro minulou generaci Audi R8, je zde srozumitelnější uživatelské prostředí a několik nových funkcí včetně možnosti do softwaru vložit záznamy z kokpitu. Nechybí možnost porovnání mezi jednotlivými koly a samozřejmě kromě vložení do grafů data vložit i do histogramů apod. Dále je možné vložit vlastní funkce a z nich poté vytvořit vlastní kanály. Audi R8 LMS týmu I.S.R. Racing obsahuje více než 100 kanálů. Jedná se převážně o kanály zaznamenávající jízdní výkony vozidla a stav jednotlivých součástí, jako například motoru, převodovky, spojky nebo kompresoru.

Software umožňuje export dat do textového souboru, ze kterého není problém data zkopírovat do tabulkového programu a dále s nimi pracovat. Problém ovšem je, že krok vzdálenosti z analyzačního softwaru Windarab pro Audi R8 LMS lze nastavit na 3 metry. Avšak z Motecu I2 se tento krok liší, neboť krok zde nejsou metry ale frekvence. Vzniká tedy chyba, která nicméně výsledky ovlivňuje jen nepatrně.



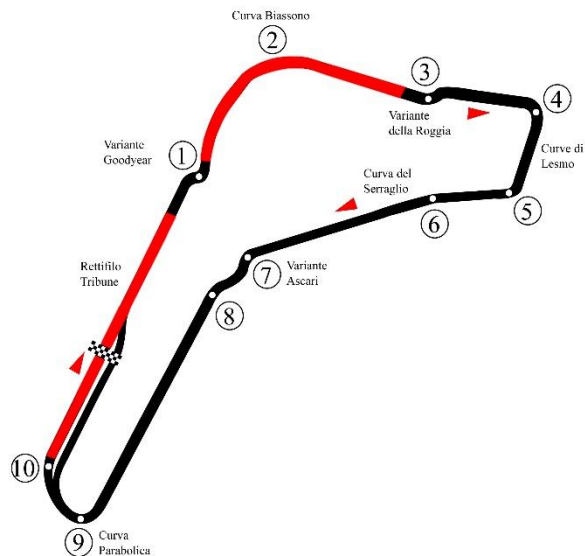
Obr. 36 Analyzační software Windarab v7

6.1 Podélná dynamika vozu

V této části bude věnována pozornost porovnání podélné dynamiky vozu ze simulátoru a skutečného vozu. Jedná se o porovnání zrychlení a brždění vozidla. Data, která budou porovnávána jsou rychlost a podélné přetížení.

6.1.1 Zrychlení

Pro porovnání je nejdříve nutné získat křivky zrychlení skutečného vozu. Data, ze kterých křivky pochází, jsou z kvalifikačních kol na tratích, která mají dlouhý úsek pro dosažení vysoké rychlosti. První okruh bude stejný jako pro získání aerodynamického přtlaku, tedy Monza. Pro přtlak však byla data získána pouze z cílové rovinky (Obr. 21). Pro křivky zrychlení je možné použít i data z části uvedené na Obr. 37. Tato část sice není rovná nicméně jezdec drží po celou dobu plný plyn, proto mohla být použita.

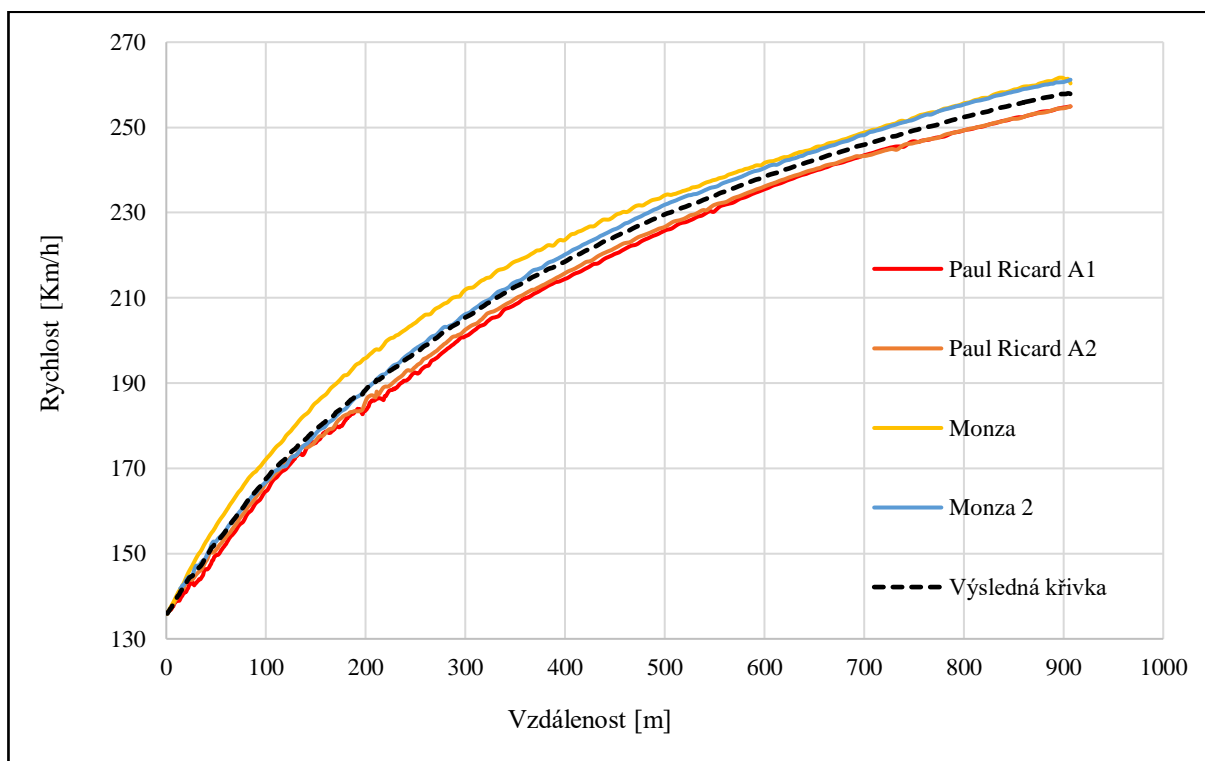


Obr. 37 Části tratě pro získání křivky zrychlení [7]

Druhá trať pro určení výsledné křivky zrychlení je Paul Ricard. Tým I.S.R. Racing zde v roce 2017 absolvoval šestihodinový vytrvalostní závod a to se dvěma auty. Tato trať je výjimečná tím, že má 1,8 km dlouhou rovinu, která však na konci mírně stoupá (Obr. 36). Proto zde vozy maximální rychlosti nedosahují, velmi se jí však přibližují. Pro účely vytvoření výsledné křivky proto nebude brána v potaz celá délka, ale pouze část do rychlosti 258 km/h. Toto je totiž maximální rychlost, která je dosahována v Monze na konci druhé části. Počáteční rychlost byla 135 km/h, neboť od této rychlosti jezdci v Paul Ricard drží plný plyn. Protože kvalifikaci jela obě auta týmu I.S.R. Racing jsou použity křivky obou vozů. Křivky zrychlení z Monzy, z Paul Ricard a výsledná křivka je uvedena v Grafu č. 6. Tato křivka byla použita pro porovnání se simulátorem.



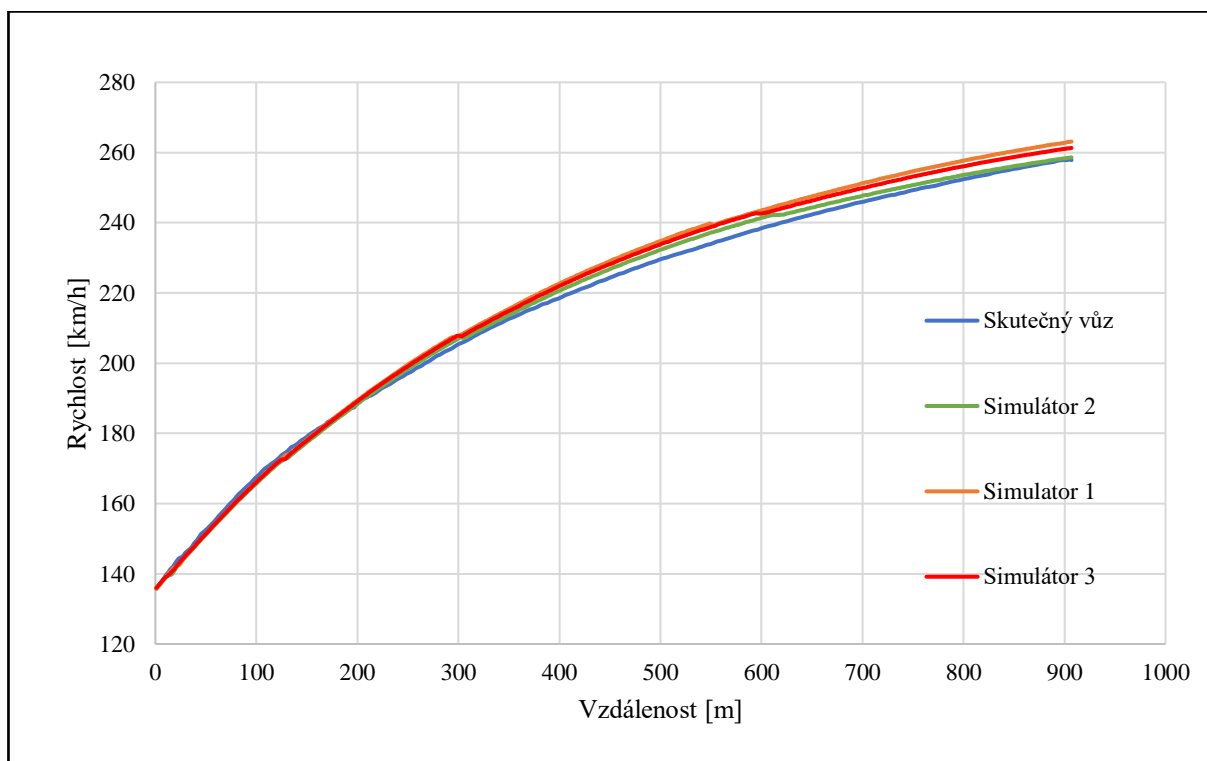
Obr. 38 Profil rovinky v Paul Ricard [8]



Graf č. 6 Křivky zrychlení skutečného vozu

Nyní je potřeba získat křivku zrychlení ze simulátoru. Zrychlení ovlivňuje výkon motoru, převodové poměry, hmotnost vozu a jeho aerodynamický odpor. Výkon motoru a hmotnost vozu je uvedena v kapitole 3. Převodové poměry jsou uvedeny také ovšem pouze převodovky. Není známý převodový poměr diferenciálu. Úpravou konečného převodu na základě rychlosti a otáček motoru však tuto neznámou můžeme vložit. Při rychlosti 270 km/h, otáček motoru 7700 min^{-1} a dynamickém poloměru pneumatiky $r_d = 0,3385 \text{ m}$ je výsledný převod 3,38.

Jediná proměnná byla tedy pro zrychlení aerodynamický odpor. Tuto veličinu však oproti aerodynamickému přítlaku nelze vypočítat, neboť pro výpočet je nutná dojezdová zkouška. Tu tým I.S.R. Racing bohužel neabsolvoval. Jak je zmíněno v kapitole 6. do simulátoru rFactor se zadávají koeficienty odporu a přítlaku jednotlivých částí. Bylo tedy nutné na základě křivky zrychlení koeficient odporu odhadnout. Porovnání měření je zobrazeno v Grafu č. 7. Růst křivky zrychlení určuje v malých rychlostech, přibližně do 150 km/h, hlavně výkon motoru až poté začne křivku ovlivňovat aerodynamický odpor. Jelikož výkon motoru je známý všechny křivky právě do této rychlosti jsou prakticky totožné.



Graf č. 7 Porovnání rychlostí při zrychlení

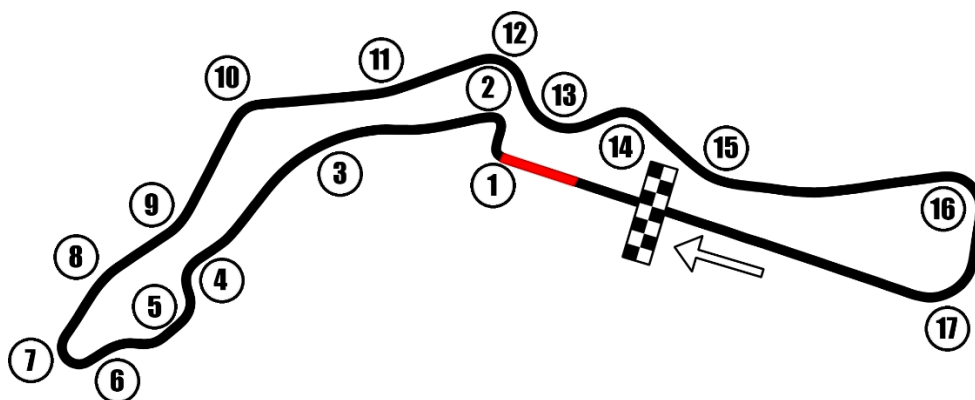
První měření probíhalo s koeficientem odporu 0,6. S tímto koeficientem však vůz v simulátoru byl příliš rychlý a dosáhl na stejné vzdálenosti vyšší rychlosti, přesněji 258 ku 264 km/h (Simulátor 1). Jak bylo zmíněno koeficient odporu byl odhadnutý, tudíž pro měření byl zvýšen o 0,04 na 0,64. Je důležité také připomenout, že koeficient 0,64 je součet koeficientů pro karoserii, přední křídlo a zadní křídlo. Pro karoserii byl zvýšen o 0,01 a pro křídlo byl zvýšen o 0,03, neboť v simulátoru je to především zadní křídlo, co ovlivňuje aerodynamiku ve vyšších rychlostech.

V druhém měření byl vůz příliš pomalý, neboť křivka zrychlení v rychlosti 230 km/h změnila průběh až se téměř ztotožnila s křivkou zrychlení skutečného vozu (Simulátor 2). Tudíž by vůz dosáhl mnohem menší maximální rychlosti. Pro třetí měření byl tedy koeficient odporu nastaven na 0,61 a tento koeficient je výsledný, neboť křivka zrychlení obou vozů se liší jen o 3 km/h (Simulátor 3). Tento rozdíl je již však v pořádku.

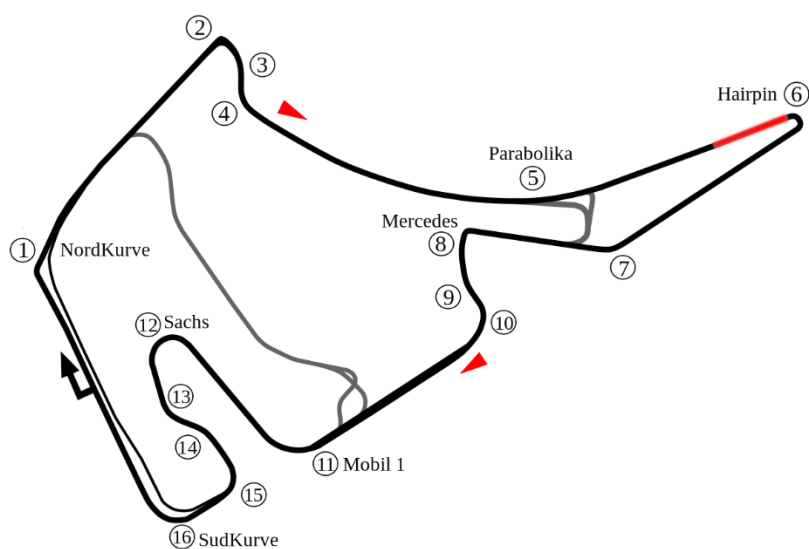
6.1.2 Zpomalení

Porovnání zpomalení vozů je mnohem jednodušší než porovnání zrychlení, neboť všechny parametry jsou známy. Bude porovnáována jak křivka zpomalení, tak podélné přetížení. Jen je nutné vybrat správné tratě a jejich úseky. Správný úsek je ten, ve kterém vůz brzdí z vysoké rychlosti do pomalé zatáčky. Je to z toho důvodu, aby křivka brždění byla co nejdelší.

První byla cílová rovinka v Monze neboť zde vozy brzdí z téměř 277 km/h na 75 km/h. Druhý úsek byl opět v Monze avšak brždění po zatáčce dvě na Obr. 37, neboť zde vůz brzdí z 262 km/h na 91 km/h. Třetí úsek byla cílová rovinka na českém okruhu Automotodrom Most, kde vůz brzdí do první zatáčky z rychlosti 253 km/h na 60 km/h (Obr. 38). A poslední úsek byl rychlý úsek na německém okruhu v Hockenheimu, kde vůz do nejpomalejší zatáčky tratě (číslo 6) brzdí z rychlosti 265 km/h na 50 km/h (Obr. 40).

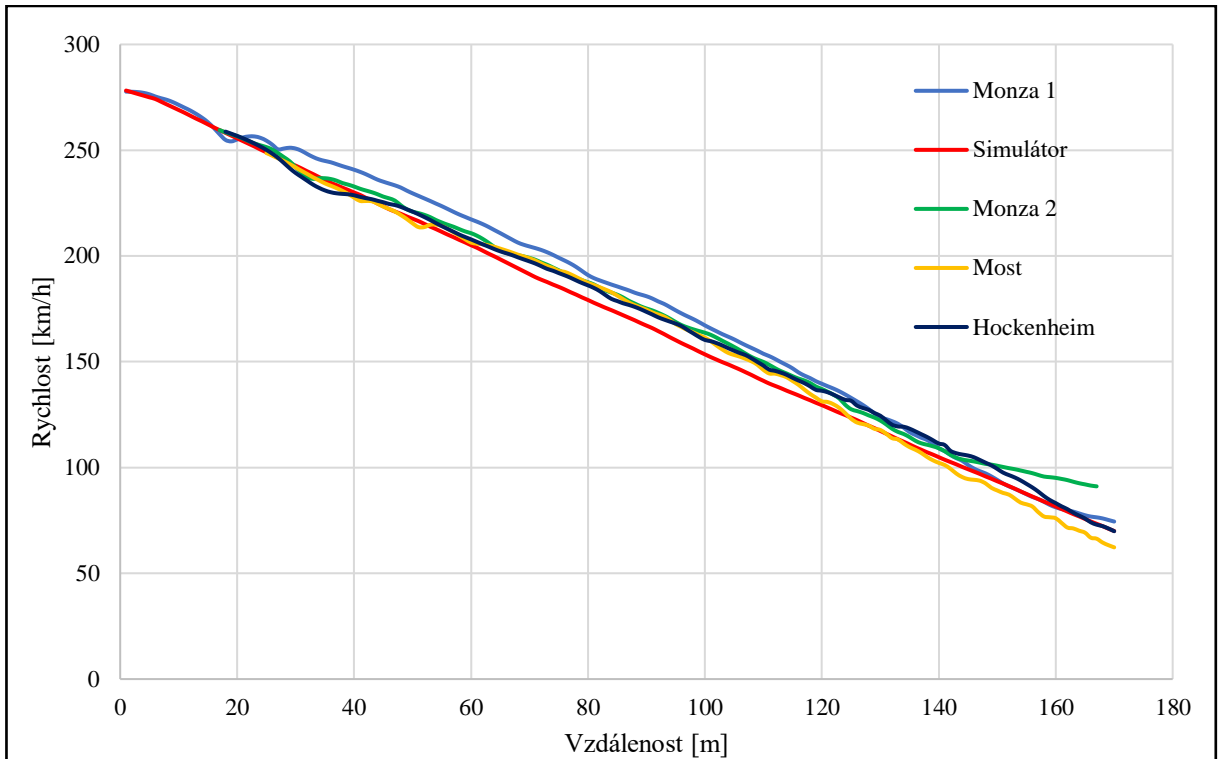


Obr. 39 Úsek pro brždění v Automotodromu Most [9]

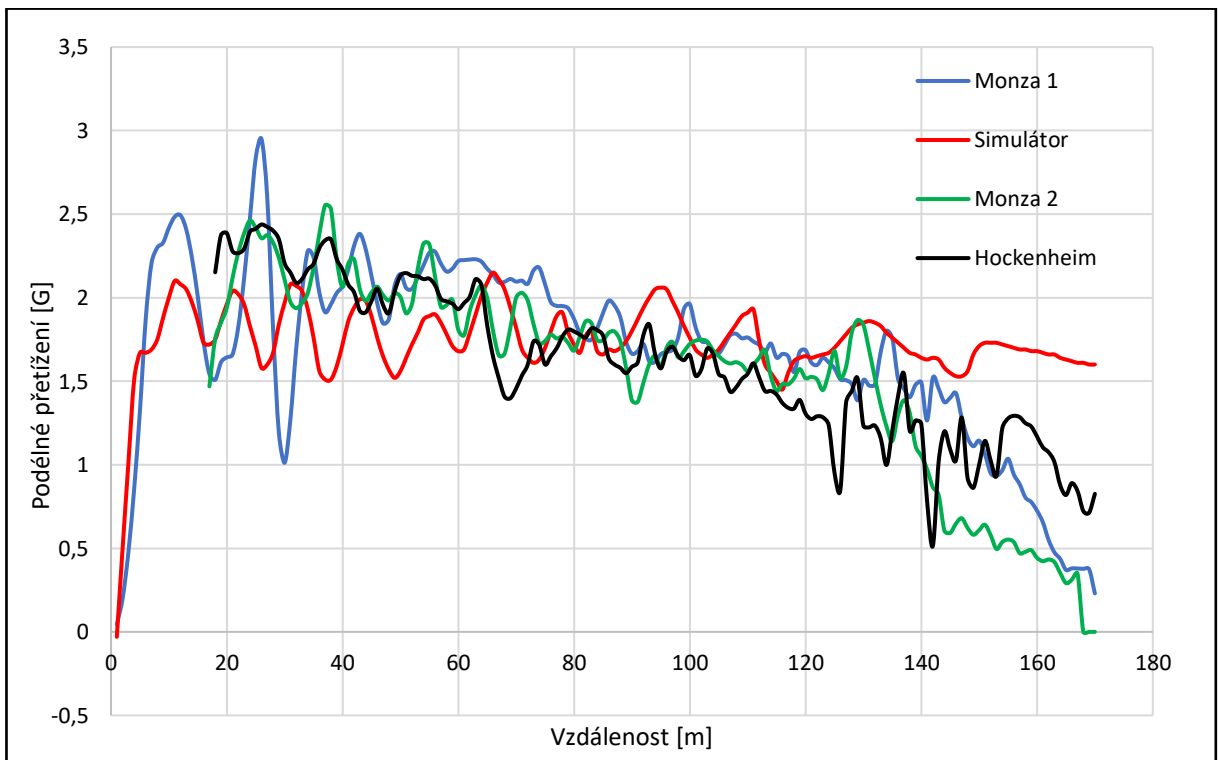


Obr. 40 Úsek pro brždění v Hockenheimu [10]

Jak už bylo zmíněno, porovnávala se především křivka brždění a podélné přetížení. Jelikož všechny parametry byly známy, měření na simulátoru proběhlo pouze jednou a toto měření se poté porovnávalo s hodnoty naměřených na trati. Brzdný moment v simulátoru vyšel pro maximální tlak 205 bar pro přední brzdy 9200 Nm a pro zadní 3000 Nm. Výpočet je obsažen v generátoru souborů, proto zde nebude uváděn. Křivky brždění simulátoru a reálného vozu jsou uvedeny v Grafu č. 8 a podélné přetížení poté v Grafu č. 9.



Graf č. 8 Porovnání rychlostí při brždění

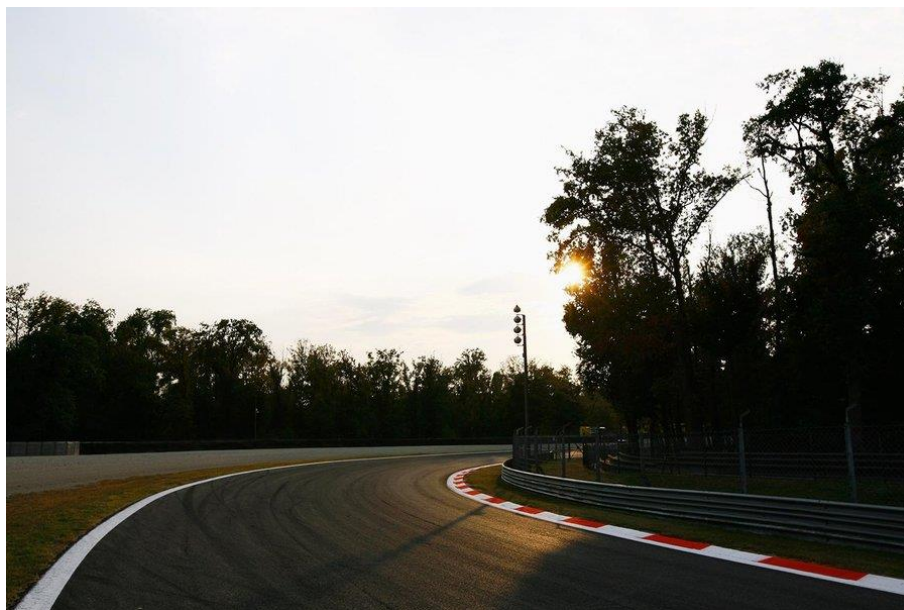


Graf č. 9 Porovnání podélného zrychlení při brždění

Jak je na Grafech č. 9 a č. 10 vidět, křivky nejsou úplně totožné. Je to samozřejmě z toho důvodu, že v simulátoru jsou prakticky ideální podmínky, proto křivka brždění má jeden sklon po celou dobu brždění. Ve skutečném voze brždění ovlivňuje jak stav pneumatik, tak kvalita asfaltu. Výsledek porovnání v obou grafech je však plně dostačující.

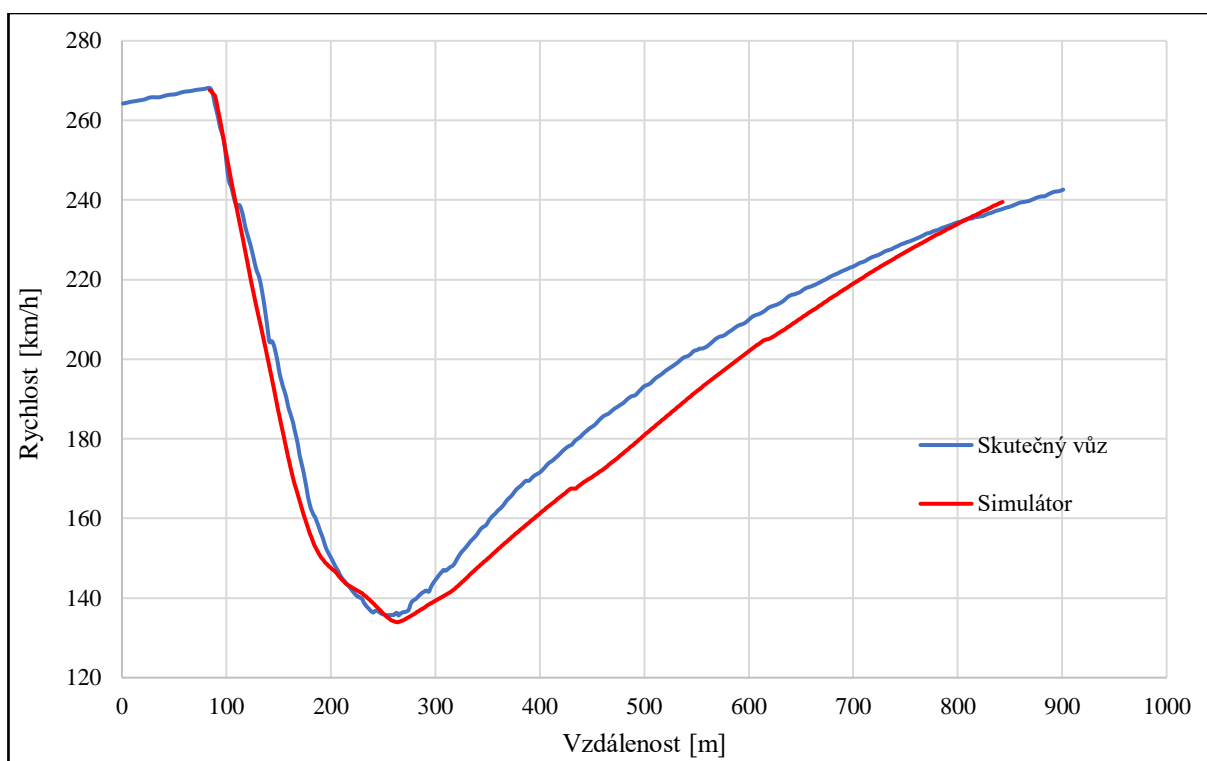
6.2 Příčná dynamika vozidla

Pro porovnání příčného zrychlení v zatáčkách bylo potřeba závodního jezdce, neboť závodní jezdec dokáže z vozu dostat maximum. Byl tedy osloven jezdec týmu I.S.R. Racing, Filip Salaquarda, zdali by nemohl zajet několik kol ve voze na simulátoru pro porovnání příčného zrychlení. Bylo mu řečeno, že musí zajet co nejrychlejší kolo. Pro porovnání příčného zrychlení byla zvolena zatáčka Parabolica okruhu v Monze. Bylo to z důvodu nejlepšího zpracování okruhu ze všech okruhů v simulátoru, neboť tým I.S.R. Racing nemá k dispozici laserově skenované tratě. Všechny tratě jsou tedy tvořeny na základě map či vlastního měření lidí, kteří okruhy vytváří. Tudíž poloměry zatáček přesně neodpovídají skutečnosti. To samé platí i pro zatáčku Parabolica, avšak nejvíce se skutečnosti přibližuje. Hlavní problém je v nižším poloměru v druhé polovině zatáčky, tudíž není možné dosáhnout takového zrychlení jako ve skutečnosti. Zatáčka je zobrazena na Obr. 41.

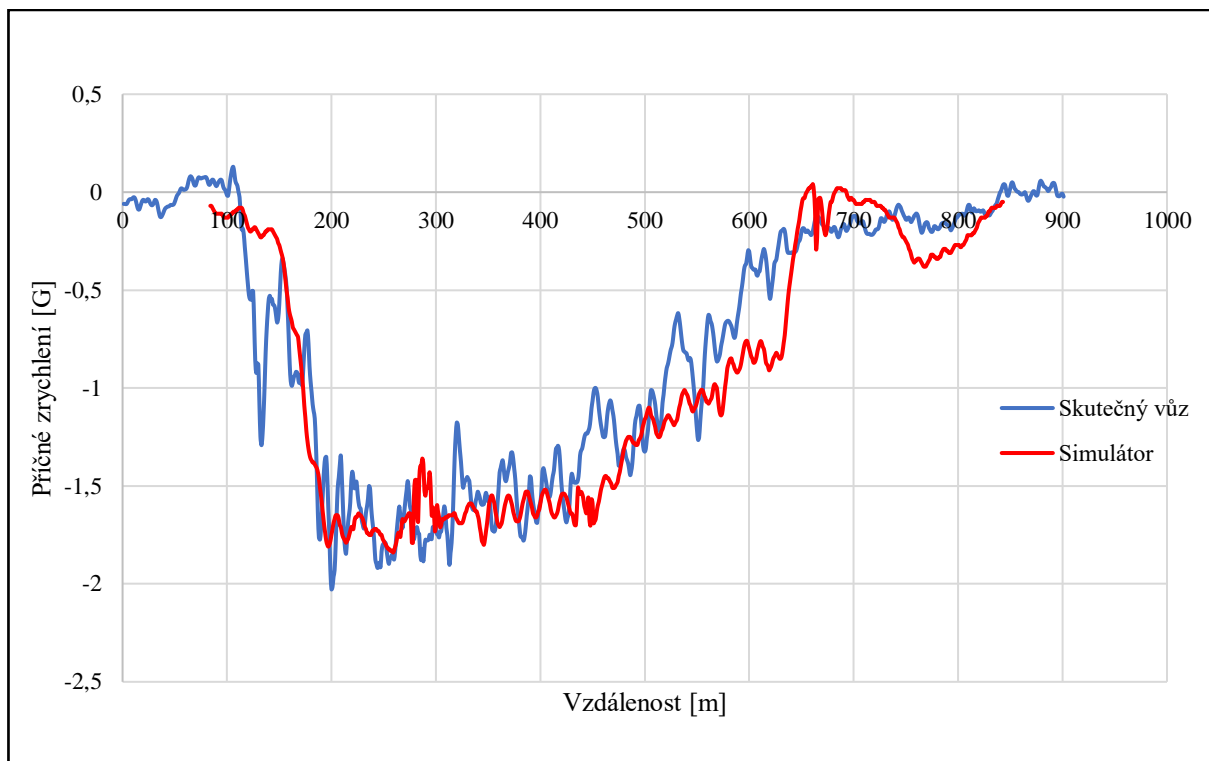


Obr. 41 Zatáčka Parabolica v Monze [11]

Pro příčné zrychlení je nejdůležitější právě přítlak vozu. Ten je vypočítán v kapitole 4 a jeho celková velikost je při rychlosti 215 km/h 5200 N. Pomocí Generátoru souborů, kde se zadává rychlost a koeficienty přítlaků jednotlivých částí vozu byla snaha takové přítláčné síly dosáhnout. Po zkopírování parametrů do textového souboru, jezdec začal testovat limity vozu. Objel 15 kol, než se mu podařilo zajet nejrychlejší kolo, a právě z tohoto kola jsou výsledné grafy pro rychlost (Graf č. 10) a pro příčné zrychlení (Graf č. 11.)



Graf č. 10 Porovnání rychlostí v zatáčce



Graf č. 11 Porovnání příčného zrychlení v zatáčce

Jak je z grafů patrné křivky nejsou úplně totožné. To však nikdy nebudou, neboť porovnání příčného zrychlení je velice obtížné. Ať už se jedná o jiné povětrnostní podmínky, či jiný profil tratě. A to je právě tento případ, kdy, jak je zmíněno výše, druhá polovina zatáčky má menší poloměr. Proto vůz není schopen dosáhnout takového zrychlení. Avšak je důležité poukázat na to, že rychlost vozů je prakticky totožná, tedy 135,4 km/h v reálném voze vs 135 km/h v simulátoru a příčné zrychlení má podobný průběh i velikost. A to je právě výsledek, který je po vozu simulátoru požadován.

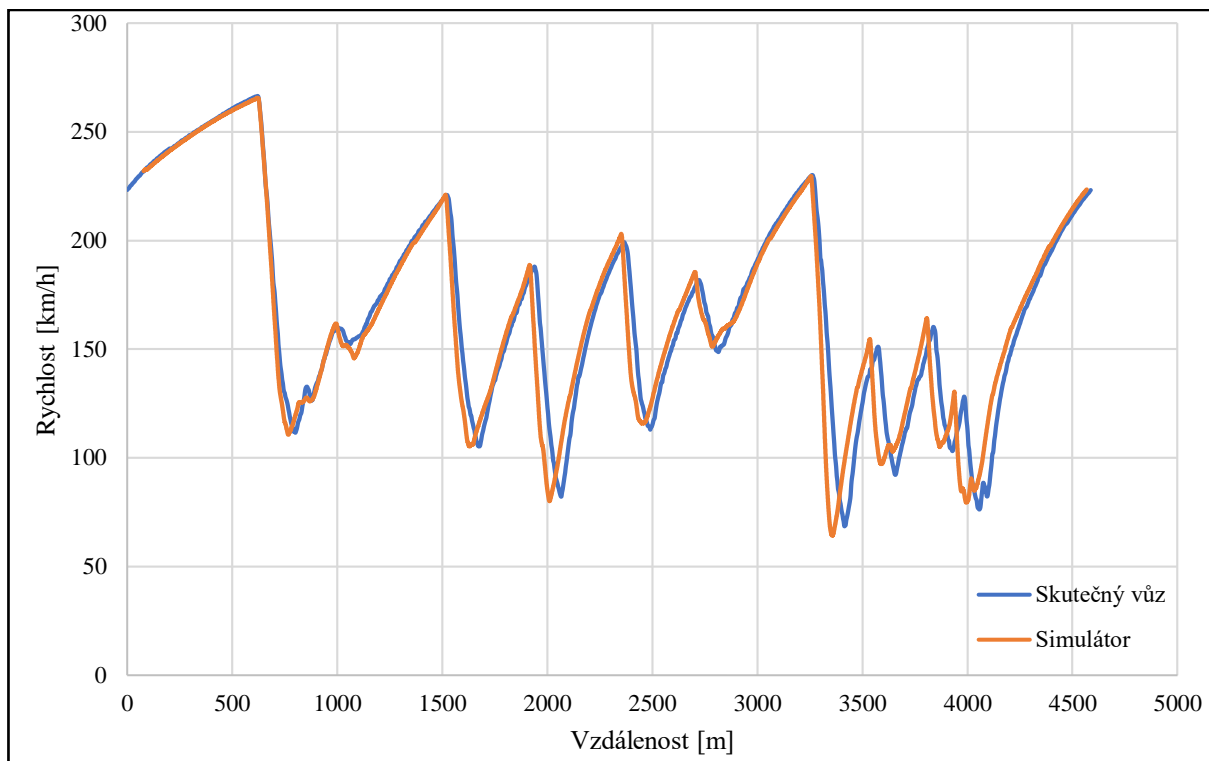
Úprava modelu simulátoru je tedy hotova. Vůz v simulátoru prakticky odpovídá skutečnému vozu. Nikdy však shoda nebude úplná, neboť záleží na spoustu faktorech, které nelze ať už při sbírání dat či testování a porovnání ovlivnit. Při zrychlení například může na sledovaném úseku být vůz po větru, proto dosáhne lepšího zrychlení nebo protivětru poté naopak lepšího zpomalení atp. Při měření příčného zrychlení je velmi důležitý také faktor pneumatik a stav povrchu trati. Vždy je proto při úpravě důležité, aby odchylka mezi simulátorem a skutečným vozem při porovnání byla maximálně 5 %.

Jak je z předešlých kapitol patrné, upravit model tak, aby odpovídal skutečnosti vyžaduje znalosti prakticky ze všech odvětví automobilismu. Navíc proces úpravy modelu, tedy naměření hodnot, vkládání hodnot do simulátoru a následné porovnání, je velmi dlouhý. Dále je nutné, aby model testoval zkušený jezdec, a dokázal dostat z vozu maximum, neboť poté jsou výsledky velmi zkreslené. Je také potřeba mít pro testování kvalitní, nejlépe laserově skenované tratě, ovšem jejich tvorba je velmi nákladná, proto je jich málo.

Po znalosti a správného zadání všech parametrů bylo nasnadě neporovnávat pouze zrychlení, zpomalení a příčné zrychlení jednoho úseku, ale soustředit se na porovnání rychlosti v rámci celého okruhu. Pro toto porovnání posloužil další kvalitně zpracovaný okruh, a to okruh ve španělské Barceloně (Obr. 42). Zde tým I.S.R. Racing v roce 2017 absolvoval další vytrvalostní závod. Testovací jezdec byl Filip Salaquarda. Porovnání nejrychlejších kol je zobrazeno v Grafu č. 12.



Obr. 42 Okruh v Barceloně [12]



Graf č. 12 Porovnání rychlostí v rámci celého kola

Jak je z grafu patrné křivky nejsou úplně totožné. Jsou lehce v druhé části trati posunuté. Je to především z důvodu špatné vzdálenosti tratě v simulátoru. Opět je však nutné porovnat rychlost v jednotlivých zatáčkách, zrychlení a zpomalení. Tyto proměnné však s malou chybou odpovídají. Proto je možno říci, že vůz v simulátoru odpovídá skutečnému vozu. Samozřejmě jezdec nezajel toto kolo hned na první pokus. Jelikož vůz byl v některých částech tratě přetáčivý, muselo se měnit nastavení vozu. Křídlo se změnilo o jeden stupeň výše a změkčoval se zadní stabilizátor. Poté už nebyl problém zajet kolo, které je vidět na Grafu. č. 12.

Jezdec poté vyžadoval změnu tratě na Sachsenring a jelikož tam vůz týmu I.S.R. Racing nikdy nejel, neexistovala data pro porovnání. Nicméně jezdec se chtěl zlepšovat, tudíž jsem si v rámci diplomové práce vyzkoušel i práci datainženýra jelikož jsem musel na základě dat jezdců říci, kde ztrácí čas. Jezdec zajel po několika pokusech zajel nejrychlejší kolo, které už ale nedokázal zlepšit. Zajel 5 kol, které byly pomalejší a chtěl vědět, kde dělá chybu. Nejdůležitější hodnoty, které se sledují pro porovnání kol jsou: zařazený stupeň, rychlost vozu, rozdíl časů, pozice plynového a brzdového pedálu a úhel řízení. Jelikož jednotlivá kola se nikdy správně nepřekryjí je nutné je posunout. Vždy se bere jako x-ová souřadnice vzdálenost, nikoliv čas a překrývá se pozice

zadního levého či pravého tlumiče před zatáčkou. Pro nejpřesnější překrytí a tedy nejpřesnější porovnání se toto musí udělat před každou zatáčkou, jinak je pravděpodobné, že se ostatní zatáčky opět správně nepřekryjí. To poté velmi máte jezdce, neboť při nepřesném překrytí například může nastat situace, že jezdec v nejrychlejších kole brzdil později, přitom to vůbec nemusí být pravda. Jezdec posune svůj brzdňý bod dál a může to skončit i havárií. Správným porovnáním a ukázáním chyby nakonec jezdec svůj čas vylepšil. Tato zkušenost byla pro mě velmi cenná.

V neposlední řadě je však také důležitý názor na model vozu samotného jezdce Filipa Salaquardy. Tomu vůz v simulátoru vyhovoval, neboť měl dobrý přítlak, dobře brzdil a při nájezdech na obrubníky zůstával stabilní.

7 Závěr

V rámci diplomové práce byl upraven simulační model simulátoru rFactor na základě skutečných parametrů vozu Audi R8 LMS týmu I.S.R. Racing. Nejdříve však bylo nutné správně prolnout obraz z projektorů pomocí softwaru Immersive Display Pro, aby byl obraz ostrý a bez zbytečného rozmazání. Dále byly naměřeny délkové a hmotnostní parametry jednotlivých částí vozu pro výpočet momentů setrvačnosti a zjištěna poloha kinematických bodů zavěšení. V neposlední řadě byl na základě dat z polohy tlumičů vypočítán aerodynamický přítlak vozu. Tento výpočet však nebyl přesný, neboť chyběly parametry pneumatik, jako deformace pneumatiky pod statickým zatížením apod. Pro zjednodušení zadávání byl vytvořen excelovský soubor Generátor souborů a hodnoty byly vloženy do pěti textových souborů, ze kterých simulátor rFactor vytvořil výsledný model.

Následně byl model otestován a byly porovnány hodnoty zrychlení, zpomalení a příčného zrychlení skutečného vozu a simulátoru za pomoci profesionálního jezdce Filipa Salaquardy. Shoda nikdy nebyla úplná, neboť záleží na mnoha faktorech ať už při měření skutečných hodnot, či hodnot ze simulátoru. Avšak při porovnání byla odchylka mezi simulátorem a skutečným vozem maximálně 5 % ať už v rychlosti, či v příčném zrychlení. Proto je úprava modelu plně dostačující. Tento model tedy nyní bude používat tým I.S.R. Racing pro trénink jezdců před jednotlivými závody. Po dvou letech pravděpodobně tým přejde na novější simulátor, který bude mít lépe zpracovaný model pneumatik a přesnější fyzikální model.

Seznam obrázků

Obr. 1 Model vozu Audi R8 LMS v simulátoru rFactor	3
Obr. 2 Nesprávné prolnutí projektorů	5
Obr. 3 Správné prolnutí projektorů	6
Obr. 4 Zakřivené plátno simulátoru	8
Obr. 5 Šasi simulátoru	9
Obr. 6 Sedačka simulátoru	10
Obr. 7 Volant simulátoru	10
Obr. 8 Elektromotor simulátoru	11
Obr. 9 Hřídele volantu	12
Obr. 10 Pedály simulátoru	13
Obr. 11 Brzdový disk se třmenem a destičkami	13
Obr. 12 Základní délkové údaje	14
Obr. 13 Schéma převodového ústrojí [1]	17
Obr. 14 Tester tlumičů	19
Obr. 15 Charakteristika předního tlumiče [1]	19
Obr. 16 Senzor polohy tlumiče [6]	20
Obr. 17 Měření hmotnosti pneumatiky a ráfku	26
Obr. 18 Kontrolní měření hmotnosti ráfku	29
Obr. 19 Měření průměru kotouče	33
Obr. 20 Měřicí deska	38
Obr. 21 Měření kinematických bodů	41
Obr. 22 Část tratě pro měření [7]	42
Obr. 23 Textový soubor s koncovkou HDV	47
Obr. 24 Šablona Základ	48
Obr. 25 Šablona Pneumatiky	49
Obr. 26 Šablona Ráfky	49
Obr. 27 Šablona Brzdy	50
Obr. 28 Šablona Zavěšení	51
Obr. 29 Šablona Zavěšení-výpočty	51
Obr. 30 Šablona Pružiny	52
Obr. 31 Šablona Tlumiče	53
Obr. 32 Šablona BumpStop	53
Obr. 33 Šablona Motor + palivo	54
Obr. 34 Šablona Aerodynamika	55
Obr. 35 Šablona Převodovka	55
Obr. 36 Analyzační software Windarab v7	57
Obr. 37 Části tratě pro získání křivky zrychlení [7]	58
Obr. 38 Profil rovinky v Paul Ricard [8]	59
Obr. 39 Úsek pro brždění v Automotodromu Most [9]	62
Obr. 40 Úsek pro brždění v Hockenheimu [10]	62
Obr. 41 Zatáčka Parabolica v Monze [11]	64
Obr. 42 Okruh v Barceloně [12]	67

Seznam grafů

Graf č. 1 Výkonová a momentová charakteristika motoru	16
Graf č. 2 Průběh levého předního tlumiče.....	43
Graf č. 3 Výška přední části vozu	44
Graf č. 4 Výška zadní části vozu.....	44
Graf č. 5 Závislost přítlaku na rychlosti	46
Graf č. 6 Křivky zrychlení skutečného vozu.....	59
Graf č. 7 Porovnání rychlostí při zrychlení	60
Graf č. 8 Porovnání rychlostí při brždění	63
Graf č. 9 Porovnání podélného zrychlení při brždění	63
Graf č. 10 Porovnání rychlostí v zatáčce.....	65
Graf č. 11 Porovnání příčného zrychlení v zatáčce	66
Graf č. 12 Porovnání rychlostí v rámci celého kola.....	68

Seznam tabulek

Tab. č. 1 Převodové poměry [1].....	17
Tab. č. 2 Specifikace senzoru VLP 100 [6].....	20
Tab. č. 3 Naměřené hodnoty pneumatik.....	23
Tab. č. 4 Výsledky pro zadní pneumatiky.....	26
Tab. č. 5 Naměřené hodnoty ráfků	27
Tab. č. 6 Pomocné rozměry.....	27
Tab. č. 7 Hmotnosti částí ráfků	28
Tab. č. 8 Výsledky pro zadní ráfky	30
Tab. č. 9 Naměřené hodnoty brzd	31
Tab. č. 10 Výsledky pro zadní brzdy.....	34
Tab. č. 11 Výsledky měření stabilizátorů a těhlic	34
Tab. č. 12 Výsledky pro zadní těhlici a příčný stabilizátor.....	35
Tab. č. 13 Výsledky měření a výpočtu neodpružených hmot	36
Tab. č. 14 Souřadnice kinematický bodů	40
Tab. č. 15 Nastavení vozu	56

Seznam použité literatury

- [1] AUDI SPORT. *Manual Audi R8 LMS*. 4. Ingolstadt: Audi, 2015.
- [2] BOWLER, Nick. *Laptime Simulation and Race Engineering Student Handbook: P04708*. Anglie.
- [3] *Wikipedia* [online]. [cit. 2018-12]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/RFactor>
- [4] *Top speed* [online]. [cit. 2018-12]. Dostupné z: <https://www.topspeed.com/cars/audi/2015-audi-r8-lms-ar168033.html>
- [5] *SpeedNews* [online]. [cit. 2018-12]. Dostupné z: <https://nasaspeed.news/tech/suspension/chassis-tuning-with-dampers-a-hard-look-at-shock-absorbers-and-their-effects-on-handling/>
- [6] *Variohm EuroSenzor* [online]. [cit. 2018-12]. Dostupné z: <https://www.variohm.com/positionsensors/sensors-detail.php?mid=497&did=VLP-Linear-Potentiometer>
- [7] *Wikimedia commons* [online]. [cit. 2018-12]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Circuit_Monza.svg
- [8] *RML AD* [online]. [cit. 2018-12]. Dostupné z: http://www.rml-adgroup.com/racing/LMS_2010/02_Ricard_Race/02_paulricard_preview.htm
- [9] *FIA CEZ* [online]. [cit. 2018-12]. Dostupné z: <https://fia-cez.com/en/okruhovy-sampionat-stredoevropske-zony-fia-cez-severocesky-most/>
- [10] *Wikipedia* [online]. [cit. 2018-12]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Hockenheimring#/media/File:Hockenheim2012.svg>
- [11] *RedBull Racing* [online]. [cit. 2018-12]. Dostupné z: <http://www-new.redbullracing.com/article/5-things-we-love-about-italian-gp>
- [12] *Automobilsport* [online]. [cit. 2018-12]. Dostupné z: <https://www.automobilsport.com/circuit-barcelona-catalunya-stats-facts-spanish-gp---164698.html>