



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA DOPRAVNÍ

*Bc. Josef Svoboda*

**MĚŘENÍ A ANALÝZA JÍZDNÍ DYNAMIKY SILNIČNÍCH  
ZÁVODNÍCH MOTOCYKLŮ**

Diplomová práce

**2020**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



**K616.....Ústav dopravních prostředků**

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Bc. Josef Svoboda**

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

**N 3710 – DS – Dopravní systémy a technika**

Název tématu (česky): **Měření a analýza jízdní dynamiky silničních závodních motocyklů**

Název tématu (anglicky): **Measuring and analysis of driving dynamics of road racing motorcycles**

### **Zásady pro vypracování**

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- prostudujte problematiku sběru a analýzy dat silničních závodních motocyklů
- proveďte řešení vhodné měřicí techniky pro jízdní zkoušky silničních závodních motocyklů
- navrhnete metodiku sběru dat za účelem zefektivnění tréninku jezdce a nastavení motocyklu a experiment pro její ověření
- proveďte navržený experiment a ověřte navrženou metodiku
- zpracujte a analyzujte naměřená data
- vypracujte závěr a shrnutí výsledků



Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucích práce

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

Seznam odborné literatury: TREVITT, Andrew. How to improve your motorcycle's handling and performance. Phoenix, AZ: David Bull Pub., c2008. ISBN 978-189-3618-459.  
MCBEATH, Simon. Competition car data logging. 2nd ed. Newbury Park, Calif.: Haynes North America, 2008. ISBN 978-184-4255-658.

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Přemysl Toman**  
**Ing. Josef Mík, Ph.D.**

Datum zadání diplomové práce: **11. června 2019**  
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **18. května 2020**  
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia  
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

  
.....  
doc. Ing. Petr Bouchner, Ph.D.  
vedoucí  
Ústavu dopravních prostředků

L. S.   
.....  
doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.  
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

  
.....  
Bc. Josef Svoboda  
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 11. června 2019

## Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval svým vedoucím, jmenovitě Ing. Přemyslu Tomanovi a Ing. Josefu Míkovi, Ph.D. za odborné vedení diplomové práce a pomoc při přípravě a realizaci praktických měření. Za cenné rady a čas věnovaný konzultacím při programování bych chtěl poděkovat panu Ing. Adamu Orlickému. Také bych rád poděkoval kolegům z Ústavu soudního znalectví v dopravě za zapůjčenou měřicí techniku. V neposlední řadě patří můj dík týmovým kolegům, kteří mi pomáhali s přípravou měření na okruhu v Barceloně. Na závěr bych rád poděkoval svým rodičům, přítelkyni a celé rodině za morální a materiální podporu během celé doby studia.

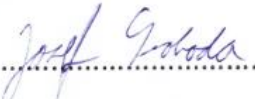
## Čestné prohlášení

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

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

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

V Praze dne 15. května 2020

  
.....  
Josef Svoboda

## Abstrakt

Diplomová práce se zabývá měřením a analýzou dat jízdní dynamiky silničních závodních motocyklů. V první části práce je uvedena studie systémů používaných pro záznam dat závodních motocyklů, včetně měřených veličin a zaznamenávaných kanálů. Dále je zde uvedena vhodná měřicí technika a také metody využívané při analýze naměřených dat. Cílem práce je návrh a realizace systému pro sběr dat a nástroje na jejich efektivní vyhodnocování dle požadavků fakultního týmu CTU Lions. Navržený systém byl ověřen dvěma experimenty na závodním okruhu ve Vysokém Mýtě a také na okruhu Catalunya ve španělské Barceloně. V závěru práce jsou naměřená data z obou experimentů vyhodnocena. Funkce a možnosti vytvořené aplikace jsou zde představeny na ukázkách specifických situací zaznamenaných během experimentů.

## Klíčová slova

analýza dat, CTU Lions, elektromobilita, jízdní dynamika, měřicí technika, MotoStudent, silniční závodní motocykly, záznam dat

## Abstract

The master thesis is focused on measurement and analysis of driving dynamics data of road racing motorcycles. The first chapter of the thesis provides an overview of research studies for systems used for data acquisition on road racing motorcycles, including collected data and measuring channels used. Further in this chapter, the suitable measuring tools and methods applied for analysis of the measured data are described. The purpose of the thesis is to design and implement a system for data acquisition from a motorcycle and develop method for their effective analysis per the requirements of the faculty racing team – the CTU Lions. The proposed system was verified during experiments on two racing circuits: Vysoké Mýto, Czech Republic and Barcelona-Catalunya, Spain. In the end, the measured data assessment and their analyses are provided. Some functions and features of the developed application are presented on the example of data from specific measurement episodes.

## Keywords

data analysis, CTU Lions, electromobility, driving dynamics, measuring tools, MotoStudent, road racing motorcycles, data acquisition

# Obsah

Seznam použitých zkratk a veličin .....	7
Úvod.....	8
1 Sběr dat pro účely analýzy jízdy silničních závodních motocyklů .....	9
1.1 Druhy systémů pro zaznamenávání dat .....	9
1.1.1 Systémy využívající senzory pro nepřímé určení pozice .....	9
1.1.2 Systémy využívající k lokalizaci GNSS .....	10
1.1.3 Porovnání rychlosti měřené za pomoci GPS a senzorem zadního kola .....	12
1.2 Měřené veličiny a matematické kanály .....	13
1.2.1 Čas $t$ [s] .....	13
1.2.2 Poloha .....	13
1.2.3 Rychlost [m.s <sup>-1</sup> ] .....	15
1.2.4 Zrychlení [m.s <sup>-2</sup> ] .....	15
1.2.5 Otáčky motoru [RPM] a poloha plynové rukojeti (škrtkící klapky) [%] .....	18
1.2.6 Zdvih přední a zadní kyvné vidlice [m] .....	19
1.2.7 Ostatní měřené veličiny a kanály .....	20
1.2.8 Videozáznam .....	20
2 Vhodná měřicí technika .....	21
2.1 Záznamová jednotka .....	21
2.1.1 Vzorkovací frekvence (Sample rate) .....	22
2.2 Senzory .....	22
2.2.1 Senzory na kolech a snímání otáčení hnacího hřídele .....	23
2.2.2 Poziční senzory pro měření zdvihu odpružení .....	23
2.2.3 Senzory pro měření pozice plynové rukojeti a zařazeného rychlostního stupně .....	24
2.2.4 Akcelerometry .....	24
2.2.5 Senzory teploty .....	24
2.2.6 Senzory tlaku .....	24
2.2.7 Další senzory .....	25
2.2.8 Příklad komerčně dodávaného systému pro záznam dat .....	25
3 Metody analýzy naměřených dat .....	26
3.1 Předzpracování dat .....	26
3.1.1 Opravy chyb v datech .....	26
3.1.2 Filtrace dat .....	26
3.2 Zobrazování dat .....	29
3.2.1 Možnosti zobrazování dat .....	29
3.2.2 Zobrazování více datových kanálů .....	30
3.2.3 Vytváření sektorů na trati .....	31
3.2.4 Stopa jezdce na trati .....	31
4 Návrh a příprava experimentu .....	32
4.1 Měřicí technika a zaznamenávaná data .....	32
4.1.1 Výchozí vrstva .....	32
4.1.2 Softwarová vrstva .....	33
4.1.3 Hardwarová vrstva .....	33
4.1.4 Datová vrstva .....	35

4.2	Rozmístění a upevnění měřicí techniky na motocykl.....	35
4.3	Jezdec a měřené motocykly .....	36
4.4	Možnosti vylepšení systému pro záznam dat .....	37
5	Experiment – měření na okruhu .....	39
5.1	Pilotní měření na autodromu ve Vysokém Mýtě .....	39
5.1.1	Podmínky měření .....	39
5.1.2	Použitá měřicí technika a pomůcky.....	39
5.1.3	Postup měření .....	40
5.2	Měření na okruhu Catalunya v Barceloně .....	43
5.2.1	Podmínky měření .....	43
5.2.2	Použitá měřicí technika a pomůcky.....	43
5.2.3	Postup měření .....	44
6	Vytvoření aplikace pro analýzu naměřených dat .....	46
6.1	Detailní popis uživatelského rozhraní programu .....	46
6.2	Vytváření skriptů .....	49
6.2.1	Rozdělení GPS dat na jednotlivá kola .....	49
6.2.2	Mapování kanálů na referenční dráhu (kolo).....	50
6.3	Vytváření programu v aplikaci App Designer .....	52
6.4	Struktura importovaných dat.....	53
6.5	GPS data pro program.....	53
6.6	Data z controlleru elektrického motocyklu .....	55
6.7	Možnosti vylepšení aplikace .....	55
7	Vyhodnocení naměřených dat .....	56
7.1	Analýza dat naměřených na okruhu ve Vysokém Mýtě .....	56
7.1.1	Porovnání měřených jízd s elektrickým a spalovacím motocyklem.....	56
7.1.2	Analýza naměřených dat z jízdy na elektrickém motocyklu.....	59
7.1.3	Analýza naměřených dat z jízdy na spalovacím motocyklu.....	61
7.2	Analýza dat naměřených na okruhu Catalunya – Barcelona .....	62
7.3	Analýza stylu jízdy z fotografií a videozáznamů .....	65
8	Diskuze výsledků .....	67
	Závěr .....	68
	Použitá literatura.....	72
	Seznam obrázků .....	72
	Seznam tabulek .....	73



## Seznam použitých zkratk a veličin

Moto3		3. motocyklová kategorie v seriálu mistrovství světa
CTU		Czech Technical University
2D		dvozměrný (Two Dimensional)
DAS		Data Acquisition System
$x_0, y_0$	[m]	počáteční (výchozí) souřadnice
$t$	[s]	čas
$\theta$	[°]	úhel směru přírůstku
$\omega$	[rad · s <sup>-1</sup> ]	úhlová rychlost
$r$	[m]	dynamický poloměr kola
$s$	[m]	dráha
GNSS		Global Navigation Satellite System
DRSC		Dedicated Short Range Communication
$S_p^i$	[m]	pseudovzdálenost přijímače a satelitu
$t_{pi}$	[s]	časové zpoždění signálu
$c$	[m · s <sup>-1</sup> ]	rychlost světla
3D		trojrozměrný (Three Dimensional)
GPS		Global Positioning System
USSF		United States Space Force
$o$	[m]	obvod
UTC		Universal Coordinated Time
ECEF		Earth-Centered, Earth-Fixed
WGS84		World Geodetic System
$N$	[m]	hlavní vertikální poloměr zakřivení země
$R_{zem}$	[m]	poloměr země
$e$	[-]	excentricita
$v$	[m · s <sup>-1</sup> ]	rychlost
$\Phi$	[°]	úhel náklonu
$a_{Lon}$	[m · s <sup>-2</sup> ]	podélné zrychlení
$a_{Lat}$	[m · s <sup>-2</sup> ]	odstředivé zrychlení
$R$	[m]	poloměr oblouku
$g$	[m · s <sup>-2</sup> ]	tíhové zrychlení
$a_{Total}$	[m · s <sup>-2</sup> ]	celkové zrychlení
FIA		Federation Internationale de l'Automobile
ECU		Electronic Control Unit
$\alpha$	[°]	úhel sklonu přední vidlice
$f$	[Hz]	vzorkovací frekvence
CAN		Controller Area Network
$\hat{x}$		aritmetický průměr
FFT		Fast Fourier Transform
$T$	[s]	perioda
CEP		Circular Error Probable
GDOP		Geometric Dilution Of Precision

## Úvod

Překonávání současných rekordů a vítězství nad soupeři je cílem každé soutěže. Ne jinak je tomu i v motorsportu, kde se týmy předhánají nejen ve zdokonalování strojů, ale i výcviku jezdců. Výsledné inovace poté mnohdy přechází z dílen a kanceláří závodních týmů do sériové výroby velkých podniků. Díky zapojení se mnoha firem tak může podpora a investice v oblasti motorsportu výrazně napomoci dalšímu technologickému rozvoji a implementaci v průmyslové výrobě.

Jedním z takových závodních týmů je i univerzitní tým CTU Lions, který se v roce 2020 již potřetí účastní celosvětové soutěže pro studenty vysokých škol MotoStudent. Cílem soutěže MotoStudent je vyvinout a sestavit prototyp závodního motocyklu odpovídající kategorii Moto3, čemuž jsem se ostatně věnoval i ve své bakalářské práci *Návrh rámu elektrického motocyklu*. Tato diplomová práce navazuje na mé bakalářské téma a zaměřuje se na výkon systému jezdec–motocykl, konkrétně přináší měření a analýzu jízdní dynamiky silničních závodních motocyklů.

Záznam jízdních dat a vyhodnocování výsledků je už desítky let osvědčená cesta závodních týmů, jak vylepšit své časy na trati i celkové umístění. V motorsportu se používají sofistikovaná měřicí zařízení s mnoha senzory, jež zaznamenávají chování jezdce a jeho stroje na závodním okruhu. Získané informace pomáhají závodníkům rychleji se přizpůsobovat daným podmínkám i situacím vznikajícím na trati. Mechanici na základě analýzy naměřených dat dokáží nastavit jednotlivé subsystémy motocyklu (odpružení, motor, brzdy) pro konkrétní potřeby jezdce a okruhu, případně odhalit defekty a vznikající problémy [1].

V úvodu práce je prostudována problematika sběru dat pro účely analýzy jízdy jednostranných vozidel. Je zde provedeno i shrnutí základních druhů systémů pro záznam dat, včetně zaznamenávaných kanálů. Dále je popsána vhodná měřicí technika a metody uplatňované v analýze naměřených dat silničních závodních motocyklů.

Hlavním cílem této práce je návrh a realizace spolehlivého a funkčního systému pro sběr dat a nástroje na jejich efektivní vyhodnocování dle požadavků týmu CTU Lions. Součástí návrhu je i konstrukce záznamového zařízení – jak z hardwarové tak softwarové stránky. Popsána je i použitá měřicí technika a její umístění na motocyklech.

Jelikož vývoj nástroje pro analýzu dat v podobě aplikace je bez testovacích dat velice složitý, bylo provedeno pilotní měření na okruhu ve Vysokém Mýtě, a to na motocyklech s různými druhy pohonu – elektrickým a spalovacím. Po ověření celého systému byl proveden druhý experiment, a to sice v reálném závodním prostředí během regulérního závodního víkendu na okruhu Catalunya ve španělské Barceloně. Na závěr je provedena analýza z pohledu jezdce ve smyslu hledání potenciálu ke zlepšení jeho výkonu na trati. Na ukázkách specifických situací jsou představeny funkce a možnosti vyvinuté aplikace.

## 1 Sběr dat pro účely analýzy jízdy silničních závodních motocyklů

Sběr dat slouží pro záznam kvantitativních údajů výkonu systému jezdec–motocykl. Jezdci může záznam dat pomoci zlepšovat dovednosti na závodním okruhu tím, že mu výsledky analýzy dat poskytují zpětnou vazbu. Naměřená data také využijeme při nastavování motocyklu, konkrétně přizpůsobením parametrů systému podvozku a motoru daným situacím, určité trati a konkrétnímu jezdcí [1].

Každý senzor připojený do zařízení pro záznam dat (DAS – Data Acquisition System) představuje jeden kanál – tedy jednu měřenou veličinu. Záznamové jednotky na trhu jsou často omezeny maximálním možným počtem současně zaznamenávaných kanálů. Systémy schopné měřit velké množství kanálů jsou drahé a stejně tak i potřebné senzory. Vhodným kombinováním i nižšího počtu správně vybraných kanálů a vytvářením tzv. „matematických kanálů“ lze dosáhnout překvapivých výsledků v podobě nově získaných informací [1] [2].

Ačkoliv jsou výpočty matematických kanálů předmětem spíše následné analýzy naměřených dat a z tohoto pohledu tedy úplně nezapadají do kapitoly sběr dat, uvádím je zde pro úplnost a přehlednost, jelikož přímo vychází a úzce souvisí s kanály a měřenými veličinami. Teoretická kapitola je pro lepší pochopitelnost prokládána ukázkami grafů, z nichž některé jsou vytvořené autorem práce.

### 1.1 Druhy systémů pro zaznamenávání dat

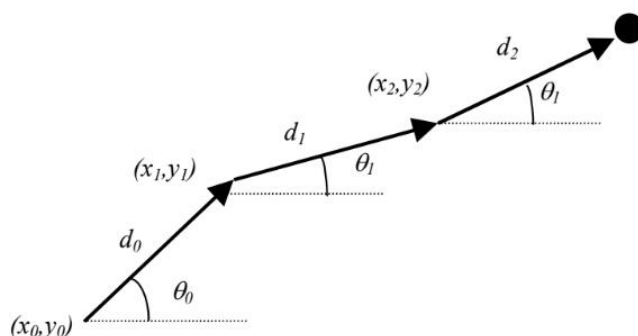
Na trhu existuje celá řada systémů pro zaznamenávání dat – tzv. „dataloggerů“, které v minulosti prošly rozsáhlým vývojem. Prakticky všechny systémy pro záznam dat jízdní dynamiky dokáží sbírat nejzákladnější data jako je rychlost či ujetá vzdálenost, avšak způsob, jakým se tato data získávají se může lišit. Systémy můžeme rozdělit na dvě skupiny podle toho, jak určují polohu stroje na trati. Rozeznáváme dva základní přístupy měření – systémy využívající senzory pro nepřímé určení pozice a systémy využívající k lokalizaci GNSS (Global Navigation Satellite System) [2] [3].

#### 1.1.1 Systémy využívající senzory pro nepřímé určení pozice

Pro motocykl pohybující se na trati lze vypočítat relativní polohu vůči poloze výchozí (referenční). Výpočet relativní polohy spočívá ve vyhodnocování dat ze senzorů, které jsou umístěny na motocyklu, v pravidelných časových intervalech  $i$ . Výsledkem jsou inkrementální přírůstky dráhy a směru vůči referenční pozici (obrázek číslo 1). Ve 2D prostoru je tedy poloha souřadnic  $[x_n, y_n]$  v čase  $t_n$  určena:

$$x_n = x_0 + \sum_{i=0}^{n-1} d_i \cos \theta_i \quad (1.1)$$

$$y_n = y_0 + \sum_{i=0}^{n-1} d_i \sin \theta_i \quad (1.2)$$



Obrázek 1: Inkrementální přírůstky dráhy pro určení polohy za pomoci senzorů na motocyklu [4].

K měření ujeté vzdálenosti se u nepřímého systému určení polohy motocyklů používá nejčastěji senzor na zadním kole, který měří úhlovou rychlost  $\omega$  [ $rad/s$ ], z níž je následně skrze dynamický poloměr  $r$  [ $m$ ] vypočítána ujetá dráha  $d_i$  [ $m$ ]. Tento princip určování polohy je velice podobný způsobu měření za pomoci měřicího kolečka. Pro měření úhlové míry a udržení směru se využívají další senzory jako gyroskop či akcelerometr. Tyto senzory zaznamenávají data, jež software systému využívá k vytvoření virtuální trasy jízdy na okruhu [4].

Jak bylo již zmíněno, systémy nevyužívající k lokalizaci GNSS musí mít jednoznačně určenou referenční polohu. Tu na závodním okruhu zajišťuje nejčastěji tzv. „maják“ – zařízení, pracující v infračerveném spektru na principu technologie DRSC (Dedicated Short Range Communication). Maják se nachází vedle trati, nejčastěji v blízkosti cílové čáry, a slouží jako referenční bod pro polohu a čas. Při průjezdu stroje okolo majáku dochází k jednostrannému přenosu dat z majáku do palubní jednotky [4] [5]. Díky tomu systém dokáže zaznamenávat přesné časy jednotlivých kol.



Obrázek 2: Vlevo je „datalogger“ v podobě palubní jednotky zahrnující systém pro předzpracování dat z externích senzorů, vpravo tzv. „maják“ pracující v infračervené oblasti sloužící pro jednoznačné určení polohy na trati [6].

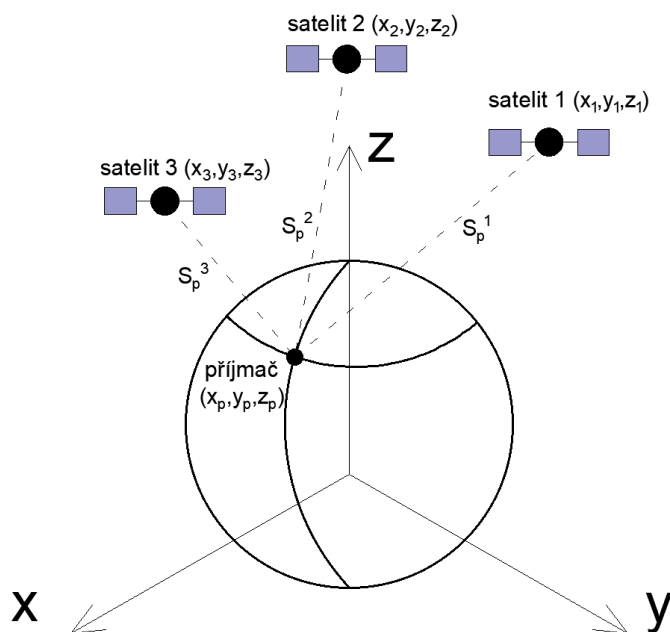
### 1.1.2 Systémy využívající k lokalizaci GNSS

GNSS (Global Navigation Satellite Systems) jsou družicové rádiové systémy sloužící ke stanovení geografické polohy příjemce uživatele na zemském povrchu. Motocykl pohybující se na trati přijímá signál pomocí antény vyvedené z palubní jednotky. V signálu (datovém balíčku) vysílaném družicí GNSS je zaznamenána poloha družice  $p_i$  a přesný čas  $t$ . Z časového zpoždění příjmu signálu  $\Delta t_{pi}$  [ $s$ ] se odvodí pseudovzdálenost  $S_p^i$  [ $m$ ] příjemce od zdroje signálu (satelitu) jako [7]:

$$S_p^i = \Delta t_{pi} \cdot c; \quad (1.3)$$

kde  $c$  [ $m/s$ ] je rychlost světla. Teoreticky by nám pro určení polohy  $(x_p, y_p, z_p)$  přijímače ve 3D prostoru měla stačit znalost polohy tří družic  $(x_i, y_i, z_i, kde i = 1,2,3)$  a jejich pseudovzdálenost  $S_p^i$  od přijímače (obrázek 3) [4]. Teoretický vzorec má tvar:

$$S_p^i = \sqrt{(x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2 + (z_i - z_p)^2}, i = 1,2,3 \quad (1.4)$$



Obrázek 3: Teoretické určování pozice za pomoci tří satelitů GNSS [7].

Prostorové protínání určí dvě polohy přijímače. Jestliže pomíneme polohu určenou mimo povrch Země měl by vzorec 1.4 postačovat. V praxi však hodiny v přijímači měřící dobu příchodu signálu od satelitu nejsou synchronizovány s GNSS časem. Musí proto být stanoven časový offset  $dt$  mezi hodinami palubní jednotky a časem GNSS. Ke stanovení offsetu je nutné využít čtvrtý satelit. Dostáváme čtyři rovnice o čtyřech neznámých ve tvaru [4]:

$$S_p^i = \sqrt{(x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2 + (z_i - z_p)^2} + c(dt - dt_i), kde i = 1,2,3,4 \quad (1.5)$$

Na světě existuje několik provozovatelů GNSS služeb. Pro účely záznamu dat v motorsportu je nejpopulárnější technologie GPS (Global Positioning System) provozovaná vládní agenturou USSF (United States Space Force) [8] [7]. Systémy sběru dat založené na technologii GNSS dokáží pomocí GPS lokalizovat a následně přesně určit polohu sledovaného motocyklu. Z těchto dat je následně možné generovat stopu jezdce na trati a díky časovému kanálu lze vypočítat rychlost, zrychlení a další užitečné veličiny. Tento systém záznamu dat narozdíl od předchozího zmiňovaného nepotřebuje maják na trati

ani senzor otáčení zadního kola. Je ale dražší a dále vyžaduje, aby jeho anténa měla stále kvalitní příjem signálu GPS. Na kvalitě signálu pak závisí i přesnost naměřených dat. Kvalitu signálu může ovlivňovat počasí, nerovnosti terénu či budovy stojící poblíž trati. Systémy sběru dat pracující na principu GNSS umožňují nejen nastavení startu a cíle uživatelem, ale také vytváření sektorů na trati. Získáme tím detailní přehled o jezdcových časech, čehož je také využito při tvorbě softwaru v diplomové práci [5].

### 1.1.3 Porovnání rychlosti měřené senzorem zadního kola za pomoci GPS

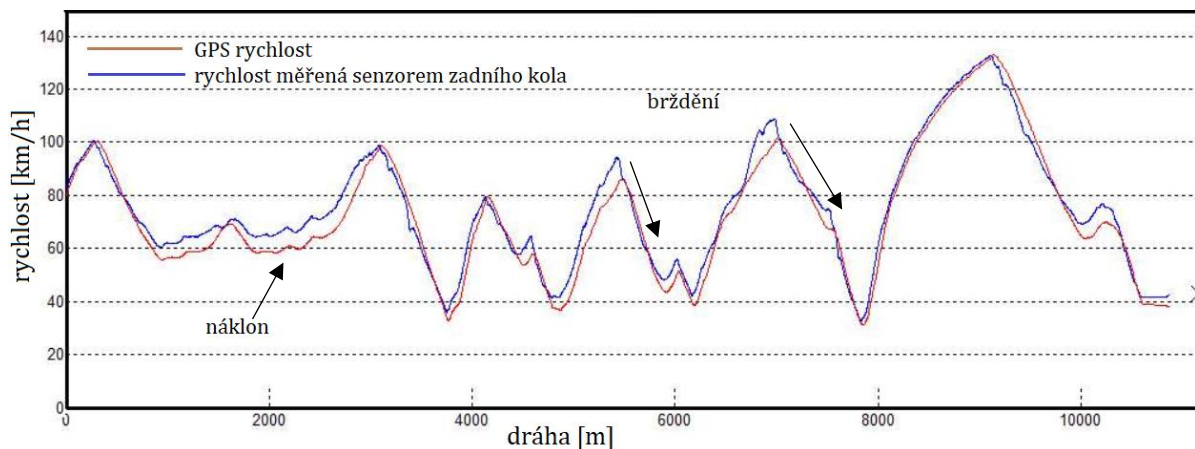
Rychlost měřená senzorem na zadním kole je ovlivněna několika faktory, které vedou k nepřesnostem a ty je nutné brát v úvahu v následné analýze dat. Rychlost a dráha, které jsou vypočítány z rychlosti otáčení zadního kola – je tedy nutná přesná znalost poloměru, popř. obvodu pneumatiky. Pokud tedy provedeme výměnu zadní pneumatiky motocyklu o obvodu  $o = 2\,050\text{ mm}$  za pneumatiku s obvodem  $o = 1\,980\text{ mm}$  (ekvivalent výměny pneumatiky typu „slick“ za „mokrou“ variantu) a neprovedeme kalibraci, rychlostní údaje se sníží přibližně o 3,5 %. Zaznamenané výsledky jsou (zčásti) ovlivněny také tím, že se motocykl během jízdy ve směrovém oblouku naklání. S větším úhlem náklonu se obvod, resp. poloměr kola zmenšuje, čímž se úměrně zvyšuje i měřená úhlová rychlost  $\omega$  a tím i ujetá vzdálenost  $d_i$  (obrázek 1). Jestliže tedy měříme rychlost u více jezdců s různým stylem jízdy na témže motocyklu či vyměníme pneu, riskujeme nepřesnosti při analýze dat. Dalším faktorem jsou také deformace a sjíždění pneumatik zejména těch závodních – obrázek číslo 4 [1] [5].



Obrázek 4: Pneumatika typu slick po tréninku závodního týmu Yamaha [9].

Systémy založené na technologii GPS měří rychlost na základě skutečné polohy motocyklu na zemském povrchu, proto zde problematika obvodu, deformací pneumatiky či úhlu náklonu odpadá a data jsou z tohoto pohledu přesnější. Tyto rozdíly jsou dobře viditelné na obrázku číslo 5, kde je v grafu zaznamenána rychlost jízdy motocyklu měřená pomocí obou zmiňovaných metod. Největší rozdíl pozorujeme během náklonu motocyklu, avšak rozdíly rychlostí vznikají také při brzdění, kdy můžeme vidět výrazné zpoždění u záznamu rychlosti měřené senzorem na zadním kole [5]. V následujících

podkapitolách práce se zaměřím zejména na popis měření a výpočty kanálů získaných pomocí systémů založených na technologii GPS.



Obrázek 5: Porovnání metod měření rychlosti [5].

## 1.2 Měřené veličiny a matematické kanály

Záznam polohy, ať už za pomoci GPS či nepřímo určovaný, je jen částí dat potřebných k široké analýze jízdy na okruhu. Pokud přidáme další senzory, dostaneme více kanálů, a tím i více informací o výkonu jezdce v tréninku či v závodě. Profesionální závodní týmy seriálu mistrovství světa MotoGP dokáží podrobnou analýzou dat různých kanálů vytvořit nejlepší možné nastavení pro dané podmínky a konkrétní jezdce ve velice krátkém čase. Významně dopomáhá také elektronické řízení subsystémů motocyklu (podvozku), jež závisí na některých senzorech a jimi měřených charakteristikách. Existuje velké množství veličin, které lze měřit a následně analyzovat [10]. Nejdůležitější měřené veličiny a matematické kanály počítanými na základě GPS dat jsou uvedeny v následujících podkapitolách.

### 1.2.1 Čas $t$ [s]

Základní veličinou pro porovnání výkonu jezdce a motocyklu je čas jednotlivých kol a sektorů na trati. Čas slouží jako první ukazatel, pomocí kterého lze velice rychle vyhodnotit, zda provedené změny v nastavení motocyklu, či jízdním stylu jezdce, byly efektivní. V případě systémů založených na měření polohy přes GPS se používá čas UTC (Coordinated Universal Time) získávaný z družic satelitních systémů.

### 1.2.2 Poloha

Jestliže jednotka DAS zachytí signál od minimálně čtyř satelitů GPS, dokáže vypočítat polohu motocyklu. Výpočty polohy jsou nejčastěji zaznamenány jako body o specifických zeměpisných souřadnicích: *latitude* [°], *longitude* [°], *altitude* [m] – tedy zeměpisná šířka, délka a výška. Zeměpisné souřadnice jsou vstupem pro přepočítání polohy na kartézský souřadnicový systém ECEF (Earth-Centered, Earth-Fixed), sloužící k vyjádření polohy těles vůči zemi. Pro přepočítání zeměpisných souřadnic se využívá konstant vycházejících z modelu WGS84 (World Geodetic System), což je světový geodetický systém definující

referenční elipsoid. Tento přepočítání je nutný pro další výpočty, jelikož kartézský souřadnicový systém ECEF je definovaný v metrech [11]. Výpočet kartézských souřadnic  $x$  [m],  $y$  [m],  $z$  [m] je následující:

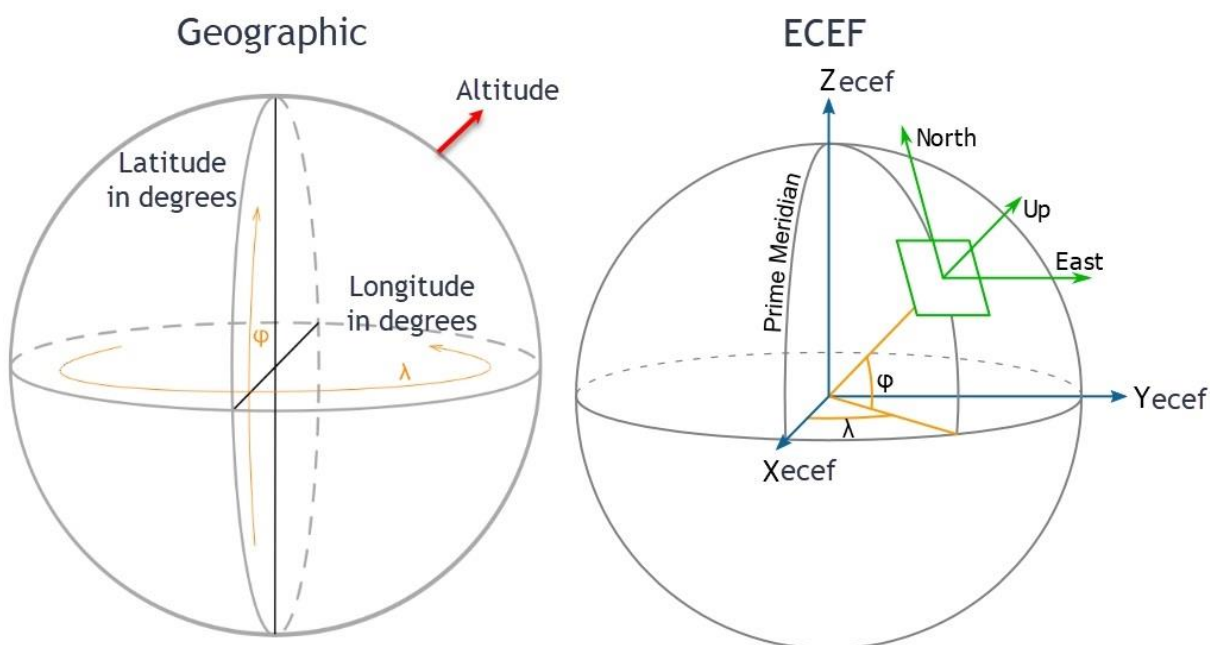
$$x = (N + altitude) \cdot \cos latitude \cdot \cos (longitude) \quad (1.2)$$

$$y = (N + altitude) \cdot \cos latitude \cdot \sin (longitude) \quad (1.3)$$

$$z = (1 - e^2) \cdot N + altitude \cdot \sin (latitude) \quad (1.4)$$

$$N = \frac{R_{zem}}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 Latitude}} \quad (1.5)$$

kde  $N$  [m] je hlavní vertikální poloměr zakřivení země,  $R_{zem} = 6\,378\,137$  [m] je poloměr země a  $e = 8,181\,919\,084\,262\,2 \cdot 10^{-2}$  je konstanta excentricity pro model WGS84. Na obrázku 6 jsou zobrazeny rozdíly mezi zeměpisnými souřadnicemi a kartézským souřadnicovým systémem ECEF. Při výpočtu kartézských souřadnic tímto způsobem vzniká chyba odpovídající cca 0,03 m [12].



Obrázek 6: Porovnání zeměpisných souřadnic a kartézského souřadnicového systému ECEF [13].

Ze znalosti souřadnic  $x_i, y_i, z_i$  [m] – resp. stopy motocyklu na trati lze vypočítat následující kanály.

- Dráha [m] je matematický kanál ujeté vzdálenosti motocyklu na okruhu. Z bodů  $P_i[x_i, y_i, z_i]$ , kde  $i = 1, 2$  ji lze vypočítat jako:

$$s = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \text{ [m]} \quad (1.6)$$

- Radius [m] – jedná se o matematický kanál reprezentující poloměr stopy, jenž jezdec vykonal v určitém směrovém oblouku na trati. Kanál dává informaci o tom, jak rychle a konzistentně jezdec daný směrový oblouk projel.



### 1.2.3 Rychlost [ $m \cdot s^{-1}$ ]

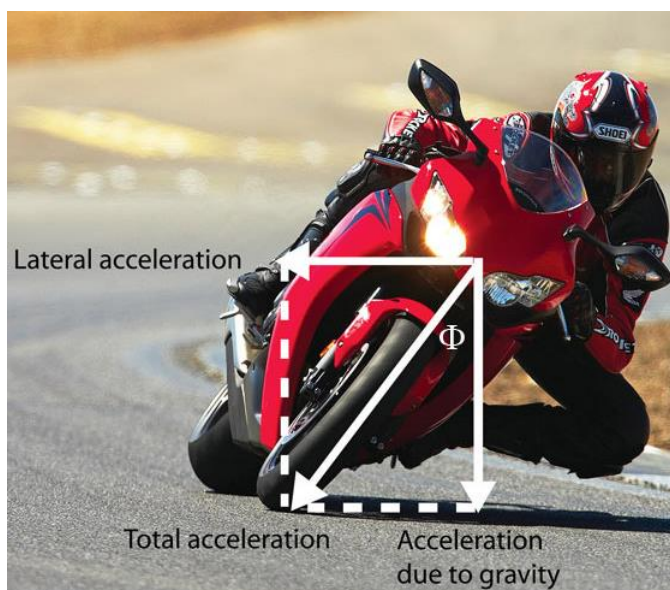
Jak již bylo popsáno v podkapitole 1.1.3, kanál rychlosti můžeme získat několika způsoby. Zaměříme-li se nyní na výpočet rychlosti z polohy dvou bodů ( $P_i[x_i, y_i, z_i]$ , kde  $i = 1, 2$ ) vypočítaných na základě zeměpisných souřadnic z GPS a příslušného času, lze rychlost získat jako derivaci dráhy  $\Delta s$  [ $m$ ] podle příslušného času  $\Delta t$  [ $s$ ]. Výpočet rychlosti:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}}{t_2 - t_1} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (1.7)$$

### 1.2.4 Zrychlení [ $m \cdot s^{-2}$ ]

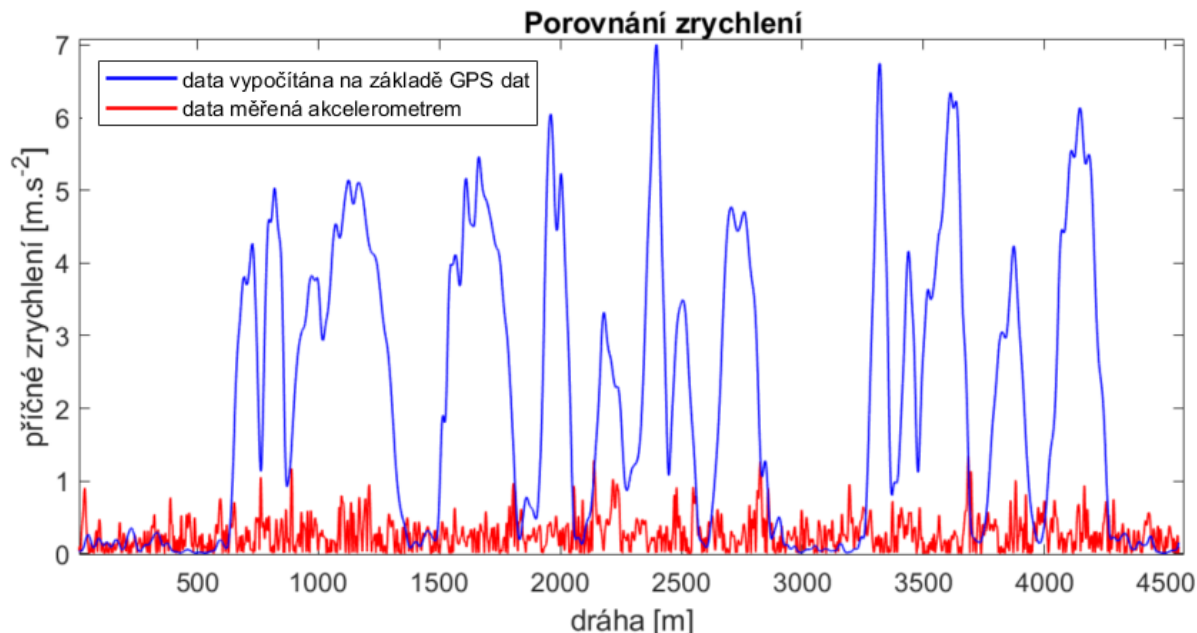
Zrychlení je jednou z důležitějších veličin v analýze jízdy jednostopých vozidel. Rozeznáváme jak několik druhů zrychlení, tak i matematických kanálů z nich vypočítaných. Zařízení pro měření fyzikální veličiny zrychlení se nazývá akcelerometr, který je více popsán v podkapitole 2.2.4. Naměřená a nezpracovaná data z akcelerometru u některých kanálů zrychlení nemusí být však pro analýzu silničních závodních motocyklů vhodná, zejména u kanálu příčného (odstředivého) zrychlení.

Akcelerometr může spolehlivě zaznamenávat data o podélném zrychlení s minimálním zkreslením informací (pokud je umístěn v těžišti). Totéž však nelze tvrdit o příčném zrychlení (lateral acceleration). Jestliže motocykl projede směrový oblouk pod určitým úhlem náklonu  $\Phi$  (obrázek 7), bude akcelerometr zaznamenávat odstředivé zrychlení, jehož hodnoty budou nižší právě kvůli náklonu motocyklu vzhledem k vozovce. Vlivem klopení je velikost odstředivého zrychlení ovlivněna působením gravitačního zrychlení. Pokud budeme chtít provádět analýzu odstředivého zrychlení na základě dat naměřených akcelerometry, musíme působení gravitace z těchto dat odstranit. K eliminaci vlivu gravitačního zrychlení se používá transformace souřadnic [5] [2].



Obrázek 7: Jezdec projíždějící směrovým obloukem [5].

Na obrázku číslo 8 je graf porovnávající absolutní hodnoty dvou kanálů příčného zrychlení naměřených akcelerometrem (červený signál) a vypočítané na základě dat z GPS (modrý signál) v rámci jednoho měřeného kola na okruhu Catalunya v Barceloně. Je zde patrné, že netransformovaná data naměřená akcelerometrem mají výrazně nižší hodnoty.



Obrázek 8: Porovnání bočních zrychlení naměřených akcelerometrem (červená) a vypočítaných na základě GPS dat (modrá).

#### 1.2.4.1 Podélné zrychlení [ $m \cdot s^{-2}$ ]

Podélné zrychlení nám dává informace o tom jak motocykl akceleruje (kladné hodnoty) či brzdí (záporné hodnoty). Podélné zrychlení můžeme ze dvou bodů o známé rychlosti  $v$  [ $m \cdot s^{-1}$ ] a času  $t$  [ $s$ ] vypočítat jako:

$$a_{Lon} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} [m \cdot s^{-2}] \quad (1.8)$$

Na základě dat podélného zrychlení lze vypočítat následující matematické kanály:

- Acceleration G a Brake G [ $m \cdot s^{-2}$ ] – matematické kanály, které získáme rozdělením kanálu podélného zrychlení na jeho kladné a záporné složky. Tyto dva matematické kanály usnadňují interpretaci a porovnávání dat z více měřených kol, kdy můžeme jasně vidět počátek a konec akcelerační zóny, resp. brzdící zóny před a za směrovým obloukem [5] [2].
- Delta Brake [ $m \cdot s^{-3}$ ] – tento matematický kanál získáme časovou derivací matematického kanálu BrakeG a dává nám informaci o rychlosti stlačování brzdových pedálů a také nám dokáže přiblížit průběh jejich uvolňování [5].

**1.2.4.2 Příčné (odstředivé) zrychlení [ $m \cdot s^{-2}$ ]**

Z kanálu příčné zrychlení dostáváme informace o zrychlení působící na jezdce ve směrových obloucích. Na základě znalosti poloměru směrového oblouku  $R$  [ $m$ ] a rychlosti motocyklu  $v$  [ $m \cdot s^{-1}$ ] ho lze vypočítat jako:

$$a_{Lat} = \frac{v^2}{R} [m \cdot s^{-2}] \quad (1.9)$$

Na základě dat příčného zrychlení lze vypočítat následující matematické kanály:

- Úhel náklonu motocyklu  $\Phi$  [ $^\circ$ ] – jestliže řidič projíždí na trati směrovým obloukem, musí motocykl vést pod určitým úhlem náklonu  $\Phi$  (obrázek 7). Tento úhel je možné přibližně vypočítat ze znalosti příčného (odstředivého) zrychlení  $a_{Lat}$  [ $m \cdot s^{-2}$ ] podle vzorce [14]:

$$\Phi = \tan^{-1} \left( \frac{a_{Lat}}{g} \right) \cdot \frac{180}{\pi} [^\circ]; \quad (1.10)$$

kde  $g = 9,81 m \cdot s^{-2}$  je tíhové zrychlení [14] [15].

- Rychlost náklonu [ $^\circ/s$ ] - tento matematický kanál reprezentuje rychlost změny úhlu náklonu motocyklu v čase. Vypočítáme ho tedy derivací úhlu  $\Phi$  [ $^\circ$ ] podle času  $t$  [ $s$ ]. Kanál rychlosti náklonu nám poskytuje informaci o rychlosti a udržování maximálního úhlu sklonu motocyklu v dlouhých směrových obloucích [2] [15].
- Cornering G [ $m \cdot s^{-2}$ ] je matematický kanál absolutních hodnot příčného (odstředivého) zrychlení  $a_{Lat}$ . Kanál usnadňuje interpretaci některých charakteristik, například průběh příčného zrychlení ve směrovém oblouku a jeho maximální hodnoty [5].

Jestliže využijeme matematických kanálů uvedených u jednotlivých druhů zrychlení (podélného a příčného), můžeme dostat další užitečné informace o absolvovaném tréninku či závodě v podobě dalších matematických kanálů:

- Celkové zrychlení [ $m \cdot s^{-2}$ ] – je vektorový součet příčného a podélného zrychlení představuje, kanál celkového zrychlení. Celkové zrychlení může poskytovat informace o úsecích, kde jezdec tzv. „dojíždí“ do začátku či konce směrového oblouku a nevyužívá naplno potenciálu brzd či výkonu motocyklu. Celkové zrychlení lze vypočítat z dat dle následujícího vzorce [2]:

$$a_{Total} = \sqrt{a_{Lat}^2 + a_{Lon}^2} [m \cdot s^{-2}]; \quad (1.11)$$

kde  $a_{Lat}$  [ $m \cdot s^{-2}$ ] je kanál příčného a  $a_{Lon}$  [ $m \cdot s^{-2}$ ] kanál podélného zrychlení motocyklu [1] [5].

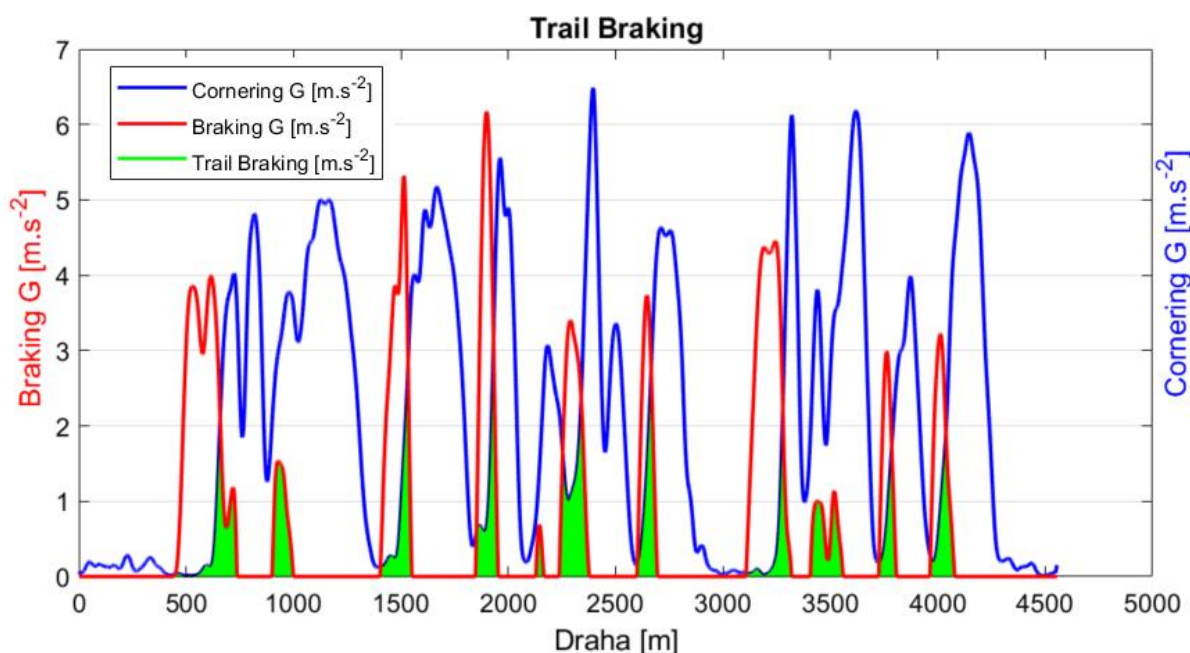
- Trail Braking [ $m \cdot s^{-2}$ ] – je matematický kanál, pomocí kterého jsme schopni zachytit chování jezdce na vjezdu do směrového oblouku, konkrétně do jaké míry jezdec dokáže vést motocykl

pod úhlem náklonu ve směrovém oblouku a zároveň brzdit. Tento matematický kanál lze vypočítat např. v programu Matlab (MathWorks Inc., USA) pomocí matematické funkce *min*:

$$\text{Trail Braking} = \min(\text{Cornering } G, \text{Braking } G) \text{ [m.s}^{-2}\text{]}; \quad (1.12)$$

kde *Cornering G* [m.s<sup>-2</sup>] a *Braking G* [m.s<sup>-2</sup>] jsou matematické kanály zmíněné v této podkapitole [16] [17].

Na obrázku číslo 9 je zobrazen graf s kanály Cornering G (modrá) a Braking G (červená). Zelená oblast grafu je matematický kanál Trail Braking zobrazující úseky, kdy motocykl najíždí do směrového oblouku a zároveň brzdí.



Obrázek 9: Příklad zobrazení mat. kanálu Trail Braking, data byla pořízena v rámci jednoho kola na okruhu Catalunya.

Kanály zrychlení se často pro účely analýzy v motorsportu přepočítávají na ekvivalent gravitační síly, tzv. „G“ jednotky. Tyto jednotky dostaneme prostým podílem zrychlení  $a$  [m.s<sup>-2</sup>] tíhovým zrychlením na zemi  $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$ .

### 1.2.5 Otáčky motoru [RPM] a poloha plynové rukojeti (škrťací klapky) [%]

Kromě veličin a matematických kanálů vypočítaných na základě GPS dat můžeme podvozek motocyklu osadit dalšími senzory a s jejich pomocí měřit další kanály jako jsou otáčky motoru či poloha plynové rukojeti. Obě veličiny jsou relativně snadno zaznamenatelné, protože většina motocyklů má k dispozici potřebné senzory pro jejich měření. Kanály se nejčastěji získávají přímo z ECU (Electronic Control Unit) motocyklu a dávají nám informaci o základních vstupech jezdce. Mohou také pomoci s rychlou změnou nastavení motocyklu [2].

- **Delta Throttle** [ $s^{-1}$ ] – je derivace kanálu polohy plynové rukojeti podle času  $t$  [s]. Získá se tím nový matematický kanál, který nám dává informaci o tom, jak rychle jezdec přidává, resp. ubírá na poloze plynové rukojeti a také jak plynule [3].

### 1.2.6 Zdvih přední a zadní kyvné vidlice [m]

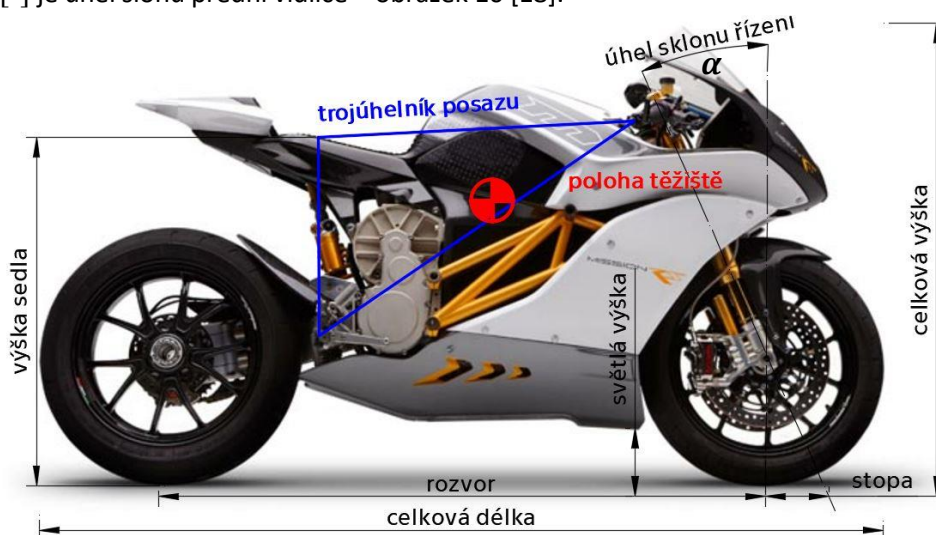
Pokud podvozek motocyklu osadíme například potenciometry, lze sbírat údaje o odpružení motocyklu. Tato data nám pomáhají s nastavením motocyklu a jejich spojení s GPS daty umožňuje pozorovat, jak motocykl reaguje na specifické situace či soubor nastavených parametrů [18].

#### 1.2.6.1 Zdvih předního kola [m]

Jedná se o matematický kanál měřený senzory instalovanými na přední vidlici. Zdvih předního kola se měří kolmo k podložce a vypočítá pomocí následujícího vzorce:

$$\text{zdvih předního kola} = \text{zdvih přední vidlice} \cdot \cos \alpha \quad [m]; \quad (1.13)$$

kde  $\alpha$  [°] je úhel sklonu přední vidlice – obrázek 10 [18].



Obrázek 10: Geometrické charakteristiky podvozku motocyklu s vyznačeným úhlem sklonu přední vidlice [19].

#### 1.2.6.2 Zdvih zadního kola [m]

Zdvih zadního kola je matematický kanál měřený například potenciometrem nasazeným nejčastěji na zadní pružící a tlumící jednotce či přímo na zadní kyvné vidlici a rámu motocyklu. Způsob výpočtu je zde kvůli variabilitě umístění potenciometru a také odlišnosti provedení zadního odpružení na různých typech podvozků specifický pro každý druh motocyklu. Zdvih zadního kola měříme opět kolmo k podložce [18].

#### 1.2.6.3 Squat [m]

Tento matematický kanál popisuje chování motocyklu, přesněji odpružení jeho podvozku při akceleraci. Při akceleraci či brzdění se zatížení přenáší do odpružení, a to reaguje tak, že nastává buď jeho odlehčení, či stlačení. Název „squat“ označuje situaci, kdy motocykl výrazně akceleruje a velká část zatížení se přenesou na zadní kolo, konkrétně do zadního odpružení. V extrémním případě situace vypadá tak, že

motocykl na výjezdu ze směrového oblouku na trati vlivem silné akcelerace ztratí kontakt s vozovkou u předního kola. Nejen, že je tato situace nebezpečná, ale jezdec při jízdě po zadním kole ztrácí rychlost a tím i čas. Squat je jedním z důležitých aspektů nastavení motocyklu a podílí se na něm nejen geometrie, ale také nastavení odpružení podvozku [18]. Squat můžeme definovat podle následujícího vzorce:

$$\text{squat} = \text{zdvih zadního kola} - \text{zdvih předního kola [m]}; \quad (1.14)$$



Obrázek 11: Graf s matematickým kanálem squat. Data byla naměřena na okruhu ve Vysokém Mýtě se spalovacím motocyklem.

Na obrázku číslo 11 je zobrazen graf s matematickým kanálem squat zaznamenaný v rámci jednoho kola na okruhu ve Vysokém Mýtě. Kladné hodnoty průběhu signálu označují situace, kdy je zadní část motocyklu níže, než ta přední v rámci zdvihu odpružení. Jestliže průběh signálu roste směrem ke kladným hodnotám znamená to, že motocykl akceleruje.

### 1.2.7 Ostatní měřené veličiny a kanály

Kanály v této podkapitole dávají přehled o chování jednotlivých systémů na motocyklu a dokáží indikovat případné poruchy nebo podat informace, na jejichž základě provedeme změny v nastavení [10].

- Tlak v předním brzdovém systému .....[Pa],
- tlak v zadním brzdovém systému .....[Pa],
- teplota vody v chladícím okruhu ..... [°C],
- teplota vzduchu v airboxu ..... [°C],
- tlak vzduchu v airboxu ..... [Pa],
- kanál poměru vzduch-palivo z lambda sondy ..... [–],
- teplota oleje ..... [°C],
- tlak oleje ..... [°C],
- stav baterie (hlavně u elektrických motocyklů) ..... [V],
- teplota pneumatik ..... [°C].

### 1.2.8 Videozáznam

Videozáznam jízdy motocyklu na okruhu může poskytovat velice užitečné informace, zvláště v případech, kdy z dat není přímo patrné, co výkon jezdce mohlo ovlivnit (např. překážka na trati v podobě pomalejšího jezdce), či jakou chybu jezdec mohl udělat (např. chyby ve stylu jízdy). Záznam jízdy můžeme zefektivnit, jestliže ho doplníme o vizualizovaná naměřená data.

## 2 Vhodná měřicí technika

Jestliže chceme měřit a zaznamenávat data jízdní dynamiky, musíme motocykl osadit měřicí technikou. Po definování základních přístupů systémů pro sběr dat v předešlé kapitole, budou v následujících podkapitolách popsány základní charakteristiky záznamových jednotek a vhodných senzorů.

### 2.1 Záznamová jednotka

Záznamová jednotka tvoří základ každého systému pro sběr dat. Její funkcí je přijímat, zpracovávat a v definovaném pořadí zaznamenávat signál od všech senzorů [1]. Na trhu dnes existuje celá řada těchto zařízení. Kompaktní rozměry, možnost záznamu velkého množství kanálů vysokými vzorkovacími frekvencemi, konektivita a dostatečná paměť jsou požadavky na dnes komerčně prodávaná zařízení.

Dalším faktorem je však i cena, která nebývá nízká. Z tohoto důvodu mnoho závodníků využívá zjednodušené systémy, u nichž záznamovou jednotku tvoří například mobilní telefon s vhodnou aplikací. Z takového DAS nedostaneme komplexní data o všech subsystémech motocyklu, avšak pro základní poznatky z jízdy (čas odjetého kola, rychlost či zrychlení) jsou tyto systémy mnohdy dostačující. Jednou z podobných aplikací je například RaceChrono dostupná pro většinu mobilních platforem [20].

Moderní profesionální jednotky již dnes mohou obsahovat i některé senzory – např. akcelerometry, gyroskop, přijímač GPS signálu a další. Pokud jednotka tyto senzory obsahuje, měla by být umístěna co nejbližší těžišti motocyklu. Celý záznamový systém může být dále doplněn o displej zobrazující základní informace o motocyklu a také některá naměřená data užitečná pro jezdce za jízdy – např. čas právě dokončeného kola či sektoru, počet odjetých kol či teplotu a tlak jednotlivých subsystémů motocyklu. Software těchto jednotek musí umět kontinuálně data zpracovávat, aby byl na výstupu již připravený kanál či matematický kanál [1]. Na obrázku číslo 12 je znázorněna záznamová jednotka s multifunkčním displejem od společnosti AIM.



Obrázek 12: Vlevo – multifunkční displej, vpravo – záznamová jednotka, tzv. „datalogger“.

### 2.1.1 Vzorkovací frekvence (sample rate)

Důležitým parametrem každého měření je vzorkovací frekvence  $f$ , která určuje, jak často záznamová jednotka měřená data ukládá. Tato veličina se obvykle udává v jednotkách hertz (Hz), neboli počet zaznamenaných dat za sekundu.

Pro jednotlivé kanály nemusí být vzorkovací frekvence shodná. Například pro kanál rychlosti v či otáček RPM postačuje nižší frekvence  $f = 10 \text{ Hz}$ , jelikož se hodnoty těchto kanálů v krátkém časovém intervalu významně nemění. Naopak pro záznam dat odpružení je vzorkovací frekvence  $f = 100 \text{ Hz}$  a vyšší nezbytná. Správná volba vzorkovací frekvence pro daný kanál pomůže také v odstranění nežádoucího šumu. Počet kanálů a jejich vzorkovací frekvence určuje nejen paměťové požadavky záznamového zařízení, ale také náročnost na výpočetní výkon či složitost následného zpracování naměřených dat [1] [3].

Na obrázku číslo 13 je znázorněno nastavení vzorkovací frekvence pro jednotlivé kanály. Toto nastavení bylo použito pro sběr dat u závodní formule Renault FR2000 [21].

Channel i...	Enabled/...	Channel name	Samplin...	Sensor type	Mea...	Low scale	High scale	Param. 1	Param. 2
RPM	Enabled	Engine	10 Hz	Engine revolution speed	rpm	0	20000	2.000	8000
SPD_1	Disabled	Front Left	10 Hz	Speed	mph...	0.0	250.0	66	10
SPD_2	Disabled	Front Right	10 Hz	Speed	mph...	0.0	250.0	66	1
CH_1	Disabled	Throttle position	10 Hz	Zero based potentiometer	% .1	0.0	100.0		
CH_2	Enabled	Oil Pressure	10 Hz	Oil press. ( FR2000 - SRA )	bar .1	0.0	50.0		
CH_3	Enabled	Water temp	2 Hz	Water temp. AIM ( FR200...	°C	0	150		
CH_4	Enabled	Steering	100 Hz	Distance potentiometer	mm ...	0.0	100.0	100.0	
CH_5	Enabled	Right rear Suspe...	100 Hz	Distance potentiometer	mm ...	0.0	100.0	100.0	
CH_6	Enabled	Front Suspension	100 Hz	Distance potentiometer	mm ...	0.0	100.0	100.0	
CH_7	Enabled	Front Brake	10 Hz	Custom_001	bar	0	10		
CH_8	Enabled	Rear Brake	10 Hz	Custom_001	bar	0	10		
ACC_1	Enabled	Lateral G	10 Hz	Lateral accelerometer	g .01	-3.00	3.00		
ACC_2	Enabled	Longitudinal G	10 Hz	Longitudinal accelerome...	g .01	-3.00	3.00		
LOG_TMP	Enabled	Datalogger_Temp	10 Hz	Cold joint	°C	0	50		
BATT	Enabled	Battery	1 Hz	Battery	V .1	5.0	15.0		

Obrázek 13: Nastavení vzorkovací frekvence pro jednotlivé kanály – sběr dat u závodní formule Renault FR2000 [21].

## 2.2 Senzory

Všechny senzory používané v oblasti motorsportu mají společnou funkci – měří konkrétních veličiny, které následně převádí na elektrický signál (nejčastěji elektrické napětí), které záznamová jednotka umí zpracovat, zaznamenat a případně i zobrazit. Moderní motocykly již v základu své výbavy obsahují různé senzory. Data z nich umí poskytovat řídicí jednotky (ECU – Electronic Control Unit) . V praxi se často ke čtení těchto dat využívá CAN (Controller Area Network) výstup, pomocí něhož dokážeme snímat kanály otáček motoru, rychlosti a polohy škrtkící klapky [1]. V následující podkapitole budou senzory rozděleny a stručně popsány podle jejich funkce na motocyklu, tedy podle měřené veličiny.



### 2.2.1 Senzory na kolech a snímání otáčení hnacího hřídele

Existuje několik druhů senzorů určených pro měření rychlosti, všechny však mají společnou vlastnost – měří úhlovou rychlost otáčení  $\omega$  [ $rad \cdot s^{-1}$ ]. V nejjednodušší formě je senzor tvořen snímačem, který dokáže detekovat průchod magnetu ve své blízkosti. Takové senzory se nazývají impulzní a s výhodou se často používají pro snímání otáček zadního kola. Existují však i další sofistikovanější principy měřící změny elektrických vlastností při průchodu feromagnetického materiálu (např. ozubeného kola) kolem snímače. Příkladem takového senzoru může být Hallova sonda, tedy polovodičový snímač indukující napětí při průchodu magnetickým polem. Tyto senzory jsou používány pro snímání otáčení výstupního či klikového hřídele motoru, kdy nejčastějším výstupem jsou otáčky motoru [1] [4].

### 2.2.2 Poziční senzory pro měření zdvihu odpružení

Senzor používaný v oblasti motorsportu pro měření vzdálenosti mezi dvěma navzájem pohyblivými body se nazývá lineární potenciometr. Jedná se o rezistor, jehož odpor se lineárně mění v závislosti na poloze měřeného objektu podél rozsahu zdvihu. Existuje několik druhů, na motocyklech se pro měření zdvihu odpružení nejčastěji používají potenciometry zobrazené na obrázcích číslo 14, 15 a 16. Tyto lineární potenciometry disponují montážními otvory pro snadné připevnění na přední vidlici (obrázek 15), či na zadní tlumící a pružící jednotku (obrázek 16). Jeden bod potenciometru je vždy pevný a druhý se posouvá s měřeným objektem. Senzory jsou k dostání v různých délkách. Lineární potenciometry jsou spolehlivé a odolné, ale mají vysokou pořizovací cenu [1] [5].



Obrázek 14, 15, 16: Lineární potenciometry a jejich možné umístění na podvozek motocyklu [5] [6].

### 2.2.3 *Senzory pro měření pozice plynové rukojeti a zařazeného rychlostního stupně*

Senzory pro měření pozice plynové rukojeti a zařazeného rychlostního stupně jsou potenciometry pracující na stejném principu jako zmíněné potenciometry lineární. Jediným rozdílem je vykonávaný druh pohybu, kdy pohyb měřeného objektu zde není přímočarý, ale rotační [1].

### 2.2.4 *Akcelerometry*

Akcelerometr je elektromechanické zařízení, které měří dynamické či statické zrychlení hmot. Dynamické zrychlení vzniká změnou rychlosti pohybujícího se senzoru (akcelerace, brzdění či průjezd měřeného objektu směrovým obloukem), zatímco statické zrychlení způsobuje působení zemské gravitace. Existuje celá řada různých principů, na kterých akcelerometry pracují [4].

Akcelerometry pro měření dynamiky vozidla jako celku, musí být na motocyklu umístěny v těžišti nebo co nejbližší těžiště a pokud nemáme senzor měřící ve všech třech osách, musíme dodržet i správnou orientaci snímače vůči měřeným osám na motocyklu (obrázek 17). Senzory by měly být připevněny k pevné části rámu motocyklu, abychom předcházeli přílišnému zašumění, jež bývá dáno způsobeno vibracemi [1] [6].

Na trhu je k dostání mnoho druhů akcelerometrů s různými třídami přesnosti v různých cenových relacích. Pro účely záznamu dat jízdní dynamiky by měl postačovat akcelerometr s rozsahem +/- 3G [6].



Obrázek 17: Jednoosý akcelerometr s vyznačeným kladným a záporným směrem orientace [6].

### 2.2.5 *Senzory teploty*

Na závodním motocyklu můžeme za pomoci senzorů kontaktním způsobem měřit teplotu provozních kapalin (voda, olej, benzín), vzduchu (okolí, v airboxu) a horkých plynů (zplodin). Většina těchto senzorů je založená na principu termočlánků nebo podobných elektromechanických součástí, u nichž víme, jak se jejich elektrické vlastnosti mění s teplotou. Bezkontaktně můžeme dále měřit například teplotu pneumatik či brzdových disků pomocí snímání infračerveného záření [1].

### 2.2.6 *Senzory tlaku*

Tlak v různých systémech motocyklu je další snímanou veličinou, která může pomoci zlepšit výkon či zvýšit bezpečnost jezdce. Pro měření tlaku se v motorsportu uplatňují dva základní principy. Jedním z nich je senzor tvořený membránou opatřenou tenzometry. Při změně tlaku zde dochází ke změně elektrického

výstupního signálu, který je úměrný působícímu tlaku. Další z principů využívá piezorezistentních senzorů, tedy polovodičových snímačů [1].

### 2.2.7 Další senzory

Gyroskop a kompas jsou další senzory, kterými se často motocykl osazuje. Jestliže jsou výstupy těchto senzorů synergicky kombinovány například s akcelerometrem či GPS, může to zpřesnit naměřená data [22]. Dalším velice často používaným senzorem je například lambda sonda měřící směšovací poměr paliva a vzduchu ve výfukovém potrubí.

### 2.2.8 Příklad komerčně dodávaného systému pro záznam dat

Jestliže se rozhodneme pořídit komerčně prodávaný systém zaznamenávající kanály potřebné pro pokročilou analýzu jízdní dynamiky závodních motocyklů, máme na výběr několik výrobců této měřicí techniky. V následující tabulce číslo 1 je uveden příklad sestavy měřicí techniky pro oblast motorsportu od výrobce AIM. Sestava obsahuje měřicí jednotku se zabudovaným přijímačem signálu GPS a dalšími inerciálními senzory (akcelerometry, gyroskop), dále také lineární potenciometry pro měření zdvihů odpružení podvozku. Měřicí jednotka disponuje také možností připojení vlastní ECU a dalších až pěti senzorů. Do sestavy byl přidán i jednoduchý display pro zobrazování základních informací jezdci. Nutno zmínit, že k nákupu techniky dostane uživatel možnost bezplatného užívání profesionálního softwaru pro analýzu naměřených dat technikou od této společnosti.

Tabulka 1: Sestava měřicí techniky od společnosti AIM [6].

Typ zařízení	Typ (průměr/délka)	Katalogové číslo	Cena
Záznamová jednotka	EVO4S	X61E4SGPS130BD	29 945 Kč
Základní display	Solo 2 DL	X47SOLO2DL02E0	14 575 Kč
Lineární potenciometr pro přední vidlice	9.5 / 150 mm	X05SNPJ150	10 070 Kč
Lineární potenciometr pro zadní opružení	13 / 75mm	X05LPAIM075	8 480 Kč
2x prodlužovací kabely k potenciometrům			1 962 Kč
Cena celkem s DPH			78 689 Kč

Další výrobci měřicí techniky (např. Motec, 2D atd.) uplatňují jiné obchodní strategie, obecně však lze říci, že do 90 000 Kč lze pořídit výkonný systém zaznamenávající všechny potřebné veličiny ve vhodných vzorkovacích frekvencích.

## 3 Metody analýzy naměřených dat

Pokud nemáme vhodný software, který nám pomůže data správně a rychle analyzovat, zůstávají naměřené kanály pouze ve formě čísel a čtení informací z nich je téměř nemožné. V této kapitole budou popsány základní přístupy analýzy naměřených dat v podobě softwarových funkcí aplikací, vytvořených pro účely vyhodnocování dat v oblasti motorsportu.

### 3.1 Předzpracování dat

Před samotnou analýzou naměřených dat by měl software umět data předzpracovat, aby výsledek analýzy a její interpretace byly co nejpřesnější a mohly jezdcí podat správné informace o absolvovaném tréninku či závodě. Při měření jízdě na okruhu se zaznamenávají velké objemy dat v prostředí s rušením (vibrace, magnetické pole od vodiče s el. proudem, nečistoty na trati, voda atp.) bez možnosti kontroly člověka. Tato data jsou často také vstupem do dalších algoritmů a pokud nejsou odhaleny či odstraněny chyby, mohou vznikat nepřesnosti. Surová data mohou obsahovat následující nedostatky:

- poškozené, chybějící, neúplné, či redundantní informace,
- špatné údaje vzniklé chybami měřicích přístrojů či při přenosu,
- náhodná složka (šum) nevhodná pro matematické algoritmy a následnou analýzu,
- nehomogenní obor hodnot, či rozložení (mimo toleranci měření) [4].

#### 3.1.1 Opravy chyb v datech

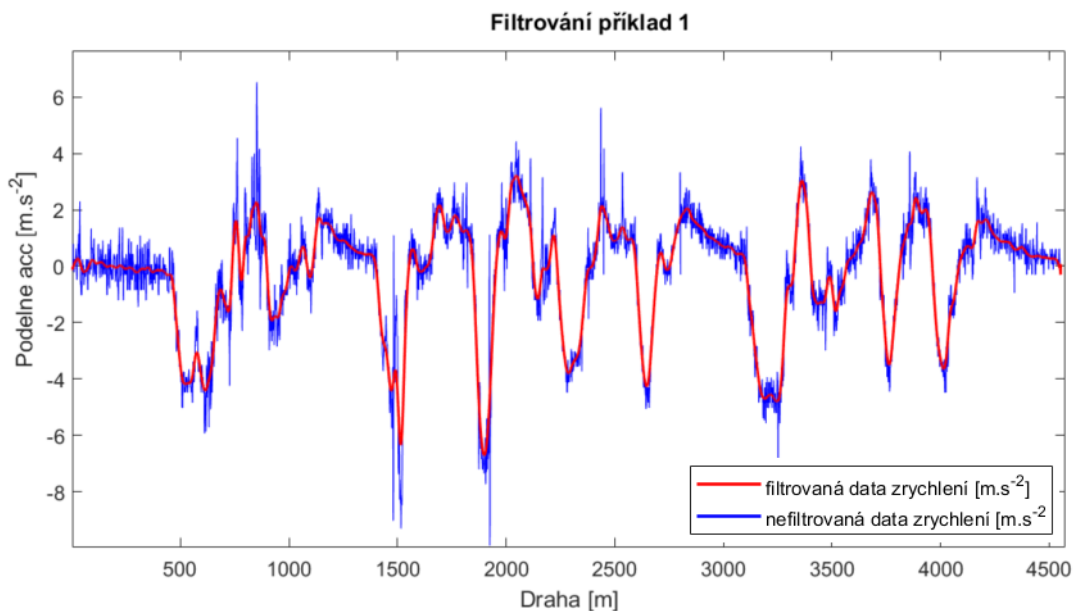
Jestliže se v naměřených datech objeví některé zmiňované chyby, je možné data opravit. Mezi metody opravy chyb patří [4]:

- I. Ignorování vzorku. Spočívá v ignorování vzorku (řádku) s chybějící hodnotou. Nevýhodou, je že dochází ke ztrátě dat.
- II. Vyplnění globální konstantou (např. „NaN“, či „NULL“). Pro daný řádek sice nedochází ke ztrátě ale hodnota nic nevyovídá o stavu měřené veličiny.
- III. Vyplnění střední hodnotou. Pro náhradu chybějících dat se použije střední hodnota za časový interval, lze zde uplatnit i statistických metod pravděpodobnosti.
- IV. Průměr platných hodnot. Použije se aritmetický průměr poslední platné hodnoty před výpadkem a první po výpadku,
- V. Lineární spojnice platných hodnot. Pro náhradu se použijí hodnoty ležící na přímce mezi okolními platnými hodnotami.

#### 3.1.2 Filtrace dat

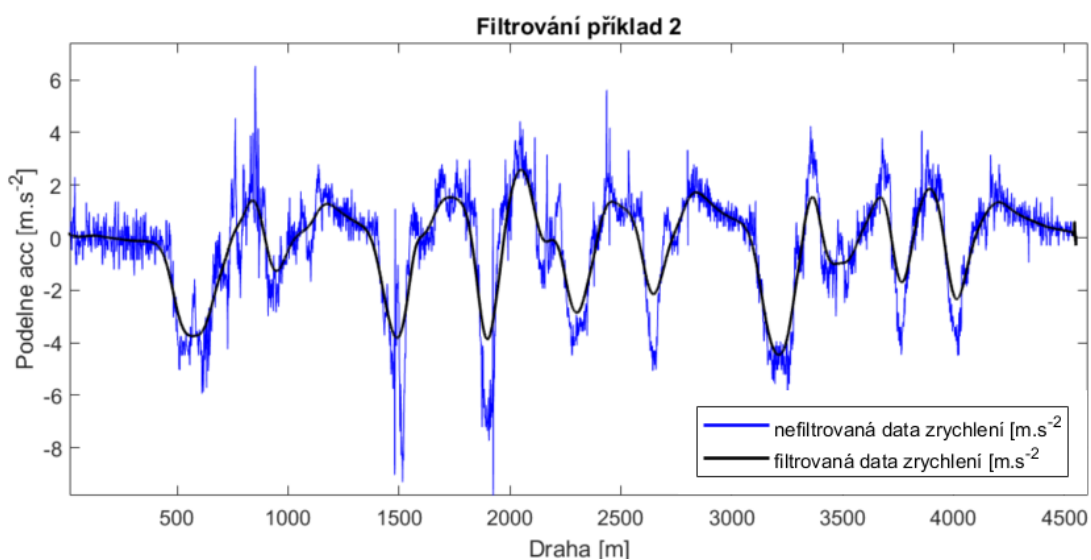
Úkolem filtrace je odstranění nesprávných či extrémních hodnot nebo odstranění náhodné složky – šumu. Usnadníme tím interpretaci a čtení z dat při následné analýze. Ideální filtr by měl odebrat všechny irelevantní složky s minimálním poškozením dat, proto musíme výběr filtru dobře zvážit. Při aplikaci filtru bychom měli na kanál předem prostudovat a aplikovat pouze takové filtrování, abychom zachovali informace plynoucí z dat a byl odstraněn pouze nežádoucí šum [5] [4].

Na obrázku číslo 18 je vidět příklad správně zvoleného nastavení filtru na kanál podélného zrychlení. S původním (modrým) kanálem zrychlení by se velice špatně pracovalo protože obsahuje příliš mnoho šumu. Filtrovaný datový kanál (červená barva) zachovává tvar původního signálu a z dat byl odstraněn pouze nežádoucí šum.



Obrázek 18: Příklad správně zvoleného nastavení filtru.

Naopak je tomu na obrázku číslo 19, kdy při filtrování stejného kanálu dochází ke ztrátě informací kvůli přílišnému vyhlazení (černá barva), důležité přechody a úrovně byly úplně ztraceny.



Obrázek 19: Příklad přílišného vyhlazení dat.

### 3.1.2.1 Filtrace v časové oblasti

V posloupnosti vzorků definované délky se vypočítá střední hodnota a použije se pro odstranění šumu. Základní metody filtrace v časové oblasti vhodné pro analýzu dat jízdní dynamiky jsou následující:

- Pro veličiny  $x$  s relativně konstantní hodnotou používáme filtraci průměrováním předchozích  $n$  vzorků. Snahou je proložit signál přímkou [4]. Vzorec této filtrace má tvar:

$$\hat{x}_n = \frac{\hat{x}_{n-1} \cdot (n-1) + x_n}{n} \quad (3.1)$$

- Pro veličiny  $x$  s měnící se hodnotou využijeme filtraci pomocí plovoucího okénka tzv. „vyhlazování“, kdy se nová hodnota počítá z několika posledních či následujících  $i$  hodnot. Pro větší velikost okna  $k$  je průběh více vyhlazený, ale méně reaguje na změny [4]. Vzorec této filtrace pro veličinu  $x$  vypočtenou z několika posledních  $i$  hodnot má tvar:

$$\hat{x}_n = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_{(n-i)+1} \quad (3.2)$$

### 3.1.2.2 Filtrace ve frekvenční oblasti

Filtrace probíhá ve frekvenční oblasti, do které je signál transformován z oblasti časové. Zde jsou aplikací filtru odebrány irelevantní složky signálu (např. vysokofrekvenční) a dojde k odfiltrování šumu [4]. Základní metody filtrace ve frekvenční oblasti vhodné pro analýzu dat jízdní dynamiky jsou:

- Filtrace pomocí FFT (Fast Fourier Transform) algoritmu. Šum lze odstranit ve frekvenční oblasti za pomoci filtru dolní propusti, která odstraní vysokofrekvenční složky. Algoritmus převede veličinu  $x(t)$  z časové do frekvenční oblasti. Zde za pomoci zmíněného lineárního filtru dolní propusti odstraní vysokofrekvenční složky tak, že nepropustí signál vyšších frekvencí, než je frekvence stanovená. Filtrovaný signál se následně převede zpět z oblasti frekvenční do oblasti časové. Pro výpočet se v praxi využívá výpočetní technika [4].
- Filtrace pomocí Fourierovy transformace, kdy každá periodická funkce v časové oblasti může být nahrazena svými harmonickými komponentami (sinusové a kosinusové funkce) [23]. Vzorec pro filtraci veličiny  $x(t)$  pomocí Fourierovi transformace má tvar:

$$x(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{i=1}^n A_i \cdot \sin \omega t + \sum_{i=1}^n B_i \cdot \cos \omega t; \quad (3.3)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot f; \quad (3.4)$$

kde  $\omega$  [rad/s] je úhlová frekvence,  $T$  [s] perioda,  $f$  [s<sup>-1</sup>] a koeficienty  $A_i$  a  $B_i$  určují amplitudu:

$$A_i = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin i\omega t dt; B_i = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos i\omega t dt \quad (3.5)$$

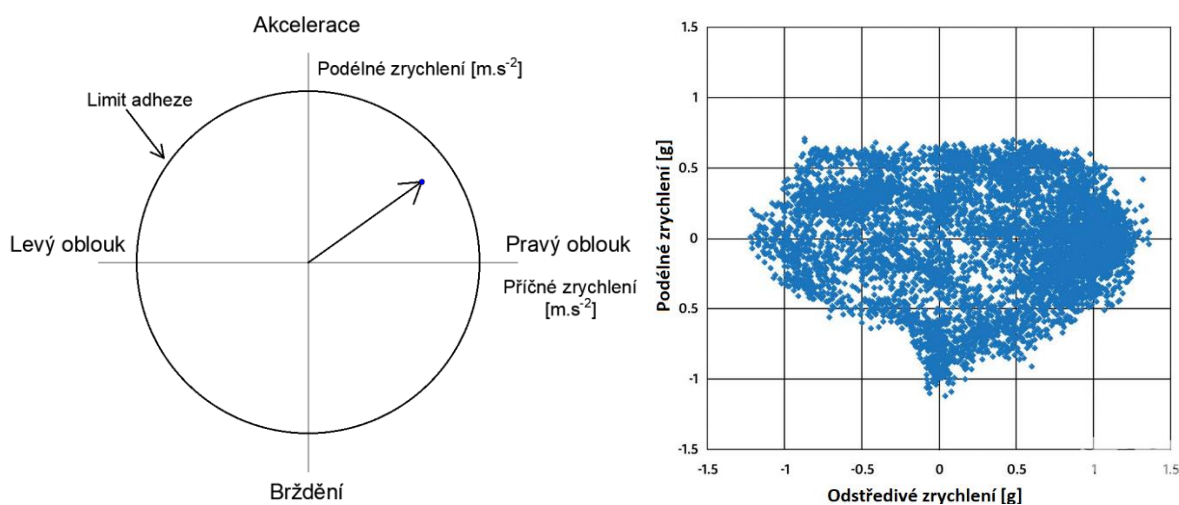
## 3.2 Zobrazování dat

Naměříme-li na okruhu v rámci tréninku či závodu data, musíme je zobrazovat tak, abychom z nich byli schopní v krátkém čase dostat co nejvíce informací. Pro všechny softwary je rozhodující umět vygenerovat přesnou trasu jízdy, při níž byla data zaznamenána. Všechna data jsou na základě této trasy následně rozdělena na jednotlivá kola, což je pro usnadnění analýzy zcela zásadní [3].

### 3.2.1 Možnosti zobrazování dat

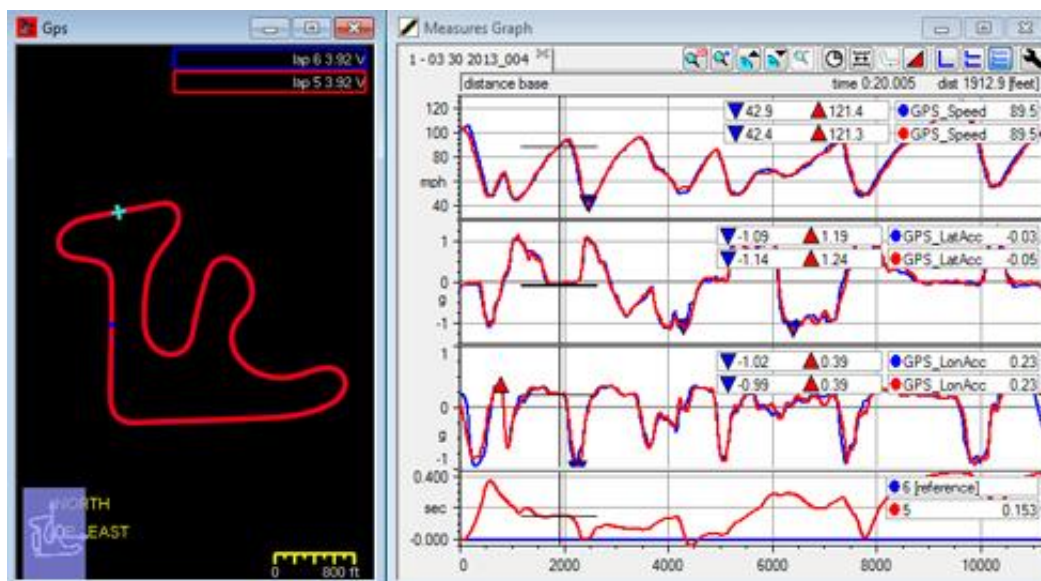
Jestliže máme data z měřené jízdy rozdělená na jednotlivá kola, můžeme zobrazovat naměřené a vypočítané hodnoty kanálů. Kanály se nejčastěji zobrazují do spojnicových grafů a můžeme je vykreslovat v závislosti na dráze nebo na čase. Jak bude posléze vysvětleno, druhý zmiňovaný způsob není vždy pro interpretaci tím nejvhodnějším.

Spojnicové grafy nejsou však jedinými vhodnými grafy pro zobrazování datových kanálů. Dalšími příklady mohou být tzv. „X-Y bodové“ grafy, které uplatníme například při zobrazování kanálů příčných a podélných zrychlení do tzv. „trakčních kružnic“ (obrázek číslo 20 a 21). Svě místo zde mají i grafy typu bar a histogramy, jež využijeme zejména při analýze odpružení a otáček motoru [1].



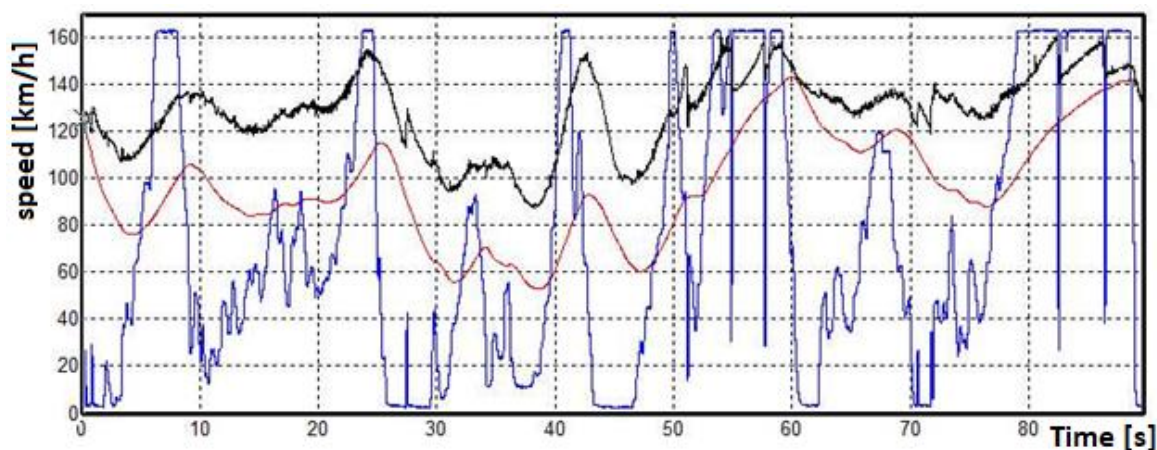
Obrázek 20,21: Trakční kružnice. Modrý zaznamenané body jsou ukázkou zrychlení, působící na motocykl v době měření [24].

Jsou-li kanály vykresleny je vhodné, aby software obsahoval uživatelské rozhraní pro jejich snadné procházení v podobě kurzorů a dalších nástrojů zobrazující například aktuální hodnoty. Velmi efektivní je způsob zobrazování kanálů do liniových grafů pod sebe namísto do grafu jediného (obrázek 23). Jestliže systém podporuje zároveň zobrazení polohy jezdce na okruhu, můžeme na data nahlížet v širších souvislostech a číst z nich zajímavé informace [5] [3]. Na obrázku číslo 22 je vidět příklad takového zobrazení v aplikaci Race Studio.



Obrázek 22: Zobrazování kanálů pod sebou, včetně informace o poloze jezdce na trati v aplikaci Race Studio [6].

Obrázek číslo 23 znázorňuje přeplněný graf, v němž se stává rychlé hledání informací složité.



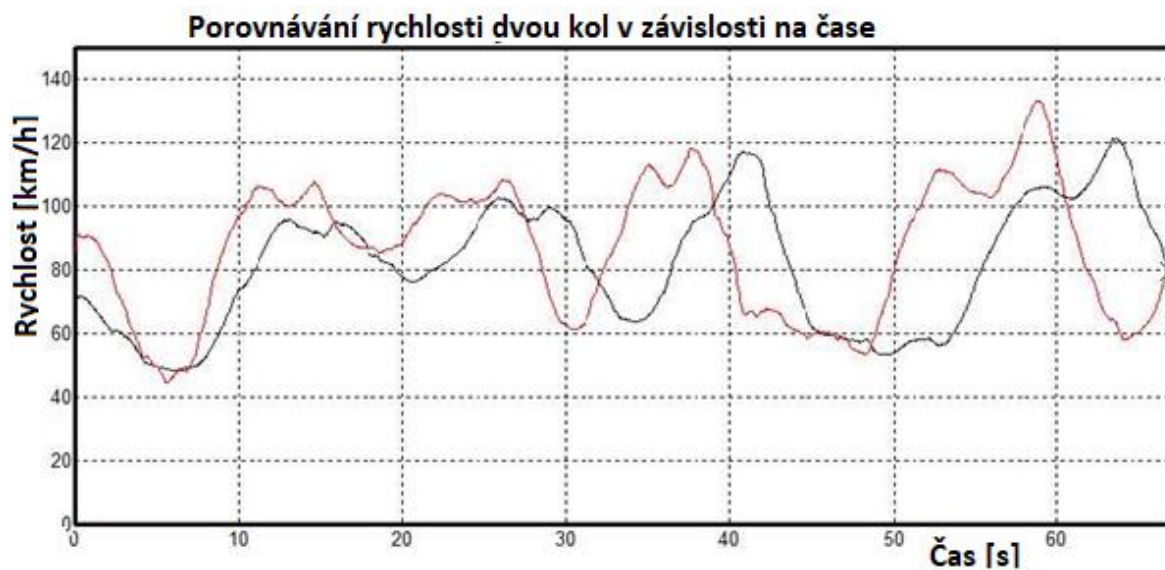
Obrázek 23: Špatně zobrazený a přeplněný graf, kdy osa Y odpovídá pouze jednomu vykreslenému kanálu [5].

### 3.2.2 Zobrazování více datových kanálů

Nejdůležitější funkcí každého softwaru je schopnost překrývat data z více naměřených kol. Sofistikovanější programy umí porovnávat data z různých relací v rámci stejného či jiného dne na téže okruhu. Zde se využívá zmiňované vykreslování kanálů v závislosti na dráze.

Při analýze dat z vícero naměřených kol budeme téměř vždy chtít zobrazovat kanály v závislosti na dráze, nikoliv na čase. Uvedeme-li příklad porovnávání kanálů rychlosti vykreslených v závislosti na čase ze dvou naměřených kol, přičemž v jednom kole byl jezdec o pár sekund rychlejší, než ve druhém. V takovém případě nastává vzájemný posun kanálů vůči sobě, protože jezdec se ve stejném čase měřeného kola bude pokaždé na okruhu nacházet v jiném místě. Tento příklad je zobrazený na obrázku číslo 24. Jestliže však vykreslíme kanály v závislosti na dráze, problém s časovým posuvem odpadá a můžeme provádět rychlá porovnávání [5] [3].





### 3.2.3 Vytváření sektorů na trati

Záznam trasy jízdy v rámci jednoho kola na okruhu může být rozdělený do několika sektorů. U systémů založených na GPS je vytváření těchto sektorů velice snadné. Rozdělení kola na sektory usnadňuje komunikaci s jezdcem a odkazování se na data. Z analýzy jednotlivých sektorů můžeme získat zajímavé výstupy jako čas, maximální rychlost, či maximální hodnoty jednotlivých kanálů zrychlení. Všechny tyto informace jsou užitečné, protože je lze porovnat mezi jednotlivými koly a rychle zjistit, kde jezdec ztratil či získal čas. Software by měl umět také zobrazování sektorových časů v každém kole a popř. zvýraznit ty nejrychlejší. Zároveň je vhodné vyznačit začátky a konce sektorů do grafů s vykreslenými kanály [1] [3].

### 3.2.4 Stopa jezdce na trati

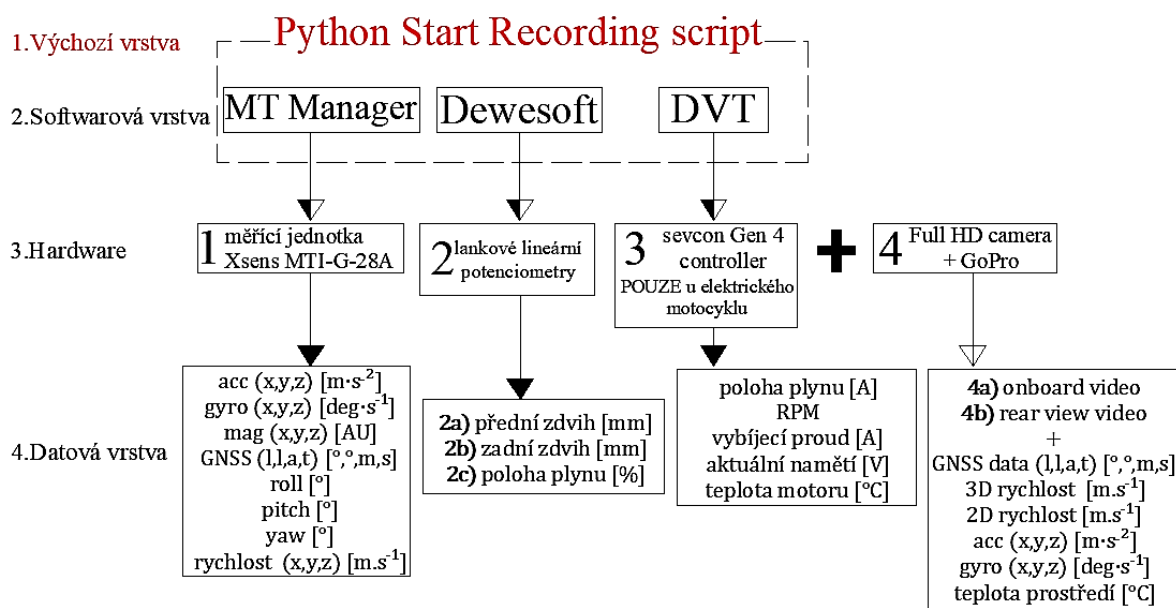
Některé systémy založené na technologii GPS jsou natolik přesné, že umožňují vizualizovat stopu jezdce na trati a to přímo v mapě či ve vytvořených hranicích okruhu. Tyto hranice se vytváří v online mapách či přímo na okruhu, nejsou-li mapové podklady kvalitní. Fyzické vytváření hranic okruhu není složité, ale obtížné je najít dostatek volného prostoru na trati. V době vytváření hranic okruhu musíme být kvůli bezpečnosti na okruhu sami, jelikož je potřeba se po okrajích okruhu pohybovat pomalu. Ideální je objet okruh automobilem a GPS anténu umístit na tu stranu, kterou zrovna mapujeme [20].

## 4 Návrh a příprava experimentu

Za účelem zefektivnění přípravy jezdců závodního týmu CTU Lions byl navržen experiment zahrnující návrh vlastního DAS, měřící jízdní dynamiku jednostopého vozidla na závodním okruhu a následné vyhodnocení naměřených dat ve vytvořeném softwaru .

### 4.1 Měřicí technika a zaznamenávaná data

Software i hardware navrženého DAS se skládá z více měřicích zařízení. Architektura celého systému včetně zaznamenávaných dat ilustruje obrázek 25.



Obrázek 25: Schéma architektury systému pro záznam dat navržený pro experiment.

#### 4.1.1 Výchozí vrstva

Softwarovou složku všech měřicích zařízení (kromě kamer) spojuje výchozí vrstva, kterou tvoří jednoduchý skript (pojmenovaný „Start Recording“) naprogramovaný v jazyce Python. Pro úspěch celého experimentu bylo zcela zásadní zajistit shodný počáteční čas  $t_0$  pro všechna měřicí zařízení, a toho bylo docíleno právě spuštěním skriptu Start Recording. Skript umožňuje spuštění všech měření u programů naráz, a to tak, že dokáže stisknout v jeden okamžik tlačítka začátku měření. Tlačítka programů jsou ve skriptu definovaná jejich pozicí, resp. souřadnicemi na obrazovce záznamového PC, kde jsou všechny programy spuštěny. Skript navíc dokáže při spuštění měření vypsát jak UTC, tak systémový čas záznamového PC. Součástí výstupních textových souborů (dat) ze všech měřicích zařízení je i přesný čas začátku měření, a to buď právě v podobě systémového (Dewesoft a DVT) či UTC času (MT Manager a GoPro). Můžeme tak dopočítat i možný časový posun na začátku měření, který vzniká v důsledku různé rychlosti spuštění zápisu dat v jednotlivých programech softwarové vrstvy.

#### 4.1.2 Softwarová vrstva

V softwarové vrstvě DAS se nachází jednotlivé programy měřících zařízení. Tyto programy musí být v době měření spuštěné na měřícím PC, jež je zabudovaný do kapotáže motocyklu (v případě prvních pokusů měření uloženého do jezdcova batohu, viz obrázek 42).

Ve všech třech programech softwarové vrstvy byly pro experiment shodně nastaveny tyto parametry:

- vzorkovací frekvence  $f = 100 \text{ Hz}$ ,
- cesta pro uložení souborů s naměřenými daty.

Dodatečně byly nastaveny další parametry v programech MT Manager a Dewesoft:

- MT Manager – poloha antény GPS vzhledem k pozici snímače  $(x, y, z) [m]$ ,
- Dewesoft – kalibrační konstanty jednotlivých lineárních potenciometrů dohledané v kalibračních protokolech dodávaných k sensorům.

Při zapnutí všech měření na všech zařízeních, vyžadují zmíněné programy náročnější požadavky na chlazení a hardware záznamového PC hlavně díky kontinuálnímu zpracovávání naměřených dat během jejich zápisu. Z celé softwarové vrstvy lze data snadno exportovat do textového formátu.

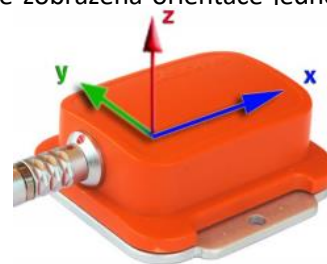
#### 4.1.3 Hardwarová vrstva

V následujících podkapitolách jsou stručně uvedeny základní charakteristiky použitých senzorů a měřících zařízení.

##### 4.1.3.1 Inerciální měřicí jednotka Xsens

Kompaktní měřicí jednotka vhodná pro měření jízdní dynamiky umožňující plný přístup k naměřeným datům. Sofistikované kontinuální zpracovávání měřených dat z mnoha senzorů jednotky by mělo zajistit požadovanou přesnost a kvalitu výstupních dat [22]. Na obrázku 26 je zobrazena orientace jednotky. Základní informace a klíčové vlastnosti jednotky jsou následující:

- model: MTI-G22A53G35,
- sériové číslo: SN 00501494,
- max. vzorkovací frekvence pro polohová data: 120 Hz,
- max. vzorkovací frekvence pro inerciální data: 512 Hz,
- kompaktní rozměry 59x58x32 mm (d,š,h) [22].



Obrázek 26: Orientace jednotky Xsens [22].

##### 4.1.3.2 Lineární lankové potenciometry MICRO-EPSILON

Lankové potenciometry měří lineární pohyb použitím vysoce flexibilního ocelového lanka. Lineární pohyb vzniklý pohybem odpružení motocyklu je převáděn na pohyb rotační, navíjením na bubínek a potenciometrem převeden na výstupní analogový signál. Ten je posílán do měřicí jednotky Krypton 3XSTG (obrázek 27) a odtud do záznamového PC. Lankové snímače byly použity jako alternativa za velmi drahé konvenční lineární potenciometry zmiňované ve druhé kapitole. Výhodou těchto senzorů je jejich kompaktní velikost, vysoká spolehlivost, dlouhá životnost a příznivá cena. Pro měření odpružení motocyklu byly použity následující snímače:

- WPS-500MK30-P-HG s maximálním rozsahem 500 mm (obrázek 32 vpravo), pro měření polohy plynové rukojeti,
- WPS-750MK30\_p10-HG s maximálním rozsahem 750 mm (obrázek 32 vlevo) pro měření zadního odpružení,
- WPS-1000-MP-C s max. rozsahem 1000 mm pro měření zdvihu přední vidlice (obr. 32 uprostřed).



Obrázek 27: Tříkanálová měřicí jednotka Krypton 3XSTG se sloty pro snímače, baterii a konektory pro připojení k PC.

### 4.1.3.3 Controller Sevcon

Controller elektrického motocyklu Sevcon Gen4 (SN: 0013\_ME1507) slouží primárně jako měnič elektrického napětí a také jako „mozek“ řízení elektrického pohonu motocyklu. Právě proto se z něj za pomoci převodníku (USB to CAN) a softwaru DVT dají získávat zajímavá data. Na obrázku 28 je zobrazen controller spolu s převodníkem.

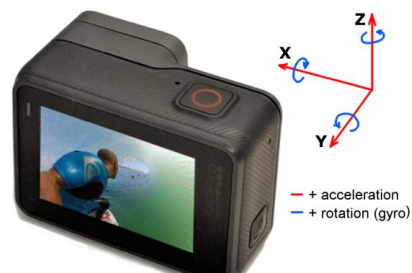


Obrázek 28: Vlevo – převodník Ixaat V2, vpravo – controller elektrického motocyklu Sevcon Gen4.

### 4.1.3.4 GoPro kamera

GoPro kamera je primárně určena pro pořizování videozáznamu ve vysokém rozlišení. Nabízí ovšem také rozšířené využití v podobě záznamu GPS dat a díky akcelerometrům poskytuje údaje o zrychlení ve všech třech osách (obrázek 29). Při experimentu byla použita následující kamera:

- model: GoPro Hero 5 (SN: 316132790),
- max. rozlišení videozáznamu: až 4K při 30 FPS,
- max. vzorkovací frekvence GPS a kanálu rychlosti: 18 Hz,
- max. vzorkovací frekvence inerciálních senzorů: 400 Hz [25].



Obrázek 29: Orientace kamery GoPro [25].

### 4.1.3.5 Záznamové PC

Záznamové PC bylo sestaveno z notebooku Lenovo ThinkPad T420, ze kterého byl odebrán display a další nepotřebné komponenty, aby se snížila jeho hmotnost. Dále bylo jeho šasi opatřeno úchyty a klávesnice krytem vytištěným na 3D tiskárně (obrázek 30), protože bude potřeba PC upevnit na podvozek motocyklů.



Obrázek 30: Vlevo – záznamové PC, vpravo – tisk potřebných komponentů na 3D tiskárně Průša MK3S.

#### 4.1.4 Datová vrstva

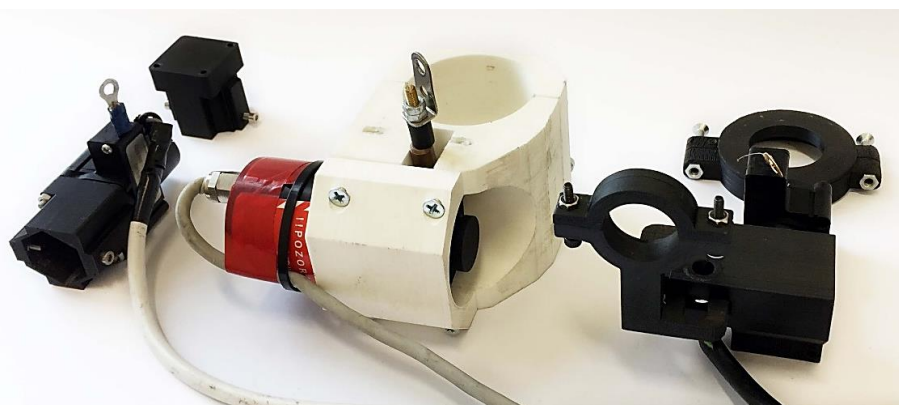
Naměřená data jsou ukládána buď rovnou do textových formátů (např. data z controlleru – software DVT), nebo do vlastních specifických formátů (v případě programů MT Manager a Dewesoft), odkud jsou následně převedeny do textových formátů. Data jsou poté částečně ručně, částečně automaticky skriptem spojena do jediného .csv souboru. Na obrázku číslo 31 je zobrazena ukázka naměřených dat z měřicí jednotky Xsens.

	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
5	Acc_X3	Acc_Y3	Acc_Z3	Gyr_X3	Gyr_Y3	Gyr_Z3	Mag_X3	Mag_Y3	Mag_Z3	Roll3	Pitch3	Yaw3	Latitude3	Longitude	Altitude3
6	-0.01688	1.535944	9.791595	0.007681	-0.00685	0.382134	-0.21023	0.464447	-1.52542	3.702158	-3.77345	-152.254	41.5696	2.259925	169.6371
7	0.005277	1.763178	9.995792	0.013378	-0.0047	0.36981	-0.21107	0.475687	-1.57749	3.705242	-3.78871	-152.04	41.5696	2.259925	169.6359
8	0.007366	1.712447	9.841671	0.020401	-0.00853	0.36703	-0.21168	0.451645	-1.59142	3.712404	-3.80608	-151.827	41.5696	2.259925	169.6348
9	0.091678	1.747221	9.684962	0.016792	-0.00933	0.374613	-0.21862	0.416751	-1.57745	3.717144	-3.82422	-151.61	41.5696	2.259926	169.6336
10	-0.05102	1.860668	9.941633	0.030918	-0.00424	0.373578	-0.21717	0.421306	-1.53329	3.729943	-3.83943	-151.393	41.5696	2.259926	169.6324
11	0.155664	2.049176	9.853089	0.024471	0.001071	0.374363	-0.21968	0.42856	-1.50473	3.730845	-3.85129	-151.174	41.5696	2.259926	169.612

Obrázek 31: Ukázka naměřených dat z jednotky Xsens.

## 4.2 Rozmístění a upevnění měřicí techniky na motocykl

Základními požadavky pro uchycení měřicí techniky na motocykl byla bezpečnost a funkčnost. Z hlediska bezpečnosti by ideálně neměla technika ani potřebná kabeláž omezovat jezdce, ani ho ohrozit v případě pádu. Pro splnění těchto faktorů byly ve finální úpravě popisovaného DAS na 3D tiskárně vytištěny speciální přípravy k uchycení většiny měřicí techniky na podvozky motocyklů – přípravy jsou patrné na obrázku 32.



Obrázek 32: Potenciometry a vytištěné přípravy pro jejich uchycení na podvozek motocyklu.

#### 4.2.1 Umístění antény GPS

Při práci se záznamovými systémy založenými na principu GPS je kvalita příjmu signálu zásadním faktorem, jelikož poloha poskytuje reference pro další měřená a vypočtená data. Kvalita signálu může být ovlivněna mnoha faktory. Pohyb jednostopých vozidel není pro umístování GPS antény ideální, protože se motocykl při jízdě naklání a jezdec přechází ze strany na stranu (vysedá do směrových oblouků). Anténa se při takových manévrech pohybuje a může tak docházet ke krátkodobému snížení počtu satelitů, ze kterých je signál přijímán. Zároveň anténa musí mít dobrý výhled na oblohu – nesmí být zakrývána jezdce. Experimentálně bylo zjištěno, že umístění antény na ocasní část motocyklu (za sedlo jezdce) dává ve většině případů dobré výsledky. Rozmístění měřicí techniky na elektrickém motocyklu je patrné z obrázku číslo 33, přičemž číslování odpovídá schématu popisující navržený DAS na obrázku číslo 25.



Obrázek 33: Osazení podvozku elektrického motocyklu měřicí technikou.

#### 4.3 Jezdec a měřené motocykly

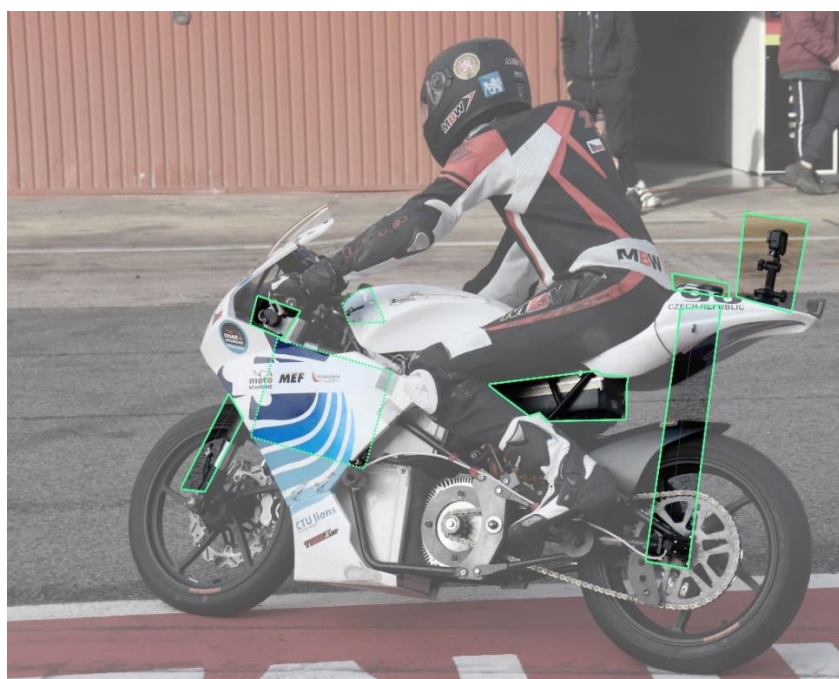
Měřicí zařízení bylo instalováno na motocykly vyrobené studenty fakultního týmu CTU Lions. Motocykly byly vyvinuty v rámci soutěže MotoStudent a mají podobné geometrické a výkonnostní parametry jako kategorie Moto3 seriálu mistrovství světa MotoGP. Pro komplexnější analýzu byl měřicí technikou osazen jeden elektrický motocykl – CTU Lions Electric EVO1 (obrázek 40) a jeden motocykl spalovací CTU Lions Petrol EVO1 (obrázek 42). Měřicí technika popisovaná v této kapitole je shodná (až na controller

u elektrického motocyklu) pro oba zmiňované motocykly. Základní informace o elektrickém a spalovacím motocyklu jsou uvedeny v tabulce číslo 2 :

Tabulka 2: Základní informace o měřených motocyklech.

motocykl	hmotnost	maximální otáčky motoru	jmenovitý / špičkový výkon	maximální točivý moment	kapacita baterií	maximální napětí / proud
CTU Lions Electric EVO1	150 kg	8 000 RPM	12/20 kW	65 Nm	6kWh	110V/ cca 450 A
CTU Lions Petrol EVO1	125 kg	11 000 RPM	19.4/- kW	19.4kW	-	-

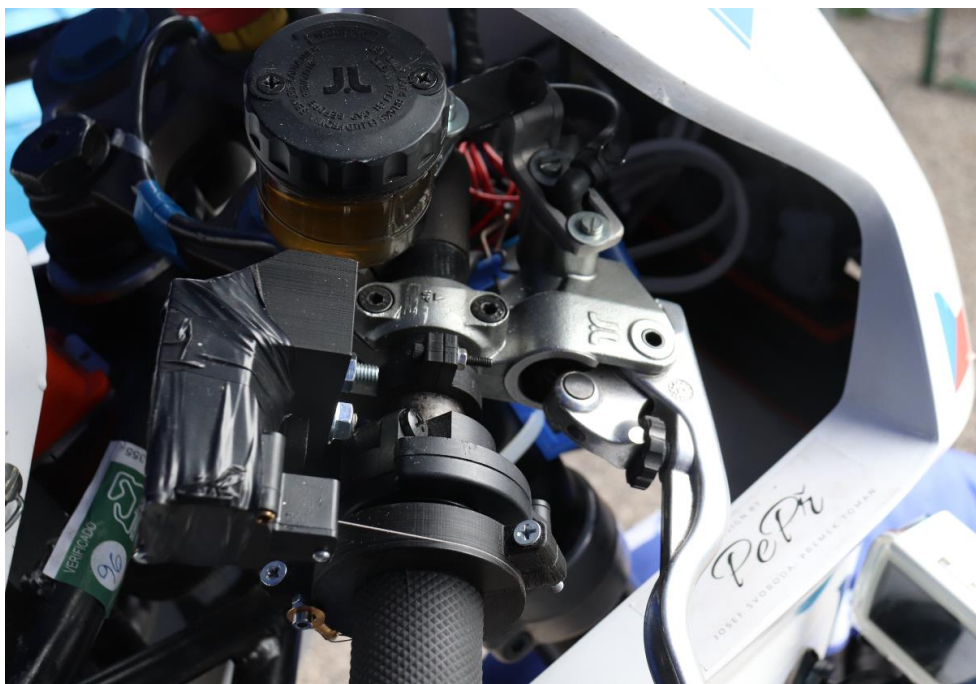
Abychom mohli porovnávat data z obou motocyklů, bylo potřeba, aby je řídil jeden jezdec. Jezdce padla na Ing. Přemysl Toman, jenž má s jízdou na motocyklech bohaté zkušenosti. Závodění se silničními motocykly na okruhu se věnuje třetím rokem. Za tuto kariéru stihl za univerzitní tým CTU Lions odjet několik závodů a dokonce zaznamenat úspěchy v podobě pódiových umístění.



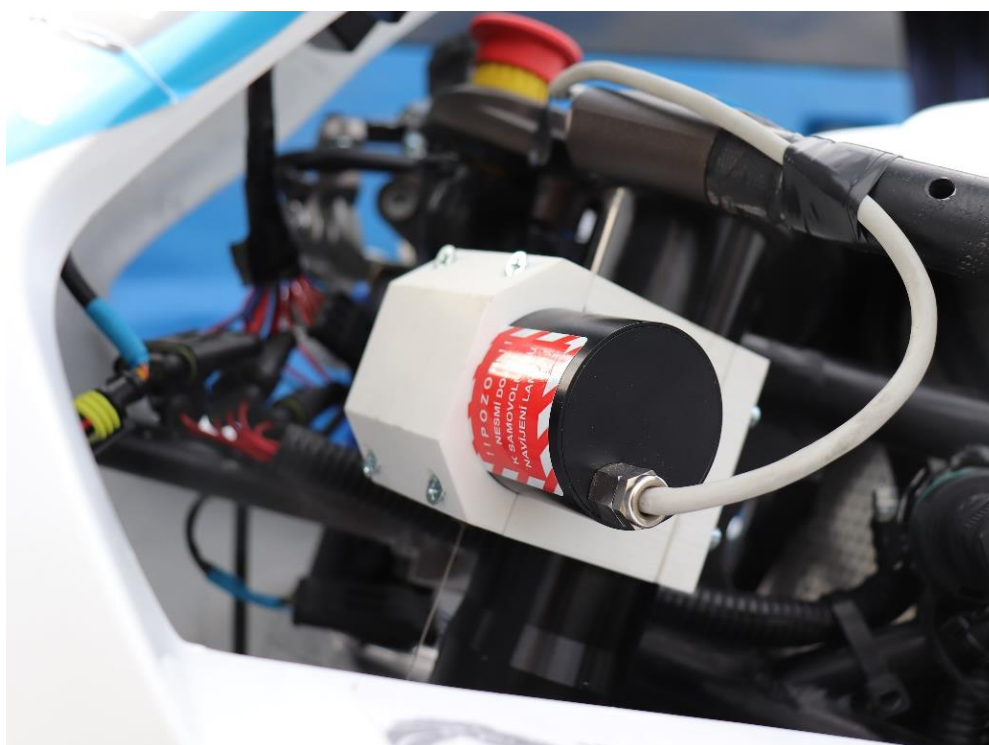
Obrázek 34: Jezdec při měřeném tréninku na okruhu Catalunya, na obrázku je též vyznačena měřící technika.

#### 4.4 Možnosti vylepšení systému pro záznam dat

Navržený DAS umožňuje celou řadu vylepšení od softwarové stránky až po tu hardwarovou. Proměnné vzorkovací frekvence pro různé kanály, jeden sofistikovaný software pro všechny zmíněné (či přidané) senzory – to je jen malý příklad toho, jak by mohl být systém do budoucna vylepšen. Jisté vylepšení systému nastalo také ihned po prvním měření. Z jezdceva zad byl odstraněn batoh s měřící technikou, která byla následně přesunuta a uchycena do kapotáže a na podvozek motocyklu (obrázek 34), protože batoh byl příliš těžký a omezoval jezdce v pohybu.



Obrázek 35: Lankový potenciometr měřící polohu plynové rukojeti.



Obrázek 36: Lankovým potenciometrem byla osazena i přední vidlice motocyklu.



## 5 Experiment – měření na okruhu

Experiment v podobě měření jízdní dynamiky na závodním okruhu byl proveden na dvou místech. Pilotní měření proběhlo v ČR na menším okruhu ve Vysokém Mýtě. Po odladění nedostatků se experiment opakoval na okruhu Catalunya ve španělské Barceloně.

### 5.1 Pilotní měření na autodromu ve Vysokém Mýtě

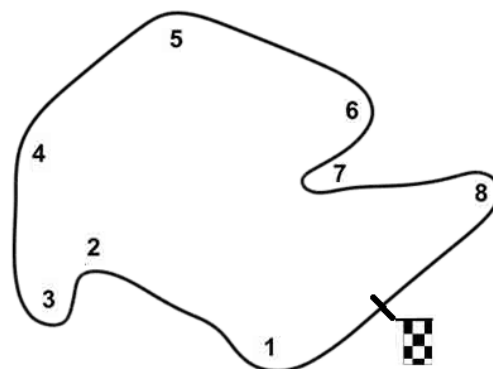
Závodní okruh ve Vysokém Mýtě byl vybudovaný spíše pro závody motokár – je to tedy spíše okruh tzv. „kartingový“, nežli okruh pro závodění silničních motocyklů. Ačkoliv jeho parametry (zejména šířka a celková délka trati) neodpovídají velkým silničním okruhům, byl pro nás první test v podobě měření na tomto okruhu ideální, protože jsme po domluvě se vstřícným majitelem měli celý okruh na jeden den k dispozici pouze pro naše účely za, a to za minimální cenu. Při měření panovaly téměř ideální povětrnostní podmínky. Postupně jsme test provedli na strojích CTU Lions Electric EVO1 (obrázek 40) a CTU Lions Petrol EVO1 (obrázek 42). Mapa okruhu ve Vysokém Mýtě je zobrazena na obrázku 37.

Parametry okruhu jsou následující:

- celková délka: 1065 m,
- počet směrových oblouků: 8,
- nejmenší poloměr směrového oblouku: 7 m,
- šířka v nejužším/nejširším místě na okruhu: 6/15 m,
- celkové převýšení: 12 m.

#### 5.1.1 Podmínky měření

- Začátek měření: 30/10/2019 10:00,
- konec měření: 30/10/2019 17:00,
- venkovní teplota: 8-15 °C slunečno, vítr cca 4 m/s,
- teplota pneumatik: vždy 40-50 °C,
- stav trati: suchá, čistá,
- přední pneumatika; tlak za tepla: Dunlop KR149 95/70R17; 2.0 bar,
- zadní pneumatika; tlak za tepla: Dunlop KR133 115/70R17; 2.3 bar.



Obrázek 37: Schéma okruhu Autodrom Vysoké Mýto.

Počáteční podmínky pro měření s motocyklem CTU Lions Petrol EVO1 byly shodné. Pro měření s motocyklem elektrickým bylo první měření zahájeno s plně nabitým motocyklem 110 V, druhé a třetí měření poté s motocyklem nabitým na 108 V. Oba motocykly měly obuté stejné slickové pneumatiky.

#### 5.1.2 Použitá měřicí technika a pomůcky

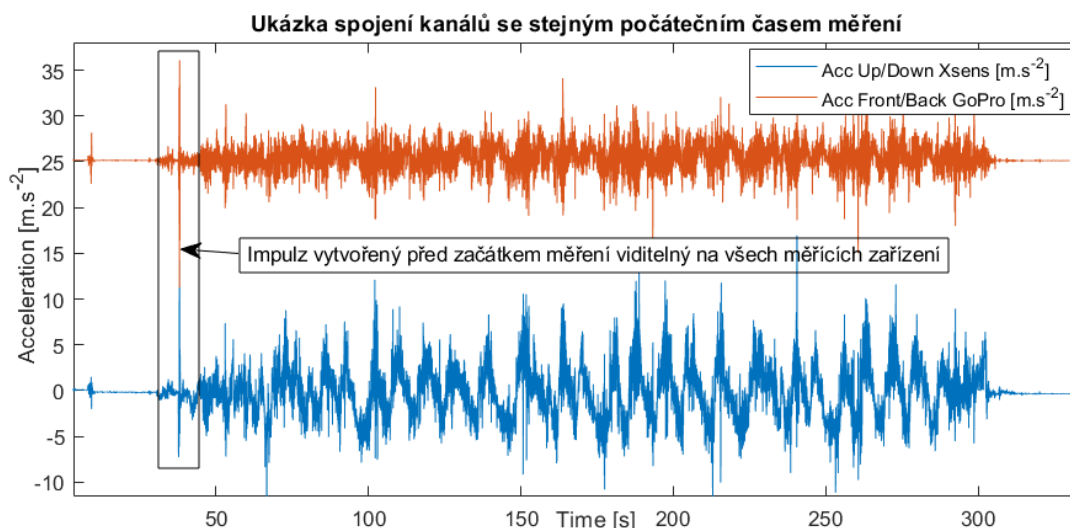
Použitá měřicí technika a její osazení na obou motocyklech bylo detailně popsáno ve čtvrté kapitole. Pomůcky pro měření byly: nahříváče pneumatik Tyrex, kompresor s manometrem, náradí, teploměr, lepící páska, kabeláž, nabíječka elektrického motocyklu, teploměr, telefon se záznamníkem, poznámkový blok, stopky a fotoaparát.

### 5.1.3 Postup měření

Po příjezdu na závodní okruh jsme měřicí technikou osadili nejprve elektrický motocykl. Jezdec si mezitím okruh několikrát projel bez měřicí techniky na spalovacím motocyklu, a to z časových důvodů, aby elektrický motocykl nemusel být po zahřívací jízdě nabíjen a aby měřicí technika nebyla zbytečně vystavena nebezpečí v případě pádu. Zatímco co jezdec poznával trať, nahřívaly se pneumatiky elektrického motocyklu na požadovanou teplotu (minimálně 50°C). Asi po deseti odjetých zahřívacích kolech jezdec usoudil, že trať dostatečně poznal a je připraven na zahájení prvního měření.

Každému měření předcházela kalibrace a kontrola měřicí techniky. Zkalibrované musely být všechny potenciometry a také inerciální měřicí jednotka Xsens. Kalibrace potenciometrů měřících odpružení a polohu plynové rukojeti proběhla v prostředí programu Dewesoft tak, že počáteční nulová hodnota byla nastavena při plném vyvěšení (úplném odlehčení) podvozku nejprve u přední vidlice a poté u zadní kyvné vidlice. Nulová hodnota pro potenciometr plynové rukojeti byla nastavena v základní poloze škrtkové klapky, tedy v nulové poloze plynové rukojeti. Kalibrace inerciální měřicí jednotky Xsens proběhla pomocí funkce „Object reset“ v prostředí programu MT Manager. Kalibrace zajistila nastavení orientace lokálního souřadného systému jednotky do nulové polohy. Při kalibraci musel být motocykl na pneumatikách co nejvíce ve svislé rovině – tzn. úhel náklonu motocyklu  $\Phi$  se blížil hodnotě  $0^\circ$ . Po kalibraci bylo spuštěno nahrávání kamerou GoPro a mohla být spuštěna i měřicí technika, jež byla umístěna do batohu na jezdcova záda (obrázek 41).

Ačkoliv byl vytvořen skript (popsaný ve čtvrté kapitole) pro sjednocení počátečního času měření  $t_0$ , předcházela každému měření procedura, která spočívala ve vytvoření „impulzu“ viditelném na všech měřicích zařízeních pro případ potřeby dodatečného sjednocení počátečního času měření na všech zařízeních. Tento impuls byl vytvořen tak, že jezdec prudce přidal plyn a následně ihned zabrzdil. Motocykl se při tomto manévru příliš nepohnul z místa, ale vzniklé zrychlení zaznamenaly akcelerometry jak v inerciální jednotce Xsens, tak v kameře GoPro (obrázek 38). Prudké přidání plynu a následné propružení bylo navíc viditelné i na datech z potenciometrů a v případě elektrického motocyklu i na datech kanálu RPM z controlleru. Po této proceduře mohlo začít samotné měření.



Obrázek 38: Filtrované signály akcelerometrů z jednotky Xsens a kamery GoPro s nastaveným shodným počátečním časem.

### 5.1.3.1 Postup měření s elektrickým motocyklem

První tři měřené jízdy proběhly na elektrickém motocyklu. Při první jízdě jezdec zajel pouze necelá tři kola, což se následně ukázalo jako nešťastné, neboť při tomto počtu odjetých kol bylo pouze jedno kolo (v pořadí se jednalo o druhé kolo) změřeno celé, ale bohužel při něm došlo k výpadku GPS signálu – viz záznam z GPS na obrázku 39. Při dalších dvou pokusech jezdec několikrát projel celou trať a postupně bylo naměřeno 3 a 6 kol. Jezdec se při každém kole snažil o co nejlepší výsledek v podobě nejrychlejšího kola. Když usoudil, že zajel nejlepší možný výkon v dané jízdě a zajel minimální stanovený počet kol, vyjel z trati a zamířil ke stanovišti, kde měl měřicí tým zázemí (obrázek 40).



Obrázek 39: Záznam polohy – výpadek signálu GPS.

Vždy po ukončení měřené jízdy byla nejprve vypnuta veškerá měřicí technika a data se uložila. Nasadily se ohřívače pneumatik a motocykl byl připojen k místní síti 230 V, aby se co nejvíce dobil před další jízdou. Poté byl jezdec dotázán na právě dokončenou jízdu – k tomu byl využit záznamník na mobilním telefonu. Dále byly zkontrolovány všechny systémy motocyklu. Po ukončení třetí jízdy byla měřicí technika demontována z elektrického motocyklu a byl jí osazen motocykl spalovací. Komentáře jezdce k jízdám na elektrickém motocyklu:

- *První měřená jízda – jezdec si stěžuje na jízdu s batohem a tato poznámka zazněla dále u všech měření jako nedostatek, jelikož batoh jezdce omezoval v pohybu. Dále zmiňuje, že silně brzdí přední brzdou motocyklu, myslí si že pokud by brzdil silně i zadní brzdou, mohl by se dostat do smyku. Z pohledu jezdce se mu jeví zadní odpružení příliš tvrdé. Konstatuje také, že s elektrickým motocyklem se mu na trati u malých poloměřů směrových obloučích hůře manipuluje.*
- *Při druhé jízdě jezdec zmiňuje, že již trať ze sedla elektrického motocyklu poznává lépe. Po první jízdě došlo také k úpravě upevnění batohu. Jezdec tuto změnu hodnotí pozitivně, lépe se na motocyklu pohybuje a tvrdí, že si jízdu celkově více užil a jelo se mu o poznání lépe.*
- *Třetí jízda byla pro jezdce pocitově nejlepší. Postřehl, že při nájezdu do první zatáčky při stisku přední brzdy se motocykl začne tzv. „vlnit“ a také slyšel nepříjemný zvuk, který (jak sám říká) mohl být způsobený průchodem větru okolo lanka potenciometru. Jezdec má velice dobrý pocit z pátého a šestého kola této jízdy.*



Obrázek 40,41: Vlevo - el. motocykl připojený k nabíječce před zahájením měření, vpravo – jezdec s batohem na trati.

### 5.1.3.2 Postup měření se spalovacím motocyklem

Scénář pro měření se spalovacím motocyklem byl stejný jako při měření s motocyklem elektrickým. Opět byl stanoven minimální počet kol – v případě spalovacího motocyklu na celkem pět kol (včetně prvního a posledního neúplného), kdy se jezdec opět snažil zajet co nejlepší čas v každém kole. V rámci tohoto měření proběhly také tři měřené jízdy a postupně bylo naměřeno 3, 6 a 7 kol. Měření se spalovacím motocyklem bylo časově méně náročné, jelikož mezi jednotlivými jízdami odpadla delší pauza způsobená nutností nabíjet elektrický motocykl. Přesto po každé jízdě musela být vypnuta a zkontrolována měřicí technika i jednotlivé systémy podvozku motocyklu. Výjimku netvořilo ani nasazení ohříváčů pneumatik. Komentáře jezdce k jednotlivým jízdám na spalovacím motocyklu:

- *První a druhá jízda: se spalovacím motocyklem se mu výrazně lépe manipuluje ve směrových obloučích o malém poloměru. Ačkoliv mají motocykly totožné brzdy, jezdec zde dokáže daleko efektivněji brzdit. Jezdec si dále stěžuje na řadící páku, kdy se mu špatně řadí zejména ve směrovém oblouku.*
- *Třetí jízda: při posledním kole třetí jízdy přestal motocykl akcelarovat, a tak jezdec zamířil do depa, jinak nové poznatky nepřidal.*



Obrázek 42,43: Jezdec s benzinovým motocyklem osazeným měřicí technikou.

## 5.2 Měření na okruhu Catalunya v Barceloně

Závodní okruh Catalunya v Barceloně patří mezi nejmodernější okruhy. Svědčí o tom i licence FIA (Federation Internationale de l'Automobile) prvního stupně, kterou se pyšní jen málo závodních okruhů na celém světě. I díky tomu zde můžeme vidět závodit např. jezdce seriálu mistrovství světa MotoGP, či Formule 1.

Základní parametry okruhu jsou následující:

- celková délka: 4627 m,
- počet směrových oblouků: 14,
- nejmenší poloměr směrového oblouku: 22 m,
- šířka v nejužším/nejširším místě na okruhu: 10/20 m,
- celkové převýšení: 52 m [26].

### 5.2.1 Podmínky měření

- začátek měření: 30/10/2019 10:00,
- konec měření: 30/10/2019 17:00,
- teplota: 8-15 °C slunečno, vítr cca 5 m/s,
- teplota pneumatik: vždy 80°C,
- stav trati: zpočátku (1. trénink) místy mokrá, ostatní jízdy již suchá a čistá,
- přední pneumatika; tlak za tepla: Bridgestone V02F GP3 90/580R17; 2.0 bar,
- zadní pneumatika; tlak za tepla: Bridgestone V02R GP3 120/600R17; 1.9 bar.



Obrázek 44: Schéma okruhu Catalunya [26].

První a třetí jízda byly zahájeny s plně nabitým elektrickým motocyklem (110 V). Počáteční napětí motocyklu při druhé jízdě bylo 102 V což je asi 71% nabití baterie.

### 5.2.2 Použitá měřicí technika a pomůcky

Použitá měřicí technika a její osazení na obou motocyklech bylo detailně popsáno ve čtvrté kapitole. Pomůcky pro měření byly shodné jako při měření na okruhu ve Vysokém Mýtě.

### 5.2.3 Postup měření

Po pilotním ověření funkčnosti systému pro záznam dat na závodním okruhu ve Vysokém Mýtě byly provedeny některé změny. Ze zad jezdce byl odstraněn batoh s měřicí technikou a technika byla upevněna na kapotáž a podvozek motocyklu. Tato změna přinesla zvýšení bezpečnosti jezdce a také jeho větší mobilitu na motocyklu. Změna také pozitivně ovlivnila průběh měření. Zapnutí a vypnutí měřicí techniky spočívalo v připojení a odpojení monitoru a myši a nehrozilo tak odpojení kabelů či nechtěné přerušení měření při přesouvání měřicí techniky z a do batohu.



Obrázek 45: Osazování elektrického motocyklu měřicí technikou.

Na okruhu Catalunya jsme měli vyhrazená tři třicetiminutová tréninková okna, v nichž startovali naráz oba dva naše motocykly – spalovací a elektrický. Bohužel jsme měli DAS pouze pro měření jednoho motocyklu. Rozhodli jsme se pro scénář měření, kdy v prvním a druhém tréninku budeme měřit elektrický motocykl s jezdce Ing. Přemyslem Tomanem a v posledním třetím tréninku naměříme téhož jezdce, avšak na motocyklu spalovacím. Ve druhém tréninku však došlo k pádu jezdce na benzinovém motocyklu a značnému poškození stroje. Oprava zabrala téměř celou čtyřhodinovou pauzu mezi tréninky. Na osazení spalovacího motocyklu tak nezbyl čas a tak byly všechny tři tréninky naměřeny s motocyklem elektrickým.

Mezi 1. a 2. tréninkem byla pouze dvouhodinová pauza. Bohužel doba dobíjení elektrického motocyklu trvá více než čtyři hodiny. Druhý trénink navíc ovlivnila nehoda závodníka jiného týmu – trénink musel být na cca 10 minut pozastaven. Po této pauze vyrazil jezdec zpět na trať, ale vlivem nedostatečného dobití motocykl neakceleroval a postupně ztrácel výkon, což vyústilo v jezdcevo odstavení stroje uprostřed trati a následné odtažení do depa traťovými komisaři. Komentáře jezdce k absolvovaným měřeným jízdám:

- *První trénink – v prvních kolech jezdec teprve poznával trať. Bylo evidentní že motocykl od šestého kola ztrácí výkon vlivem vybití baterie. Trať byla místy mokrá. Jezdec konstatuje, že se mu lépe projíždí levé směrové oblouky.*
- *Druhý trénink – motocykl neměl potřebný výkon. Jezdec pozitivně hodnotí jen to, že lépe poznal okruh.*
- *Třetí trénink – jezdec vyrážel na trať s plným nabitím, jelo se mu nejlépe ze všech tréninků.*



Obrázek 46: Nabíjení a kalibrace potenciometrů elektrického motocyklu – příprava na druhý trénink.



Obrázek 47: Jezdci týmu CTU Lions čekající na zahájení třetího tréninku na okruhu Catalunya – Barcelona.

## 6 Vytvoření aplikace pro analýzu naměřených dat

Software Lion's Data Analyzer byl vytvořen po vzoru profesionálních programů určených pro analýzu dat jízdní dynamiky v oblasti motorsportu. Těchto programů na trhu existuje velké množství, a dokonce existují i daleko sofistikovanější programy pro obecnou analýzu dat (nejen těch z oblasti motorsportu). Hlavní nevýhodou komerčních softwarů je jejich vysoká cena a mnohdy nemožnost konektivity s daty naměřenými vlastním DAS (z důvodů obchodní strategie výrobců techniky) – tzn. opětovný nárůst ceny za potřebný hardware (záznamové jednotky, senzory, kabeláž). Programy pro obecnou analýzu dat nabízí velké množství užitečných funkcí z mnoha oblastí zpracování signálu, např. software Diadem (National Instruments Inc., USA). Tyto programy jsou vhodné pro detailní pohled na jednotlivé kanály a umožňují s nimi operovat pomocí širokého repertoáru funkcí. Avšak v praxi je potřeba jezdcům podat srozumitelné informace, a to v co nejkratším možném čase. Z tohoto důvodu rozhraní takto sofistikovaných programů nejsou pro rychlou analýzu dat z oblasti motorsportu příliš vhodná. Tyto skutečnosti byly motivací k vytvoření programu pro analýzu dat silničních závodních motocyklů.

### 6.1 Detailní popis uživatelského rozhraní programu

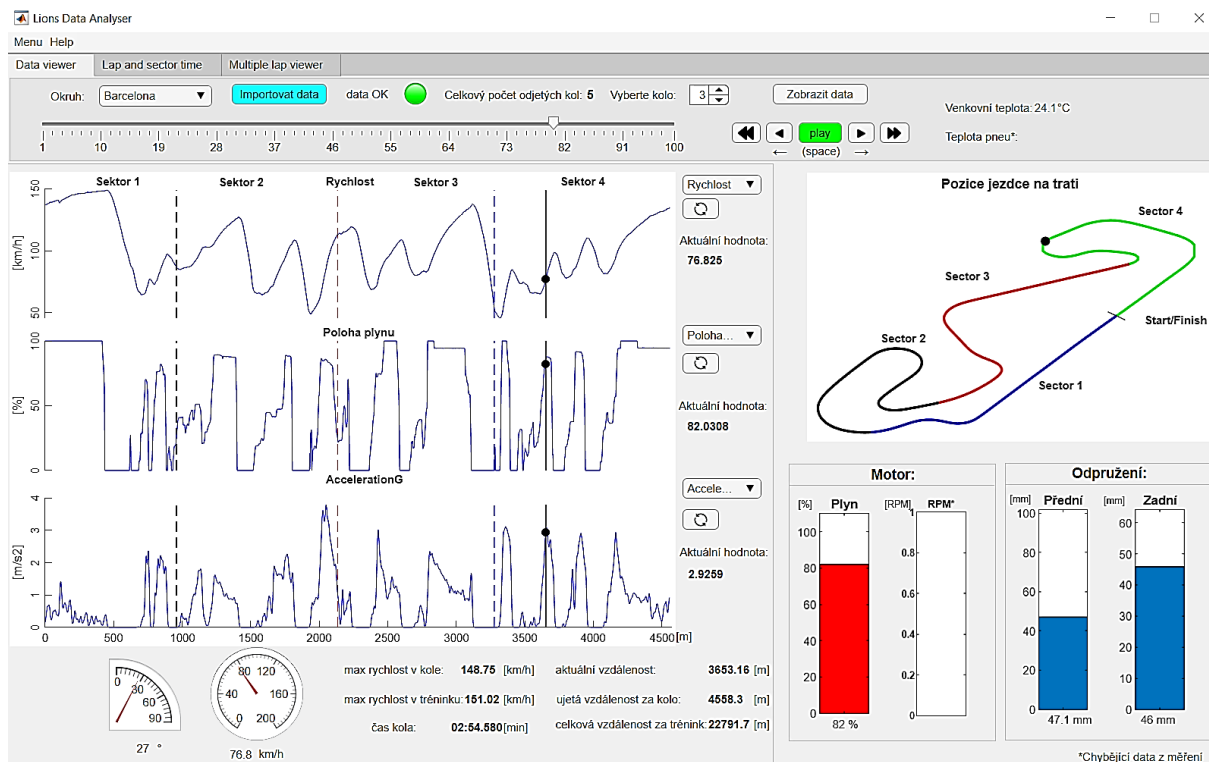
Za účelem efektivnější analýzy a názornější vizualizace naměřených dat byl v aplikaci App Designer v prostředí softwaru Matlab vytvořen program Lion's Data Analyzer. Program dokáže načíst textový soubor (.csv,.txt,.xls) s naměřenými daty v předdefinovaném pořadí kanálů a na základě skriptů data vyhodnotit. Software je naprogramovaný pro práci s GPS daty, popř. dalšími externími senzory (např. potenciometry), a na jejich základě umí vykonávat následující funkce:

- importovat naměřená data z textového souboru,
- předzpracovat (opravit a filtrovat) surová data,
- na základě filtrovaných GPS dat zobrazit ujetou dráhu jezdce,
- dráhu jezdce rozdělit na jednotlivá kola podle okruhu, kde byla data naměřena,
- zobrazit kanály a vypočítat matematické kanály uvedené ve druhé kapitole,
- namapovat všechny kanály na jednu referenční dráhu pro daný okruh. Pomocí této funkce mohou být jednotlivá data naměřená ve více kolech zobrazována na jedné společné dráze a tím mezi sebou snadněji porovnávána,
- zobrazit počet odjetých měřených kol, vybrat určité kolo a zobrazit kanály, které si uživatel vybere a zároveň se pomocí posuvníku či tlačítek interaktivně pohybovat v datech a sledovat tak, kde se zrovna jezdec na trati nacházel,
- interaktivně či jako kanály zobrazovat data z potenciometrů a dalších externích senzorů,
- rozdělit ujeté kolo na předem definované sektory vytvořené na trati,
- na základě UTC času vypočítat časy jednotlivých kol i jednotlivých sektorů a zvýraznit ty nejrychlejší,
- vzájemně porovnávat kanály a interaktivně se v nich pohybovat, a to až ve třech vybraných kolech zároveň,



## Vytvoření aplikace pro analýzu naměřených dat

Rychlou úpravou skriptů je dále možno přidávat do databáze vlastní okruhy a možností jsou i další modifikace aplikace (přidávání kanálů, metody vyhodnocení) přesně podle vlastních požadavků. Na obrázku číslo 48 je zobrazena první karta programu, která slouží pro snadnou vizualizaci dat naměřených v rámci jednoho naměřeného kola.

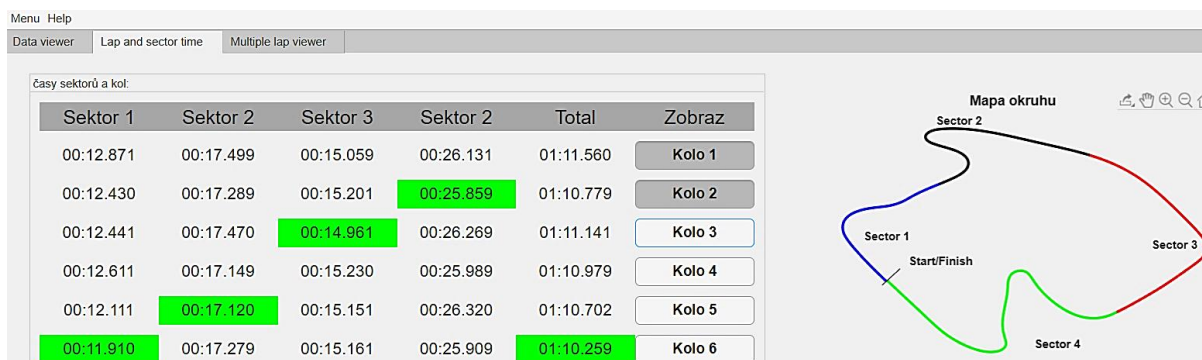


Obrázek 48: První karta programu – vizualizace naměřených dat v rámci jednoho kola.

Po vybrání příslušného okruhu (zde pro ukázkou data z okruhu Catalunya – Barcelona) a importování dat (pomocí tlačítka *Importovat data*) se v horní části okna zobrazí celkový počet odjetých kol. Stisknutím tlačítka „Importovat data“ program také provede téměř všechny výpočty (mapování, filtrování, výpočet matematických kanálů atd.), a pokud jsou data v pořádku, rozsvítí se zeleně kontrolka „data OK“. Následně si uživatel může vybrat naměřené kolo a zobrazit data tlačítkem „Zobrazit data“. Ve třech rolovacích menu jsou na výběr naměřené a vypočítané kanály. Jednotlivé kanály se po výběru zobrazují do třech oken pod sebe, přičemž všechny kanály jsou zobrazovány v závislosti na dráze. V pravé části karty pak může uživatel pozorovat, kde se jezdec v daném okamžiku nacházel na trati a sledovat informace ohledně motoru (RPM a poloze plynové rukojeti) či odpružení (přední a zadní zdvih kola). Nechybí ani rozhraní pro interaktivní prohlížení dat – posuvník, tlačítka (např. pro automatický posun) či klávesové zkratky pro ovládání aktuální pozice jezdce na okruhu a zároveň i pozice v oknech se zobrazovanými kanály. Na kartě jsou dále znázorněny doplňující informace jako je maximální rychlost v daném kole, čas kola, ujetá dráha či teplota prostředí.

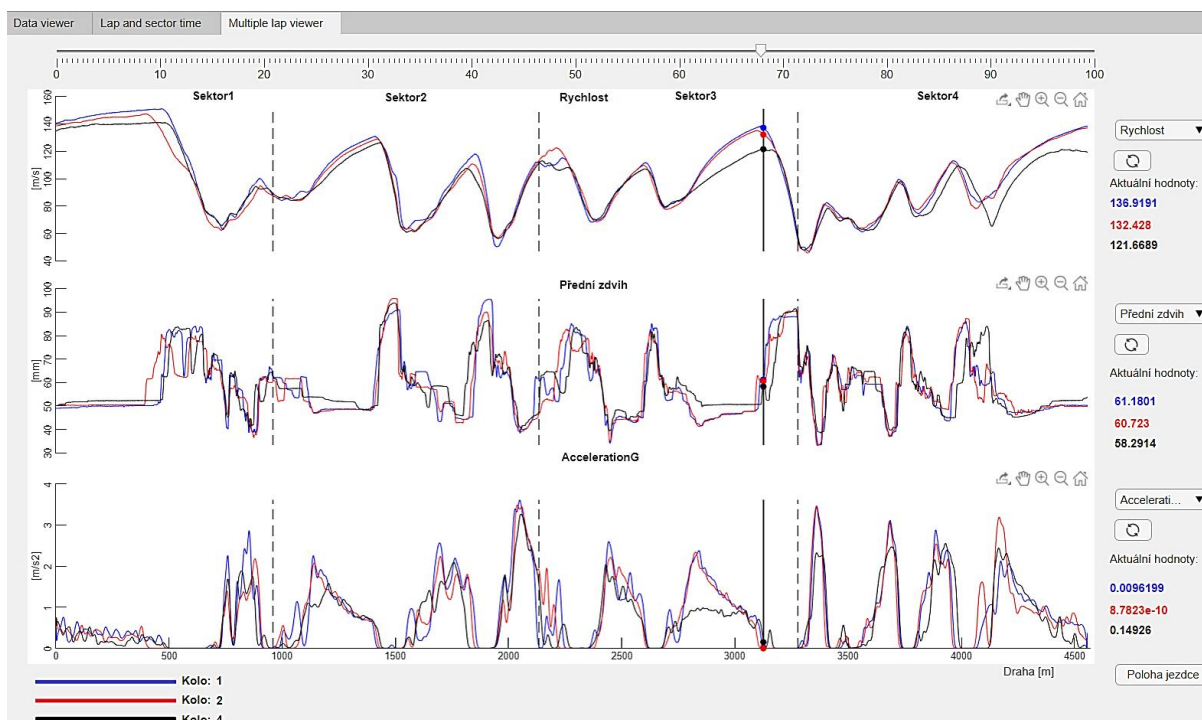
## Vytvoření aplikace pro analýzu naměřených dat

Na druhé kartě programu jsou na základě polohy a UTC času vypočítané jednotlivé časy sektorů a kol (obrázek 49). Uživatel si může na základě časů (nejrychlejší v daném sektoru a kole označené zelenou barvou) na této kartě vybrat až tři kola pro následné vzájemné porovnání na kartě následující.



Obrázek 49: Druhá karta programu s vypočítanými časy sektorů a kol na okruhu ve Vysokém Mýtě.

Jestliže si uživatel na druhé kartě vybral tři kola, může je vzájemně porovnat na třetí kartě programu (obrázek 50). Zde si obdobně jako na kartě první vybere kanály, které ho zajímají a posuvníkem se v nich může interaktivně pohybovat, přičemž aktuální hodnoty jsou vypisovány v pravé části okna. Všechny kanály jsou opět vykreslovány v závislosti na referenční dráze. V pravém dolním rohu se nachází tlačítko zobrazující mapu s aktuální pozicí jezdce na trati v závislosti na aktuálním posunu v datech.



Obrázek 50: Třetí karta programu umožňující porovnávání kanálů z vícero měřených kol.

Kanály a jejich aktuální hodnoty zobrazované na třetí kartě jsou barevně odlišené, v levém spodním rohu se nachází legenda. Software Lion's Data Analyzer, včetně dat naměřených na obou okruzích, je součástí přílohy diplomové práce.

## 6.2 Vytváření skriptů

Skripty (kódy) a funkce programu Lion's Data Analyzer byly vytvořeny v programovacím jazyku Matlab. Skripty a funkce se ukládají do souborů s příponou .m, které obsahují jejich definice. Program Matlab dále disponuje knihovnamy s užitečnými nástroji a funkcemi. Jednou z těchto funkcí je i App Designer, v níž byl vytvořen i program Lion's Data Analyzer. V následujících podkapitolách jsou ukázky vybraných skriptů zapsaných pro lepší srozumitelnost v podobě tzv. „pseudokódů“.

### 6.2.1 Rozdělení GPS dat na jednotlivá kola

Aby bylo možné data polohy používat v dalších algoritmech (např. pro výpočet rychlosti či poloměru směřového oblouku atd.) musí jednotlivé body zaznamenané pomocí GPS ležet za sebou tak, jak motocykl danou trať projel – toho dosáhneme vyhlazením polohových dat. Vyhlazením se však dopouštíme určité chyby, která činí řádově několik centimetrů od původních naměřených dat. Nicméně i data polohy jsou již zatížena určitou chybou přesností GPS. Pro přesné určení chyby určování polohy za pomoci GPS bychom museli provést další experiment přímo na trati. Pro účely sběru dat dynamiky závodních motocyklů na okruhu dlouhém v řádech kilometrů je však chyba v řádech desítek centimetrů přijatelná. Pseudokód pro vyhlazování polohových dat:

1. *A = Latitude;*
2. *SirkaOkna = zadej šířku plovoucího okna;*
3. *pocetOpakovani = zadej počet opakování filtrování;*
4. **For** (*k=1*) do (*proměnná pocetOpakovani*);
5. **If** *k > 1* **then**
6.     *A = newAn;*
7. **End if**
8. **For** (*i=1*) do (*délka vektoru A*);
9.     **If** *i <= a* a zároveň *i >= sirkaOkna* **then**
10.         *proměnná newAn (i) = A (i);*
11.     **Else**
12.         *newAn (i) = (suma (A (i-sirkaOkna až i+sirkaOkna))) / (2\*sirkaOkna + 1);*
13.     **End if**
14. **End loop**
15. **End loop**
16. *Latitude\_Smooth = newAn;*

Stejným způsobem musí být provedeno vyhlazení vektoru (souřadnice) *Longitude*. Výsledkem vyhlazení bude obdobně vektor *Longitude\_Smooth*. Následně byla data rozdělena na jednotlivá kola:

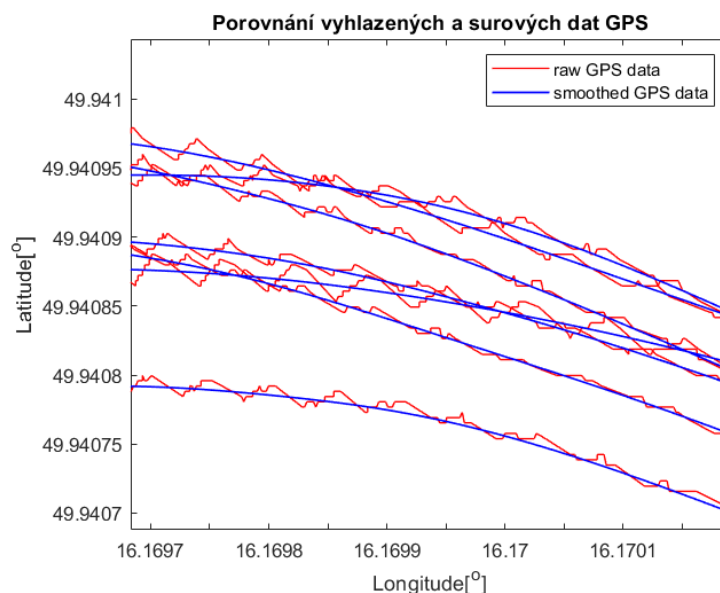
17. *pocitadloKol = 0;*
18. *i = 1;*
19. *vzdalenost = 200; % počáteční hodnota úhlopříčky budoucího obdélníku*
20. *Bod1 = zadej souřadnice bodu 1 cílové čáry [x<sub>1</sub>,y<sub>1</sub>];*
21. *Bod2 = zadej souřadnice bodu 2 cílové čáry [x<sub>2</sub>,y<sub>2</sub>];*
22. *% počítání koeficientů a,b,c přímky zadané pomocí dvou bodů pomocí funkce polyfit*
23. *Koeficienty = polyfit ([Bod1(1), Bod2(1)], [Bod1(2), Bod2(2)]);*
24. **While** *i <* (*délka vektoru Longitude\_Smooth*) **then**

```

25.   If [Latitude_Smooth(i) > Bod1(1) a zároveň Latitude_Smooth(i) < Bod2(1)) a zároveň
      (Latitude_Smooth(i) > Bod1(2) a zároveň Longitude_Smooth(i) < Bod2(2))] then
26.   % nyní se budou počítat vzdálenosti bodu od přímky (cílové čáry)
27.   v = absolutní hodnota [(a * Latitude(i) + b*Longitude(i) + c)/(odmocnina(a2+ b2));
28.   If v <= rovno vzdálenost then
29.     vzdálenost = v; % pokud je nalezena menší vzdálenost uloží se do proměnné v
30.   Else
31.     pocitadloKol = pocitadloKol+1;
      konecKola(pocitadloKol) = i; % pokud už není nalezena menší vzdálenost bodu od
      přímky, byl nalezen poslední bod daného kola a začíná se počítat kolo další
32.   End If
33.   i = i+1;
34.   End if
35.   End loop

```

Výsledek vyhlazování (detail) sedmi ujetých kol na je patrný na obrázku číslo 51.



Obrázek 51: Detailní pohled na naměřená a vyhlazená GPS data.

### 6.2.2 Mapování kanálů na referenční dráhu (kolo)

Pro snazší porovnávání kanálů z vícero měřených kol je potřebné, aby data byla zobrazena na shodné (referenční) dráze. Referenční dráha byla získána výběrem kola, jehož stopa byla uznána jako nejlepší ze všech (neobsahovala chyby jezdce). Dráha byla dále navzorkována po určité vzdálenosti na body. Následujícím pseudokódem byla naměřená data namapována na referenční dráhu:

```

1.  A = Latitude_Ref; % souřadnice referenční dráhy
2.  B = Longitude_Ref; % souřadnice referenční dráhy
3.  C = Latitude_Smooth;
4.  D = Longitude_Smooth;
5.  bod = 0;
6.  p = 0;
7.  n=0;
8.  For (i=1) do (délka vektoru A) then
9.  % složky směrového vektoru bodů referenční dráhy :
10. vx(i) = A(i+1)-A(i);

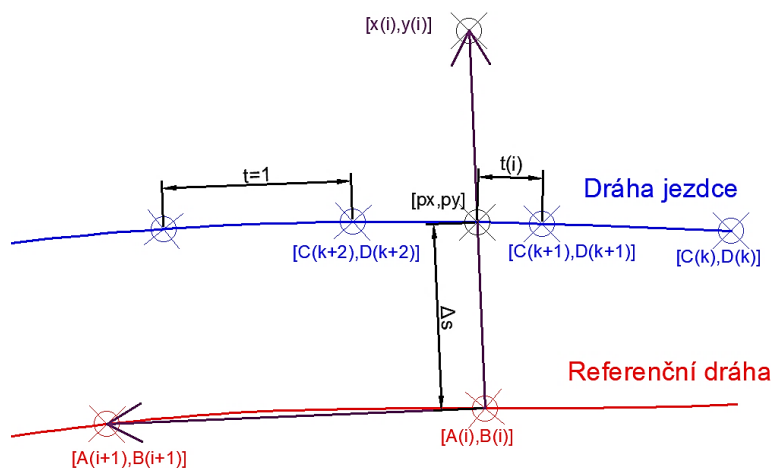
```

```

11.  $vy(i) = B(i+1)-B(i);$ 
12. % složky normálového vektoru bodů referenční dráhy:
13.  $n(i, :) = [vy(i), -vx(i)];$ 
14. % výpočet složek (bodu) normálové vektoru přesunutě do patřičného i-tého bodu referenční dráhy
15.  $x(i) = A(i)+n(i,1);$ 
16.  $y(i) = B(i)+n(i,2);$ 
17.  $k = p$  % uložení aktuálního kroku do pomocné proměnné
18. While  $k \leq konecKola(n+1)$  % proměnná konecKola z předchozího kódu
19.  $ux(k) = (C(k+1)-C(k));$  % směrový vektor skutečné dráhy motocyklu
20. % v dalším kroku bude vypočítán průsečík kde normálový vektor referenční dráhy protne dráhu skutečně ujetou jezdcem
21.  $[px, py] = \text{findintersection} ([x(i),y(i);A(i),B(i)], [C(k),D(k); C(k+1),D(k+1)] );$ 
22.  $t(k) = (x(k)-C(k)) / ux(k);$  % parametr t vychází z parametrického vyjádření přímky
23. If  $t(k) > 0$  a zároveň  $t(i) < 1$  then % podle parametru t zjišťuji zda má být bod namapován, zda jsem našel správný průsečík, či nikoliv
24.  $Bod = bod + 1$ 
25.  $Map\_bod(bod) = (k)$  % pořadnice namapovaného bodu
26.  $Par\_t(bod) = t(k)$  % parametr t nutný k interpolaci mezi dvěma body
27.  $p=k$ 
28.  $k = k + konecKola(pocitadloKol)$ 
29. Else
30.  $k = k+1$ 
31. End if
32. End While
33. End For loop

```

Pro snazší pochopení kódu byl vytvořen obrázek číslo 52. Z obrázku je patrné, že při mapování vzniká chyba  $\Delta s$ . Aby tato chyba byla co nejmenší, je nutné, aby referenční dráha co nejvíce odpovídala dráze jezdce a jeho jízdnímu stylu. Proto je vhodné, aby referenční dráhou bylo jedno z kol odjeté jezdcem na okruhu. Dalším faktorem je také potřeba přiměřené hustoty bodů  $[A(i),B(i)]$  na referenční dráze. Při zpětném ověřování namapovaných bodů vzhledem k naměřeným GPS datům byla naměřena největší chyba namapovaného bodu  $\Delta s = 0,4$  m, což není ani polovina rozvoru motocyklu a tudíž chyba byla uznána jako přijatelná.



Obrázek 52: Interpretace pseudokódu pro namapování dat na referenční dráhu.

Samotné namapování naměřených dat na referenční dráhu bylo provedeno interpolací mezi dvěma body  $[A_i, B_i]$  pomocí parametru  $t(i)$ :

$$X_{map}(i) = X(map_{bod}(i) \cdot 1 - t(i)) + X(map_{bod}(i + 1) \cdot t(i)); \quad (6.1)$$

kde  $X_{map}$  je namapovaná naměřená hodnota,  $X$  je naměřená hodnota,  $map_{bod}$  je pořadnice namapovaného bodu a  $t$  je parametr potřebný k interpolaci, vycházející z parametrického vyjádření přímky.

### 6.2.2.1 Postup při výpočtu odstředivého zrychlení a náklonu z GPS dat

Přibližné hodnoty odstředivého zrychlení byly vypočítány opět na základě dat z GPS, konkrétně podle vzorce:

$$a_{Lat} = \frac{v^2}{R} [m \cdot s^{-2}]; \quad (6.2)$$

kde  $v [m \cdot s^{-1}]$  je rychlost a  $R [m]$  je poloměr zakřivení směrového oblouku. Jeden z možných výpočtů rychlosti byl již zmíněn v první kapitole. Zbývá tedy určit poloměr směrového oblouku. Jedním z možných výpočtů poloměrů je pomocí kartézských souřadnic vypočítaných na základě GPS polohy, konkrétně jejich tří bodů  $[x_{i-k}, y_{i-k}]$ ,  $[x_i, y_i]$ ,  $[x_{i+k}, y_{i+k}]$ , kde  $k [m]$  je definovaná vzdálenost bodů pro výpočet. Do kódu byla zavedena, aby byl potlačen šum a nepřesnosti vznikající při výběru bodů následujících ihned po sobě. Empiricky byla zjištěna optimální hodnota vzdálenosti  $k=1$  až  $2 m$ . Ze tří zmiňovaných bodů je následně možné stanovit poloměr směrového oblouku podle následujících rovnic:

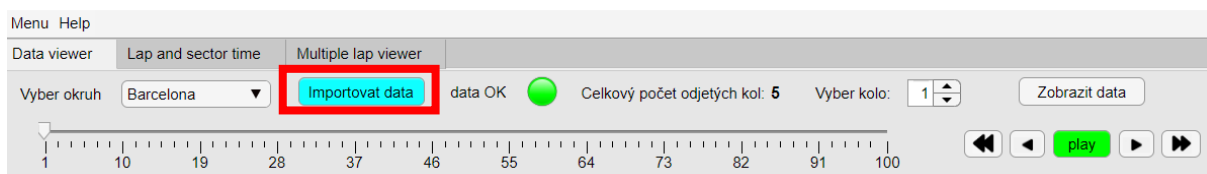
$$x_i^2 + y_i^2 + 2mx_i + 2ny_i + p = 0; \quad (6.3)$$

kde  $m, n, p$  jsou neznámé parametry obecné rovnice kružnice. Jestliže do rovnice 6.3 postupně dosadíme naše tři vypočítané body dostaneme celkem tři rovnice, ze kterých mohou být neznámé parametry dopočítány. Ze znalosti středové rovnice kružnice se středem  $S = [m, n]$  lze vypočítat požadovaný poloměr kružnice [27]:

$$R = \sqrt{(x_i - m)^2 + (y_i - n)^2} [m] \quad (6.4)$$

## 6.3 Vytváření programu v aplikaci App Designer

Rozšíření App Designer umožňuje na základě uložených skriptů a funkcí vytvořit Windows aplikaci a za pomoci knihovny základních komponent sloužící pro snadné ovládání, také její uživatelské rozhraní. Základní komponenty se skládají např. z tlačítek, posuvníků nebo tzv. „axis“ čili oken pro vykreslování grafu funkce. Po vykonání určité akce (např. stisknutí tlačítka) se komponenty odkazují tzv. „volají“ příslušné skripty a funkce. Na obrázku 53 je vidět červeně vyznačená ukázka komponenty *button* s názvem *Importovat data* a níže její tzv. „callback“, tedy odkaz na volání funkcí po jejím stisknutí.



Obrázek 53: Uživatelské rozhraní aplikace s tlačítkem Importovat data

```

349 % Button pushed function: ImportovatdataButton
350 function ImportovatdataButtonPushed(app, event)
351 -     [file,path] = uigetfile('.csv','','C:\Users\lions_stroj\Documents\K616_pepa\diplomka\Matlab\M
352 -     fileS = convertCharsToStrings(file);
353 -     pathS = convertCharsToStrings(path);
354 -     filename = pathS +fileS;
355 -     assignin('base','pathS',pathS);
356 -     assignin('base','filename',filename);
357
358 -     vyberokruh= app.VyberokruhDropDown.Value;
359
360
361 -     switch vyberokruh
362
363 -         case 'Barcelona'
364
365 -             filename=evalin('base','filename');
366 -             dataLines = [6, Inf];
367 -             assignin('base','Kanal_3',Kanal_3)
368 -             SirkaOkna=8;
369 -             PocetOpakovani=20;
370 -             [Longitude_Sm,Latitude_Sm,Altitude_Sm] = Smooth_kola(LongGP3,LatGP3,AltGP3,SirkaOkna,P
371 -             assignin("base","TimeGP3",TimeGP3);
372 -             assignin("base","Longitude_Sm",Longitude_Sm);
373 -             assignin("base","Latitude_Sm",Latitude_Sm);
374
375 -             [Sec4TimeSeconds,Sec3TimeSeconds,Sec2TimeSeconds,Sec1TimeSeconds,Sec4TimeMinute,Sec3T
376 -             assignin("base","pocitadloKol",pocitadloKol);

```

Obrázek 54: Ukázka tzv. „callbacku“ – tedy odkazování se na určité funkce po stisknutí tlačítka.

## 6.4 Formát importovaných dat

Importovaná data do aplikace mají následující formát:

UTC čas [s]; latitude [°]; longitude [°]; altitude [m]; rychlost [ $m \cdot s^{-1}$ ]; AccZ [ $m \cdot s^{-2}$ ]; AccY [ $m \cdot s^{-2}$ ]; AccX [ $m \cdot s^{-2}$ ]; teplota [°C]; přední zdvih [mm]; poloha plynu [%]; zadní zdvih [mm];

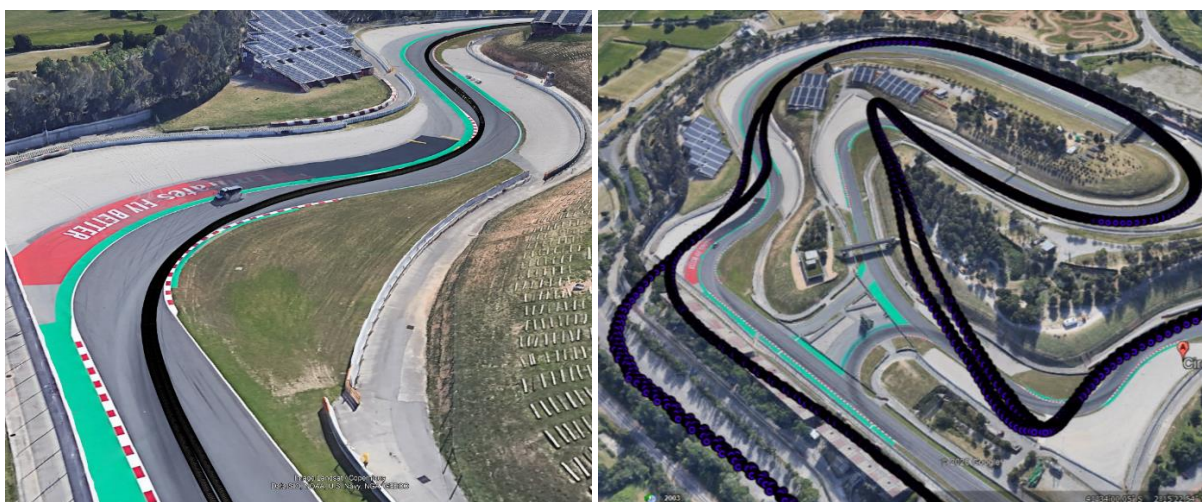
kde Acc jsou data z akcelerometrů.

## 6.5 GPS data pro program

Podle původní strategie experimentu měla být kvalitní GPS data poskytována inerciální měřicí jednotkou Xsens s přesností 2,5 m CEP (Circular Error Probable) [22]. Tato přesnost by byla vhodná pro algoritmy programu Lion's Data Analyzer. Při analýze naměřených dat se však chyba naměřených dat ukázala jako daleko větší, a to až o jeden řád – tedy chyba cca 30 m v případě jízdy na okruhu Catalunya (obrázek 55). Ačkoliv byla snaha o úpravu jak algoritmů, tak i samotných dat, s takovou chybou bylo pokračování ve vyhodnocování ve vlastním programu nemožné. Chyby v nepřesnosti mohly způsobit následující okolnosti:

- zákryt výhledu antény GPS na oblohu jezdcem – k této situaci skutečně docházelo a to zejména před směrovými oblouky, kdy jezdec aktivně svým tělem zvyšoval aerodynamický odpor a tím více zakrýval anténu umístěnou na zadní části motocyklu,
- rušení příjmu signálu ze satelitů GPS elektrickými obvody, a to zejména na elektrickém motocyklu, kdy průchod elektrického proudu vodiči generuje magnetické pole, které mohlo způsobit šum a nepřesnosti v datech,
- nesprávné nastavení parametrů jednotky,
- chyba či poškození měřicí jednotky.

Po několika dnech hledání řešení této situace, kdy hrozilo že data z obou okruhů budou pro účely vyhodnocení ve vlastním softwaru nepoužitelná (zejména u dat z okruhu Catalunya by tato ztráta byla velice nepříjemná, jelikož data měla sloužit i pro vývoj nového motocyklu), bylo nakonec nalezeno řešení v podobě telemetrických dat zaznamenaných ve videonahrávkách kamery GoPro. GPS metadata byla z videozáznamu formátu MP4 exportována pomocí volně dostupného programu Telemetry Extractor, kde data podstupují postprocesing (podobně jako je tomu v případě jednotky Xsens). Výsledkem byla daleko přesnější GPS data než v případě výstupních dat z programu MT Manager – tedy GPS dat naměřených inerciální jednotkou Xsens. Porovnání naměřených dat v programu Google Earth Pro je ilustrováno na obrázku číslo 55.



Obrázek 55: GPS data zaznamenaná na okruhu Catalunya, vlevo – GPS data zaznamenaná kamerou GoPro zobrazující přesnou stopu jezdce na trati, vpravo – GPS data zaznamenaná jednotou Xsens vykazující značnou chybu.

Ačkoliv postprocesing programu Telemetry Extractor je neznámý a chová se pro nás jako tzv. „black box“, z exportovaných dat můžeme zjistit informaci o jejich přesnosti pomocí kanálu GDOP (Geometric Dilution Of Precision). Tyto vypočtené koeficienty vypovídají o kvalitě naměřených dat, resp. o jejich geometrické přesnosti [28]. V tabulce číslo 3 jsou zaznamenány třídy přesnosti GDOP koeficientů. Polohová data naměřená pomocí kamery GoPro vykazovala nejvyšší hodnotu koeficientu  $GDOP = 2,5$  v případě měření na okruhu Catalunya a  $GDOP = 2,2$  při měření na okruhu ve Vysokém Mýtě.



Tabulka 3: GDOP koeficienty popisující přesnost polohy získané pomocí GPS [28].

GDOP hodnota	Kvalita	Popis
1	Ideální	Nejvyšší možná úroveň přesnosti
1-2	Velmi dobrá	Dostatečně přesná úroveň, vyhovuje většině aplikací.
2-5	Dobrá	Minimum pro přesná měření.
5-10	Dostatečná	Menší přesnost - doporučuje se více otevřený výhled na oblohu.
10-20	Uspokojivá	Nízká úroveň přesnosti - vhodné k hrubému odhadu aktuální polohy.
>20	Slabá	Nepřesná data, na této úrovni dosahují nepřesnosti i několik stovek metrů.

## 6.6 Data z controlleru elektrického motocyklu

Controller elektrického motocyklu měl podle architektury navrženého DAS poskytovat data ohledně řízení elektrického motoru – zejména kanály otáček motoru a vybíjecích proudů. Tato data byla skutečně naměřena, ale po jejich důkladné studii bylo zjištěno, že, ačkoliv byla v programu DVT nastavena vzorkovací frekvence  $f = 100 \text{ Hz}$ , byla zaznamenaná data vzorkována frekvencí jinou, a to zcela náhodnou. Tento problém se ukázal jako zcela zásadní pro algoritmy vytvořeného programu, jelikož data z controlleru v kontextu ostatních kanálů vykazovala velké nepřesnosti. Data z controlleru nakonec nebyla použita.

## 6.7 Možnosti vylepšení aplikace

Hlavním vylepšením do budoucna je přepsání aplikace z prostředí softwaru Matlab do jiného programovacího jazyka. Důvodem této změny je potřeba spojit naměřená data s pořízeným videozáznamem, což je v programu Matlab v porovnání s jinými programovacími jazyky příliš komplikované a neefektivní. Problém zde způsobuje plynulost běhu programu při práci s videozáznamy.

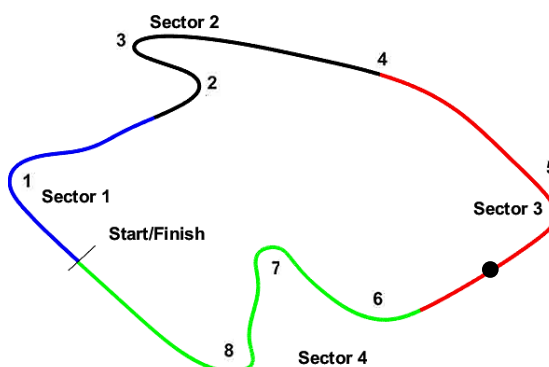
Dalším z potenciálních vylepšení spočívá v sofistikovanějším a přesnějším výpočtu odstředivého zrychlení (a tím i náklonů a dalších kanálů) za pomoci Kalmanova filtru a tzv. „*modelu konstantního zrychlení*“. Princip výpočtu odstředivého zrychlení spočívá v tom, že polohová data vypočítaná na základě GPS jsou posílána do modelu a ten vrací vypočítané a lépe filtrované veličiny rychlosti a zrychlení. Na základě několika předpokladů a následných výpočtů by mělo být možné dostávat daleko přesnější odhad složky odstředivého zrychlení a tím i souvisejících matematických kanálů. Výpočet tímto způsobem je však složitější než námi použitý a vyžaduje více času pro jeho ladění a testování. Dále je možné automatizovat a zpřesnit výpočet referenční dráhy a tudíž i zmenšit chybu vznikající dosavadním postupem.

## 7 Vyhodnocení naměřených dat

Jedním z hlavních cílů práce bylo navrhnout funkční systém sběru dat jízdní dynamiky silničních závodních motocyklů a vytvořit nástroj pro jejich efektivní vyhodnocování dle požadavků univerzitního závodního týmu CTU Lions. V této kapitole budou na základě naměřených dat z provedených experimentů popsány možnosti a funkce vytvořeného programu na ukázkách situací, které by byly s jezdce konzultovány. Mohl by tak být zlepšen výkon jezdce a nastavením správných parametrů podvozku a motoru i výkon motocyklu.

### 7.1 Analýza dat naměřených na okruhu ve Vysokém Mýtě

Jak již bylo zmíněno, na okruhu ve Vysokém Mýtě byla měřena data na elektrickém a spalovacím motocyklu se stejným jezdce. Nabízí se tedy možnost porovnání obou strojů, resp. porovnání dosažených parametrů a jízdního stylu jezdce na každém ze strojů. Před samotnou analýzou dat byly na okruhu vytvořeny čtyři sektory (barevně znázorněné jak na obrázku 56, tak později v oknech s jednotlivými grafy).



Obrázek 56: Rozdělení okruhu ve Vysokém Mýtě na sektory a očíslování jednotlivých směrových oblouků.

#### 7.1.1 Porovnání měření jízdy s elektrickým a spalovacím motocyklem

Za účelem porovnání naměřených dat během měřených jízd (tréninků), byly vytvořeny následující dvě tabulky (tabulka 4 a 5) obsahující maximální hodnoty vybraných parametrů, které popisují výkonnostní charakteristiky jezdce na obou motocyklech v rámci všech odjetých kol na okruhu. Nejvyšší hodnoty těchto parametrů v daném tréninku jsou označeny zelenou barvou.

Tabulka 4: Vybrané parametry naměřené na elektrickém motocyklu.

	kolo	čas na kolo [min]	max. rychlost (sektor)[km/h]	max. accel. G (sektor)[m.s <sup>-2</sup> ]	max. total G (sektor)[m.s <sup>-2</sup> ]	max. náklon (oblouk)[°]	max. brakeG (sektor) [m.s <sup>-2</sup> ]	max. corner G (oblouk)[m.s <sup>-2</sup> ]	max. trail braking (oblouk)[m.s <sup>-2</sup> ]
1. trénink	nedostatečný počet odjetých kol, chyba GPS								
2. trénink	1	01:15,500	96,33 (4)	4,51 (4)	5,41 (2)	28,3 (1)	3,77 (1)	5,36 (1)	3,05 (5)
	2	01:14,440	95,22 (4)	4,05 (4)	5,87 (2)	31,5 (2)	4,38 (1)	6,02 (2)	3,31 (5)
	3	01:12,592	97,39 (4)	3,92 (4)	6,03 (3)	31,8 (5)	4,41 (1)	6,08 (5)	3,21 (5)
	$\bar{x}$	01:14,177	96,31	4,22	5,77	30,53	4,19	5,82	3,19
3. trénink	1	01:16,830	95,14 (4)	3,61 (2)	5,41 (4)	29,1 (7)	4,66 (3)	5,20 (3)	2,92 (5)
	2	01:14,439	95,18 (4)	4,12 (4)	5,51 (4)	29,5 (2)	4,62 (3)	5,53 (2)	2,95 (5)
	3	01:13,651	96,35 (4)	4,21 (4)	5,91 (2)	30,6 (3)	4,35 (2)	5,85 (2)	2,82 (2)
	4	01:14,540	94,57 (4)	3,72 (2)	5,95 (2)	30,2 (2)	5,55 (3)	5,68 (2)	3,05 (5)
	5	01:12,660	93,88 (4)	4,45 (3)	6,45 (2)	34,1 (2)	4,71 (3)	6,61 (2)	3,22 (5)
	6	01:12,590	97,37 (4)	4,05 (4)	6,22 (2)	33,6 (2)	5,05 (3)	6,42 (2)	2,95 (5)
	$\bar{x}$	01:14,118	95,42	4,03	5,91	31,18	4,82	5,88	2,99

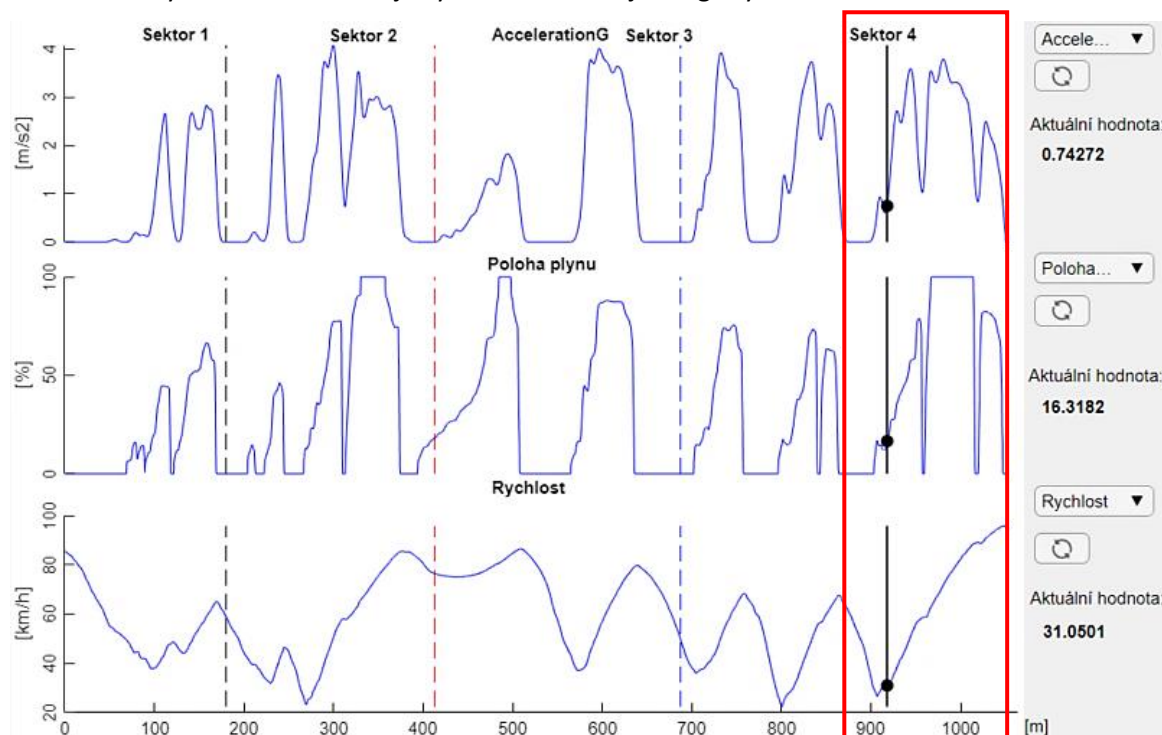
## Vyhodnocení naměřených dat

Tabulka 5: Vybrané parametry naměřené na spalovacím motocyklu.

	kolo	čas na kolo [min]	max. rychlost (sektor)[km/h]	max. accel. G (sektor)[m.s <sup>-2</sup> ]	max. total G (sektor)[m.s <sup>-2</sup> ]	max. náklon (oblouk)[°]	max. brakeG (sektor) [m.s <sup>-2</sup> ]	max. corner G (oblouk)[m.s <sup>-2</sup> ]	max. trail braking (oblouk)[m.s <sup>-2</sup> ]
1. trénink	1	01:18,860	89,5 (4)	3,99 (4)	6,00 (2)	30,6 (3)	4,73 (3)	5,82 (3)	2,16 (8)
	2	01:15,300	89,14 (4)	4,05 (2)	6,37 (4)	31,3 (8)	5,55 (3)	5,99 (8)	2,50 (3)
	3	01:15,130	93,43 (4)	4,16 (3)	5,96 (4)	31,9 (8)	4,99 (3)	6,12 (8)	2,78 (5)
	$\bar{x}$	01:16,430	91,35	4,28	6,26	31,58	5,35	6,06	2,62
2. trénink	1	01:11,560	91,49 (4)	4,62 (2)	6,45 (4)	31,6 (4)	5,51 (3)	6,07 (4)	2,59 (2)
	2	01:10,779	93,27 (4)	4,78 (4)	6,73 (4)	33,8 (2)	5,60 (3)	6,60 (2)	2,81 (8)
	3	01:11,141	94,41 (4)	4,14 (3)	6,68 (4)	32,5 (5)	5,85 (3)	6,36 (5)	2,95 (2)
	4	01:10,979	93,73 (4)	4,52 (2)	6,82 (4)	33,1 (7)	5,72 (3)	6,41 (7)	2,45 (8)
	5	01:10,702	93,21 (4)	4,58 (2)	6,76 (4)	33,0 (7)	5,15 (2)	6,45 (7)	2,65 (8)
	6	01:10,259	93,76 (1)	4,48 (2)	6,41 (3)	31,8 (2)	5,91 (3)	6,30 (2)	3,20 (2)
	$\bar{x}$	01:10,903	94,05	4,47	6,54	32,45	5,56	6,32	2,84
3. trénink	1	01:13,870	95,93 (4)	4,29 (4)	5,85 (2)	30,5 (2)	5,13 (3)	5,78 (2)	3,00 (5)
	2	01:11,950	93,56 (4)	4,01 (2)	6,18 (3)	32,3 (3)	5,47 (3)	6,21 (3)	2,65 (2)
	3	1:12:430	95,82 (4)	4,08 (2)	6,05 (2)	31,5 (2)	5,81 (3)	5,99 (2)	2,65 (5)
	4	01:10,830	94,61 (1)	4,45 (4)	6,48 (1)	34,1 (1)	5,41 (3)	6,68 (1)	2,83 (6)
	5	01:10,100	95,16 (1)	4,25 (2)	6,17 (2)	31,9 (3)	5,57 (3)	6,11 (3)	3,01 (6)
	6	01:10,830	95,46 (1)	4,16 (3)	6,35 (3)	33,1 (3)	5,68 (3)	6,41 (3)	3,07 (2)
	7	01:13,270	94,70 (1)	4,37 (2)	6,65 (3)	32,4 (5)	5,95 (3)	6,22 (5)	2,81 (6)
	$\bar{x}$	01:11,808	94,89	4,22	6,31	32,55	5,65	6,27	2,84

Z časů jednotlivých kol zaznamenaných v tabulkách je patrné, že jezdec byl a trénoval na okruhu poprvé a během prvních jízd okruh ze sedla konkrétního motocyklu stále poznával. Teprve na konci druhé měřené jízdy se dokázal přiblížit svým nejlepším výkonům. U elektrického motocyklu to jezdcům trvalo o poznání rychleji – cca pět odjetých kol oproti devíti s motocyklem spalovacím. Měřené jízdy se spalovacím motocyklem navíc následovaly až po jízdách s motocyklem elektrickým. Tuto skutečnost lze vysvětlit celkově snazší ovladatelností z hlediska ovládacích prvků u elektrického motocyklu.

Ačkoliv má ekletický motocykl celkově nižší výkon než motocykl spalovací, dosahoval na okruhu vyšších maximálních rychlostí. Tento fakt je vysvětlen následujícími grafy.



Obrázek 57: Grafy kanálu AccelerationG, polohy plynu a rychlosti v rámci jednoho měřeného kola na spalovacím motocyklu.

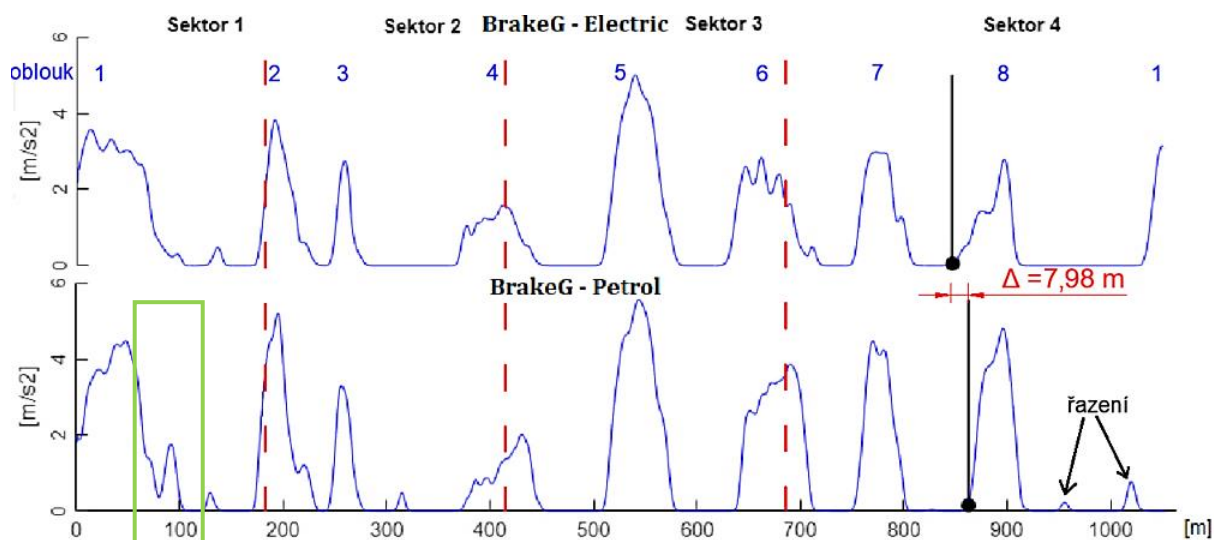
Graf na obrázku 57 zobrazuje tři kanály (AccelerationG, Poloha plynu a Rychlost) naměřené v rámci třetího kola třetího tréninku se spalovacím motocyklem. V jednotlivých grafech je také vyznačena poloha počátku cílové rovinky (černé svislé čáry), kde jezdec začíná prudce akcelarovat. U kanálů AccelerationG a Poloha plynu můžeme v červeně vyznačené oblasti pozorovat náhlé změny v průběhu signálů. Kanál rychlosti zde také neroste plynule, ale vyskytují se zde anomálie v podobě špiček. Všechny zmiňované okolnosti má na svědomí řazení vyšších rychlostních stupňů u spalovacího motocyklu, kdy vlivem stisknutí spojkové páky dochází k přerušení toku výkonu a motocykl na krátkou chvíli přestává akcelarovat. Jelikož elektrický motocykl disponuje přímým jednostupňovým převodem s dostatečným rozsahem kroutícího momentu (jezdec zde neřadí), dokáže na relativně krátkém úseku v podobě cílové rovinky okruhu (cca 200 metrů) akcelarovat daleko rychleji, a tím dosáhnout i vyšších maximálních rychlostí na jejím konci.

Z hlediska časů jednotlivých kol a jejich sektorů na trati stojí za pozornost kola a sektory, kde jezdec vybočuje mimo trend. Na obrázku 58 a 59 jsou zobrazené časy jednotlivých kol a sektorů v rámci třetího tréninku na obou motocyklech.

Sektor 1	Sektor 2	Sektor 3	Sektor 4	Total	Sektor 1	Sektor 2	Sektor 3	Sektor 4	Total
00:14.420	00:18.680	00:15.860	00:27.870	01:16.830	00:13.030	00:17.850	00:16.030	00:26.960	01:13.870
00:13.180	00:18.210	00:15.600	00:27.449	01:14.439	00:12.280	00:16.939	00:15.311	00:27.420	01:11.950
00:13.081	00:17.490	00:15.560	00:27.520	01:13.651	00:12.620	00:17.450	00:15.220	00:27.140	01:12.430
00:12.530	00:17.970	00:15.990	00:28.050	01:14.540	00:12.320	00:17.180	00:14.760	00:26.570	01:10.830
00:12.750	00:17.190	00:15.470	00:27.250	01:12.660	00:11.940	00:16.940	00:14.740	00:26.480	01:10.100
00:12.720	00:17.310	00:15.360	00:27.200	01:12.590	00:12.070	00:17.270	00:14.680	00:26.810	01:10.830
					00:12.580	00:17.300	00:14.480	00:28.910	01:13.270

Obrázek 58, 59: Časy sektorů a kol ve třetím tréninku – vlevo na elektrického motocyklu, vpravo na motocyklu spalovacím

Jestliže se nyní podíváme zpět do tabulky číslo 4 a 5, konkrétně na maximální hodnoty kanálů zrychlení, můžeme zde pozorovat celkově vyšší hodnoty u spalovacího motocyklu. Ačkoliv oba dva motocykly mají totožné brzdy, a dokonce i shodné přední a zadní odpružení, nabývají zde hodnoty kanálů BrakeG (záporné složky podélného zrychlení) a CornerG (absolutní hodnoty odstředivého zrychlení) značných rozdílů. Při rozhovoru po jízdách absolvovaných na elektrickém motocyklu bylo konstatováno, že se jezdci na elektrickém motocyklu hůře projíždí směrové oblouky. Tato skutečnost je bezesporu dána tím, že elektrický motocykl má celkově vyšší hmotnost, výše posazené těžiště a dále má delší rozvor. Směrové oblouky okruhu s malými poloměry nejsou pro závodní jízdu s tímto motocyklem ideální. V následujícím grafu jsou vykresleny průběhy kanálu BrakeG v jezdcem nejrychleji zajetých kolech s oběma motocykly – tedy v kole šestém pro elektrický a kole pátém pro spalovací motocykl.



Obrázek 60: Porovnání matematických kanálů BrakeG v nejrychleji zasetém kole na elektrickém a spalovacím motocyklu.

Na obrázku číslo 60 jsou na první pohled viditelné vyšší maximální hodnoty u průběhu kanálu BrakeG naměřeného na spalovacím motocyklu. Příčinou jsou jeho vhodnější hmotnostní charakteristiky. Dalším faktorem je však i to, že jezdec při brzdění může podřadit na nižší převodový stupeň a brzdám tak pomoci následným efektem v podobě brzdění motorem. Jestliže se blíže podíváme na průběh brzdného zpomalení v blízkosti směrového oblouku číslo 8, pozorujeme, že jezdec na elektrickém motocyklu začíná brzdit daleko dříve před vjezdem do oblouku než na motocyklu spalovacím – v tomto případě téměř o 8 metrů. I díky tomu má jezdec ve čtvrtém sektoru na spalovacím motocyklu čas o 0,72 s rychlejší (obrázek 59). Další příklad toho, že jezdec na spalovacím motocyklu brzdí před obloukem později a efektivněji můžeme sledovat na konci zobrazeného kola. Jezdec na elektrickém motocyklu na konci grafu začíná již brzdit do 1. směrového oblouku kola následujícího, zatímco u průběhu kanálu motocyklu spalovacího tento náznak brzdění viditelný není. Tento fakt potvrzuje také to, že jezdec na spalovacím motocyklu ve svých nejrychlejších kolech dosahuje maximální rychlosti až v 1. sektoru okruhu (tabulka 5).

Na obrázku číslo 60 můžeme také pozorovat chybu jezdce na spalovacím motocyklu v prvním směrovém oblouku (vyznačeno zelenou oblastí), kdy klesající průběh kanálu BrakeG v polovině oblouku přestává být hladký. Tento tvar signálu je způsoben tím, že jezdec uprostřed oblouku začal opakovaně brzdit. Jezdec by měl maxima brzdného zpomalení dosáhnout na vjezdu do směrového oblouku a následně brzdy postupně uvolňovat. Ve středu oblouku už by neměl opakovaně stlačovat brzdový pedál, ale naopak měl by začít akcelerovat.

### 7.1.2 Analýza naměřených dat z jízdy na elektrickém motocyklu

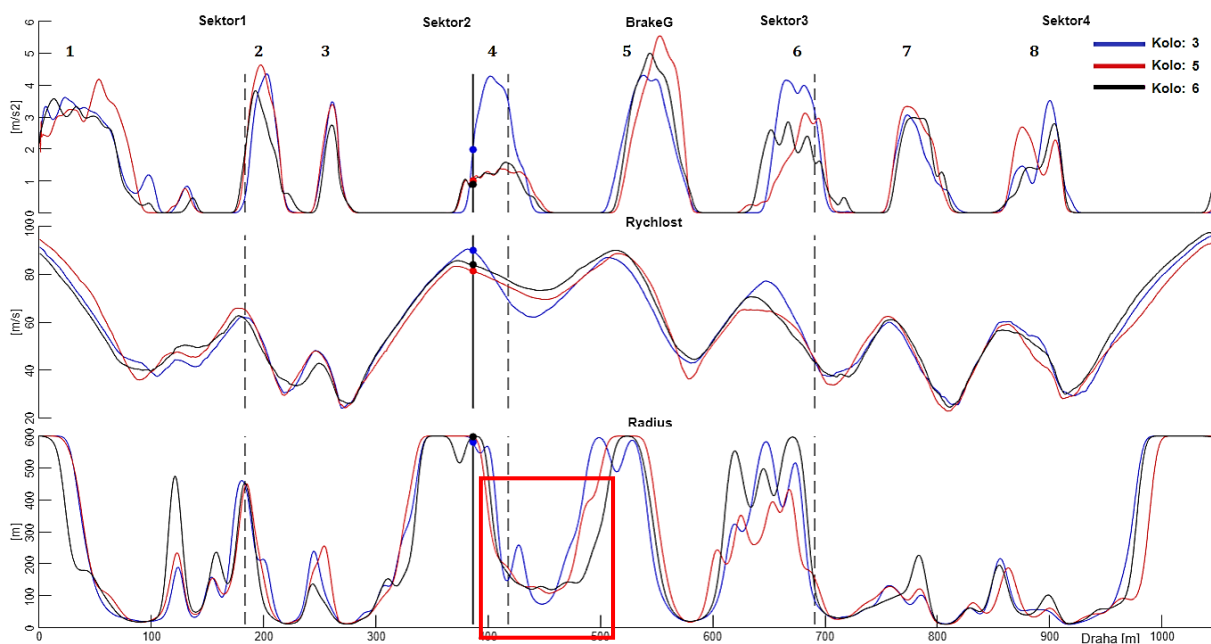
Při konzultaci po první měřené jízdě na elektrickém motocyklu bylo ze strany jezdce konstatováno, že mu pocitově připadá zadní odpružení na elektrickém motocyklu příliš „tvrdé“. Průběh zadního odpružení z prvního kola druhého tréninku je zobrazen v následujícím grafu.



Obrázek 61: Průběh kanálu zadního zdvihu kola v rámci prvního kola druhého tréninku.

Analýza průběhu odpružení je na každém okruhu důležitá. Ačkoliv si můžeme myslet, že přesně víme jak má průběh zdvihů vypadat a motocykl podle toho naladit, měli bychom všechny změny vždy konzultovat s jezdcem. Na obrázku číslo 61 je zobrazen průběh zdvihu zadního kola ve zmiňovaném kole. Maximální hodnoty zdvihu nepřesahují 64 mm, což je méně než polovina celkového zdvihu zadního kola elektrického motocyklu (celkový zdvih zadního kola je zde 130 mm). Minimální hodnota zdvihu je zároveň 33 mm – to znamená že na obou stranách v rámci celého zdvihu jsme v dostatečné vzdálenosti od dorazů. Jestliže si jezdec žádá změnu nastavení zadní části podvozku, můžeme mu zkusit vyhovět, například v podobě rychlé změny předpětí pružiny u zadní pružící a tlumící jednotky. Tato změna může mít pozitivní dopad v podobě vyšších hodnot příčného zrychlení, neboť se v oblouku zvětší rozvor a motocykl se stane stabilnějším. Zde je nutno dodat, že na správné fungování odpružení podvozku má vliv velké množství faktorů a změna jednoho parametru nemusí u tohoto komplexního systému vždy znamenat úspěch.

Jezdce během rozhovoru po třetí měřené jízdě na elektrickém motocyklu zajímaly časy z pátého a šestého kola, kdy měl dojem, že podal dobrý výkon. Subjektivní hodnocení se potvrdilo, jezdec opravdu během 5. a 6. kola třetího tréninku zajel svůj nejlepší výkon v podobě nejrychlejšího času. Jestliže si tato kola vybereme pro vzájemné porovnání a přidáme např. kolo třetí, můžeme sledovat širší souvislosti.

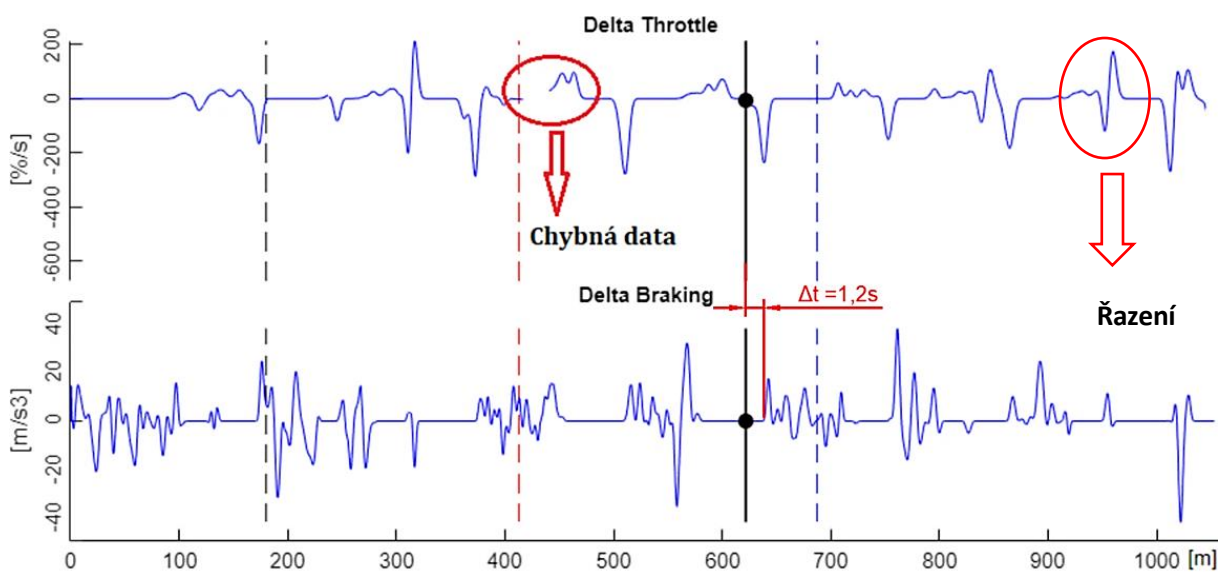


Obrázek 62: Grafy kanálů BrakeG, Rychlost a Radius naměřené v rámci třetího, pátého a šestého kola.

Na obrázku číslo 62 jsou zobrazené tři grafy ze třech odjetých kol, konkrétně kanály BrakeG, Rychlost a Radius (poloměr stopy jezdce ve směrovém oblouku). Podíváme-li se na čtvrtý směrový oblouk (označeno černým kurzorem), pozorujeme výrazně vyšší hodnoty u kanálu BrakeG (záporné složky podélného zrychlení) ze třetího kola. Z průběhu signálu kanálu rychlosti (druhý graf) si můžeme povšimnout, že jezdec udělal v tomto třetím kole chybu, a to když najížděl do čtvrtého směrového oblouku vyšší rychlostí (téměř o 10 km/h) než u ostatních kol. Následovalo daleko ostřejší brzdění a celkový propad rychlosti v oblouku (až o 12 km/h v porovnání s nejrychlejším šestým kolem). V celkovém důsledku tato chyba jezdce zpomalila v obou sektorech a v oblouku celkově rozhodila. Svědčí o tom průběh kanálu Radius ve třetím grafu (červená oblast).

### 7.1.3 Analýza naměřených dat z jízdy na spalovacím motocyklu

Při hlubší analýze dat třetí měřené jízdy spalovacího motocyklu byla zjištěna další zajímavá situace týkající se jízdního stylu jezdce. V následujících grafech jsou zobrazeny kanály Delta Throttle (časová derivace kanálu polohy plynové rukojeti) a Delta Braking (časová derivace kanálu BrakeG čili záporné složky podélného zrychlení).



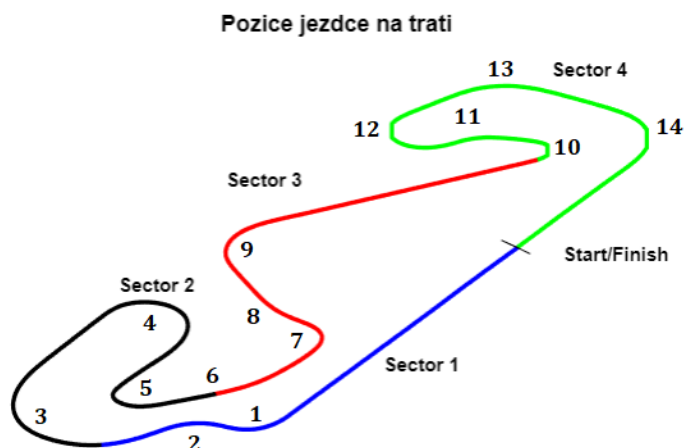
Obrázek 63: Graf matematických kanálů Delta Throttle a Delta Braking.

Na obrázku číslo 63 jsou zobrazena data ze čtvrtého kola. Z obou zobrazených matematických kanálů lze získat informace o rychlosti přidávání a ubírání na poloze plynové rukojeti, resp. stisku brzdových pedálů v případě druhého zmiňovaného kanálu. Černý posuvník na obrázku označuje moment, kdy jezdec přestává akcelarovat před blížícím se šestým směrovým obloukem (na obrázku 56 vyznačeno černým bodem). Toto je zřejmé i z dat kanálu Delta Throttle, kde pozorujeme rychlou změnu polohy plynové rukojeti směrem k úplnému uzavření škrtící klapky. Ve druhém zobrazeném signálu Delta Braking následuje po zmíněném ději změna průběhu signálu způsobená započítím brzdící fáze před průjezdem směrového oblouku. Tato fáze však začala pozdě, konkrétně 1,2 s po začátku uvolňování plynové rukojeti jak je patrné z obou grafů. Jestliže jezdec pouští před obloukem plynovou rukojeť, mělo by bezprostředně

poté následovat ostré brzdění. U profesionálních pilotů tato časová prodleva trvá pouze v řádech několika desetin sekundy. Časová prodleva nemá vliv pouze na výsledný čas daného sektoru či kola, ale také na odpružení. Jestliže jezdec pouští plynovou rukojeť, téměř okamžitě následuje reakce podvozku v podobě přesunutí zatížení ze zadního kola směrem ke kolu přednímu. Následkem toho je stlačení přední vidlice a lepší kontakt pneumatiky předního kola s vozovkou. Jezdec by měl této reakce předního odpružení využít a ještě při přenosu zatížení začít efektivně brzdit přední brzdou. Výsledkem bude dosažení vyšších hodnot brzdného zpomalení a hladší průběh zdvihu předního odpružení.

## 7.2 Analýza dat naměřených na okruhu Catalunya – Barcelona

V této podkapitole budou vyhodnocena data ze španělského okruhu Catalunya, jež byla naměřena na elektrickém motocyklu v rámci závodního víkendu seriálu Moto Engineering Cup, konkrétně ve třech třiceti minutových oknech určených pro trénink. Před samotnou analýzou naměřených dat byl okruh rozdělen na čtyři sektory barevně zobrazené na obrázku 64.



Obrázek 64: Okruh Catalunya rozdělený na čtyři sektory.

Pro základní porovnání výsledků z jednotlivých tréninků, byla vytvořena tabulka číslo 6 popisující výkonnostní charakteristiky jezdce a motocyklu na okruhu. Nejvyšší dosažené parametry jsou označeny zelenou barvou.

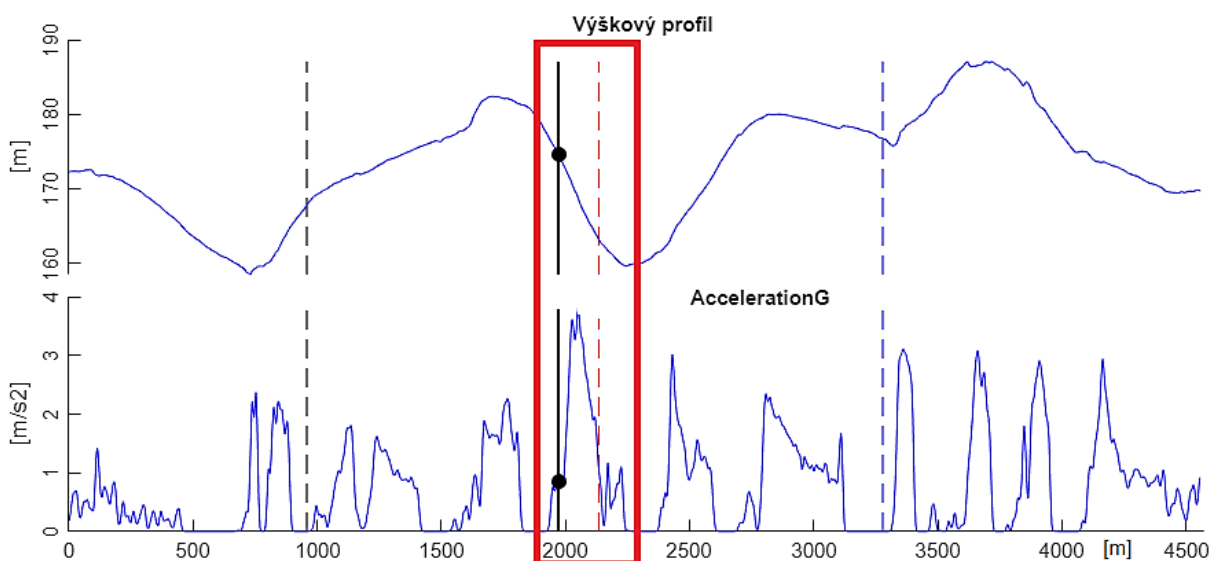
Tabulka 6: Vybrané maximální hodnoty parametrů naměřených na okruhu Catalunya.

	kolo	čas na kolo [min]	max. rychlost (sektor)[km/h]	max. accel. G (sektor)[m.s <sup>-2</sup> ]	max. total G (sektor)[m.s <sup>-2</sup> ]	max. náklon (oblouk)[°]	max. brakeG (oblouk) [m.s <sup>-2</sup> ]	max. corner G (oblouk)[m.s <sup>-2</sup> ]	max. trail braking (oblouk)[m.s <sup>-2</sup> ]	
1. trénink	1	03:01,170	148,13 (1)	3,84 (2)	6,99 (4)	34,5 (10)	4,75 (5)	6,78 (10)	2,85 (10)	
	2	02:57,400	150,54 (1)	3,93 (2)	7,05 (3)	35,0 (7)	5,35 (5)	6,81 (7)	3,28 (7)	
	3	03:00,570	147,53 (1)	3,67 (2)	6,75 (4)	34,5 (14)	5,29 (5)	6,71 (14)	2,81 (4)	
	4	02:56,670	149,42 (1)	3,65 (2)	6,95 (4)	34,9 (14)	5,01 (10)	6,81 (14)	2,61 (5)	
	5	02:57,599	146,99 (1)	3,28 (2)	6,91 (4)	34,3 (14)	4,68 (10)	6,71 (14)	2,71 (7)	
	6	03:03,331	135,68 (1)	3,34 (2)	7,18 (3)	35,6 (7)	4,91 (4)	7,08 (7)	2,35 (7)	
	7	03:01,469	130,93 (1)	2,87 (2)	6,89 (4)	34,5 (14)	4,75 (10)	6,78 (14)	2,47 (4)	
	8	03:38,440	Zájezd do boxu - jezdec celkově ubírá na výkonu, nepočítá se do statistiky.							
$\bar{x}$	02:59,744	143,52	3,46	6,96	34,80	5,00	6,82	2,71		
2. trénink	Nedostatečný počet odjetých kol, přerušeny trénink, vybitá baterie motocyklu.									
3. trénink	1	02:52,060	151,02 (1)	3,62 (2)	7,31 (2)	35,6 (7)	6,98 (4)	7,03 (7)	3,12 (5)	
	2	02:54,470	147,26 (1)	3,48 (2)	7,62 (4)	35,1 (14)	6,14 (4)	6,98 (14)	3,07 (5)	
	3	02:54,580	148,75 (1)	3,68 (2)	7,58 (4)	36,5 (14)	5,25 (4)	7,28 (14)	2,59 (7)	
	4	02:58,535	141,01 (1)	3,28 (2)	7,43 (3)	36,4 (7)	5,51 (4)	7,29 (7)	2,52 (14)	
	5	03:27,130	Zájezd do boxu - jezdec celkově ubírá na výkonu, nepočítá se do statistiky.							
$\bar{x}$	02:54,911	145,67	3,48	7,54	35,99	5,63	7,18	2,73		



Z hodnot v tabulce číslo 6 můžeme pozorovat, že narozdíl od okruhu ve Vysokém Mýtě se zde při intenzivních tréninkových jízdách začalo výrazně projevovat vybíjení motocyklu. V tabulce je to nejvíce patrné na maximálních dosažených rychlostech a časech jednotlivých kol. Jezdec při prvním tréninku dokázal projet okruh celkem 9x (aplikace nezapočítává neúplná kola – zde tedy první). Během tréninku jezdec ujel bezmála 42 kilometrů, což mu pomohlo v lepším poznání okruhu. Z časů jednotlivých kol můžeme pozorovat, že elektrický motocykl zvládne v závodním tempu ujet šest kol (se započítaným prvním neměřeným kolem je to cca 28 km), než začne pomalu ztrácet výkon. V tabulce je dále vidět jak jezdec postupně zlepšoval maximální hodnoty parametrů, přičemž těch nejlepších výkonů dosahoval ve třetím tréninku, který bude dále analyzován detailněji.

Jestliže nahlédneme do tabulky číslo 6, konkrétně na sloupec maximálních hodnot kanálu AccelerationG můžeme zde vidět, že všechny hodnoty byly naměřeny ve shodném – druhém sektoru okruhu. Po detailním studiu kanálu ve vytvořené aplikaci bylo zjištěno, že hodnoty byly naměřeny dokonce i ve stejném místě na trati – konkrétně na výjezdu z pátého směrového oblouku. Vysvětlení tohoto faktu nalezneme v následujících grafech.



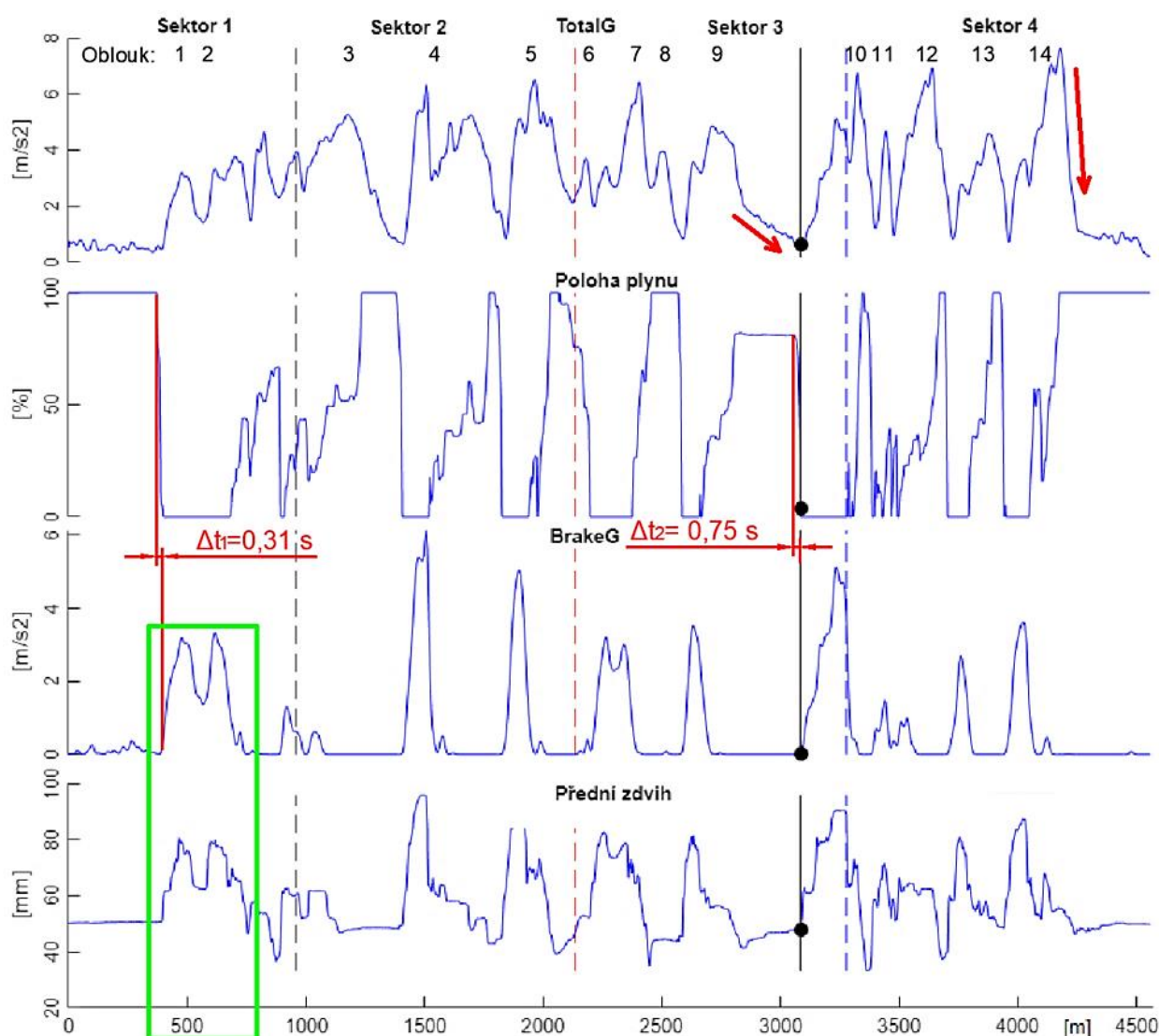
Obrázek 65: Grafy kanálů Výškový profil a Acceleration G naměřených na okruhu Catalunya.

Na obrázku číslo 65 jsou zobrazeny kanály AccelerationG a Výškový profil v rámci prvního kola třetího tréninku odjetého na okruhu. Z obrázku je již patrné, proč jezdec za pátým směrovým obloukem dosahoval nejvyšších hodnot podélného zrychlení. Trať se zde totiž místech nachází v klesání dosahujících hodnot až 5 %. Na následujícím obrázku jsou znázorněny časy jednotlivých sektorů a kol zajetých jezdcem v rámci třetího tréninku na okruhu Catalunya.

Sektor 1	Sektor 2	Sektor 3	Sektor 4	Total	Zobraz
00:31.450	00:46.330	00:41.820	00:52.460	02:52.060	Kolo 1
00:33.070	00:47.200	00:41.790	00:52.410	02:54.470	Kolo 2
00:32.119	00:48.051	00:42.000	00:52.410	02:54.580	Kolo 3
00:32.220	00:47.870	00:42.885	00:55.560	02:58.535	Kolo 4
00:35.540	00:48.920	00:45.350	01:17.320	03:27.130	Kolo 5

Obrázek 66: Časy sektorů a kol třetího tréninku na okruhu Catalunya.

Jestliže na obrázku číslo 66 porovnáme časy sektorů prvního celkově nejrychlejšího kola a kola druhého, můžeme pozorovat největší rozdíl v prvním sektoru. V následujících grafech exportovaných z aplikace Lion's Data Analyzer budou popsány některé chyby, kterých se jezdec v tomto druhém kole dopustil.



Obrázek 67: Grafy kanálů TotalG, Poloha plynu, BrakeG a Předního zdvihu naměřených ve druhém kole na okruhu Catalunya.

Na obrázku 67 jsou vykreslené průběhy kanálů TotalG (vektorový součet příčného a podélného zrychlení), Poloha plynu, BrakeG a Zdvih předního kola. V prvním sektoru (konkrétně v nájzdu do prvního oblouku) můžeme sledovat chybu ze strany jezdce (zeleně vyznačená oblast) v podobě

přerušovaného brzdění při nájezdu do prvního směrového oblouku. Jezdec zde neodhadl vzdálenost a začal brzdit příliš brzy před obloukem. Tato chyba ho stála rychlost a tím i čas, celkem 2,25 s. Zajímavý pohled je i na kanál zdvihu předního kola v těchto místech, jenž téměř dokonale opisuje tvar kanálu brzdného zpomalení. Je zcela zřejmé, že přední brzda motocyklu musí mít daleko vyšší účinnost než brzda zadní. Právě z důvodu přenosu reakce od brzd do odpružení je nutné, aby brzdění bylo prováděno plynule bez cyklického stlačování brzdového pedálu. Další chybou je zde již zmiňovaná prodleva mezi uvolněním plynové rukojeti a začátkem brzdění do desátého směrového oblouku. Je však vidět, že jezdec na této problematice zapracoval – viz prodleva před prvním směrovým obloukem ve druhém a třetím grafu.

Dále bude popsána situace na obrázku číslo 67, kdy jezdec najíždí do devátého směrového oblouku. V průběhu signálu matematického kanálu TotalG vidíme pozvolný klesající průběh v tomto úseku trati (označeno červenou šipkou). Jestliže má však průběh signálu u tohoto kanálu podobný tvar, znamená to, že jezdec nevyužívá plně potenciálu brzd či trakce svého stroje a takzvaně „dojíždí“ do směrového oblouku. Tento fakt potvrzuje i kanál plynové rukojeti, kdy jeho poloha v tomto úseku osciluje pouze okolo hodnot 80 %. Signál kanálu TotalG by měl klesnout k nule jen v případech, kdy jezdec přechází z akcelerace do brzdění na rovných úsecích okruhu nebo když dosáhne maximální rychlosti. Dále se hodnoty budou blížit nule, jestliže jezdec plynule přechází v šikanách z náklonu z jedné strany na druhou. Ve všech ostatních případech by se měl průběh grafu blížit maximálním hodnotám a mít strmý průběh tak, jako je tomu u směrového oblouku číslo 14.

### 7.3 Analýza jízdního stylu z fotografií a videozáznamů

Veškerá naměřená data je vhodné konzultovat přímo s jezdcem, ideálně ihned po proběhlém tréninku, dokud má vše čerstvě v paměti. Jestliže si naměřená data prohlédneme s časovým odstupem, je velkým přínosem, pokud byla daná jízda nahrávána na videokameru, a to buď přímo na motocyklu nebo byla pořízena videa a fotky od pozorovatelů na trati. Během studie těchto záznamů můžeme odhalit některé chyby jezdce, zvláště pokud nahrávky synchronizujeme s naměřenými daty.

Podíváme-li se zpětně do tabulek číslo 4, 5 a 6, konkrétně do sloupců s maximálními hodnotami náklonů a vykreslíme si jejich průběhy, zjistíme, že se jezdci jak s elektrickým, tak spalovacím motocyklem lépe klopí do levých směrových oblouků, což ostatně sám potvrdil i během rozhovoru po jízdách ve Vysokém Mýtě. Obecně platí, že čím většího úhlu náklonu dokáže jezdec v oblouku s motocyklem dosáhnout, tím více dokáže eliminovat účinky odstředivého zrychlení a následně projet směrový oblouk rychleji. Na výsledné úhly náklonů motocyklu v oblouku má vliv mnoho faktorů. Jedním z nich je i jízdní styl jezdce.

Na obrázku číslo 68 je fotka jezdce na elektrickém motocyklu v nájezdu do směrového oblouku číslo 14 na okruhu Catalunya, vpravo na obrázku 69 je zobrazena fotka profesionálního jezdce v plném náklonu na blíže nespecifikovaném závodním okruhu. Jestliže se nyní zaměříme na pravou ruku, konkrétně na úhel

svírající předloktí s říditky motocyklu u obou jezdců, vidíme na první pohled rozdíl. Je pravděpodobné, že jezdec na elektrickém motocyklu drží plynovou rukojeť příliš křečovitě a nedokáže ruku v lokti a zápěstí dostatečně uvolnit, což může mít za následek i celkově menší úhly náklonu. Podíváme-li se zpět na obrázek 41 z okruhu ve Vysokém Mýtě a také obrázek 43 stejného jezdce na spalovacím motocyklu můžeme pozorovat stejnou situaci. Motocykl jezdec řídí hlavně pohybem těla a popisovaný jev může být jeden z důvodů, proč se jezdci špatně klopí na pravou stranu, kde přidává plyn.



Obrázek 68, 69: Vlevo – jezdec na elektrickém motocyklu na okruhu Catalunya, vpravo – profesionální jezdec v oblouku.

Na další fotografii – obrázek 70 pozorujeme opět jezdce na okruhu Catalunya, konkrétně v desátém směrovém oblouku. Z fotografie a následně i videa je patrné, že jezdec dostatečně nevyužívá svou vnější nohu při jízdě v oblouku. Ve správném provedení by se měl o nohu zapřít a zároveň s její pomocí tlačít motocykl směrem k zemi do většího úhlu náklonu. Zapření se vnější nohou dále umožní více uvolnit ruce. Pokud jezdec zalehne a opře se hruď o kryt baterií (v případě spalovacího motocyklu nádrže) a posune svou hlavu více kupředu, zaujme podobnou pozici jako profesionální jezdec na obrázku 69. Popisované situace byly zkoumány i na videozáznamech z kamer umístěných na motocyklu (obrázek 7).



Obrázek 70, 71: Jezdec na elektrickém motocyklu v desátém směrovém oblouku na okruhu Catalunya.

## 8 Diskuze výsledků

Na základě analýzy dat z okruhů ve Vysokém Mýtě a v Barceloně bylo jezdcům doporučeno následující:

- I. Zaměřit se na brzdicí fázi před směrovými oblouky, konkrétně se snažit eliminovat časové prodlevy mezi koncem akcelerace a počátkem brzdění a naopak.
- II. Trénovat odhad vzdálenosti, kde by měla být započata brzdicí fáze před směrovým obloukem. K těmto účelům slouží tzv. „vzdálenostníky“ před každým směrovým obloukem. Jezdec by se jich měl naučit využívat v co největší míře.
- III. Snažit se naplno využívat potenciálu výkonu a brzd motocyklu.
- IV. Pokusit se o změnu jízdního stylu a pracovat na jeho zlepšení – například provádět speciální cvičení, nastudovat a inspirovat se jízdním stylem u profesionálních jezdců.

Na motocyklech by dále mohly být provedeny tyto změny:

- I. Po prvních trénincích na každém okruhu analyzovat a provést změny nastavení podvozku (po konzultaci s jezdcem).
- II. Úprava řízení motoru elektrického motocyklu, konkrétně snaha nastavit správně rekuperační brzdění simulující motorovou brzdu spalovacího motocyklu, jež pomáhá jezdcům při brzdění do oblouků.
- III. Snažit se více přizpůsobit posaz na motocyklu jezdcům – například širší rozevření řídítek, snížení či zvýšení sedla. Dále úprava polohy stupaček a řadicí páky přesně pro potřeby konkrétního jezdce.
- IV. Úprava polohy ovládacích prvků z důvodu nižšího zatěžování rukou jezdce (poloha brzdové a spojkové páky).

Elektrický motocykl je specifický stroj. Jízdní styl a ovládání je odlišné od konvenčních spalovacích motocyklů. Jestliže dále přihlédneme k faktu, že jezdec nemá se závoděním se silničními motocykly na okruhu mnoho zkušeností, musíme konstatovat, že podal opravdu výborné výkony. Elitní jezdci svůj styl jízdy trénují dlouhé roky. Teprve po odjetí tisíců kilometrů na okruhu v tréninku začínají závodit. Jezdec trénoval na obou tratích poprvé a je téměř jisté, že své výkony do budoucna zlepší.

## Závěr

Cílem této práce bylo zvýšení efektivity tréninku jezdců a usnadnění při hledání ideálních parametrů pro nastavení jednotlivých komponent podvozku motocyklu. Navržený systém pro zaznamenávání dat jízdní dynamiky a vyvinutý software pro jejich analýzu pomáhá překonat omezení plynoucí z nedostatku tréninku. Zvyšuje tak konkurenceschopnost univerzitního týmu CTU Lions napříč celým startovním polem soutěže MotoStudent. Pomocí informací obsažených v datech je jezdcům a mechanikům týmu poskytována zpětná vazba, která ve výsledku pomáhá zlepšovat výkony závodníka v podobě časů jednotlivých kol a finálního umístění.

V první části práce je uvedena studie systémů používaných pro záznam dat silničních závodních motocyklů. Kapitola také pojednává o měřených veličinách vhodných pro komplexní analýzu jízdní dynamiky jednostopých vozidel, přičemž pochopení této problematiky tvoří podklad pro návrh vlastního systému. Na základě této rešerše byla zvolena technologie pro systém zaznamenávající data na principu příjmu signálu ze satelitních navigačních systémů. Dále byly detailně popsány jednotlivé kanály a matematické kanály vhodné pro práci se zvoleným typem technologie záznamové jednotky.

V další kapitole byla představena měřicí technika používaná profesionálními závodními týmy, včetně praktické ukázky komerčně dodávané měřicí sestavy. Byly zde zmíněny i možnosti nastavení vzorkovací frekvence pro jednotlivé měřené kanály. Získávání informací z naměřených dat je však složité, jestliže nemáme vhodný software, který nám je umožní správně a rychle analyzovat. Proto byly v následující kapitole uvedeny základní softwarové funkce, jež by měla každá aplikace pro analýzu dat v oblasti motorsportu obsahovat.

Po splnění cílů teoretické části práce, byl za účelem vytvoření softwaru pro efektivní analýzu naměřených dat navržen experiment v podobě měřených jízd v reálných podmínkách na závodním okruhu. Experiment zahrnoval návrh architektury vlastního systému zaznamenávající potřebné kanály. Architektura systému je tvořena několika dostupnými měřicími zařízeními integrovanými do jednoho celku pomocí skriptu naprogramovaného v jazyce Python. Jelikož je tento systém modulární, lze ho i přes značné konstrukční rozdíly implementovat na všechny motocykly vyvinuté fakultním týmem CTU Lions. Ve čtvrté kapitole bylo popsáno i osazení motocyklů měřicí technikou, kdy většina přípravků pro uchycení senzorů byla vytvořena za použití technologie 3D tisku.

Navržený systém pro sběr jízdních dat byl ověřen v rámci pilotního měření na okruhu Autodrom Vysoké Mýto. Test byl úspěšný a naměřená data tvořila základní vstup pro vytvoření aplikace Lion's Data Analyzer, tedy aplikace pro analýzu naměřených dat. Podrobný popis vývoje aplikace a problémy s ním spojené jsou obsahem šesté kapitoly práce. Výhoda navržené aplikace spočívá mimo jiné i v tom, že je

software otevřený a může být pro potřeby týmu do budoucna rozšiřován a zdokonalován (např. přidáváním okruhů a senzorů).

Ze zkušeností z pilotního experimentu bylo jasné, že pro chystané druhé měření na okruhu Catalunya ve španělské Barceloně musí měřicí technika fungovat precizně, jelikož na potřebná měření máme jen tři půlhodinové pokusy. Při analýze či samotném tréninku se totiž mohou objevit okolnosti, které mohou cenná data znehodnotit – ze zkušeností například ztráta signálu GPS, přerušovaný trénink nebo chyba jezdce a následný pád. Navržený systém sběru dat fungoval bezchybně a naměřená data z obou experimentů mohla být v sedmé kapitole vyhodnocena.

Analýza naměřených dat z obou experimentů byla spojena s ukázkou jednotlivých funkcí aplikace Lion's Data Analyzer. Jako první bylo provedeno porovnání jízdy na elektrickém a spalovacím motocyklu v rámci jízd na okruhu ve Vysokém Mýtě. Vyhodnocením byly odhaleny některé konstrukční odlišnosti obou motocyklů, jež se výrazně podílí na ovladatelnosti a jízdním stylu jezdce. Zcela zásadním rozdílem se ukázaly být odlišné geometrické a hmotnostní charakteristiky porovnávaných strojů – zejména poloha těžiště, hmotnost nebo rozvor. Následovala analýza konkrétních situací a chyb jezdce na obou zmiňovaných okruzích.

Jednou z chyb, které se jezdec často dopouštěl, bylo opakované či pozdní stisknutí brzdové páčky před nebo přímo ve směrovém oblouku. Tato situace byla způsobena nesprávným odhadem vzdálenosti blížícího se nájezdu do směrového oblouku. Chybu je možno s jezdcem po absolvovaném tréninku konzultovat a pomocí vytvořené aplikace s grafickým rozhraním mu rychle předat informaci, kde měla být brzdící fáze započata. Na trati se před směrovými oblouky nachází vzdálenostníky, jež usnadňují orientaci a v tomto ohledu i možnost posunout jezdcovy hranice při využívání brzd a trakce svého motocyklu.

Diplomová práce splnila svůj cíl navržením a realizací systému pro zaznamenávání a vyhodnocování dat jízdní dynamiky silničních motocyklů. Pomocí vytvořeného softwaru byl definován potenciál ke zlepšení výsledků. V následné diskuzi byla shrnuta doporučení směrem k jezdci, vycházející z konkrétních situací a chyb zaznamenaných v naměřených datech nebo na videonahrávkách a fotografiích. Diplomová práce je podkladem pro vytvoření efektivnějších podmínek pro výcvik jezdců a vývoj nových prototypů motocyklů závodního týmu CTU Lions, na kterém se autor diplomové práce aktivně podílí jako konstruktér.

Do budoucna bude záznamový systém i software na vyhodnocování dat nadále zdokonalován. Jedna z prvních inovací bude spočívat v propojení naměřených dat s videozáznamy z kamer umístěných během jízdy na motocyklu. Dále bude vyvíjen a testován nový algoritmus pro sofistikovanější filtraci naměřených dat. Celý systém bude využíván v průběhu nadcházející sezóny soutěže MotoStudent s finálovým závodem na jaře 2021 ve Španělsku na okruhu Motorland Aragon.

## Použitá literatura

- [1] MCBEATH, Simon. *Competition car data logging*. 2nd ed. Newbury Park, Calif.: Haynes North America, 2008. ISBN 978-184-4255-658.
- [2] TREVITT, Andrew. *Data Power: Improve your riding by using data acquisition* [online]. b.r. [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.cycleworld.com/sport-rider/data-power/>
- [3] SEGERS, Jorge. *Analysis techniques for racecar data acquisition*. USA: SAE International, 2008. ISBN 978-0-7680-1655-0.
- [4] PŘIBYL, Pavel a Miroslav SVÍTEK. *Inteligentní dopravní systémy*. Praha: BEN - technická literatura, 2001. ISBN 80-730-0029-6.
- [5] *Data MC - data for motorcycles* [online]. b.r. [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://www.datamc.org/>
- [6] *Aim products* [online]. b.r. [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: <https://www.aim-sportline.com/en/products-bike.htm>
- [7] *The Global Positioning System* [online]. U.S. government, b.r. [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <https://www.gps.gov/>
- [8] ČÁBELKA, Miroslav. Úvod do GPS. *CITT Praha Akademie kosmických technologií oblast Galileo, GMES* [online]. b.r., , 74 [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <https://www.natur.cuni.cz/geografie/geoinformatika-kartografie/ke-stazeni/vyuka/gps/skriptum-uvod-do-gps>
- [9] *Photo GP* [online]. 2017 [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://photo.gp/>
- [10] SPALDING, Neil. *MotoGP Technology*. Second edition. Haynes Publishing, 2010. ISBN 9781844258345.
- [11] CLYNCH, James R. *Coordinates* [online]. Naval Postgraduate School, 2002, , 15 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://www.oc.nps.edu/oc2902w/coord/coord.pdf>
- [12] KLEDER, Michael. *Covert lat, lon, alt to ECEF Cartesian*. MATLAB Central File Exchange, 2020. Dostupné také z: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/7942-covert-lat-lon-alt-to-ecef-cartesian>
- [13] *Packtpub: Mapping, GIS, and GPS* [online]. b.r. [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: [https://subscription.packtpub.com/book/application\\_development/9781788830409/10/ch10lvl1sec68/mapping-gis-and-gps](https://subscription.packtpub.com/book/application_development/9781788830409/10/ch10lvl1sec68/mapping-gis-and-gps)
- [14] *Hackday.io: Lean angle calculation method* [online]. 2016 [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://hackaday.io/project/13438-motorcycle-lean-angle-video-overlay/log/45115-lean-angle-calculation-method>
- [15] TREVITT, Andrew. *MotoGP Extreme Lean | Ask the Geek: The differences in lean angle between Moto3, Moto2, and MotoGP* [online]. 2016 [cit. 2020-04-14].
- [16] TREVITT, Andrew. *Riding Skills Series: Trail Braking: The difficult combination of braking and turning* [online]. b.r. [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.cycleworld.com/sport-rider/riding-skills-series-trail-braking/>
- [17] IENATSCH, Nick. *Trail-Braking's True Purpose: Fear and Lean Angle* [online]. 2020 [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.cycleworld.com/story/blogs/ienatsch-tuesday/trail-braking-true-purpose/>
- [18] TREVITT, Andrew. *Sportbike suspension tuning: how to improve your motorcycle's handling and performance*. Phoenix, AZ: David Bull Pub., 2008. ISBN 978-189-3618-459.



- [19] Electric Super Bikes. In: *Inhabitat* [online]. b.r. [cit. 2018-08-11]. Dostupné z: <https://inhabitat.com/mission-motorcycles-rolls-out-super-fast-r-and-rs-electric-super-bikes/>
- [20] ROLLINGER, Mirek. *Datalogging – záznam dat z jízdy* [online]. In: . b.r. [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.motorkari.cz/clanky/jak-na-to/datalogging-zaznam-dat-z-jizdy-26949.html?>
- [21] HARGREAVES, Wayne. *Foundation Degree in Autosport Engineering and Technology: Data logging strategies*. School of Engineering & Computing, 2016. Blackpool and The Fylde College.
- [22] *MTi-G: MINIATURE AHRS WITH INTEGRATED GPS* [online]. b.r. [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://www.spectratech.gr/Web/Xsens/pdf/MTi-G.pdf>
- [23] PŘIKRYL, Jan a Bohumil KOVÁŘ. *Modelování systémů a procesů: Učební text. Ústav aplikované matematiky ČVUT FD*. Praha, 2015.
- [24] *Cycle world: G-Force Plot and Motorcycle Chains* [online]. 2009 [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <https://www.cycleworld.com/sport-rider/g-force-plot-and-motorcycle-chains-ask-geek/>
- [25] *GPMF Introduction: Parser for GPMF formatted telemetry data used within GoProcameras*. [online]. b.r. [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://gopro.github.io/gpmf-parser/>
- [26] *Circuit Catalunya* [online]. b.r. [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <https://www.circuitcat.com/es/>
- [27] *Geeks for geeks: Equation of circle when three points* [online]. b.r. [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.geeksforgeeks.org/equation-of-circle-when-three-points-on-the-circle-are-given/?fbclid=IwAR0gsNoQmaYAjJ39Vo3iZ0j5VVx1GITVQcl9c41GWvHH35QaWZoInbleOQU>
- [28] MIRONOVOVA, Martina a Hynek HAVLIŠ. *Calculation of GDOP Coefficient* [online]. b.r., , 13 [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <https://stc.fs.cvut.cz/history/2011/sbornik/papers/pdf/1100016-1.pdf>

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Inkrementální přírůstky dráhy pro určení polohy za pomoci senzorů na motocyklu [4].	10
Obrázek 2: Vpravo je „datalogger“ v podobě palubní jednotky zahrnující systém pro předzpracování dat z externích senzorů, vlevo tzv. „maják“ pracující v infračervené oblasti sloužící pro jednoznačné určení polohy na trati [6].	10
Obrázek 3: teoretické určování pozice za pomoci tří satelitů GNSS [7]	11
Obrázek 4: Pneumatika typu slick po tréninku závodního týmu Yamaha [9].	12
Obrázek 5: Porovnání metod měření rychlosti [5].	13
Obrázek 6: porovnání zeměpisných souřadnic a kartézského souřadnicového systému ECEF [13].	14
Obrázek 7: Jezdec projíždějící směrovým obloukem. [5].	15
Obrázek 8: Porovnání bočních zrychlení naměřených akcelerometrem (červená) a vypočítaných na základě GPS dat (modrá).	16
Obrázek 9: Příklad zobrazení mat. kanálu Trail Braking, data byla pořízena v rámci jednoho kola na okruhu Catalunya.	18
Obrázek 10: geometrické charakteristiky podvozku motocyklu s vyznačeným úhlem sklonu přední vidlice [19]	19
Obrázek 11: Graf s matematickým kanálem squat. Data byla naměřena na okruhu Catalunya.	20
Obrázek 12: Vlevo – multifunkční displej, vpravo – záznamová jednotka, tzv. „datalogger“.	21
Obrázek 13: Nastavení vzorkovací frekvence pro jednotlivé kanály – měření dat u závodní formule Renault FR2000 [21].	22
Obrázek 14, 15, 16: Lineární potenciometry a jejich možné umístění na podvozek motocyklu [5] [6].	23
Obrázek 17: Jednoosý akcelerometr s vyznačeným kladným a záporným směrem orientace [6].	24
Obrázek 18: Příklad správně zvoleného nastavení filtru.	27
Obrázek 19: Příklad přílišného vyhlazení dat.	27
Obrázek 20,21: Trakční kružnice. Modrý zaznamenané body jsou ukázkou zrychlení, působící na motocykl v době měření [24].	29
Obrázek 22: Zobrazování kanálů pod sebou, včetně informace o poloze jezdce na trati v aplikaci Race Studio [6].	30
Obrázek 23: Špatně zobrazený a přeplněný graf, kdy osa Y odpovídá pouze jednomu zobrazenému kanálu [5].	30
Obrázek 24: Porovnávání rychlosti v rámci dvou odjetých kol v závislosti na čase [5].	31
Obrázek 25: Schéma architektury systému pro záznam dat navržený pro experiment.	32
Obrázek 26: Orientace jednotky Xsens [22].	33
Obrázek 27: Tříkanálová měřicí jednotka Krypton 3XSTG se sloty pro snímače, baterií a konektory pro připojení k PC.	34
Obrázek 28: Vlevo – převodník Ixaat V2, vpravo – controller elektrického motocyklu Sevcon Gen4.	34
Obrázek 29: Orientace kamery GoPro [25].	34
Obrázek 30: Vlevo – záznamové PC, vpravo – tisk potřebných komponentů na 3D tiskárně Průša.	35
Obrázek 31: Ukáзка naměřených dat.	35
Obrázek 32: Potenciometry a vytištěné přípravky pro jejich uchycení na podvozek motocyklu.	35
Obrázek 33: Osazení podvozku elektrického motocyklu měřicí technikou.	36
Obrázek 34: Jezdec při měřeném tréninku na okruhu Catalunya.	37
Obrázek 35: Lankový potenciometr měřící polohu plynové rukojeti.	38
Obrázek 36: Lankovým potenciometrem byla osazena i přední vidlice motocyklu.	38
Obrázek 37: Schéma okruhu Autodrom Vysoké Mýto.	39
Obrázek 38: Filtrované signály akcelerometrů z jednotky Xsens a kamery GoPro s nastaveným shodným počátečním časem.	41
Obrázek 39: Záznam polohy – výpadek signálu GPS.	41
Obrázek 40,41: vlevo - el. motocykl připojený k nabíječce před zahájením měření, vpravo – jezdec s batohem na trati.	42

Obrázek 42,43: Jezdec s benzinovým motocyklem osazeným měřicí technikou. ....	43
Obrázek 44: Schéma okruhu Catalunya [26] .....	43
Obrázek 45: Osazování elektrického motocyklu měřicí technikou. ....	44
Obrázek 46: Nabíjení a kalibrace potenciometrů elektrického motocyklu – příprava na druhý trénink. ....	45
Obrázek 47: Jezdci týmu CTU Lions čekající na zahájení třetího tréninku na okruhu Catalunya. ....	45
Obrázek 48: První karta programu – vizualizace naměřených dat v jednom kole. ....	47
Obrázek 49: Druhá karta programu s vypočítanými časy sektorů a kol na okruhu ve Vysokém Mýtě. ...	48
Obrázek 50: Třetí karta programu umožňující porovnávání kanálů z vícero měřených kol.....	48
Obrázek 51: Detailní pohled na naměřená a vyhlazená GPS data. ....	50
Obrázek 52: Interpretace pseudokódu pro namapování dat na referenční dráhu. ....	51
Obrázek 53: Uživatelské rozhraní aplikace s tlačítkem Importovat data .....	53
Obrázek 54: Ukázka tzv. „callbacku“ – tedy odkazování se na určité funkce po stisknutí tlačítka. ....	53
Obrázek 55: GPS data zaznamenaná na okruhu Catalunya, vlevo – GPS data zaznamenaná kamerou GoPro zobrazující přesnou stopu jezdce na trati, vpravo GPS data zaznamenaná jednotou Xsens vykazující značnou chybu.....	54
Obrázek 56: Rozdělení okruhu ve Vysokém Mýtě na sektory a očíslování jednotlivých oblouků. ....	56
Obrázek 57: Grafy kanálu AccelerationG, Poloha plynu a rychlosti v rámci jednoho kola na okruhu.....	57
Obrázek 58: Časy sektorů a kol ve třetím tréninku – vlevo na elektrického motocyklu, vpravo na motocyklu spalovacím .....	58
Obrázek 59: Porovnání matematických kanálů BrakeG v nejrychleji zjetém kole na elektrickém a spalovacím motocyklu. ....	59
Obrázek 60: Průběh kanálu zadního zdvihu kola v rámci prvního kola druhého tréninku.....	60
Obrázek 61: Grafy kanálů BrakeG, Rychlost a Radius naměřené v rámci třetího kola. ....	60
Obrázek 62: Graf matematických kanálů Delta Trottle a Delta Braking. ....	61
Obrázek 63: Okruh Catalunya rozdělený na čtyři sektory. ....	62
Obrázek 64: Okruh Catalunya rozdělený na čtyři sektory. ....	63
Obrázek 65: Časy sektorů a kol třetího tréninku na okruhu Catalunya. ....	64
Obrázek 66: Grafy kanálů TotalG, Poloha plynu, BrakeG a Přehího zdvihu naměřených ve druhém kole na okruhu Catalunya. ....	64
Obrázek 67, 68: Vlevo – jezdec na elektrickém motocyklu na okruhu Catalunya, vpravo – profesionální jezdec v oblouku.....	66
Obrázek 69, 70: Jezdec na elektrickém motocyklu v desátém oblouku na okruhu Catalunya .....	66

Všechny obrázky, které nemají uvedený zdroj, byly vytvořeny autorem práce.

## Sezam tabulek

Tabulka 1: Sestava měřicí techniky od společnosti AIM [6]. ....	25
Tabulka 2: Základní informace o měřených motocyklech. ....	37
Tabulka 3: GDOP koeficienty popisující přesnost polohy získané pomocí GPS [28].....	55
Tabulka 4: Vybrané parametry naměřené na elektrickém motocyklu. ....	56
Tabulka 5: Vybrané parametry naměřené na spalovacím motocyklu. ....	57
Tabulka 6: Vybrané maximální hodnoty parametrů naměřených na okruhu Catalunya. ....	62

## Sezam příloh

LionsDataAnalyzerInstaller_web.exe	instalační soubor aplikace Lion's Data Analyzer
DATA_Vysoke_Myto_2_Trenink_Petrol.csv	data z okruhu Vysoké Mýto – třetí trénink
DATA_Barcelona_3_Trenink_Electric.csv	data z okruhu Catalunya – třetí trénink
readme -instalace.txt	nápověda k instalaci