ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

Ústav soudního znalectví v dopravě

Měření dynamiky jízdy systému řidič-motocykl

Drive Dynamics Measurements of System Driver - Motorcycle

Diplomová práce

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích

Studijní obor: Dopravní systémy a technika

Vedoucí práce: doc. Ing. Drahomír Schmidt, Ph.D.

Bc. Martin KOBOSIL

Praha 2016

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta dopravní
d ě k a n
Konviktská 20, 110 00 Praha 1

K622 ..... Ústav soudního znalectví v dopravě

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Martin Kobosil

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – DS – Dopravní systémy a technika

Název tématu (česky): **Měření dynamiky jízdy systému řidič-motocykl**

Název tématu (anglicky): Drive Dynamics Measurements of System Driver - Motorcycle

Zásady pro vypracování

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

- Kategorizace motocyklu
- Specifické vlastnosti motocyklu
- Problematika měření jízdy motocyklu
- Problematika zpracování dat
- Problematika umístění snímaču
- Experimet - Měření jízdní dynamiky motocyklů různých kategorii

Rozsah grafických prací: určí vedoucí práce

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

Seznam odborné literatury:

VLK, František. Teorie a konstrukce motocyklů. Brno: František Vlk, 2004. ISBN 80- 239-1601-7

KASANICKÝ, Gustáv. Analýza nehod jednostopých vozidiel. 1. vyd. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2000, 450 s. ISBN 80-710-0598-3.

VLK, František. Dynamika motorových vozidel /. vyd. 2. Brno: Prof.Ing.František Vlk,DrSc., nakladatelství a

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Drahomír Schmidt, Ph.D.**

Datum zadání diplomové práce: **31. července 2015**
(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: **1. června 2016**
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

L. S.

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE Fakulta dopravní -3-

doc. Ing. Tomáš Mičunek, Ph.D.
vedoucí
Ústavu soudního znalectví v dopravě

prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek, dr. h. c.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Martin Kobosil
jméno a podpis studenta

V Praze dne ..... 31. července 2015

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval především panu doc. Ing. Drahomíru Schmidtovi, Ph.D. za odborné vedení diplomové práce. Za cenné rady a čas věnovaný konzultacím bych chtěl poděkovat Ing. Alžbětě Lenkové a Ing. Lubošovi Nouzovskému. Také bych rád poděkoval všem ostatním členům Ústavu soudního znalectví v dopravě za podporu a poskytnutí zázemí, všem testovacím jezdcům, za pomoc při měření experimentu a mé přítelkyni za podporu a lásku. V neposlední řadě je mou milou povinností poděkovat rodičům za morální a materiální podporu, které se mi dostávalo po celou dobu studia.

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS16/255/OHK2/3T/16.

Prohlášení

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

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).

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

V Praze dne 24. května 2016 .....

podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

Ústav soudního znalectví v dopravě

Měření dynamiky jízdy systému řidič-motocykl

Diplomová práce

Bc. Martin KOBOSIL
Praha 2016

Klíčová slova:

Jednostopá motorová vozidla, motocykl, dynamika jízdy motocyklu, bezpečnost motocyklu, měřicí technika pro dynamiku jízdy, zpracování dat, měření dynamiky jízdy motocyklu.

Abstrakt:

Diplomová práce se věnuje měření dynamiky jízdy systému řidič – motocykl, a to jak z pohledu techniky měření, tak z pohledu mechaniky pohybu jednostopých vozidel. Na základě experimentu s motocykly a jezdci různých kategorií hledá a popisuje vztahy mezi řidičem, typem motocyklu a jízdními vlastnostmi vozidla. Část práce se věnuje kategorizaci a specifikám motocyklů včetně rozboru statistik nehodovosti. Dále se věnuje problematice a principům měření jízdy motocyklu a to včetně popisu senzoriky, umístění snímačů a zpracování dat.

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

Faculty of Transportation Sciences

Department of Forensic Experts in Transportation

Drive Dynamics Measurements of System Driver - Motorcycle

Master thesis

Bc. Martin KOBOSIL

Prague 2016

Key words:

Single track vehicles, motorcycle, mechanics of motorcycle, motorcyclist safety, senzors for motocycle handling, data processing, drive dynamics measurements of motorcycles.

Abstract:

My diploma thesis deals with drive dynamics measurements of system driver – motorcycle, both in terms of measurements technique and mechanics of drive vehicle movement. Describes the relations between the driver, type of motorbike and handling on the basis of the experiment with motorbikes and riders from different categories. The part of the work is dedicated to categorization and specifics of motorbikes includes statistics analysis of accident frequency of motorcyclist. Next part is focused on issues and principle of drive dynamics measurements includes description and location of senzors and data processing.

Obsah

Seznam použitých zkratek 9
Seznam použitých veličin a jejich jednotek 9
Úvod 10
1. Kategorizace jednostopých motorových vozidel 12
1.1. Moped a motokolo 12
1.2. Skútr 12
1.3. Motocykl 13
2. Specifika jednostopých motorových vozidel 16
2.1. Dynamika pohybu motocyklu 16
2.1.1. Ovladatelnost a stabilita motocyklu 16
2.1.2. Pohyb motocyklu 19
2.2. Bezpečnost motocyklu 23
2.2.1. Prvky pasivní bezpečnosti motocyklu 23
2.2.2. Prvky aktivní bezpečnosti motocyklu 24
2.3. Statistiky nehodovosti 25
2.3.1. Základní ukazatele 25
2.3.2. Závažnost DN a ostatní ukazatele 27
3. Problematika měření jízdy motocyklu 30
3.1. Měření pomocí akcelerometru 30
3.2. Využití GNSS pro určení polohy 31
3.2.1. Struktura systému 31
3.2.2. Výpočet polohy 32
3.2.3. Metoda měření polohy 33
3.3. Gyroskopický senzor úhlové rychlosti 34
3.4. Měřící technika – Xsens MTi-G 35
3.4.1. Technické specifikace 35
3.4.2. Kalmanův filtr 37
3.4.3. Výstupy senzoru 38
3.5. Software – MT manager 41

4. Měření a zpracování dat 43
4.1. Umístění snímače 43
4.1.1. Experiment umístění snímačů 44
4.1.2. Porovnání výsledků experimentu 45
4.2. Zpracování naměřených dat 47
4.2.1. Transformace souřadnic 48
4.2.2. Filtrace dat 49
5. Měření dynamiky jízdy motocyklů 51
5.1. Lokalita 51
5.2. Podmínky experimentu 52
5.3. Jezdci a jejich motocykly 52
5.4. Analýza naměřených dat 58
5.4.1. Časy jednotlivých kol 58
5.4.2. Průběh jednotlivých kol 59
5.4.3. Naměřené hodnoty 63
5.5. Závěry z měření 72
Závěr 73
Použité zdroje 76
Seznam tabulek 79
Seznam grafů 79
Seznam obrázků 80

Seznam použitých zkratek

JMV	Jednostopé motorové vozidlo
EHK - OSN	Evropská hospodářská komise Spojených národů
CRV	Centrální registr vozidel
GNSS	Globální navigační satelitní systém
MEMS	Mikro-elektro-mechanická součástka
IMU	Inerciální měřící jednotka
WGS-84	Světová geografický systém 1984
CC	Cross country – motocyklové offroad závody

Seznam použitých veličin a jejich jednotek

Značka	*Jednotka*	*Veličina*
$a_{x,y,z}$	[m/s^2]	okamžité zrychlení ve směru osy X, Y, Z
F	[N]	síla
G	[N]	tíha soustavy
g	[m/s^2]	gravitační zrychlení
h, l, d, x, H, P, B	[m]	rozměry
J	[kg.m.s^2]	moment setrvačnosti rotujících hmot
m	[kg]	hmotnost
α, β	[°]	úhel
M_z	[kg.m]	gyroskopický moment
ω_y	[rad/s]	úhlová rychlost
R	[m]	poloměr křivosti trajektorie
s	[m]	vzdálenost
t	[s]	čas
v	[m/s]	okamžitá rychlost
S	[m^2]	plocha
ρ	[kg/m^3]	hustota
μ	[-]	součinitel přilnavosti
c_x	[-]	součinitel odporu
ϕ	[°]	úhel klopení
Θ	[°]	úhel klonění
ψ	[°]	úhel stáčení
D^i_k	[m]	vzdálenost přijímače *k* od satelitu *i*
c	[m/s]	rychlost světla ve vakuu
x_i, y_i, z_i,	[m]	souřadnice
w_t	[-]	šum

Úvod

V souladu s celosvětovým trendem i v České republice roste zájem o jednostopá motorová vozidla. Motocykly se staly nedílnou součástí silničního provozu. Současné stroje se díky technickému vývoji mohou pyšnit špičkovou úrovní jízdní dynamiky, zpracováním a spolehlivostí.

Jízda na motocyklu, díky charakteru jízdy, poskytuje zážitek, který je s jízdou ve dvoustopém vozidle jen těžko srovnatelný. Motocykly jsou vyhledávány nejen jako dopravní prostředek pro přemístění, ale zejména jako prostředek pro rekreační využití.

S rostoucím počtem motocyklů roste i počet dopravních nehod s účastí motocyklu. Právě nehodovost jednostopých vozidel se v posledních letech stala hojně diskutovaným tématem v médiích a mezi odbornou i laickou veřejností. Motivace k tomu je jasná, následky dopravních nehod motocyklů bývají velmi často fatální. Smutné statistiky hovoří za vše. Motocyklista má téměř tři a půl krát větší pravděpodobnost úmrtí při dopravní nehodě, než má řidič osobního automobilu. Závažnost následků dopravních nehod na motocyklu je dokonce větší než u cyklistů nebo chodců. [1]

Jednostopým motorovým vozidlům je díky všem svým specifikům, rostoucímu počtu a závažnosti dopravních nehod potřeba věnovat separovaně od jiných druhů vozidel. Snaha přispět k řešení této problematiky a tím možná i přispět ke snížení alarmujícího počtu vzniklých zranění a úmrtí motocyklistů, se staly důvodem ke zpracování této diplomové práce.

Bakalářská práce Jednostopá motorová vozidla, byla rešeršní přípravou podkladů pro práci diplomovou. Během mého navazujícího výzkumu na Ústavu soudního znalectví v dopravě jsem si ale uvědomil, že se nelze omezit pouze na samotný stroj, nýbrž na něj musíme nahlížet jako na systém řidič – motocykl.

Profesionální testovací jezdci, kteří testují motocykly, mohou garantovat určitou kvalitu. Na každém motocyklu umí jít až na hranici jeho možností a díky tomu jsou testy jednotlivých motocyklů navzájem srovnatelné. V reálném provozu se ale pohybuje celé spektrum řidičů rozdělených podle zkušeností a schopností ovládat svůj motocykl. Běžný řidič zná dobře chování jen svého motocyklu a na něm se také v provozu pohybuje.

Proto je potřeba kategorizovat nejen jednotlivé motocykly podle konstrukce, ale i jejich jezdce podle zkušeností a následně hledat vztahy mezi typem motocyklu, řidičem a jízdními vlastnostmi vozidla. Pouze takto komplexní přístup nad celou problematikou lze efektivně využít v oblasti prevence či analýzy dopravních nehod.

Tato práce poskytuje přehled o jednostopých motorových vozidlech. Zmiňuje jejich specifika, jednak z pohledu mechaniky pohybu, jednak z pohledu bezpečnosti motocyklů. Součástí této kapitoly je i rozbor statistik nehodovosti.

Dále se věnuje problematice a principům měření dynamiky jízdy systému řidič – motocykl a to včetně popisu senzoriky, umístění snímačů či zpracování dat. U jednotlivých senzorů popisuje jejich fyzikální podstatu měření a vyzdvihává jejich výhody a nevýhody.

Závěrečná kapitola se věnuje vlastnímu praktickému měření, kdy se na uzavřeném silničním okruhu provedl experiment měření dynamiky jízdy motocyklů různých kategorií s jezdci napříč zkušenostním spektrem od začátečníků po motocyklové závodníky.

1. Kategorizace jednostopých motorových vozidel

Na pozemních komunikacích nalezneme velké množství rozlišných typů jednostopých motorových vozidel. Jejich rozdělení se z pohledu legislativy věnuje zákon č. 56/2001 Sb. o podmínkách provozu na pozemních komunikacích. JMV spadají do kategorie vozidel L.

Vozidla zařazená podle EHK-OSN v kategorií L1 a L2 s maximální konstrukční rychlostí 50 $km.h^{-1}$ se považují za mopedy, vozidla kategorií L3 a L4 se považují za motocykly a vozidla kategorie L5 se považují za motorové tříkolky. [2]

Legislativní rozdělení ovšem nereflektuje, zejména v kategorii motocykly, značné rozdíly v konstrukci, v designu či účelu využití vozidel. Proto se mezi uživateli zažilo běžné rozdělení, dle konstrukce. Toto rozdělení se neřídí žádným zákonem ani technickou normou. a proto může být zdrojem nepochopení či dokonce kontroverze. Rozdělení, jak je popsáno dále, vychází z mého subjektivního pohledu na tuto problematiku.

1.1. Moped a motokolo

Moped je určen pro dopravu jedné osoby na krátkou vzdálenost. Je vybaven maloobjemovým motorem s objemem menším než 50 cm^3 a jeho nejvyšší konstrukční rychlost nepřesahuje 50 $km.h^{-1}$. Název moped představuje zkratku slov motor a pedál. Vozidlo je vybaveno pedály a počítá se u něj se spoluúčastí lidské síly. Jeho konstrukce vychází z jízdního kola. Motokolo je jízdní kolo, které je trvale vybavené hnacím maloobjemovým motorem. [3]

1.2. Skútr

Skútr je určen pro dopravu jedné nebo dvou osob zejména po městských aglomeracích a jejich okolí. Jeho konstrukce je přizpůsobená pro nenáročný a pohodlný provoz. Díky konstrukci bez horní části rámu a díky přední kapotáži poskytuje ochranu proti stříkající vodě a blátu. Řidič nesedí obkročmo jako na motocyklu, nýbrž snožmo jako na židli. [3][4]

Malý skútr

Malý skútr je charakterizován malými rozměry kol, krátkým rozvorem a automatickou převodovkou. Tato konstrukce zlepšuje ovladatelnost a provoz v rámci obce. Typický je pro malé skútry jednoválcový dvoudobý motor s objemem 50 až 200 cm^3, který tvoří jeden blok s převodovkou a sekundárním převodem. V posledních letech se rozšiřuje nabídka elektricky poháněných skútrů. [3]

Cestovní skútr („Maxiskútr“)

Velký cestovní skútr s objemem motoru 250 až 800 cm^3 vznikl původně jako dopravní prostředek do většího města, který zvládne pohodlně přijet po dálnici z okolních satelitních městeček. V posledních letech si tato vozidla získávají velkou oblibu a tvoří výrazný segment trhu s prodejem skútrů. Na dnešních cestovních skútrech se dá pohodlně cestovat a svými parametry a jízdní dynamikou se přibližují cestovním motocyklům.

1.3. Motocykl

Motocykl je určen pro dopravu jedné nebo dvou osob sedících za sebou. Má dvě kola a na rozdíl od mopedu nepoužívá pedály, ale pevné stupačky. Řidič sedí obkročmo na motocyklu a má pevnou podporu kolen. Motocykl je vybaven zpravidla spalovacím motorem s objemem motoru větším než 50 cm^3 a jeho nejvyšší konstrukční rychlost přesahuje 50 $km.h^{-1}$. [3]

Silniční cestovní motocykl

Velké cestovní motocykly s rozsáhlou kapotáží a velkým dojezdem jsou osazeny víceválcovými motory s objemem motoru 650 cm^3 až 1800 cm^3. Motocykly jsou určeny na překonávání dlouhých vzdáleností. Díky tomu jsou velice pohodlné a bývají osazeny nejmodernějšími doplňky a asistenčními pomocníky, jako jsou například vyhřívaná sedadla, tempomat, ABS nebo zpátečka. Typickou výbavou cestovních motocyklů jsou boční a horní kufry v zadní části motocyklu. Jejich nevýhodou je vysoká hmotnost.

Silniční sportovní motocykl

Velice výkonné a aerodynamicky tvarované motocykly s obsahem motoru 600 cm^3 až 1200 cm^3. Jsou schopny dosahovat vysokých maximálních rychlostí a zároveň jsou agilní při průjezdu obloukem. Konstrukce sportovních motocyklů musí být lehká a zároveň tuhá, proto se u nich používá speciálních materiálů jako karbon, kevlar apod. Pohodlí řidiče je značně omezeno sportovním posedem a motocykl je velice náročný na provoz.

Naháč („Naked bike“)

Všestranný motocykl bez kapotáže, případně s malou aerodynamickou kapotáží. Název naháč se používá proto, že rám a motor nezakrývají žádné kapoty. Od sportovních motocyklů se liší vzpřímenější pozicí jezdce, která je pohodlnější, a proto je motocykl vhodný i na cestování. Naháč často přejímá motor ze sportovních motocyklů, u kterých se sníží maximální výkon ve vysokých otáčkách a dosáhne se vyššího krouticího momentu. [5]

Enduro

Motocykl, který je konstruován na jízdu po všech typech terénu. Z principu se jedná o terénní motocykl, který prodělal modifikace z hlediska každodenní použitelnosti. Je osazován jedno

nebo dvouválcovými motory s objemem od 125 cm^3 až po 1200 cm^3. Motocykl se používá převážně v silničním provozu, ale také v lehkém a středním terénu. Je pro něj typický vysoký zdvih, pérování a hrubý vzorek pneumatik. Jezdec sedí vzpřímeně, při jízdě v terénu jede ve stoje. Díky své robustnosti, jednoduchosti a průchodnosti terénem se používají na dálkové cestování a rallye. [3][5]

Supermoto

Motocykl, který je zaměřený hlavně na radost z jízdy. Má nízkou hmotnost, tuhý rám a výkonný jedno nebo dvouválcový motor s objemem do 1200 cm^3. Supermoto pochází z motokrosových speciálů, které si zachovaly vysoké zdvihy, ale obuly silniční pneumatiky. Pozice jezdce je vzpřímená, ale díky tuhé konstrukci a tvrdému sedlu také nepohodlná. Motocykl je vhodný na obloukovité komunikace, jízda vyšší rychlostí je kvůli absenci kapotáží nepohodlná.

Cruiser a chopper

Silné a mohutné motocykly vybavené typicky vidlicovým dvouválcovým motorem o objemu 800 cm^3 až 1800 cm^3. Vyznačují se dlouhým rozvorem, širokou zadní pneumatikou a hlasitým zvukem. Motocykly kategorie cruiser a chopper pochází z USA a je u nich upřednostňován vzhled před výkonem. Design motocyklu často odráží představy svého majitele a je jedinečný. Posed na těchto motocyklech je vzpřímený s nohami posunutými hodně dopředu. Cruiser se vybavuje spoustou doplňků a je vhodný na dálkové cestování po rovných úsecích, zatímco chopper se zaměřuje zejména na design. [3]

Obrázek 1: Silniční cestovní, silniční sportovní a naked bike. [6][7][8]

Obrázek 2: Enduro, supermoto a cruiser. [9][10][11]

Otázkou pro další výzkum zůstává, podle jakých technicky objektivních parametrů by se jednotlivé motocykly dali zařadit do těchto kategorií. Jako jeden z nejzajímavějších parametrů se jeví poměr výkonu a hmotnosti. Již nyní ale můžeme říct, že pro jednoznačné rozdělení motocyklu do kategorií bude potřeba více než jeden parametr.

Tabulka 1 ukazuje tento poměr pro několik vybraných motocyklů z jednotlivých kategorií a zároveň demonstruje, jak výkonné jsou i běžné motocykly v porovnání s ostatními druhy dopravy.

Tabulka 1: Poměr výkonu a hmotnosti pro vybrané dopravní prostředky.

Kategorie vozidla	**Název vozidla**	**Hmotnost [kg] / výkon [kW]**
Silniční sportovní	Yamaha YZF R1 (2015)	1,41
Supermoto	Ducati Hypermotard 800 (2015)	2,47
Silniční cestovní	Kawasaki GTR 1400 (2015)	2,76
Enduro	BMW F 800 GS (2015)	3,08
Naked bike	Suzuki Bandit 1250 (2015)	3,43
Cruiser	Harley – Davidson Road King (2015)	5,56
OA – sportovní	BMW M135i (2015)	6,47
OA – malé	Škoda Fabia (2015)	13,94
OA – střední	Ford Mondeo (2015)	16,93
Autobus	Mercedes - Benz Tourismo (2015)	43,17

2. Specifika jednostopých motorových vozidel

Jednostopé motorové vozidlo má proti dvoustopému vozidlu celou řadu specifik. Nejvýznamnější rozdíly najdeme už v samotném pohybu vozidla. Jízda na motocyklu je založena na zcela jiných fyzikálních principech než jízda v automobilu. První část této kapitoly stručně popisuje dynamiku pohybu motocyklu a poukazuje na nejvýznamnější rozdíly.

Další specifika najdeme při pohledu na bezpečnost JMV. Přestože funkce prvků bezpečnosti je stejná jako u dvoustopých vozidel, je zřejmé, že prvky použité v automobilech jsou jen zřídka kdy použitelné na motocyklech. [12][13]

Poslední část této kapitoly se věnuje statistikám nehodovosti, jejíž rozbor je neodmyslitelnou součástí komplexního pohledu na bezpečnost JMV. Pro motocykly zde jsou nalezeny a popsány jejich specifické trendy a nejvýznamnější ukazatele.

2.1. Dynamika pohybu motocyklu

V této části je popsán kontext mezi silami působícími na motocykl a samotným pohybem vozidla. Z hlediska dopravní techniky se jedná o popis jízdních vlastností vozidla. [13]

2.1.1. Ovladatelnost a stabilita motocyklu

Ovladatelnost motocyklu určuje hlavní měrou geometrie řízení motocyklu. Nejvýznamnějšími parametry jsou:

- poloha těžiště,
- rozvor kol,
- úhel osy řízení,
- závlek předního kola. [3]

Poloha těžiště

Těžiště je významný bod na motocyklu, respektive soustavy motocykl - jezdec. Je to bod, do kterého můžeme ekvivalentně umístit působení tíhy, odstředivé síly a setrvačné síly. Poloha těžiště má vliv na rozdělení zatížení mezi jednotlivá kola. Poměr zatížení kol velice ovlivňuje ovladatelnost motocyklů. Snaha výrobců je dosahovat poměru zatížení kol 50:50. [12]

Rozvor kol

Další parametr mající zásadní vliv na jízdní dynamiku motocyklu je rozvor kol (vzdálenost středů kol od sebe). Rozvor je základní rozměr určující celkové rozměry motocyklu. Velký rozvor zajišťuje dobré vedení motocyklu při vysokých rychlostech. Malý rozvor zlepšuje obratnost a chování motocyklu v obloucích. [3][12]

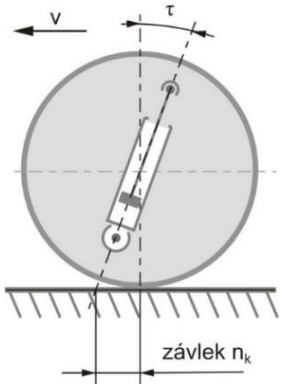
Úhel osy řízení

Je úhel, který svírá osa přední vidlice s kolmicí na rovinu vozovky. Tento parametr má zásadní vliv na ovládání motocyklu. Velký úhel osy řízení má stabilizující účinek na přední vidlici a zlepšuje vedení předního kola v přímém směru při vysoké rychlosti. Nevýhodou velkého úhlu osy řízení je ovladatelnost v nízkých rychlostech. [3][12]

Závlek předního kola

Závlek předního kola neboli stopa či předsunutí předního kola, je vzdálenost mezi průsečíkem osy řízení s vozovkou a svislou osou předního kola. Závlek předního kola je parametr, který úzce souvisí s úhlem osy řízení. Společně mají významný vliv na směrovou stabilitu. Větší závlek předního kola, zaručuje stabilitu motocyklu při vysoké rychlosti v přímém směru, je s ním však problém při ovládání motocyklu při nízké rychlosti. [3][12]

Na obrázku 3 je vyznačen úhel osy řízení (τ) a rozměr n_k udává závlek předního kola.



Obrázek 3: Úhel osy řízení a závlek předního kola. [14]

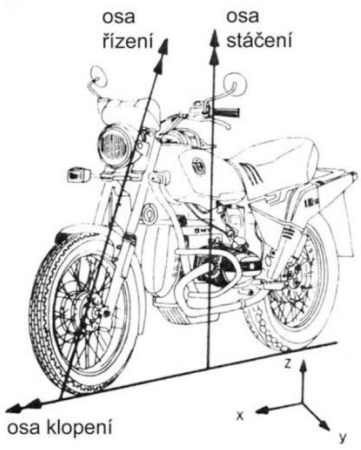
Stabilita motocyklu

Aby byl motocykl ovladatelný, je v první řadě nutno zachovat jeho stabilitu. Stabilitou jednostopých vozidel se rozumí zachování jejich rovnováhy okolo podélné a příčné osy. Ta je dosahována korigováním pohybu řídítek a těla řidiče. [12]

Z pohledu zákonů mechaniky se stabilita vozidla mění v závislosti na rychlosti pohybu. Jedoucí motocykl získává stabilitu samočinně, respektive spouští se komplexní proces, který pochází od gyroskopického účinku předního kola. Zatímco stabilitu stojícího motocyklu určují pouze dotykové plochy kol s vozovkou, a proto je bez účinku dalších podpěr (stojánek, řidič) motocykl nestabilní. [3][12]

V oblasti nestability se vozidlo stabilizuje akcelerací, pohybem jezdce na motocyklu nebo natočením řízení pomocí řídítek. Vliv na stabilitu kromě geometrie řízení má také hmotnost, tuhost konstrukce vozidla, boční sklon vozovky, mechanizmus řízení či aerodynamická působení (vztlaky, boční vítr). [3][12]

K natáčení motocyklu kolem osy řízení slouží na motocyklu řídítka. Pro natáčení motocyklu kolem osy klopení jezdec naklápí motocykl pohybem těla. Jednotlivé osy systému pro jednostopé vozidlo jsou zobrazeny na obrázku 4. [3]



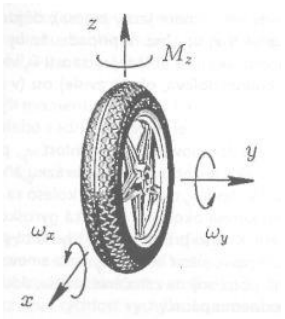
Obrázek 4: Osy klopení, řízení a stáčení motocyklu. [15]

Gyroskopické momenty

Motocykl jedoucí určitou rychlostí je v oblasti samovolné stability. To je způsobeno tím, že kola motocyklu působí jako gyroskop.

Gyroskop je rychle rotující kolo, které má vysokou osovou stabilitu, tzn., že se může snadno pohybovat ve směru své osy, ale klade odpor naklápění do jiných směrů. Působící síly se přitom při vyšší rychlosti rotace zvětšují. [15]

Obrázek 5 znázorňuje vznik gyroskopického momentu. Jakmile je úhlová rychlost ω_y dostatečná, vznikne při naklopení motocyklu okolo osy x gyroskopický moment, který způsobí natočení předního kola. Motocykl proto zatočí na tu stranu, na kterou se naklopí. Jakmile není ω_y dostatečná, nevznikne potřebný gyroskopický moment, motocykl je v oblasti nestability a dojde k pádu. Díky tomuto efektu lze řídit motocykl i bez toho, aby měl řidič ruce na řídítkách. [12]



Obrázek 5: Vznik gyroskopického momentu Mz. [12]

Gyroskopický moment je vyjádřen vztahem (1):

$$M_{Gz} = J * \omega_y * \omega_x \quad (1)$$

$$J = \int r^2 \, dm \quad (2)$$

$$\omega_y = \frac{v}{r} \quad (3)$$

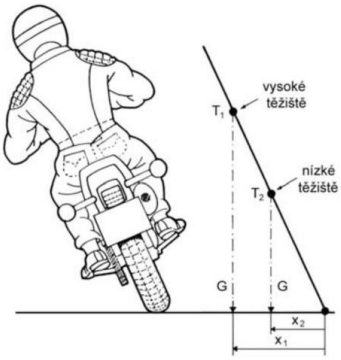
Kde M_{Gz} je gyroskopický moment, J je moment setrvačnosti a ω_y je úhlová rychlost otáčení kola. [3]

Vliv těžiště na stabilitu

Jede-li motocykl do oblouku, působí na něj boční síla. Aby bylo dosaženo rovnováhy motocyklu, je nutno motocykl naklopit. Zde se projevuje vliv polohy těžiště na stabilitu.

Je-li motocykl naklopen, stabilitu negativně ovlivňuje destabilizující moment, který je dán součinem tíhy a ramene x (viz vztah (4)). Jak je vidět na obrázku 6, při stejném úhlu naklopení má motocykl s nižším těžištěm lepší stabilitu. [3][12]

$$M_{DS} = G * x \quad (4)$$



Obrázek 6: Vliv naklopení motocyklu na těžiště. [12]

Poloha těžiště má dále velký vliv na to, jak rychle lze motocykl překlápět z jedné strany na druhou nebo v případě, jede-li motocykl malou rychlostí do oblouku.

2.1.2. Pohyb motocyklu

Pohyb motocyklu lze z hlediska směru a zrychlení rozdělit do následujících fází:

- pohyb rovnoměrný přímočarý – jízda konstantní rychlostí v přímém směru,
- pohyb nerovnoměrný – zrychlení či zpomalení,
- pohyb křivočarý – jízda motocyklu obloukem.

Pohyb rovnoměrný přímočarý

Pohyb rovnoměrný přímočarý je v podstatě nejjednodušší. Je to pohyb, při němž motocykl ujede za stejný časový interval vždy stejný úsek dráhy. Síly působící na motocykl při jízdě rovnoměrným přímočarým pohybem jsou v rovnováze. Tyto síly jsou:

- tíha motocyklu,
- jízdní odpory,
- hnací síla,
- setrvačná síla. [12]

Pohyb nerovnoměrný – zrychlování

Zrychlení motocyklu je charakteristika, kterou popisujeme jako změnu rychlosti vozidla za jednotku času. Zrychlení je vektorová veličina. Udává směr i velikost změny. Chceme-li dosáhnout větší hodnoty zrychlení u jednostopého vozidla, musíme dosáhnout větší hnací síly motoru nebo snížit jeho celkovou hmotnost.

Průměrně výkonný motocykl dosahuje měrného výkonu přibližně 0,3 kW/kg. Této hodnoty ve světě automobilů dosahují pouze sportovní vozy. Tudíž i běžný motocykl zrychluje podobně jako sportovní automobily a je nutné jim v silničním provozu věnovat zvýšenou pozornost.

Pohyb nerovnoměrný - brzděni

Brzděním se rozumí snižování rychlosti vozidla. Brzdný účinek je schopnost motocyklu zpomalit za určitou dobu o určitou hodnotu rychlosti na určité dráze. Brzdný účinek se dosahuje zpomalováním otáčejících se kol. [3][12]

Brzdná dráha je dráha, kterou vozidlo urazí od okamžiku, kdy nastane brzdný účinek přední a zadní brzdy do zastavení. Brzdná dráha nezahrnuje reakční dobu řidiče. [3]

Faktory ovlivňující celkovou brzdnou dráhu motocyklu:

- Rychlost jízdy. Čím větší rychlost, tím delší brzdná dráha.
- Hmotnost a účinnost brzd. Čím lehčí motocykl a účinnější brzdy, tím kratší brzdná dráha.
- Stav a typ vozovky a kvalita pneumatik. Mokrá nebo znečistěná vozovka, respektive nezpevněné cesty, prodlužují brzdnou dráhu stejně tak jako špatně nahuštěné pneumatiky.
- Osobní zkušenost řidiče. Zejména na motocyklu je toto velice zásadní faktor ovlivňující brzdnou dráhu. Zkušený řidič je schopen s kvalitními brzdami dosahovat lepších výsledků než osobní automobil, zatímco nezkušený řidič dosahuje na stejném stroji mnohem horších výsledků. [3]

Při brzdění motocyklů platí několik specifických podmínek:

- Rozdělení brzdného účinku mezi přední a zadní kola je závislé na způsobu dávkování řidičem. Přední a zadní brzdový okruh jsou zpravidla nezávislé.
- Brzdný účinek se významně mění v závislosti na zatížení motocyklu. To je dáno nízkou hmotností motocyklu, respektive rozdílem mezi nezatíženým motocyklem a například motocyklem s jezdcem a spolujezdcem.
- Díky krátkému rozvoru a vysoko položenému těžišti dochází při brzdění ke změnám zatížení mezi přední a zadní kolo. Vlivem momentu vyvolaného setrvačnou silou, může dojít při brzdění k postavení motocyklu na přední kolo.
- Při brzdění motocyklu v náklonu, například při průjezdu zatáčkou, dochází ke vzniku přídavného radiálního momentu, který zhoršuje ovládání motocyklu. [12]

Pohyb křivočarý

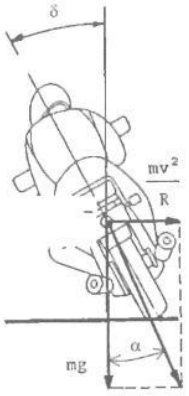
Pohyb křivočarý je pohyb, jehož trajektorií je obecná křivka. Pro motocykl to znamená, že jeho pohyb není po přímce, ale pohybuje se po křivce s proměnnou rychlostí a proměnným zrychlením. V praxi se jedná o průjezd motocyklu obloukem.

Průjezd motocyklů obloukem je dalším bodem, kde se dynamika jízdy jednostopých vozidel výrazně odlišuje od dvoustopých vozidel. Na motocykl působí navíc od přímé jízdy síla odstředivá. Její velikost je dána vztahem:

$$F_o = \frac{m*v^2}{R}. \qquad (5)$$

Kde F_o je odstředivá síla [N], v rychlost [m.s^{-1}], m hmotnost soustavy [kg] a R je poloměr oblouku [m].

Odstředivou sílu kompenzujeme naklopením motocyklu o úhel δ.



Obrázek 7: Působení odstředivé síly v náklonu. [12]

Kde G je tíha soustavy [N], δ je úhel naklopení motocyklu [°] a α je úhel výsledné síly. [12]

Pro dosažení rovnováhy platí:

$$\tan \alpha = \frac{F_o}{G} = \frac{m*v^2}{R*m*g} = \frac{v^2}{R*g} \quad (6)$$

Odstředivá síla však není jediným činitelem působícím na motocykl při průjezdu zatáčkou. Dále ho ovlivňuje stav vozovky, respektive hodnota součinitele adheze. Při jeho překročení dojde ke smyku. V mezních hodnotách může odstředivá síla dosáhnout hodnoty boční adhezní síly. [12]

Z toho plyne, že lze sestavit podmínku (7) pro úhel výsledné síly α:

$$\tan \alpha \leq \frac{F_{o,max}}{G} \leq \frac{G*\mu_\alpha}{G} \leq \mu_\alpha. \quad (7)$$

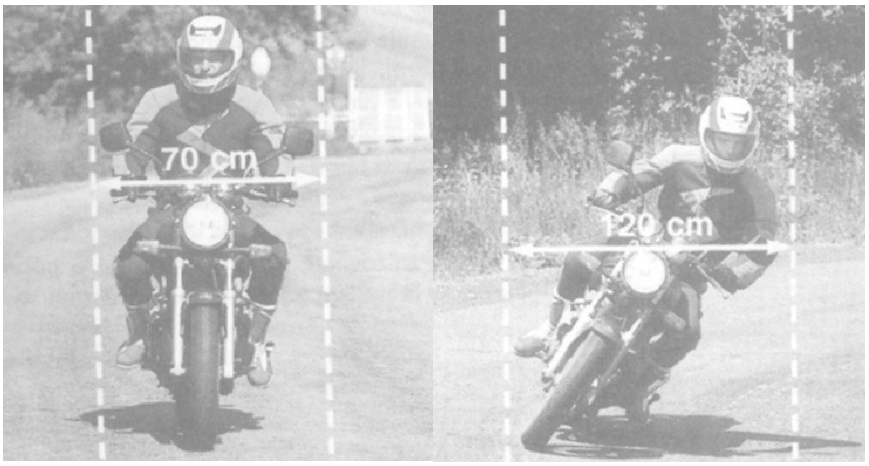
Úpravou rovnic zjistíme vztah pro maximální rychlost průjezdu obloukem.

$$\tan \alpha_{max} = \mu_\alpha = \frac{{v_{max}}^2}{R*g} \quad (8)$$

$$v_{max} = \sqrt{R * g * \mu_\alpha}. \quad (9)$$

Pro dosažení správného úhlu α není rozhodující jaký úhel naklopení δ má motocykl, ale rozhodující je poloha těžiště soustavy (motocykl + jezdec + zátěž). Z toho vyplývá, že obloukem o poloměru R lze projet pokaždé s různou technikou jízdy a tedy i s různými úhly naklopení. [12]

Při průjezdu obloukem je nutné také přihlédnout k faktu, že se šířka motocyklu a jezdce značně zvětší oproti jízdě v přímém směru. Tento rozdíl je patrný z obrázku 7. [12]



Obrázek 8: Rozdíl šířky jízdního koridoru při přímé jízdě a při jízdě obloukem. [12]

2.2. Bezpečnost motocyklu

Při dopravní nehodě je posádka motocyklu vystavena mnohem většímu riziku poranění než posádka automobilu. Množství dopravních nehod se smrtelnými následky je na počet najetých kilometrů až 10x vyšší než u automobilů. Prvky bezpečnosti, které jsou popsány dále, mají funkci zabraňovat a minimalizovat vznik poranění posádky. Přestože funkce těchto prvků je stejná jako u automobilů, jsou zde uzpůsobeny tak, aby maximálně vyhovovaly specifickým potřebám JVM. [12] [16]

2.2.1. Prvky pasivní bezpečnosti motocyklu

V pasivní bezpečnosti na motocyklech můžeme najít dvě strategie ochrany posádky motocyklu:

- Prvky ochrany umístit přímo na řidiče, např. přilba
- Prvky ochrany umístit přímo na motocykl, např. airbag [16]

Motocyklová přilba

Přilby používané na pozemních komunikacích musejí být ze zákona homologované. To zaručuje, že přilba splňuje základní bezpečnostní požadavky. O tom, jak je motocyklová přilba bezpečná, rozhoduje kvalita zpracování a použité materiály. Skořepiny přileb se vyrábí z plastu, sklolaminátu či z karbonu. Motocyklové helmy se dělí na dva základní typy, a to přilba otevřená a integrální. Integrální poskytuje vyšší bezpečnost, protože chrání i obličejovou část hlavy. [17]

Motocyklové oblečení

Motocyklové kombinézy používají zejména sportovně založení jezdci. Materiálem pro výrobu kombinéz je hovězí, popřípadě klokaní kůže. Jejich základním požadavkem je pružnost, pevnost a otěruvzdornost. Do kombinézy jsou zpravidla implementovány gelové nebo plastové chrániče na nejvíce exponovaných místech. Textilní motocyklové oblečení poskytuje větší komfort za cenu nižší úrovně bezpečnosti. Výhodou je snadné oblékání, dobré odvětrání, volnost pohybu a snadná implementace dalších bezpečnostních systémů, např. chráničů, airbagů apod. [17]

Dalšími prvky pasivní bezpečnosti, umístěnými přímo na jezdci, jsou motocyklové rukavice, motocyklové boty a další chrániče. Motocykl je možno dále osadit ochrannými rámy a jinými podobnými prvky pasivní bezpečnosti, ovšem jejich účinnost je sporná.

Airbag

Airbag, který se aktivuje při čelním nárazu motocyklu, se poprvé objevil na motocyklu Honda Gold Wing v roce 2005. Nejčastějším poraněním jezdce při srážce s bokem osobního vozidla

je poranění hlavy a dolních končetin. Hlava zpravidla dopadá na bok automobilu. Vážnost poranění hlavy je podle statistik nižší u případů, kdy jezdec vozidlo přeletí, aniž by přímo narazil do jeho boku. [12][16][17]

Z tohoto důvodu nalezneme dvě základní filozofie aplikace airbagu:

- Ovlivnit trajektorii jezdce nad vozidlo.
- Chránit jezdce, zmírnit následek nárazu do okolních předmětů. [16]

2.2.2. Prvky aktivní bezpečnosti motocyklu

Funkcí prvků aktivní bezpečnosti je především zabránit nebo zamezit vzniku dopravní nehody. Současným trendem je osazení vozidel prvky umožňujícími vzájemnou bezdrátovou komunikaci s okolními vozidly. Na základě této komunikace mohou vozidla zaregistrovat motocykl a autonomně zabránit střetu. Průkopníkem této technologie je společnost BMW, která tyto prvky aktivní bezpečnosti testuje na modelu 1600 GTL.

Tradiční možnosti aktivní bezpečnosti na motocyklech:

A) Obsluha vozidla
   - Jednoduchá obsluha brzd a jemný chod spojky.
   - Automatická nebo poloautomatická převodovka.

B) Viditelnost a rozlišitelnost
   - Zvýšení rozlišitelnosti motocyklu oproti jiným účastníkům silničního provozu (např. reflexní vestou, reflexní přilbou nebo reflexními prvky na motocyklu).
   - Zlepšení viditelnosti z helmy kvalitním plexy (např. absorbování slunečního svitu nebo elektronické zobrazení snímaného dopravního značení).
   - Automatické zapínání potkávacích světel při startu motocyklu.

C) Komfort
   - Zlepšení klima v přilbě, přívod kyslíku pod přilbu.
   - Ochrana řidiče před vedrem, zimou, špínou a mokrem kvalitním oblečením.
   - Snížení vibrací působících do rukou a nohou motocyklisty.
   - Zavedení povinné praxe, před udělením řidičského oprávnění nejvyšší kategorie.

D) Jízdní vlastnosti
   - Systémy proti ponořování tlumících a pružících jednotek.
   - Zvýšení tuhosti rámu motocyklu a zamezení rozkmitání motocyklu.
   - Zamezení kmitání předního kola pomocí tlumiče řízení.
   - Systém ABS samostatně účinkující pro přední a zadní kolo motocyklu. [17][18]

2.3. Statistiky nehodovosti

Zabýváme-li se bezpečností jednostopých motorových vozidel, je velice důležité pečlivě analyzovat statistická data nehodovosti. Statistiky slouží k přehledu a předpovídání nehodovosti, mohou dokládat jednotlivá tvrzení nebo nalézt problémová místa a zákonitosti, které mohou sloužit k vysvětlení určitých jevů.

Analýze statistik nehodovosti a následnému vyčíslení ztrát z nehodovosti motocyklů jsem se podrobně věnoval ve své bakalářské práci „Základní ekonomická analýza nehod jednostopých motorových vozidel“. V této kapitole jsou proto vybrány jen ty nejvýznamnější ukazatele a specifika jednostopých motorových vozidel.

2.3.1. Základní ukazatele

Vývoj počtu registrovaných vozidel

Jak ukazuje tabulka 2, roste jak počet registrovaných automobilů, tak i motocyklů. Meziroční procentuální nárůst motocyklů je dokonce vyšší než u automobilů. V roce 2009 je patrný značný pokles nárůstu způsobený světovou finanční recesí z podzimu roku 2008.

Tabulka 2: Registrované motocykly a automobily v ČR v letech 2004 – 2013. [19]

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012[1)]	2013
Registrované JMV	794 000	822 703	860 131	892 796	903 346	924 291	944 171	976 911	977 197
Meziroční nárůst	4.95 %	3.61 %	4.55 %	3.80 %	1.18 %	2.32 %	2.15 %	-	3.50 %
Registrované automobily	3 958 708	4 108 610	4 280 081	4 423 370	4 435 052	4 496 232	4 581 642	4 706 325	4 729 185
Meziroční nárůst	3.75 %	3.79 %	4.17 %	3.35 %	0.26 %	1.38 %	1.90 %	-	3.22 %

1) údaje k 1. 7. 2013 - z důvodu přechodu na nový systém evidence vozidel v Centrálním registru vozidel (CRV)

Tabulka 3 ukazuje vývoj počtu motocyklů registrovaných v ČR v závislosti na objemu motoru. Z dat je patrná významně rostoucí popularita motocyklů s obsahem motorů mezi 50 až 125 ccm^3. Do této kategorie patří převážně motocykly kategorie skútr, jejichž obliba roste zejména ve větších městských aglomeracích. Nejrizikovější skupina motocyklů s objemem válců nad 125 ccm^3 má v posledních letech meziroční nárůst okolo čtyř procent ročně. To znamená přibližný meziroční nárůst o 12 000 vozidel.

Tabulka 3: Registrované motocykly v ČR s objemem válce nad 125 ccm3. [19]

	2009	2010	2011	2012[1)]	2013
JMV s objemem válců 51 ccm^3 - 125 ccm^3	66 085	69 205	72 747	83 442	85 935
Meziroční nárůst	-	4,72 %	5,12 %	-	18,13 %
JMV s objemem válců nad 125 ccm^3	363 896	376 902	390 750	411 686	410 569
Meziroční nárůst	-	3,57 %	3,67 %	-	5,07 %

1) údaje k 1. 7. 2013 - z důvodu přechodu na nový systém evidence vozidel v Centrálním registru vozidel (CRV)

Vývoj počtu dopravních nehod a jejich následky

Následující tabulka shrnuje data týkající se výhradně nehod motocyklistů. Tabulka 3 ukazuje počet vozidel zúčastněných na dopravních nehodách a jejich následky. Vývoj je sledován záměrně až od roku 2009, kdy došlo k zavedení vyššího limitu ohlašovací povinnosti při dopravní nehodě.

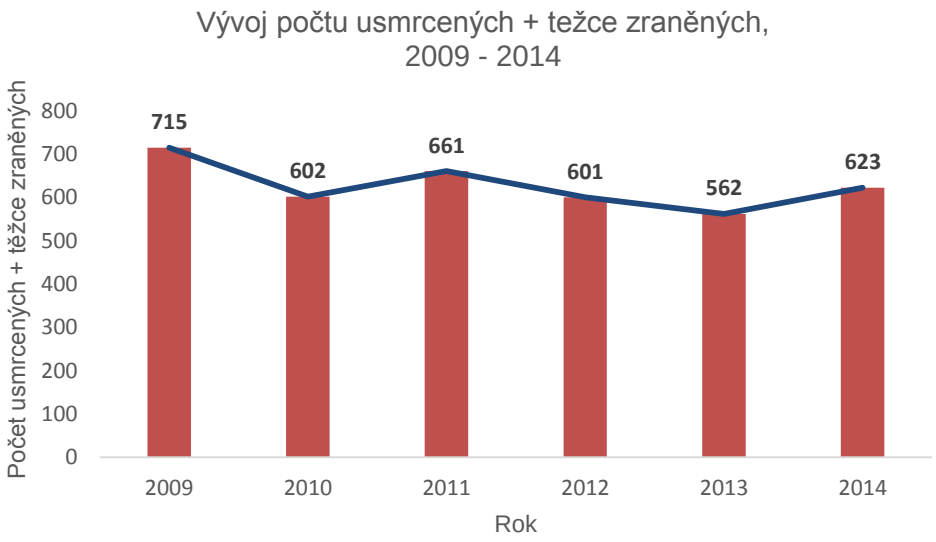
Dopravní nehody s účastí jednostopých motorových vozidel mají dlouhodobě nejvyšší závažnost. Nejtragičtější co do počtu úmrtí byl rok 2010. Na druhou stranu v tomto roce bylo méně vážných zranění. Nejtragičtější se proto ukazuje rok 2011 (viz. Graf 1). Nejúspěšnější byl jednoznačně rok 2013, kdy bylo za sledované období nejméně úmrtí i vážných zranění. V roce 2014 bylo usmrceno 89 motorkářů, to je o 23 více než v předchozím roce. Tento třetinový nárůst úmrtí je velice znepokojivý.

Tabulka 4: Počet zúčastněných motocyklů na DN a jejich následky do 24 hodin. [1]

	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Počet zúčastněných motocyklů na DN	3170	2 795	3 153	3 143	3 124	3 319
Usmrceno	88	96	78	90	66	89
Těžce zraněno	627	506	583	511	496	534
Lehce zraněno	2 009	1 809	2 007	1 934	2 060	2 096
Nezraněno	797	704	775	811	821	888

Celkový počet nehodou dotčených osob přibližně odpovídá počtu zúčastněných motocyklů na DN. Rozdíl je dán počtem spolujezdců, kteří se zúčastnili DN.

V grafu 1 je zobrazen vývoj počtu usmrcených a těžce zraněných. Právě tyto následky mají majoritní podíl na celkových ekonomických ztrátách a i z pohledu společnosti jsou brány jako nejtragičtější.



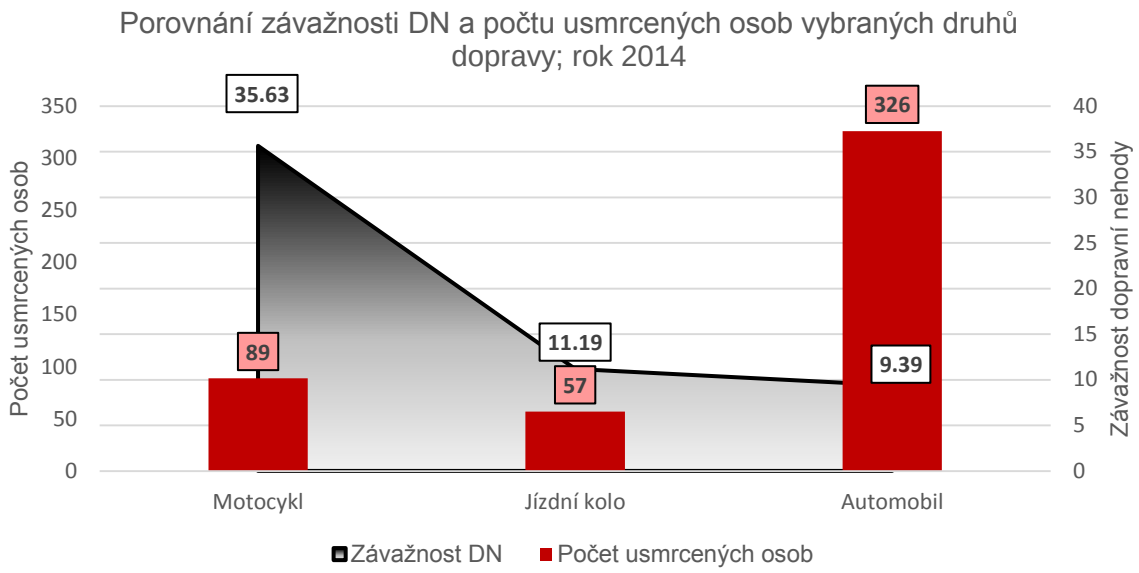
Graf 1: Vývoj počtu usmrcených a těžce zraněných. [1]

2.3.2. Závažnost DN a ostatní ukazatele

Závažnost dopravních nehod udává počet usmrcených osob na 1000 dopravních nehod. Zkoumáme-li počet úmrtí v automobilu, je dlouhodobě patrný klesající trend. Tento trend je způsoben zejména významnými pokroky na poli bezpečnosti dvoustopých vozidel. Bohužel motocykly nekopírují tento trend z důvodu, že možnosti pasivní bezpečnost u motocyklů jsou odkázány převážně na oblečení a helmu řidiče. [19]

Na celkovém počtu úmrtí při dopravních nehodách v roce 2014 činil podíl motocyklistů 14%. To je nejvyšší hodnota od roku 1993 a znamená, že téměř každou osmou usmrcenou osobou při dopravní nehodě byl motocyklista. V roce 2013 činil tento podíl 11%. [19][20][21]

Závažnost dopravní nehody v automobilu je mnohem nižší než na motocyklu. Motocyklisté jsou nejrizikovější skupinou ze všech účastníků silničního provozu. Graf 2 zobrazuje srovnání závažnosti dopravní nehody a počty usmrcených osob pro vybrané druhy dopravních prostředků. Podle oficiálních policejních statistik je závažnost dopravní nehody u motocyklů vyšší i oproti chodcům. [1]



Graf 2: Porovnání závažnosti DN a počtu usmrcených osob. [1]

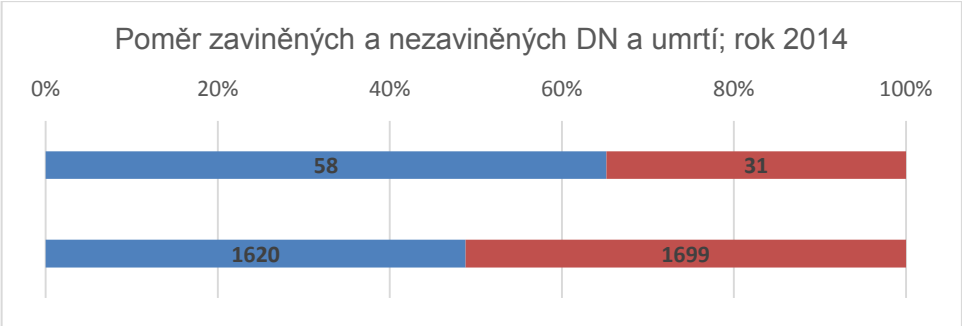
Přestože v osobních automobilech umírá nejvíce osob, závažnost dopravní nehody je téměř 3,5x nižší než u motocyklů. Tzn., že řidič motocyklu má více než třikrát vyšší pravděpodobnost úmrtí při dopravní nehodě, než má řidič osobního automobilu.

Mezi nejčastější příčiny dopravních nehod, kde je viníkem řidič motocyklu, patří nepřiměřená rychlost vzhledem k dopravně technickému stavu vozovky, nedodržení bezpečné vzdálenosti za vozidlem a nezvládnutí řízení vozidla. Hlavní příčiny nehod zaviněných řidiči motocyklů v roce 2014 ukazuje tabulka 5.

Tabulka 5: Hlavní příčiny nehod zaviněných řidičem motocyklu. [1]

	Počet nehod	**Zastoupení v %**
Nepřizpůsobení rychlosti technickému stavu vozovky	472	29
Nedodržení bezpeční vzdálenosti za vozidlem	189	12
Nezvládnutí řízení vozidla	172	11
Řidič se plně nevěnoval řízení vozidla	132	8
Nepřizpůsobení rychlosti stavu vozovky	128	8
Nepřizpůsobení rychlosti vlastnostem vozidla a nákladu	119	7

Graf 3 vypovídá o poměru zaviněných nehod s účastí motocyklistů. V roce 2014 řidiči motocyklů zavinili 1620 nehod z celkového počtu 3319 nehod za účasti motocyklů. To je v rozporu s často zaznívajícím argumentem, že si za dopravní nehody mohou motocyklisté sami. Vlastním zaviněním zemřelo v roce 2014 celkově 58 řidičů.



Graf 3: Poměr zaviněných a nezaviněných DN a úmrtí. [1]

Časové rozdělení a věk řidiče

Zabýváme-li se časovým rozdělením a věkovým složením řidičů při dopravních nehodách, vyplívá, že nejtragičtějším měsícem z pohledu úmrtí motocyklisty byl v roce 2012 červen, kdy bylo usmrceno 18 motocyklistů. Nejnižších hodnot úmrtí motocyklistů dostáváme od listopadu do února. [21]

Nejtragičtějším dnem z pohledu usmrcených motocyklistů byla v roce 2012 sobota, kdy bylo usmrceno 21 motocyklistů. Nejméně smrtelných nehod pak bylo evidováno ve středu a čtvrtek. V průběhu dne byl největší výskyt smrtelných nehod mezi 15. a 18. hodinou. [21]

Nejvíce usmrcených motocyklistů při dopravních nehodách v roce 2014 bylo ve věku 35 – 44 let. Věková kategorie se poslední roky posouvá směrem nahoru. V roce 2012 byla nejčastější věková kategorie při úmrtí motocyklistů 25 – 30 let. [1][21]

Závěrem si lze odnést, že motocyklisté jsou nejrizikovějšími účastníky silničního provozu. Jejich počet roste a možnosti zajištění jejich bezpečnosti jsou nižší než u osobních automobilů.

3. Problematika měření jízdy motocyklu

Pomocí měření jízdních vlastností můžeme změřit, popsat a analyzovat dynamické charakteristiky vozidel. Tato data následně slouží například jako podklady pro znaleckou praxi. Změřené hodnoty normálního a krizového brzdění motocyklu bývají použity k vyhodnocení analýz reálných silničních nehod. Vyhodnocením parametrů jízdy na určité trase můžeme predikovat nebezpečné úseky trasy atd.

Jednostopá motorová vozidla se vyznačují specifickou jízdou. Zaměřením takové jízdy můžeme sledovat parametry, jejichž sledování u dvoustopých vozidel nemá význam. Základním úkolem problematiky zaměření jízdy motocyklu je výběr způsobů měření, zvolení vhodné měřící techniky, správné umístění snímačů a zpracování dat. To vše s ohledem na praktičnost a přesnost výsledků.

Ze zkušeností a na základě výsledů měření provedených v bakalářské práci se jako nejvhodnější ukazuje zaměření jízdy motocyklu pomocí sdruženého snímače pro měření jízdní dynamiky. Pro potřeby této práce jsem měl k dispozici snímač Xsens MTi-G, který synergicky kombinuje akcelerometr, GPS přijímač, gyroskop a další přídavné senzory. V následujícím textu je každý z těchto přístupů teoreticky rozebrán a následně jsou popsány specifikace snímače.

3.1. Měření pomocí akcelerometru

Akcelerometr je elektromechanické zařízení, které měří dynamické či statické zrychlení sil. Dynamické zrychlení vzniká změnou rychlosti pohybujícího se senzoru a statické zrychlení způsobuje působení zemské gravitace. [23]

Měření dynamiky pomocí akcelerometrů není závislé na vnějších podmínkách a nejlépe zahrnuje všechny vlivy prostředí (není nutné znát odporové síly). Akcelerometrické senzory jsou schopny měřit s frekvencí vyšší o několik řádů oproti běžným kapalinovým náklonoměrům a v porovnání s GPS přijímači jsou levné. [23][24]

Akcelerometry mohou sloužit k určení rychlosti a vzdálenosti. To je možné díky tomu, že integrací zrychlení přes čas dostaneme rychlost objektu (10) a integrací rychlosti přes čas dostaneme vzdálenost (11). Akcelerometry dále mohou také detekovat změny úhlu náklonu měřením zemské gravitace nebo mohou měřit vibrace strojů. [23]

$$v_{(t)} = \int_{t0}^{t} a(t)dt + C \tag{10}$$

$$s_{(t)} = \int_{t0}^{t} v(t)dt + C \tag{11}$$

Určení rychlosti a vzdálenosti přímo z akcelerace ovšem není bez problémů. Obvykle neznáme přesnou prostorovou orientaci snímače a vlastní měření je zatížené šumem. Při stanovení rychlosti se chyba projeví odchylkou narůstající lineárně s délkou měřeného intervalu. To po dostatečně dlouhé době měření znehodnotí. Při stanovení polohy vozidla je situace ještě komplikovanější. Chyba z integračních konstant způsobí odchylky narůstající dokonce kvadraticky s časem. [24]

Z výše uvedeného je zřejmé, že měření pomocí akcelerometrů nemůže být použito samostatně a musí být doplněno například o měření pomocí GNSS přijímače. Potom zle získat výhody z obou měření.

3.2. Využití GNSS pro určení polohy

Jak bylo řečeno výše, nezanedbatelným problémem u měření trajektorie pomocí akcelometrů je mj. nastavení přesné prostorové orientace. Sdružené snímače pro měření jízdní dynamiky používají pro korekci orientace a polohy data z GNSS modulu. [25]

3.2.1. Struktura systému

Globální navigační satelitní systémy jsou systémy umožňující určit polohu uživatele kdekoliv na Zemi v jakoukoliv denní dobu. V současné době existuje několik satelitních systémů (GPS, Glonass, Galileo apod.). Struktura a základní principy jsou pro všechny obdobné a liší se v zásadě pouze v technických detailech. Strukturu každého systému lze rozdělit na tři základní složky: kosmický, řídící a uživatelský segment. [26][27]

Kosmický segment zahrnuje aktivní umělé družice Země (satelity), jejichž poloha je kontinuálně určována v jednotné celosvětové geocentrické souřadnicové soustavě. Srdce každé družice tvoří velmi přesné atomové hodiny s celsiovým nebo rubidiovým standardem. Pro komunikaci se Zemí jsou družice vybaveny přijímačem a vysílačem. Elektrickou energii získávají pomocí solárních panelů a svou polohu jsou schopny korigovat pomocí raketových motorů. Satelity šíří digitální informaci (efemeridy, almanachy apod.) a je vždy zaručena viditelnost minimálně 4 družic s elevací větší než 15^{o} a to 24 hodin denně ze kteréhokoliv místa na Zemi. [26][27]

Řídící segment vytváří a udržuje systémový čas, průběžně monitoruje funkci družic, provádí manévry satelitů (korekce drah satelitů) a koordinuje činnost celého systému. Řídící segment se skládá z jedné hlavní řídící stanice a několika monitorovacích stanic, které nepřetržitě přijímají signály ze všech družic. Hlavní řídící stanice shromažďuje a zpracovává údaje z monitorovacích stanic a počítá efemeridy družic. Tyto efemeridy slouží k navigaci

v reálném čase a ve správný okamžik jsou předány družicím. Družice tyto informace vysílají v navigační zprávě uživatelům. [26][27]

Uživatelský segment zahrnuje pozemní přijímače schopné přijímat a zpracovávat družicové GNSS signály. Pasivní přijímače získávají informace o své poloze a čase tak, že dokážou dekódovat signály z družic. Provoz těchto přijímačů je bez poplatku a díky tomu, že přijímače nekomunikují s družicemi, je GNSS schopen obsloužit neomezený počet uživatelů. [26][27] [28]

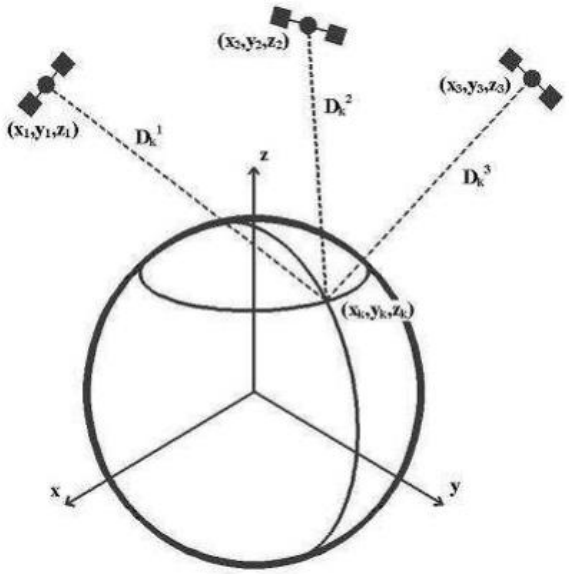
3.2.2. Výpočet polohy

Dálkoměrné pasivní systémy dokáží určit polohu přijímače díky známé vzdálenosti od jednotlivých družic. Známe-li souřadnice minimálně tří družic $(x_i, y_i, z_i,\ kde\ i = 1{,}2{,}3)$ a vzdálenost k těmto družicím, můžeme polohu přijímače (x_p, y_p, z_p) určit pomocí teoretického výpočtu. Schéma příjmu signálu ze tří družic je znázorněno na obrázku 9. [26]

$$\mathrm{D}_p^i = \sqrt{\left(x_i - x_p\right)^2 + \left(y_i - y_p\right)^2 + \left(z_i - z_p\right)^2}, i = 1, 2, 3 \qquad (12)$$

Kde D_p^i je vzdálenost mezi přijímačem p a satelitem i.

Prostorové protínání z délek určí dvě možné polohy přijímače. Pomineme-li určení polohy mimo povrch Země, stačilo by teoreticky pro určení polohy přijetí signálu od tří družic. V praxi je však určení vzdálenosti přijímače od družic vypočítává nepřímo pomocí kódového měření. [26][27]



Obrázek 9: Schéma určení polohy ze tří signálu.

Každá družice vysílá signál, ve kterém jsou modulovány pseudonáhodné kódy a navigační zprávy. Navigační zpráva se vysílá ve formě binárního kódu, kódovaného pomocí fázového posunu nosných vln. [26][27]

U kódovaného měření přijímače generují repliku kódu v závislosti na čtení vlastních hodin. Porovnáním repliky a kódu získaného z družice dostanou časový posun τ_{pi}, který odpovídá tranzitnímu času mezi družicí a přijímačem. Vynásobením transitního času rychlostí světla získáváme vzdálenost přijímače od družice. [26][27]

$$\mathrm{D}_p^i = \mathrm{c} * \tau_{pi} \tag{13}$$

Kde c je rychlost světla.

Tato vzdálenost, nazývající se pseudovzáleností by ovšem byla zatížena značnou chybou z důvodu desynchronizace časové základny systému GNSS a uživatele. Tuto chybu přijímače označíme jako δ_p a můžeme jí přepočítat na vzdálenost. [26][27]

$$\mathrm{d} = \mathrm{c} * \delta_p \tag{14}$$

Pro určení správné polohy musíme přidat do rovnice (12) δ_p jako čtvrtou neznámou. Informaci o systémovém čase a tudíž i o δ_p přijímač dostává z další družice. Pro správný výpočet polohy (15) je tedy nutný příjem signálu minimálně od 4 družic současně. [26][27]

$$\mathrm{D}_c^i = \mathrm{c} * \tau_{ci} = c * \left(\tau_{pi} + \delta_p\right) = \mathrm{D}_p^i + d\ , i = 1, 2, 3, 4 \tag{15}$$

Kde D_c^i je pseudovzdálenost mezi satelitem a GNSS přijímačem

3.2.3. Metoda měření polohy

Při měření jízdní dynamiky vyžadujeme kinematické určování polohy. Anténa GNSS přijímače je vzhledem k zemskému povrchu v pohybu. Snímač využívá relativní určování polohy. [27]

U kinematické metody se napřed měří počáteční inicializace a pak přijímač provádí podrobné měření v krátkém časovém kroku. Při výpadku signálu není potřeba nové inicializace, metoda vychází z předpokladu, že ambiguity se určí i za pohybu na základě přesných kódových měření. [26][27]

Pro zvýšení přesnosti snímač využívá korekcí u kódového měření tzv. metodu diferenciální GNSS (DGNSS). Základem DGNSS je známá poloha referenční stanice. Díky znalosti vlastní přesné polohy je referenční stanice schopna vypočítat chybu v měření

pseudovzdálenosti mezi stanicí a satelitem. K chybě dochází vlivem atmosféry na měřenou vzdálenost. [26][27]

Princip spočívá v předpokladu, že chyba naměřená v pseudovzdálenosti je u nepříliš vzdálených přijímačů v okolí referenční stanice podobná. Okolní přijímače použijí korekci, kterou mohou dostat online například přes GSM a odečtou jí od vlastních měření. Pomocí DGNSS dochází k výraznému zpřesnění určení polohy. [26][27]

3.3. Gyroskopický senzor úhlové rychlosti

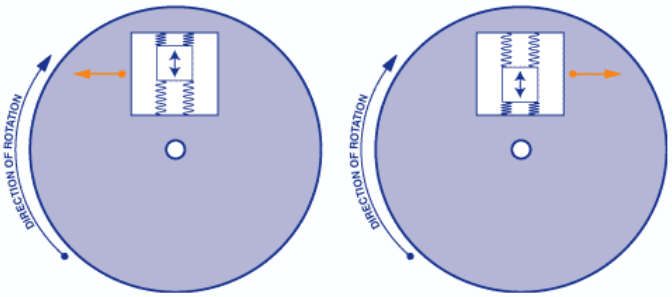
Gyroskop je zařízení sloužící k přímému měření orientace objektu. Obecně gyroskopem nazýváme těleso, které se snaží zachovat svou osu rotace okolo osy kolmé k tomuto tělesu. První mechanické gyroskopy využívaly gyroskopického efektu díky zákonu zachování hybnosti. Po natočení gyroskopu se změní poloha mezi konstantně rotujícím setrvačníkem a vnějším ramenem o úhel natočení. [29][30]

Gyroskopy pracující na optickém principu fungují na základě měření fázového posunu dopadu optického paprsku na senzor. Tyto přístroje se vyznačují vysokou přesností, ale také vysokou pořizovací cenou. Proto je jejich využití omezené. Gyroskopické senzory nejvíce používané v praxi jsou vyrobeny technologií MEMS. MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) je technologie, kdy na čipu křemíkové báze se spolu s elektrickými obvody vytváří i mechanické mikrosoučásti, které tvoří samotný snímač. [29][30][31]

MEMS gyroskopy vychází z detekce Coriolisovy síly. Tato setrvačná síla obecně působí na libovolný objekt uvedený do pohybu v rotující soustavě rotující úhlovou rychlostí Ω. Coriolisova síla je generována kolmo na spojnici tělesa s osou rotace a její velikost je dána vztahem (16). Princip generování Coriolisovy síly znázorňuje obrázek 10. [29]

$$\vec{F} = -2 * m * \vec{\Omega} \times \bar{v} \tag{16}$$

Kde $\vec{F}$ je Corilisova síla, m je hmotnost pohybujícího se tělesa a $\bar{v}$ je rychlost pohybu tělesa.



Obrázek 10: Princip snímače úhlové rychlosti. [22]

3.4. Měřící technika – Xsens MTi-G

Jak již bylo řečeno, mým požadavkům na techniku schopnou zaměřit dynamické charakteristiky motocyklů nejvíce vyhovuje sdružený snímač pro jízdní zkoušky Xsens MTi-G zobrazený na obrázku 11. Tento senzor je přímo určen pro měření jízdní dynamiky. Zařízení je založeno na třech hlavních inerciálních senzorech. Obsahuje tříosý akcelerometr, tříosý gyroskop, GPS přijímač a další pomocné snímače jako teploměr, barometr či magnetometr, které mohou sloužit ke kontrole a kalibraci. Snímač k měření vyžaduje neustálé zapojení k počítači, do kterého se ukládají naměřená data.

Obrázek 11: Sdružený snímač Xsens MTi-G. [25]

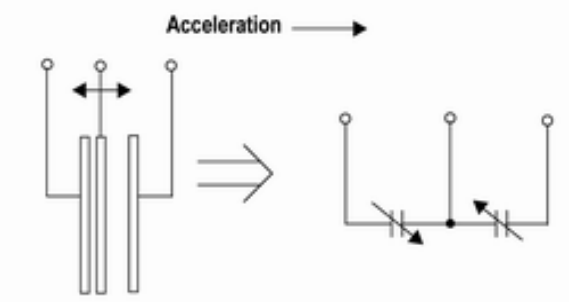
3.4.1. Technické specifikace

Výrobcem používaného snímače je holandská společnost Xsens Technologies B. V., která patří mezi přední inovátory v oblasti snímání pohybu. Jejich produkty se používají v řadě profesionálních a průmyslových odvětví.

Rozměry Xsens MTi-G jsou 58 x 58 x 33 mm. Hmotnost zařízení činí 68g a rozsah pracovní teploty je od - 20 °C až 60 °C. Základním stavebním kamenem Xsens MTi-G je snímač zrychlení, snímač úhlové rychlosti a GPS anténa.

Tříosý akcelerometr

Snímač zrychlení ve třech osách pohybu. Rozsah senzoru ± 5 g. Jednotkou zrychlení je [$m.s^{-2}$]. Akcelerometr pro jízdní dynamiku v Xsens MTi-G je vyrobený technologií MEMS a je kapacitní. Jeho struktura a funkce je založena na proměnné kapacitě tříelektrodového vzduchového kondenzátoru. Využívá se nelineární závislosti kapacity na vzdálenosti elektrod kondenzátoru. Je-li prostřední elektroda v pohybu vlivem zrychlení, viz obrázek 12, vznikne změna ve vzdálenosti elektrody od kondenzátoru. Změna kapacity kondenzátoru se přepočítá na velikost zrychlení. [22][25]



Obrázek 12: Princip kapacitního akcelerometru. [22]

Gyroskop

Snímač úhlové rychlosti ve třech osách. Rozsah senzoru ± 300 °/s. Jednotkou úhlové rychlosti je [rad/s^2, st/s^2]. Použitý gyroskop je vyrobený technologií MEMS, je monolitický a kapacitní. Pracuje na principu detekce Coriolisovy síly. Základem je periodicky se pohybující struktura dané hmotnosti upevněná pomocí pružin v rámu. Je-li směr pohybu gyroskopu kolmý ke směru otáčení, působí na hmotnou pohybující se část snímače Coriolisova síla, jejíž velikost je úměrná úhlové rychlosti otáčení. Stlačení vnějších pružin rámu způsobí vzájemný posuv měřících plošek. Tento posun se přepočítá na velikost úhlové rychlosti. [22]

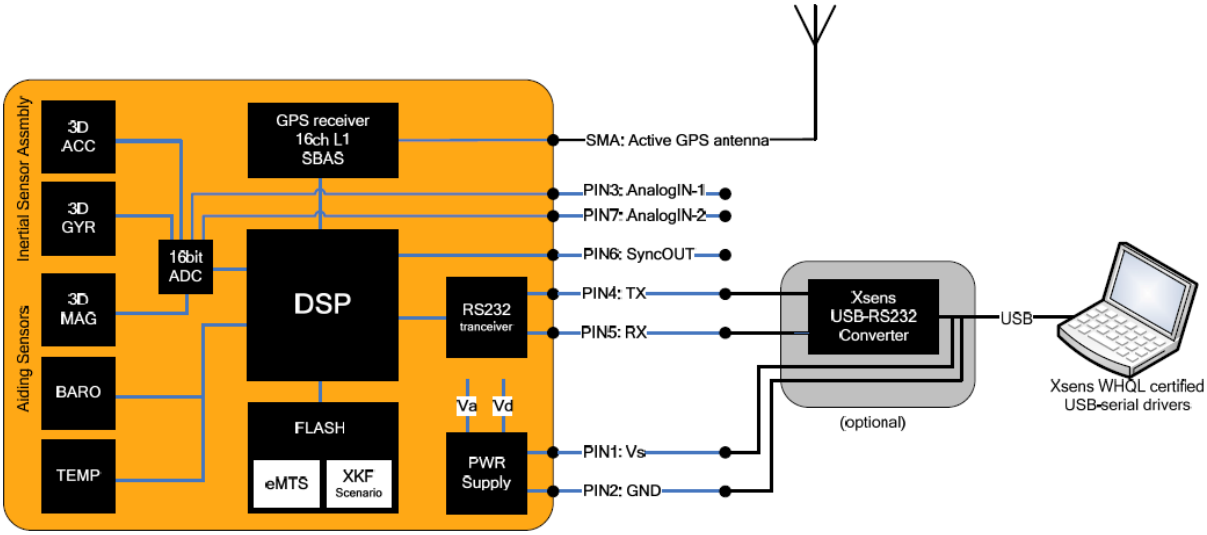
Přijímač GPS signálu

Jedná se o 50 kanálový GPS přijímač, pomocí kterého se získává aktuální poloha a rychlost vozidla. Anténa GPS je součástí balení, viz obrázek 13 a k zařízení se připojuje externě. Výstupy z GPS přijímače slouží ke korekci inerciálních výstupu z měření akcelerometru a gyroskopu pomocí Kalmanova filtru. Poloha přijímače se zjišťuje na základě zpoždění signálu, které vydávají satelity GPS na oběžné dráze. Rychlost z GPS je získaná pomocí Dopplerova jevu, kde se sleduje změna ve frekvenci nosné vlny, která putuje mezi přijímačem a satelitem. Poloha satelitu i přijímače je známá, a proto se může vypočítat absolutní rychlost přijímače. [22][25]

Obrázek 13: Sdružený snímač Xsens MTI-G a anténa GPS signálu. [25]

Další přídavné senzory tvoří snímač magnetického pole, rozsah senzoru ± 750 mGauss, snímač teploty, rozsah: - 55 °C až + 125 °C a tlakový snímač, tzv. barometr s rozsahem: 30 až 120x10^3 Pa. [22][25]

Architekturu zapojení jednotlivých senzorů pak ukazuje obrázek 14. Kde DSP je mikroprocesor, SBAS je zkratka Satellite Based Augmentation System, XKF je Kalmanův filtr a ADC převodník analog – digital.



Obrázek 14: Architektura snímače MTi-G. [25]

3.4.2. Kalmanův filtr

Stanovení polohy vozidla přímo z akcelerace je velice problematické. Kalibrace prostorové orientace snímače je zatíženo chybou z integračních konstant, které měření po dostatečně dlouhé době znehodnotí. Orientace a pozice jsou u MTi-G korigovány pomocí Kalmanova filtru. Ten je v zařízení přednastavený a jeho specifikace je 6DOF GPS (XKF-6G). [25]

Obecně se jedná o rekurzivní filtr, který pracuje ve dvou krocích. Prvním krokem je predikce v čase a druhým korekce v čase. Kalmanův filtr pracuje se stavovými veličinami. Pro ně platí, že v každém časovém okamžiku t v sobě zahrnují veškerou informaci ze svého minulého vývoje. [32][33]

Stavový model se skládá ze dvou částí. První vyjadřuje, jak stav současný závisí na stavu minulém (17). Druhá část říká, jak aktuální výstup závisí na aktuálním stavu (18).

$$x_t = Mx_{t-1} + Nu_t + w_t \tag{17}$$

$$y_t = Ax_t + Bu_t + v_t \tag{18}$$

Kde x_t značí stav, u_t je řízení a w_t, v_t jsou šumy. M, N, A, B jsou matice parametrů stavu.

V prvním kroku predikce je predikovaný, respektive současný stav počítán zanedbáním šumů (19). To je možné díky tomu, že u dat předpokládáme bílý šum, jehož střední hodnota je rovná nule. Následně je aktualizována kovarianční matice (rozptyl), podle zákona přenosu chyb (20). [32]

Predikce:

$$x_t = Mx_{t-1} + Nu_t \tag{19}$$

$$R_x = R_w + MR_xM' \tag{20}$$

Kde x_t je stav systému, u_t je vstup a R_x je kovarianční matice stavu a R_w je kovarianční matice šumu.

V praxi krok predikce znamená, že data z akcelerometru jsou integrována a tím je odhadnuta orientace a pozice snímače.

Následuje krok korekce. V tomto kroku se nejprve vypočítá předpověď výstupu zanedbáním šumu (21) a přepočtou se kovarianční matice stavu a výstupu (22), (23). Po tomto výpočtu je predikovaný stav x_t opraven o tzv. Kalmanův gain (24), (25). Zesílení udává, kolik procent z vypočítané predikce se použije na úpravu stavu. Kalmanův gain musí mít hodnotu menší než 1. Použití 100% korekce by znamenalo, že filtr není aktivní. [32][33]

Korekce:

$$y_p = Ax_{t-1} + Bu_t \tag{21}$$

$$R_y = R_v + AR_xA' \tag{22}$$

$$R_x = R_x - R_xA'R_y{}^{-1}AR_x \tag{23}$$

$$K_g = R_xA'R_v{}^{-1} \tag{24}$$

$$x_t = x_t + K_g(y_t - y_p) \tag{25}$$

Kde y_p je predikovaný výstup, R_y je kovarianční matice výstupu a K_g je Kalmanův gain.

V praxi je v kroku predikce minimalizována chyba z akcelerometru za použití údajů o poloze z GPS přijímače a dat z barometru.

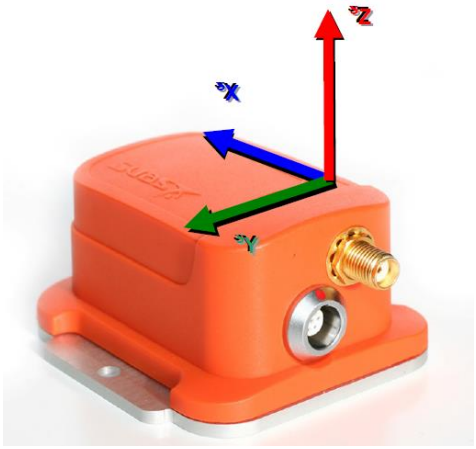
3.4.3. Výstupy senzoru

Na výstupu zařízení dostáváme údaje ze tří výstupních módů. Každý mód měří v jiném souřadném systému, ale dohromady musí poskytovat kompletní informaci o orientaci,

poloze, rychlosti a kalibrovaných datech jednotlivých snímačů. Všechny tyto údaje jsou zpracovány s jednotnou časovou stopou podle našich definovaných požadavků.

Definice souřadných systém

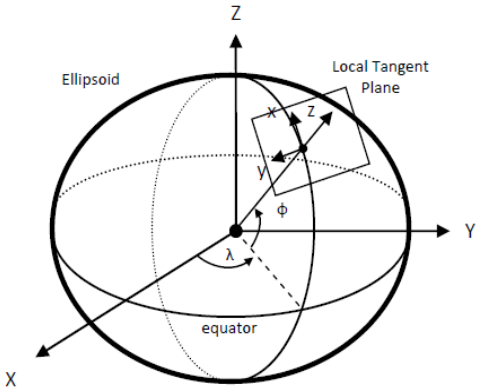
Lokální systém snímače $S_{x,y,z}$ je pravoúhlý souřadný systém samotného senzoru vyznačený na obrázku 15. Tento systém využívají kalibrovaná data (3D akcelerace; 3D úhlová rychlost; 3D magnetické pole) a odpovídá defaultně NWU (North-West-Up) konvenci. [25]



Obrázek 15: Lokální souřadný systém MTi-G. [25]

Zeměpisné sférické souřadnice MTi-G používá k jednoznačnému určení pozice snímače kdekoliv na Zemi. Jsou vyjádřeny třemi souřadnicemi Longitude, Latitude a Altitude (LLA) v souladu s WGS84. [25]

Local Tangent Plane (LTP) je souřadný systém, který je lokální linearizací systému LLA. Snímač tento systém používá pro záznam 3D rychlosti. Výchozí orientace defaultně odpovídá NWU konvenci. LLA a LTP systémy jsou znázorněny na obrázku 16.



Obrázek 16: Schéma LLA a LTP souřadných systémů. [25]

Orientace snímače

Snímač dokáže stanovit svojí orientaci rozdílem lokálního souřadného systému snímače $S_{x,y,z}$ a LTP. Výstupní orientace snímače je pak prezentována několika módy:

- Eulerovy parametry tvoří soubor čtyř hodnot udávající přesnou 3D orientaci (26), které reprezentují rotaci okolo jednotkového vektoru $\boldsymbol{n}$ o úhel $\propto$ (27). [25]

$$q_{GS} = (q_0, q_1, q_2, q_3) \tag{26}$$

$$q_{GS} = (\cos\left(\frac{\propto}{2}\right), n * \sin\left(\frac{\propto}{2}\right)) \tag{27}$$

- Eulerovy úhly tvoří soubor tří úhlů. Klopení, klonění a stáčení (roll, pitch, yaw). Jednotlivé úhly pak odpovídají rotaci okolo os XYZ globálního pravoúhlého systému Země. [25]
  - rotace kolem těžištní osy x – úhel klopení ϕ – hodnoty [-180°; 180°]
  - rotace kolem těžištní osy y – úhel klonění Θ – hodnoty [-90°; 90°]
  - rotace kolem těžištní osy z – úhel stáčení ψ – hodnoty [-180°; 180°]

  Jednotlivé úhly můžeme spočítat z Eulerových parametrů podle následujících vztahů.

$$\phi_{GS} = tan^{-1}\left(\frac{2q_2q_3+2q_0q_1}{2{q_0}^2+2{q_3}^2-1}\right) \tag{28}$$

$$\Theta_{GS} = -sin^{-1}(2q_1q_3 - 2q_0q_2) \tag{29}$$

$$\psi_{GS} = tan^{-1}\left(\frac{2q_1q_2+2q_0q_3}{2{q_0}^2+2{q_1}^2-1}\right) \tag{30}$$

- Matice rotací neboli řídící kosinová matice poskytuje kompletní informaci o orientaci přístroje. Matice rotací můžeme popsat jako transformační matici, která uvádí v soulad globální LTP systém a lokální systém snímače. Matici rotací můžeme interpretovat pomocí Eulerových parametrů (31) či pomocí Eulerových úhlů (32). [25]

$$\mathrm{R}_{GS} = \begin{bmatrix} {q_0}^2 + {q_1}^2 - {q_2}^2 - {q_3}^2 & 2q_1q_2 - 2q_0q_3 & 2q_0q_2 + 2q_1q_3 \\ 2q_0q_3 + 2q_1q_2 & {q_0}^2 - {q_1}^2 + {q_2}^2 - {q_3}^2 & 2q_2q_3 - 2q_0q_1 \\ 2q_1q_3 - 2q_0q_2 & 2q_2q_3 + 2q_0q_1 & {q_0}^2 - {q_1}^2 - {q_2}^2 + {q_3}^2 \end{bmatrix} \tag{31}$$

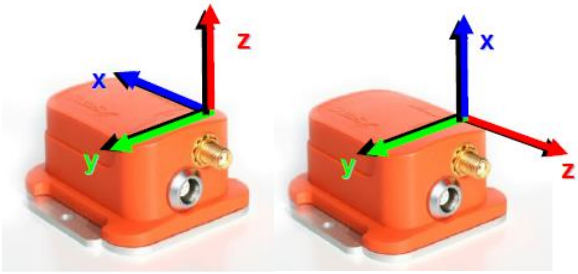
$$\mathrm{R}_{GS} = R_{\psi}^{Z} R_{\Theta}^{Y} R_{\phi}^{X} = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\Theta & 0 & \sin\Theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\Theta & 0 & \cos\Theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \tag{32}$$

Po roznásobení dostaneme matici rotací, která je na výstupním módu orientace snímače definována souborem devíti hodnot $(a - i)$.

$$R_{GS} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & d & g \\ b & e & h \\ c & f & i \end{bmatrix} \quad (33)$$

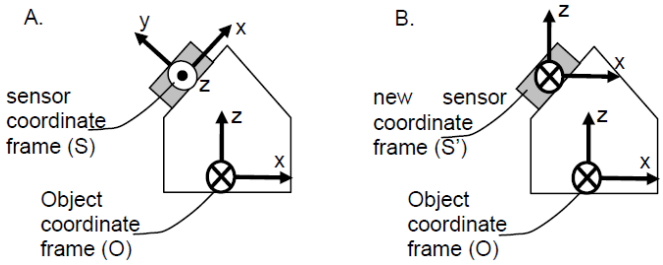
V některých situacích může nastat, že osy snímače přesně neodpovídají osám objektu, který chceme měřit. Proto existují dva způsoby jak softwarově na výstupu zkoordinovat oba souřadné systémy. Prvním je ruční zadání matice natočení, neboť je-li známá poloha snímače, můžeme libovolně pozměnit souřadný systém snímače jako například v rovnici (34). [25]

$$R_{OS} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (34)$$



Obrázek 17: Ruční zadání matice natočení. [25]

Druhým způsobem je využití funkce Object Reset. Tato funkce automaticky doplní matici natočení. Podmínkou pro použití této funkce je, že osa x natočeného snímače musí ležet v rovině xz měřeného objektu. Tzn., že funkce nastaví lokální systém snímače tak, aby výchozí naklonění bylo nulové. [22][25]



Obrázek 18: Princip funkce Object Reset. [25]

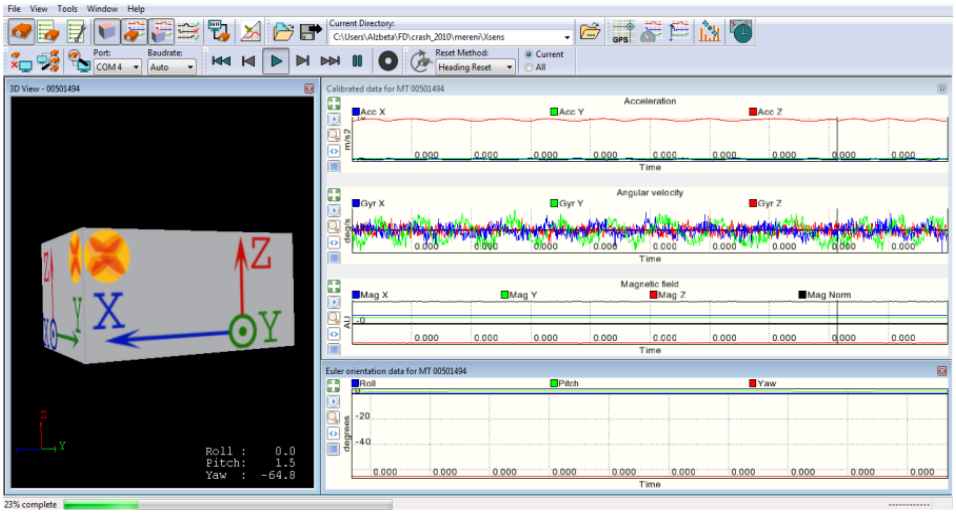
3.5. Software – MT manager

Surová data ze snímače jsou v počítači zpracovává kontinuálně během měření pomocí softwaru MT manager. Pracovní rozhraní MT manageru ukazuje obrázek 19. Tento software má v sobě několik předdefinovaných scénářů (filtrů) pro sběr dat. Tyto filtry se využívají u měření, která jsou zatíženy šumem a jinými nelinearitami.

Pro účely našeho měření se jako nejvíce vhodný ukázal scénář Automotive. Tento scénář je určen pro měření silničních vozidel, tj. vozidel, u kterých se nepřepokládá významný boční skluz. Pro tento scénář se předpokládá, že trajektorie závisí na rychlosti a je ekvivalentní stáčení vozidla. Osa x snímače musí korespondovat s osou x vozidla s odchylkou do jednoho stupně.

Výstupem z MT manager je soubor dat ve formátu .mtb. Tato data jsou určena pro další zpracování v softwarech jako MS Excel či National Instruments Diadem. NI DIAdem umožňuje rychlé hledání, analýzu a vizualizaci dat. Tento software se ukázal jako ideální vzhledem k charakteru, množství a typu zpracovaných dat. Všechny grafické výstupy v této práci jsou právě výstupy z programu NI Diadem.

Výstupem z MT manageru může být také .kmz soubor, který v sobě nese informace o poloze z GPS souřadnic a pomocí např. softwaru Google Earth umožňuje zobrazit projetou cestu v mapě.



Obrázek 19: Rozhraní MT manager. [25]

4. Měření a zpracování dat

Zásadní pro správně provedené měření je jednak vhodné umístění a nastavení senzoru, jednak následné zpracování naměřených dat. Nevhodným umístěním senzoru, například na místo podléhající vibracím, můžeme do výsledků zanést chyby, které lze poté jen obtížně odstranit. Při zpracování dat je nutné provést transformaci souřadnic, která z hodnot odstraní vliv gravitačního zrychlení. Následně můžeme data očistit od zatížení šumem pomocí filtrů.

4.1. Umístění snímače

Měření probíhá snímačem sdružujícím inerciální měření a měření GNSS. Kromě umístění samotného senzoru je potřeba vhodně umístit i anténu GNSS.

U JMV platí, že řidič výrazně ovlivňuje hmotnost i pružící efekt podvozku vozidla. Při osazování vozidla snímačem je potřeba na vozidlo nahlížet jako na systém řidič – motocykl a umístění či vyrovnávání senzoru provádět s jezdcem sedícím na motocyklu.

Umístění snímače by mělo být co nejblíže předpokládanému těžišti systému řidič – motocykl. Snímač se upevňuje na vodorovnou plochu tak, aby byla zajištěna souosost osy *x* snímače s osou *x* motocyklu. Anténa se umisťuje na vozidlo horizontálně, tak aby nebyla stíněna kapotáží či jezdcem a měla tak dostatečný příjem signálu z družic GNSS. Vzdálenost mezi anténou a snímačem se před každým měřením změří a zadá do interní paměti snímače pomocí komunikačního protokolu. Pro připevnění snímače i antény lze použít oboustrannou lepicí pásku.

Senzor vyžaduje neustálé napájení z počítače, do kterého se kontinuálně ukládají naměřená data. Měřící počítač musí být připevněn na dobře dostupném místě s ohledem na bezpečnost a chlazení.

Nastavení snímaní senzoru vychází z teoretických základů uvedených v kapitolách 3.4. a 3.5. Pro měření jízdní dynamiky se používá předdefinovaný scénář Automotive. Vzorkovací frekvence snímače se používá 100 Hz.

Výstupní snímané veličiny ze senzoru:

- zrychlení v osách x, y, z (Acc_X, Y, Z) [m/s^2],
- úhlová rychlost v osách x, y, z (Gyr_X, Y, Z) [rad/s],
- síla magnetického pole v osách x, y, z (Mag_X, Y, Z) [mGauss],
- úhly klonění, klopení a stáčení (Roll, Pitch, Yaw) [^{o}],
- zeměpisná výška, šířka a délka (Altitude, Latitude, Longitude) [m] [^{o}],
- rychlost v osách x, y, z (Vel_X, Y, Z) [m/s].

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	Acc_X	Acc_Y	Acc_Z	Gyr_X	Gyr_Y	Gyr_Z	Mag_X	Mag_Y	Mag_Z	Roll	Pitch	Yaw	Latitude	Longitude	Altitude	Vel_X	Vel_Y	Vel_Z
2	-0.219233	0.684883	8.138658	-0.036371	0.005955	0.002723	0.448216	-0.283368	-1.046950	1.885646	1.014943	5.810889	50.067100525	14.423583031	267.428040	-0.464547	0.773263	-0.338302
3	-0.126637	0.774145	12.562035	-0.001945	-0.068262	0.008784	0.448873	-0.282008	-1.044847	1.889543	0.977455	5.814608	50.067100525	14.423583031	267.424774	-0.463954	0.776945	-0.310622
4	-0.651879	0.916334	9.059930	-0.010983	0.021293	-0.016263	0.449528	-0.283194	-1.045356	1.888042	0.991723	5.805672	50.067100525	14.423583031	267.421631	-0.469522	0.782580	-0.317802
5	0.277629	0.708382	10.977398	-0.040786	-0.024878	0.010464	0.449196	-0.282646	-1.044587	1.869715	0.979048	5.811173	50.067100525	14.423583031	267.418518	-0.465217	0.786497	-0.306048
6	-1.585343	0.269967	8.226943	-0.016233	0.027246	-0.017393	0.448913	-0.283260	-1.047307	1.865196	0.996743	5.801696	50.067100525	14.423583031	267.415375	-0.479589	0.785048	-0.321605
7	-0.508671	1.990497	10.415702	0.011953	0.001435	-0.026131	0.449356	-0.282534	-1.045000	1.876730	0.999822	5.786732	50.067100525	14.423583031	267.412201	-0.484504	0.801137	-0.314913
8	-0.312691	0.286846	9.081819	-0.011012	-0.035170	-0.003850	0.447550	-0.292584	-1.048973	1.875317	0.981521	5.783844	50.067100525	14.423582077	267.409027	-0.486026	0.800874	-0.322138
9	-0.334548	1.035200	8.423961	-0.030282	0.011906	-0.000767	0.450629	-0.277251	-1.051558	1.862908	0.990122	5.783602	50.067100525	14.423582077	267.405731	-0.488678	0.808232	-0.335690
10	0.276370	1.101801	12.904438	-0.000696	-0.059736	0.000535	0.452996	-0.280294	-1.053050	1.866686	0.953363	5.783005	50.067100525	14.423582077	267.402191	-0.491753	0.816021	-0.304646
11	0.079326	0.741412	9.070572	0.001284	0.025245	-0.018400	0.451940	-0.279137	-1.049936	1.952581	0.992043	5.760018	50.067100525	14.423583984	267.404266	-0.463695	0.754022	-0.309555
12	0.787692	0.760718	11.163305	-0.028621	-0.011993	0.006488	0.452703	-0.279047	-1.054251	1.941193	0.986818	5.763478	50.067100525	14.423583984	267.401245	-0.454314	0.758786	-0.296010
13	-0.932634	-0.314926	8.739562	-0.025744	0.038916	-0.014069	0.452234	-0.276509	-1.051957	1.931266	1.011143	5.756152	50.067100525	14.423583984	267.398224	-0.461483	0.751922	-0.306754
14	-0.565844	1.825562	10.526453	0.018479	0.025554	-0.019739	0.449608	-0.283628	-1.046608	1.946612	1.027928	5.745319	50.067100525	14.423583984	267.395203	-0.466728	0.766165	-0.298980
15	-0.389052	0.400763	9.064472	-0.029132	-0.022963	0.000449	0.448838	-0.283816	-1.044961	1.934868	1.016538	5.745108	50.067100525	14.423583984	267.392181	-0.469071	0.766859	-0.306326

Obrázek 20: Snímané veličiny.

4.1.1. Experiment umístění snímačů

Pro nalezení vhodného umístění snímače na motocyklu jsem provedl sérii zkušebních měření na motocyklu KTM 990 Adventure R. Předmětem experimentu bylo nalézt všechny možné pozice pro umístění senzorů a následně empiricky určit nejvhodnější z nich.

Po osazení snímači motocykl vždy projel krátký úsek a jednotlivé výsledky byly porovnány s ohledem na shodnost a kvalitu dat.

Měření probíhala 23. března 2016 od 14:00 do 15:30 v okolí komplexu budov ČVUT FD Horská. Celková délka úseku byla přibližně 600m. Během měření bylo zataženo a teplota okolo 13 °C.

Vzhledem ke konstrukci vozidla a možnosti přístupu k měřícímu zařízení se jako použitelné ukázali dvě pozice pro umístění snímače. Pozice pro umístění senzoru č. 1 je na zadní plotně motocyklu, pozice č. 2 potom uvnitř schránky umístěné z vrchu mezi nádržemi (viz obrázek 21).

Obrázek 21: Umístění snímače na motocyklu KTM Adventure.

Měření probíhala se dvěma zařízeními Xsens MTi-G současně. Snímače byly k motocyklu připevněny dle zásad z úvodu této kapitoly. Údaje ze snímačů zpracovávaly dva měřící počítače, které byly umístěny do textilní brašny v zadní části motocyklu. Antény přijímačů GNSS od obou senzorů byly umístěny na zadní plotně (viz obrázky 22 a 23).

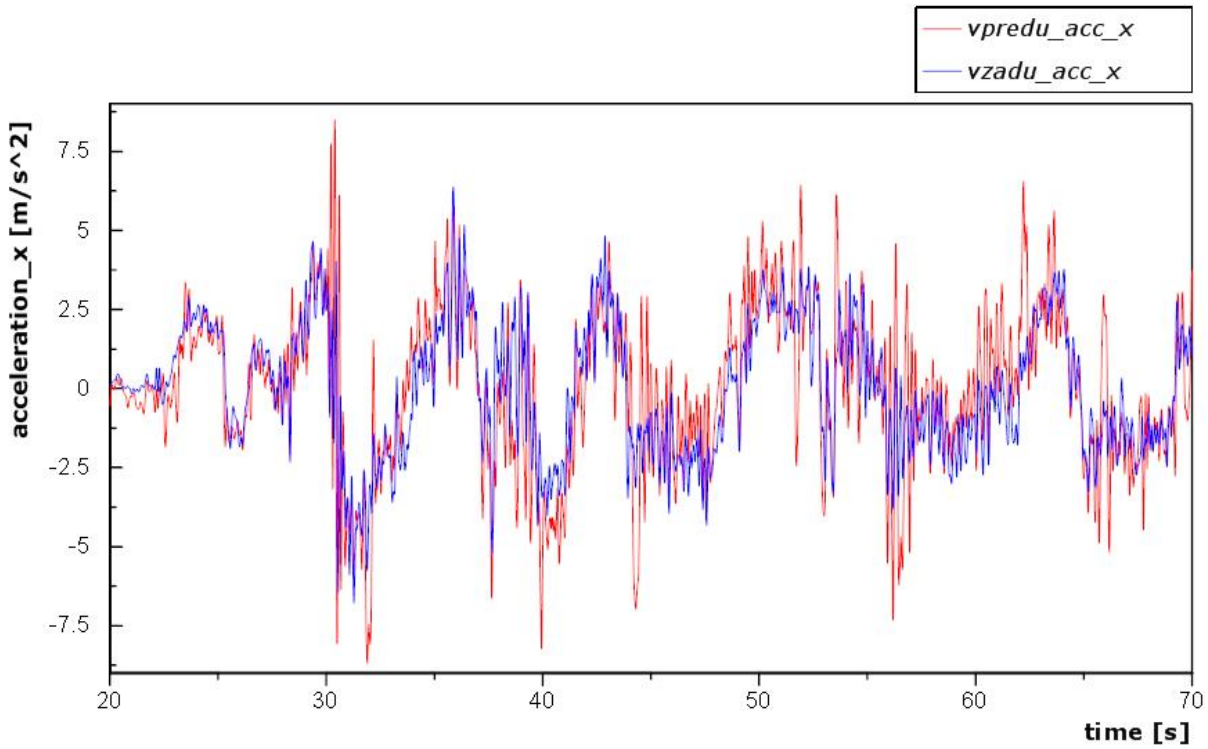
Měření byly provedeny dvě, přičemž při druhém měření byly zaměněny pozice senzorů, aby se vyloučilo ovlivnění výsledku vlivem odlišných měření samotných senzorů.

Obrázek 22: Osazení motocyklu měřicí technikou (vlevo), měřící počítače (vpravo).

Obrázek 23: Umístění snímače vzadu (vlevo), umístění snímače vpředu (vpravo).

4.1.2. Porovnání výsledků experimentu

Naměřená data byla zpracována (viz kapitola 4.2.) a porovnána mezi sebou. Průběh zrychlení v ose x od obou snímačů ukazuje obrázek 24. Jak můžeme vidět, signál od obou snímačů podléhá šumu. Šumění dat způsobují vibrace od podložky a vlastní šumění přístroje. Nejvhodnější pozice pro umístění snímače je taková, při které dochází k nejmenšímu šumění dat vlivem umístění senzoru.

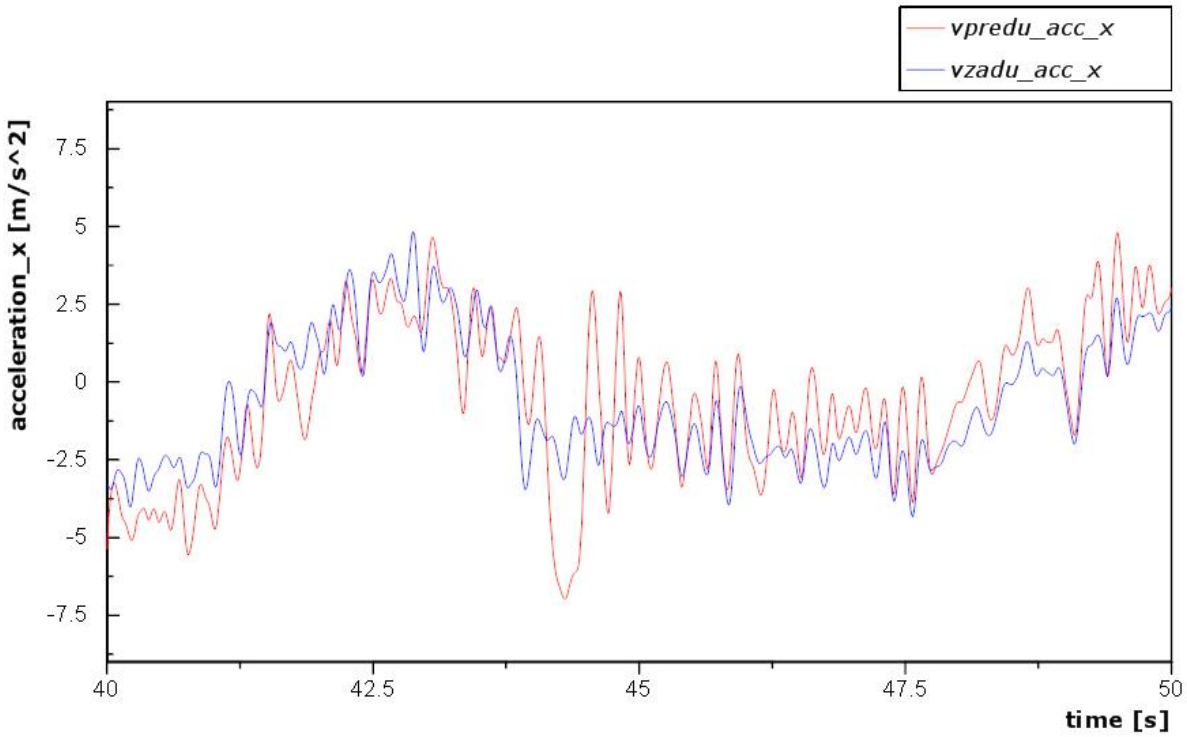


Obrázek 24: Průběh zrychlení motocyklu od obou senzorů.

Při detailnějším pohledu na průběh signálů (viz obrázek 25) je patrné, že umístění snímače vzadu na zadní plotnu motocyklu způsobuje menší zašumění dat než umístnění vpředu.

Pozice na zadní plotně je sice v rozporu s tvrzením, že umístění snímačů má být co nejblíže těžišti systému řidič-motocykl, ale v tomto případě zřejmě hráli roli vibrace jdoucí od motoru. Je ovšem nutné podotknout, že oba signály mají dobrou vypovídající hodnotu a použitím pozice vpředu by nedošlo ke znehodnocení výsledků měření.

Každý motocykl má jedinečný průběh vibrací a omezené možnosti pro umístění snímače. Proto tento experiment nelze paušalizovat a je pravděpodobné, že u jiných typů motocyklu bude nejvhodnější umístění senzoru např. na víčko nádrže. Kdyby cílem měření bylo dosáhnout co nejvyšší kvality dat, museli bychom provádět experiment umístění snímače pro každý motocykl zvlášť.



Obrázek 25: Detailní průběh zrychlení motocyklu od obou senzorů.

4.2. Zpracování naměřených dat

Jednotlivé snímače uvnitř Xsens MTi-G převádí naměřenou veličinu na elektrické napětí. To dále pokračuje do ADC převodníku, kde je signál z analogové formy převeden na digitální. Tato data v podobě čísel následně zpracovává počítač.

Každé takové měření je značně zatížené šumem. Ten vzniká už při samotném měření veličiny, které ovlivňují náhodné chyby. Další nežádoucí vlastností jsou vibrace. Ty rozkmitávají mikro-mechanické součásti snímače a v neposlední řadě vzniká šum i při převodu dat z analogové na digitální formu.

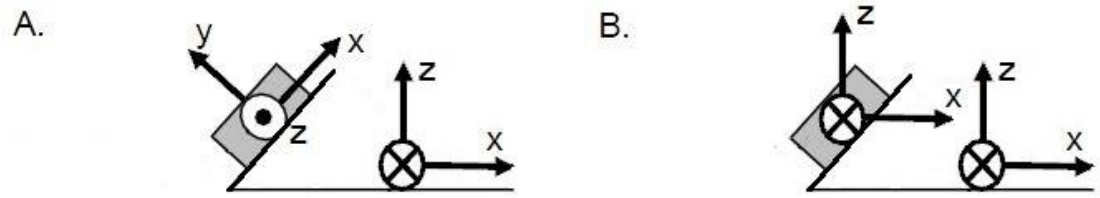
I přes velkou sofistikovanost senzorů, které se snaží maximálně eliminovat zmíněné problémy, mají data bez dalšího zpracování jen nízkou vypovídací hodnotu. Pro úplnou interpretaci dat je nutné použití filtraci měřené veličiny. Teprve potom lze data správně vyhodnotit.

Pro hodnoty zrychlení dále platí, že kromě šumu data ovlivňuje působení gravitačního zrychlení. To je nutné z dat následně odstranit transformací souřadnic snímače do systému horizontálně vertikálního.

Data, která slouží jako podklad ke zpracování v této podkapitole, byla naměřena 4. dubna 2016 na motocyklu KTM 990 Adventure R.

4.2.1. Transformace souřadnic

Během měření je snímač pevně přichycen k vozidlu. Jeho souřadný systém je totožný se souřadným systémem vozidla. Vlivem klonění či klopení vozidla během jízdy je velikost zrychlení v osách x a y ovlivněna působením gravitačního zrychlení. Toto působení gravitace je nutné z dat odstranit. Proto se na naměřených datech provede transformace souřadnic do systému horizontálně vertikálního. Tato transformace eliminuje vliv gravitačního zrychlení.



Obrázek 26: Systém před transformací (vlevo) a po transformaci (vpravo).

Základem transformace je vytvoření matice rotací pro všechny osy (R_x, R_y, R_z). Vynásobením těchto matic dostaneme Transformační matici R pro úpravu souřadnic signálu.

$$R = [R_x \times R_y \times R_z] \tag{35}$$

Kde pro osu x platí (α značí úhel klopení),

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \tag{36}$$

pro osu y platí (β značí úhel klonění),

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \tag{37}$$

pro osu z platí (γ značí úhel stáčení). [12]

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{38}$$

Transformační matice:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\beta \times \cos\gamma & \cos\beta \times \sin\gamma & -\sin\beta \\ \cos\gamma \times \sin\beta \times \sin\alpha - \sin\gamma \times \cos\alpha & \sin\gamma \times \sin\beta \times \sin\alpha + \cos\gamma \times \cos\alpha & \cos\beta \times \sin\alpha \\ \cos\gamma \times \sin\beta \times \cos\alpha - \sin\gamma \times \sin\alpha & \sin\gamma \times \sin\beta \times \sin\alpha - \cos\gamma \times \sin\alpha & \cos\beta \times \cos\alpha \end{bmatrix} \tag{39}$$

Transformační matici lze zjednodušit, uvážíme-li že osa x snímače odpovídá ose x vozidla. Proto platí, že $\sin\gamma = 0$. V jízdní dynamice se používá ještě jedno zjednodušení. Člen $\cos\gamma \times \sin\beta \times \sin\alpha$ se zanedbává z důvodu násobení dvou velmi malých úhlů.

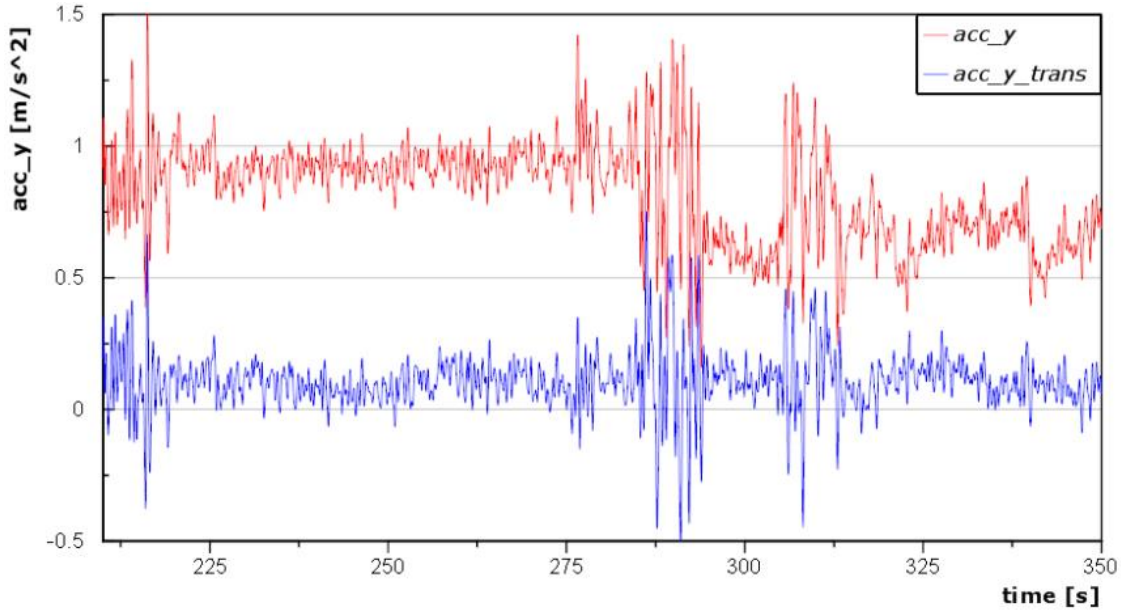
Po zjednodušení dostaneme transformační matici:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\beta \times \cos\gamma & 0 & -\sin\beta \\ 0 & \cos\gamma \times \cos\alpha & \cos\beta \times \sin\alpha \\ \cos\gamma \times \sin\beta \times \cos\alpha & \cos\gamma \times \sin\alpha & \cos\beta \times \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (40)$$

Signál s původním systémem souřadnic (x, y, z) vynásobíme transformační maticí a dostaneme transformovaný signál se systémem souřadnic (x´, y´, z´).

$$R \times (x, y, z) = (x', y', z') \quad (41)$$

V grafu znázorněném na obrázku 27 je červeně zobrazen původní signál zrychlení v ose y a modře je zobrazen signál zrychlení s transformovanými souřadnicemi. Nastalo zřetelné posunutí modrého signálu směrem dolů k hodnotám odpovídajícím nulovému zrychlení. Aby klidové hodnoty signálu plně korespondovali s 0, používá se nastavení offsetu. Ten se vypočítá například klouzavým průměrem z prvních n hodnot, kdy je ještě vozidlo v klidu.

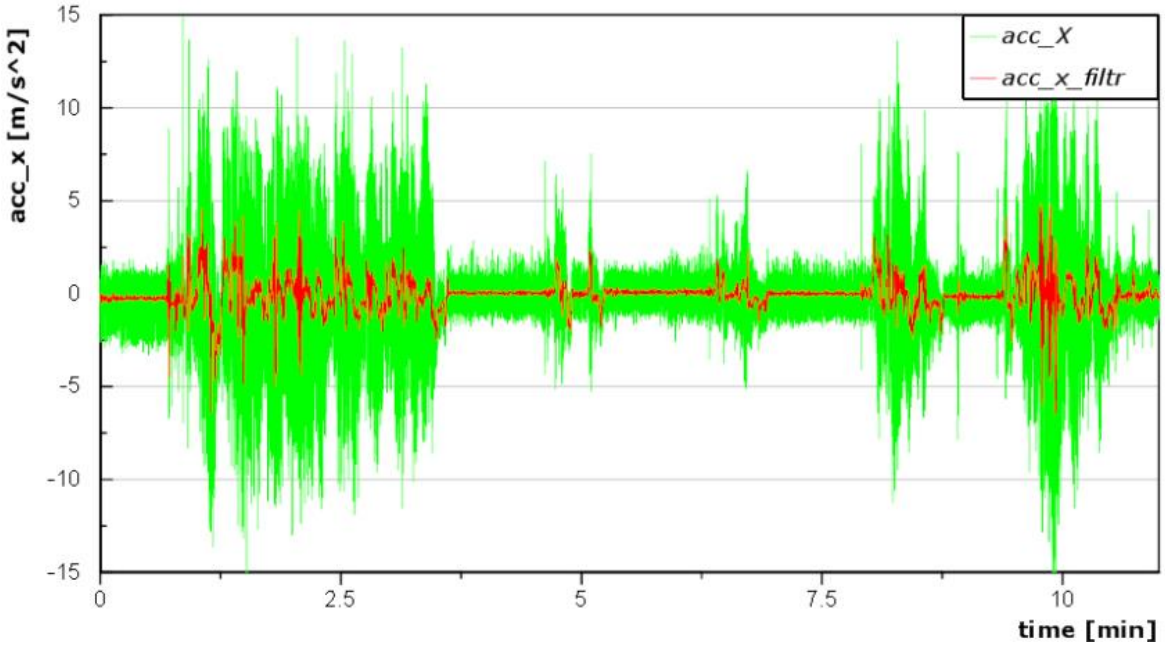


Obrázek 27: Transformace souřadnic.

4.2.2. Filtrace dat

Jak již bylo zmíněno v úvodu této podkapitoly, pro úplnou a správnou interpretaci dat je potřeba po transformaci souřadnic provést filtraci dat. Ideálním filtrem za účelem mého měření a výzkumu se projevil digitální Butterworthův filtr s parametry: dolní propust, frekvence 2 Hz – 5 Hz, v závislosti na míře znehodnocení dat šumem a 4. řád filtrace.

V grafu je zeleně znázorněn signál zrychlení v ose x před filtrací a červeně po filtraci. Šum byl filtrován frekvencí 4 Hz. Je patrné, že došlo k odstranění šumu a zároveň nedošlo ke zkreslení signálu vyhlazením.



Obrázek 28: Filtrace signálu.

5. Měření dynamiky jízdy motocyklů

Pro účely této práce navrhuji experiment, jehož předmětem je měření dynamiky jízdy motocyklů různých kategorií s jezdci napříč věkovým i zkušenostním spektrem.

Jednotlivé motocykly se osadí sdruženým snímačem pro měření jízdních zkoušek a naměří se dynamika jejich jízdy na uzavřeném silničním okruhu. Naměřené hodnoty budou podrobeny analýze.

Očekávaným výstupem experimentu bude popis technicky objektivních parametrů, které nejlépe popisují dynamiku jízdy motocyklu a popis parametrů, které nejlépe vypovídají o zkušenostech řidiče.

Takto empiricky naměřená data poslouží jako základ pro další výzkum, jehož cílem bude vytvoření znalostní databáze technicky objektivních parametrů jízdy motocyklů, kterou bude možné využít v oblasti prevence či analýzy dopravních nehod.

5.1. Lokalita

Pro měření jízdních vlastností jednotlivých motocyklů byl vybrán asfaltový okruh o délce 1,4 km, který se nachází v areálu Motorland Bělá.

Motorland Bělá se nachází na okraji města Bělá pod Bezdězem, přibližně 10 km od Mladé Boleslavi. Areál se nachází v bývalém vojenském újezdu Ralsko. V areálu se nachází silniční okruh a několik offroad tratí vhodných především pro motocykly a čtyřkolky, dále také pro testovací a předváděcí jízdy terénních vozů automobilek či záchranných sborů.

Samotný silniční okruh je poměrně úzký a vlivem okolní zeleně také nepřehledný. Povrch vozovky je tvořen asfaltovou živicí a jeho mikrotextura je drsná a makrotextura hrubá. Na několika místech komunikace se nacházelo znečistění štěrkem a drobné poškození vozovky.

Obrázek 29: Motorland Bělá. [35]

5.2. Podmínky experimentu

Měření dynamiky jízdy proběhlo ve čtvrtek 07. 04. 2016 v odpoledních hodinách. Experimentu se zúčastnilo pět jezdců na pěti motocyklech. Každý z jezdců si nejprve vyzkoušel dvě kola okruhu nanečisto. Poté mu byl motocykl osazen měřicí technikou a odjezdil dalších pět kol s měřením jízdní dynamiky.

Jezdcům bylo řečeno, ať se snaží jet co nejrychleji, ovšem s maximálním ohledem na jejich bezpečnost a bezpečí techniky.

Během experimentu bylo oblačno až zataženo a teplota se pohybovala od 12 do 16 °C. Foukal mírný filtr a po prvních třech měření lehce zapršelo. Před dalším měřením ovšem trať stihla z větší části oschnout. Pořadí jezdců a jejich klimatické podmínky ukazuje tabulka 6.

Tabulka 6: Pořadí jezdců a klimatické podmínky.

	čas	teplota	počasí	vozovka
1. Jiří Nikl – Triumph Tiger 1200	15:30–15:45	16 °C	oblačno	suchá
2. Jiří Kobosil – H-D Electra Glide 1690	16:00-16:15	16 °C	oblačno	suchá
3. Martin Kobosil – KTM 990 Adventure	16:30-16:45	15 °C	zataženo	suchá
4. Tomáš Procházka – KTM 950 Adventure	17:30-17:45	13 °C	zataženo	místy mokrá
5. Jiří Horáček – KTM Duke 390	18:00-18:15	12 °C	zataženo	místy mokrá

5.3. Jezdci a jejich motocykly

Pro měření na okruhu jsem vybral 5 testovacích jezdců, rozdělených podle věku a zkušeností. Jednotliví jezdci a jejich motocykly jsou představeni dále.

Informace o řidičích jsem získal ústně v den měření a zpětně jsem se je snažil kvantifikovat tak, abych co nejlépe vystihl jejich zkušenosti. Pro další výzkum bude nezbytné sestrojit dotazník, který jednoznačně přiřadí jezdce do správné, předem definované kategorie.

Obrázek 30: Testovací motocykly na silničním okruhu Motorland Bělá.

Jiří Nikl – Triumph Tiger Explorer (2013)

Muž ve věku 42 let, hmotnost 100 kg, motocykl kategorie: Cestovní enduro. Jiří Nikl má velmi bohaté zkušenosti a dlouhou praxi v řízení motocyklů. Motocykly ho doprovází většinu jeho života a za tu dobu jich stihnul vyzkoušet i vlastnit celou řadu.

Motocykl využívá za účelem víkendových projížděk. Na současném stroji jezdí již druhým rokem. Společně mají najeto 12 tisíc kilometrů. Řidič zná velmi dobře chování svého motocyklu.

Technické parametry testovaného motocyklu - Triumph Tiger Explorer (obrázek 31):

- rok výroby: 2013,
- výkon: 101 kW,
- objem: 1215 cm^3,
- točivý moment: 121 Nm při 6400 ot/min,
- hmotnost systému řidič-motocykl: 359 kg,
- motor: čtyřdobí, kapalinou chlazený, řadový dvouválec
- brzdy: přední 2x kotoučová, zadní 1x kotoučová
- rám: příhradový ocelový
- rozvor: 1530 mm
- závlek předního kola: 105,5 mm
- úhel hlavy řízení: 66,1° [34]

Umístění snímače je vyznačeno na obrázku 31. Snímač a GNSS přijímač byly k motocyklu připevněny dle zásad z kapitoly 4.1. Měřící počítač se umístil do textilní brašny připevněné k zadní části motocyklu.

Obrázek 31: Triumph Tiger 1200 Explorer.

Jiří Kobosil – Harley-Davidson Electra Glide Classic (2011)

Muž ve věku 60 let, hmotnost 140 kg, motocykl kategorie: Cruiser. Jiří Kobosil jezdil na motocyklech za mlada jako student. K motocyklům se vrátil před osmi lety, kdy si dovezl svůj první Harley-Davidson z USA. Od té doby se stali motocykly součástí jeho života a najezdil tisíce kilometrů na cestách v ČR i v zahraničí.

Motocykl nejraději využívá za účelem cestování a víkendových projížděk. Současný stroj řídí již druhým rokem a společně mají najeto 18 tisíc kilometrů. Řidič zná velmi dobře chování svého motocyklu.

Technické parametry testovaného motocyklu – H-D Electra Glide Classic (obrázek 32):

- rok výroby: 2011,
- výkon: cca 60 kW (výrobce neudává),
- objem: 1690 cm^3,
- točivý moment: 134 Nm při 3500 ot/min,
- hmotnost systému řidič-motocykl: 540 kg,
- motor: čtyřdobí, vzduchem chlazený, vidlicový dvouválec,
- brzdy: přední 2x kotoučová, zadní 1x kotoučová
- rám: trubkový ocelový
- rozvor: 1610 mm
- závlek předního kola: 158 mm
- úhel hlavy řízení: 60,7° [34]

Poloha snímače je vyznačena na obrázku 32. Snímač a měřící počítač byly umístěny do zadního kufru motocyklu a byly připevněny dle zásad z kapitoly 4.1.. Anténa GNSS byla přichycena na sedadlo spolujezdce.

Obrázek 32: Harley-Davidson Electra Glide Classic.

Martin Kobosil – KTM 990 Adventure R (2012)

Muž ve věku 24 let, hmotnost 105 kg, motocykl kategorie: Enduro. Martin Kobosil jezdí na motocyklech již osmým rokem. Přestože na svém motocyklu procestoval přes 20 zemí Evropy, považuje se stále za méně zkušeného a opatrného řidiče.

Motocykl nejraději využívá za účelem cestování a víkendových projížděk. Současný stroj vlastní již tři roky a společně mají najeto přes 30 tisíc kilometrů. Řidič zná chování svého motocyklu.

Technické parametry testovaného motocyklu – KTM 990 Adventure R (obrázek 33):

- rok výroby: 2012,
- výkon: 84,5 kW,
- objem: 999 cm^3,
- točivý moment: 100 Nm při 6750 ot/min,
- hmotnost systému řidič-motocykl: 312 kg,
- motor: čtyřdobí, kapalinou chlazený, vidlicový dvouválec,
- brzdy: přední 2x kotoučová, zadní 1x kotoučová
- rám: trubkový chrommolybdenový
- rozvor: 1570 mm
- závlek předního kola: 119 mm
- úhel hlavy řízení: 63,8° [34]

Umístění snímače je vyznačeno na obrázku 33. Snímač a GNSS přijímač byly k motocyklu připevněny dle zásad z kapitoly 4.1. Měřící počítač se umístil do textilní brašny připevněné k zadní části motocyklu.

Obrázek 33: KTM 990 Adventure R.

Tomáš Procházka – KTM LC8 950 Adventure S (2004)

Muž ve věku 27 let, hmotnost 90 kg, motocykl kategorie: Enduro. Tomáš Procházka je motocyklový závodník. Se svým otcem soutěží v kategoriích CC a Enduro. Dostal se na několik soustředění v zahraničí, kde jezdil po boku těch nejlepších jezdců z ČR.

Motocykl využívá za účelem víkendových projížděk. Současný stroj vlastní již šestým rokem a společně mají najeto přes 30 tisíc kilometrů. Řidič zná velmi dobře chování svého motocyklu.

Technické parametry testovaného motocyklu – KTM 950 Adventure S (obrázek 34):

- rok výroby: 2004,
- výkon: 72 kW,
- objem: 942 cm^3,
- točivý moment: 95 Nm při 6500 ot/min,
- hmotnost systému řidič-motocykl: 288 kg,
- motor: čtyřdobí, kapalinou chlazený, vidlicový dvouválec,
- brzdy: přední 2x kotoučová, zadní 1x kotoučová
- rám: trubkový chrommolybdenový
- rozvor: 1570 mm
- závlek předního kola: 118 mm
- úhel hlavy řízení: 63° [34]

Umístění snímače je vyznačeno na obrázku 34. Snímač a GNSS přijímač byly k motocyklu připevněny dle zásad z kapitoly 4.1. Měřící počítač se umístil do textilní brašny připevněné k zadní části motocyklu.

Obrázek 34: KTM LC8 950 Adventure S.

Jiří Horáček – KTM Duke 390 (2015)

Muž ve věku 26 let, hmotnost 64 kg, motocykl kategorie: Naked bike. Jiří Horáček je začátečník, který do světa motocyklu vstoupil teprve nedávno, když získal řidičské oprávnění pro kategorii A.

Motocykl využívá za účelem každodenního ježdění. Současný stroj si pořídil na jaře 2016 a samotné testování byla teprve jeho čtvrtá jízda na tomto motocyklu vůbec. Řidič dosud nezná chování svého motocyklu.

Technické parametry testovaného motocyklu – KTM Duke 390 (obrázek 35):

- rok výroby: 2015,
- výkon: 32.1 kW,
- objem: 375 cm^3,
- točivý moment: 35 Nm při 7250 ot/min,
- hmotnost systému řidič-motocykl: 203 kg,
- motor: čtyřdobí, kapalinou chlazený, jednoválec,
- brzdy: přední 1x kotoučová, zadní 1x kotoučová
- rám: příhradový ocelový
- rozvor: 1367 mm
- závlek předního kola: 100 mm
- úhel hlavy řízení: 65° [34]

Umístění snímače je vyznačeno na obrázku 35. Snímač a GNSS přijímač byly k motocyklu připevněny dle zásad z kapitoly 4.1. Měřící počítač se umístil do textilní brašny připevněné k zadní části motocyklu.

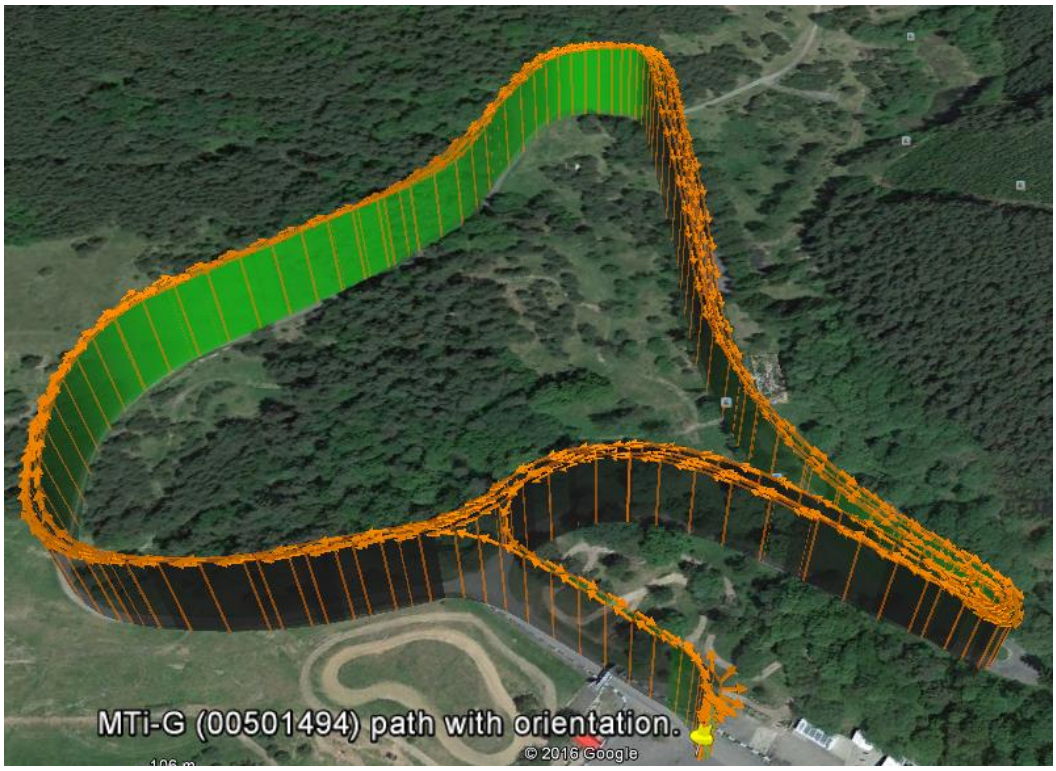
Obrázek 35: KTM Duke 390.

5.4. Analýza naměřených dat

Pro každý motocykl se naměřilo a analyzovalo prvních pět kol na okruhu.

5.4.1. Časy jednotlivých kol

Naměřené hodnoty zpracovává a ukládá měřící počítač pomocí softwaru MT manager. Výstupem z MT manageru následně může být .kmz soubor, který v sobě nese informace o poloze z GPS souřadnic. Tyto informace můžeme nechat zobrazit v mapovém podkladu například pomocí softwaru Google Earth (obrázek 36).



Obrázek 36: Projetá trasa v mapovém podkladu Google Earth. Motocykl H-D El. Glide.

Analýzou polohy jednotlivých motocyklů v čase lze sestavit tabulku s časy jednotlivých kol pro každý motocykl (Tabulka 7).

Tabulka 7: Časy prvních pěti kol pro jednotlivé motocykly ve vteřinách.

	Tiger 1200	El. Glide 1690	Adventure 990	Adventure 950	Duke 390
1. kolo	79,81	103,51	98,81	68,21	104,80
2. kolo	79,01	97,01	91,41	64,31	96,21
3. kolo	73,78	94,51	86,81	66,01	92,13
4. kolo	76,81	95,51	88,21	64,88	91,01
5. kolo	74,71	95,45	82,87	65,00	94,29

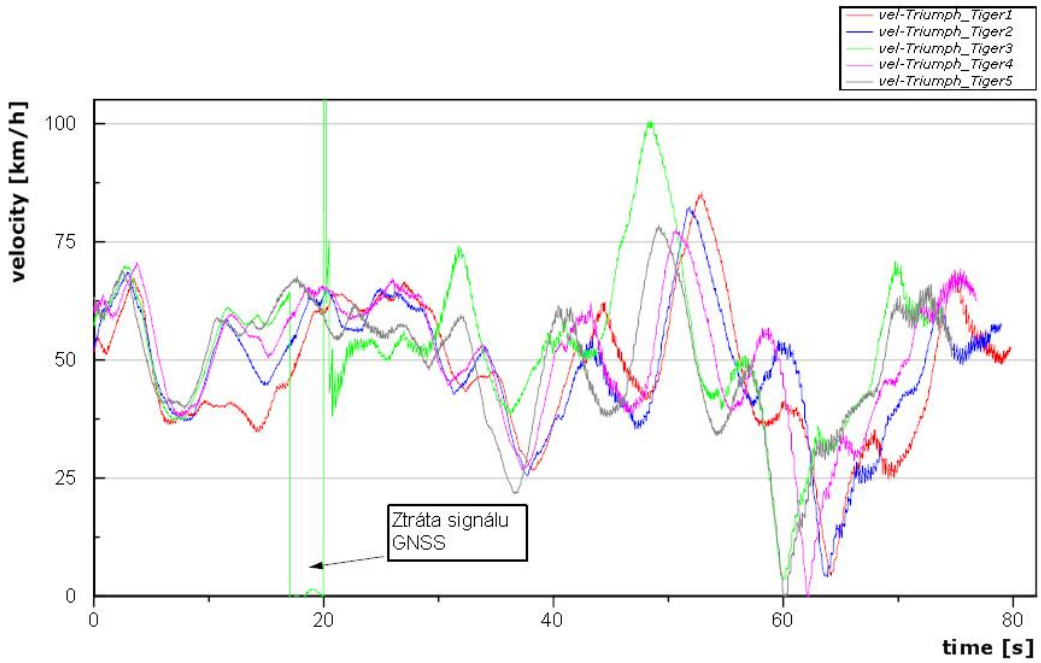
Při pohledu do tabulky lze konstatovat, že všichni jezdci shodně zajeli nejpomaleji první kolo a následně svůj čas zlepšovali. Nejrychlejší kola zajížděl motocyklový závodník Tomáš Procházka na motocyklu KTM 950 Adventure. Zajímavé je, že Martin Kobosil zajížděl na srovnatelném stroji KTM 990 Adventure časy přibližně o 30% horší. Zde lze demonstrovat, jak zásadní může být um a zkušenosti jezdce pro řízení motocyklu.

Velmi rychle jezdil Jiří Nikl na svém cestovním Triumphu Tiger 1200, který zajížděl druhá nejrychlejší kola. Srovnatelné časy pak měly poslední dva stroje, které jsou ale z technického hlediska naprosto odlišné. Jiří Kobosil na 400 kg vážícím motocyklu H-D Electra Glide narážel na problémy s úzkou tratí a s elasticitou svého motocyklu, zatímco začátečníka Jiřího Horáčka na 140 kg KTM Duke 390 trápila nedostatečná zkušenost s řízením svého motocyklu.

5.4.2. Průběh jednotlivých kol

Následující obrázky znázorňují průběhy rychlosti v jednotlivých kolech. Každého jezdce budeme analyzovat zvlášť.

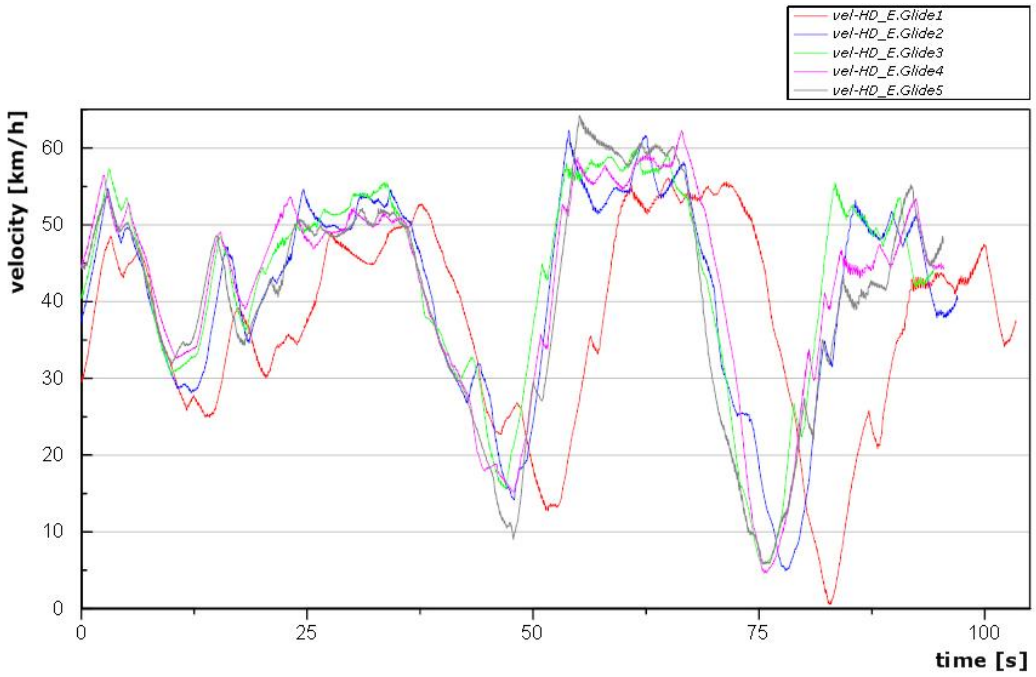
Jiří Nikl na cestovním enduru Triumph Tiger zajížděl poměrně rychlá a vyrovnaná kola. To vypovídá o bohatých zkušenostech řidiče a o dobré znalosti svého stroje. V grafu na obrázku 37 vidíme propad rychlosti v prvním kole mezi 10 – 20 vteřinou (červený signál). Dále vidíme ztrátu signálu z družic GNSS ke které došlo ve třetím kole (zelený signál). Tento výpadek se v grafu projevil propadem rychlosti na nulu.



Obrázek 37: Rychlost v jednotlivých kolech, Triumph Tiger.

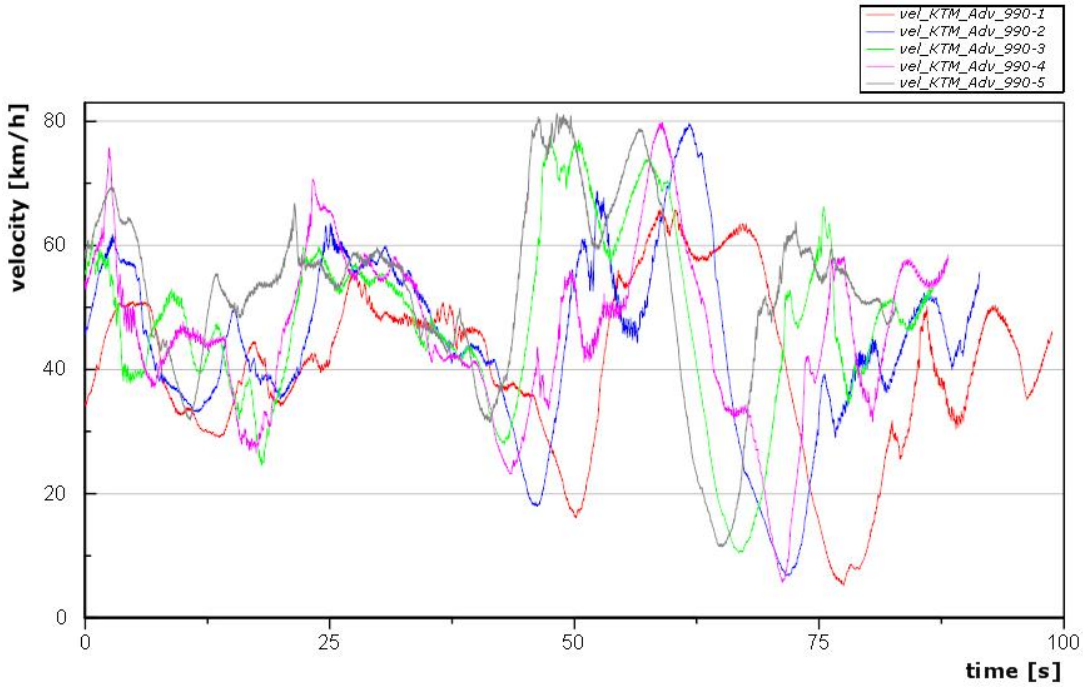
Po nalezení signálu snímač pokračoval v měření, je ovšem možné, že hodnoty naměřené přibližně 30 vteřin po nalezení signálu mohou být výpadkem zkreslené. Je totiž nepravděpodobné, aby v jednom kole došlo k tak velkému rozdílu v maximální naměřené rychlosti. Celkový čas třetího kola by ovšem výpadek ovlivnit neměl.

Jiří Kobosil na Cruiseru Harley-Davidson Electra Glide zajížděl také velice vyrovnaná kola. Z grafu na obrázku 38 vidíme, že řidič zvolil v prvním kole opatrnější styl jízdy (červený signál). Pomineme-li však toto první kolo, jsou pak všechny ostatní časy v rozmezí 2,5 vteřiny. To svědčí o vyrovnané jízdě a dobré znalosti chování svého stroje.



Obrázek 38: Rychlost v jednotlivých kolech, H-D Electra Glide.

U Martina Kobosila na Enduru KTM 990 Adventure je nejvíce patrné zlepšování časů (obrázek 39). Téměř v každém kole získával větší jistotu nad svým strojem a postupně zrychloval. Přesto zdaleka nedosahoval limitů svého stroje (srovnání s Tomášem Procházkou). Rozdíl mezi nejrychlejším a nejpomalejším časem tvoří téměř 16 vteřin. Tato jízda odpovídá opatrnějšímu jezdci, jenž zcela dobře nezná chování svého stroje.

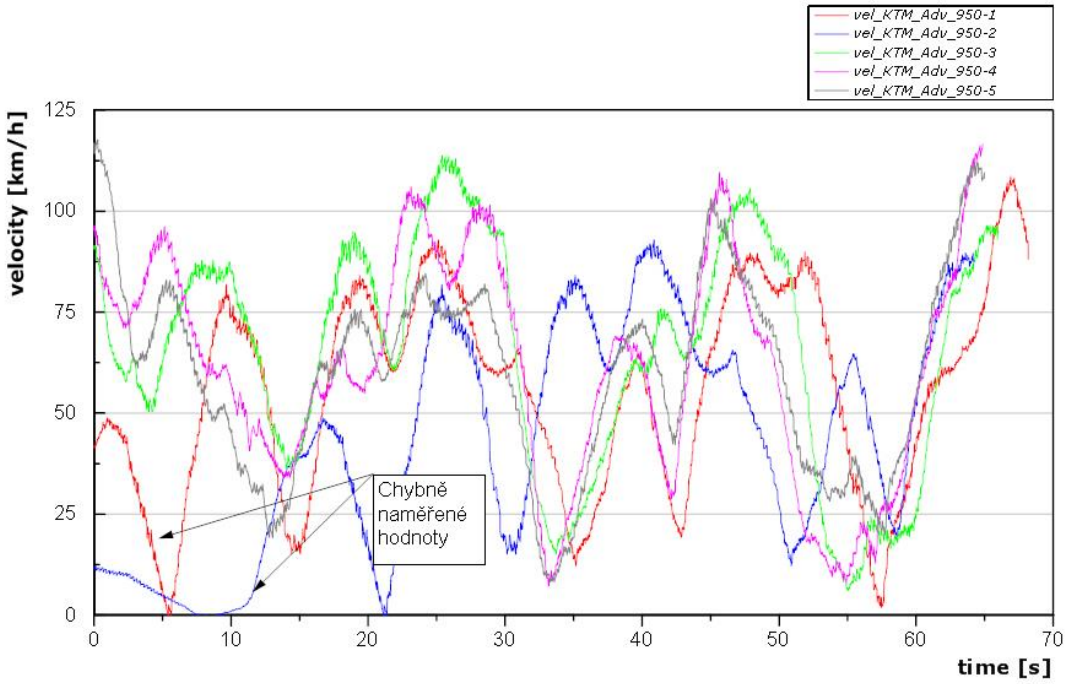


Obrázek 39: Rychlost v jednotlivých kolech, KTM 990 Adventure.

Tomáš Procházka na Enduru KTM 950 Adventure zajel suverénně nejrychlejší a nejvyrovnanější časy. Všechna kola byla v rozmezí 4 vteřin. Tento fakt vypovídá o výborné znalosti svého stroje. Bohužel celé měření dynamiky jízdy Tomáše Procházky je zatížené hrubou chybou. V grafu na obrázku 40 je ukázáno na několik chybně naměřených hodnot. Při detailnějším pohledu ale nalezneme další chyby v každém zaznamenaném kole.

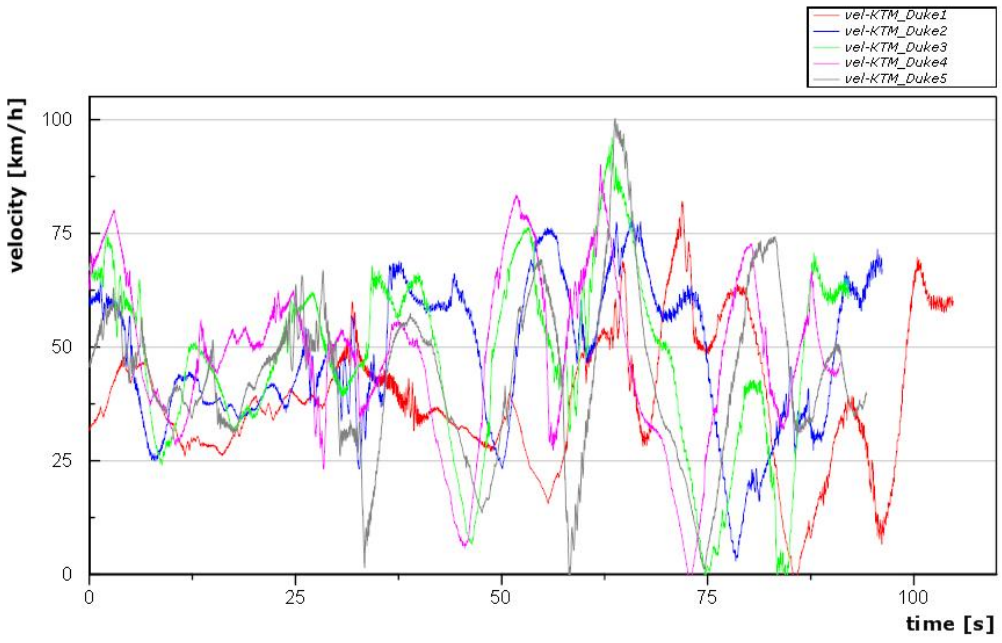
Během přípravných dvou kol před měřením, když už měl řidič osazený motocykl měřicí technikou, muselo dojít k dekalibraci citlivých senzorů ve sdruženém snímači. K tomu došlo pravděpodobně kvůli jízdě po zadním kole (wheelie) a následným otřesům způsobených při dopadů. Tomu také nasvědčuje fakt, že během měření docházelo k chybně naměřeným hodnotám na místech, které Tomáš Procházka projížděl po zadním kole.

Bohužel toto rozhození senzoriky se projevilo mimo rychlosti i na ostatních parametrech naměřených během měření dynamiky jízdy Tomáše Procházky. Jakožto i u naměřených hodnot jízdy motocyklu Jiřího Horáčka, který svá kola odjel jako poslední.



Obrázek 40: Rychlost v jednotlivých kolech, KTM 950 Adventure.

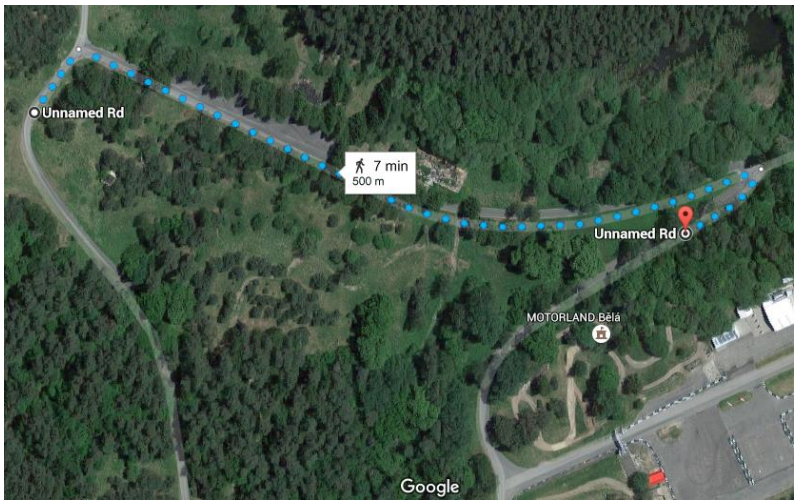
Jiří Horáček na Naked Biku KTM Duke 390 zajížděl poměrně nevyrovnaná kola. Při pohledu na obrázek 41 můžeme vidět jednak větší šum, který je zřejmě způsoben předchozí jízdou Tomáše Procházky, jednak celou řadu chyb včetně několika téměř zastavení vozidla. Tyto chyby mohlo způsobit například špatné řazení a odpovídají omylům, které se stávají začínajícím jezdcům. Přesto u Jiřího Horáčka můžeme vidět zajímavé hodnoty zrychlení a maximální rychlosti, které svědčí o dobré elasticitě jeho lehkého naked biku.



Obrázek 41: Rychlost v jednotlivých kolech, KTM Duke.

5.4.3. Naměřené hodnoty

Podíváme-li se na průběh parametrů v rámci jednoho kola, zjistíme, že nejzajímavějších hodnot dosahovali jezdci na úseku ve spodní části trati, mezi dvěma ostrými pravotočivými oblouky (obrázek 42). Proto jsem se rozhodl zaměřit se na tento vyznačený úsek trati.



Obrázek 42: Vyznačený úsek ve spodní části okruhu. Zdroj: https://maps.google.cz/.

Do této části jezdci sjíždí z kopce, následuje brzdění a naklopení motocyklu na pravou stranu. Po výjezdu z oblouku jezdci akcelerují. Přibližně uprostřed úseku mezi ostrými oblouky se vozovka stáčí mírně doleva. Tento levotočivý oblouk je poměrně nepřehledný vlivem vzrostlé zeleně a někteří jezdci zde intuitivně snižovali rychlost, jak můžeme vidět například na obrázku 43. Po tomto mírném oblouku jezdci dosahovali maximální rychlosti, aby následně začali brzdit před nájezdem do druhého oblouku. Následuje průjezd ostrým pravotočivým obloukem v nízké rychlosti a výjezd do kopce.

Právě rychlost projetí druhého oblouku může vypovídat, jednak o ovladatelnosti motocyklu, jednak o schopnosti jezdce zvládat svůj stroj.

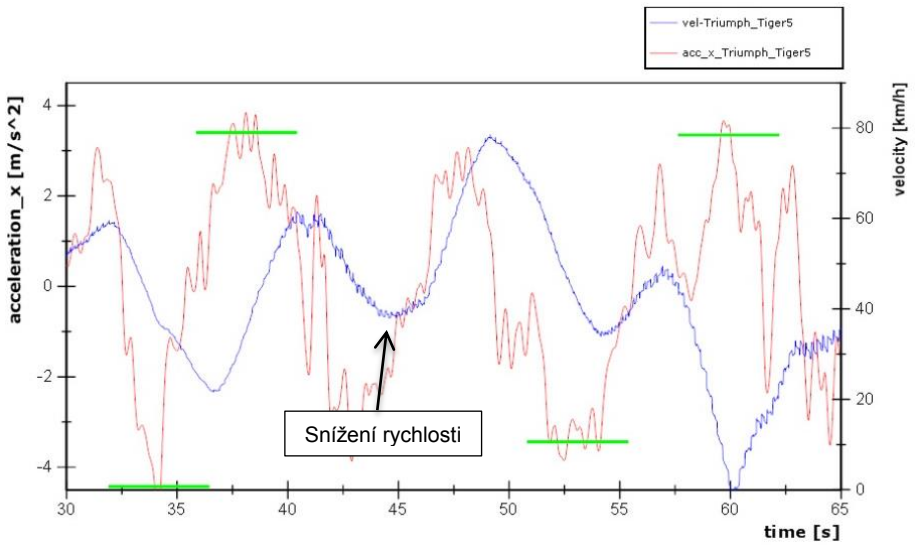
Následující tabulky ukazují naměřené hodnoty zpomalení $a_{x_(MIN)}$ a hodnoty zrychlení $a_{x_(MAX)}$ před vjezdem do obou oblouků a po výjezdu z nich. Dále ukazují maximální rychlost $v_{_(MAX)}$ dosaženou mezi oblouky a minimální rychlost $v_{_(MIN)}$, naměřenou při průjezdu druhým obloukem. Přiložený obrázek vždy ilustruje naměřené hodnoty v jednom vybraném kole.

Jelikož naměřené hodnoty zrychlení jsou vždy ovlivněné šumem, musí se hodnoty zpomalení a zrychlení odečítat jako střední hodnota zašuměného signálu. V grafu na obrázku 43 jsou tyto efektivní hodnoty zvýrazněné zeleně. U jízdy Tomáše Procházky a Jiřího Horáčka jsou některé hodnoty doplněné hvězdičkou. Tyto hodnoty je bohužel potřeba brát s jistou rezervou, jelikož byly odhadovány z velmi zašuměného signálu.

Tabulka 8: Naměřené hodnoty rychlostí a zrychlení pro motocykl Triumph Tiger 1200.

	1. oblouk		2. oblouk		$v_{_(MAX)}$ [km/h]	$v_{_(MIN)}$ [km/h]
	$a_{x_(MIN)}$ [m/s^2]	$a_{x_(MAX)}$ [m/s^2]	$a_{x_(MIN)}$ [m/s^2]	$a_{x_(MAX)}$ [m/s^2]		
1. kolo	-2,9	3,3	-3,6	2,8	81	4
2. kolo	-3,4	3,0	-3,5	2,2	85	4
3. kolo	-3,3	2,5	-4,1	3,6	100*	3*
4. kolo	-3,6	4,4	-3,5	4,1	79	2
5. kolo	-4,4	3,4	-3,6	3,3	80	2

* hodnota může být ovlivněna z důvodu ztráty signálu z družic GNSS



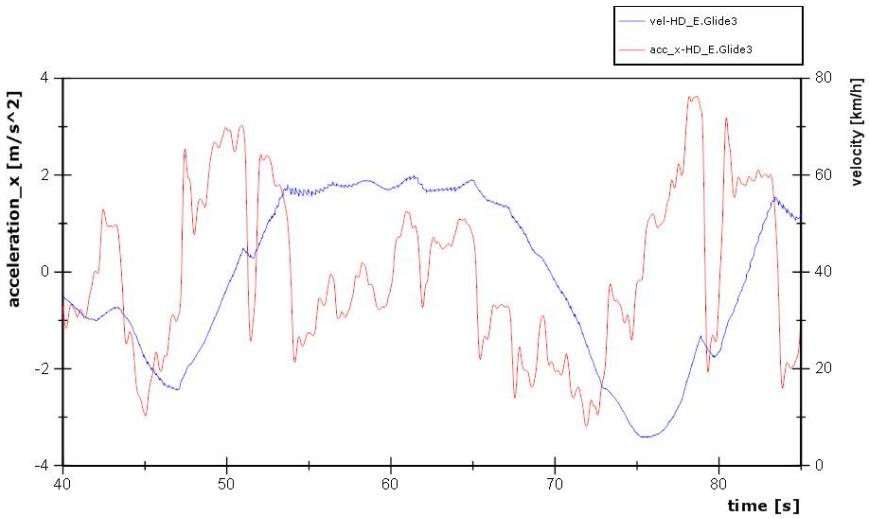
Obrázek 43: Zrychlení v ose x a rychlost, vyznačené veličiny, 5. kolo, Triumph Tiger 1200.

Při srovnání technických parametrů jednotlivých strojů, můžeme motocykl Triumph Tiger Jiřího Nikla zařadit na pomyslné třetí místo, těsně hned za oba sportovně naladěné stroje KTM Adventure. Tomu odpovídají i hodnoty zrychlení a zpomalení v tabulce 8.

Jiří Nikl dosahoval druhé nejvyšší maximální rychlosti na úseku mezi oblouky, ale průjezd druhým obloukem byl podobně jako u Cruiseru Jiřího Kobosila velice pomalý. Za tento pomalý průjezd zřejmě může vyšší hmotnost a vysoké těžiště stroje, které při nízkých rychlostech zhoršují ovladatelnost stroje.

Tabulka 9: Naměřené hodnoty rychlostí a zrychlení pro motocykl H-D Electra Glide.

	1. oblouk		2. oblouk		$v_{_(MAX)}$ [km/h]	$v_{_(MIN)}$ [km/h]
	$a_{x_(MIN)}$ [m/s^2]	$a_{x_(MAX)}$ [m/s^2]	$a_{x_(MIN)}$ [m/s^2]	$a_{x_(MAX)}$ [m/s^2]		
1. kolo	-2,2	2,0	-2,8	2,5	55	2
2. kolo	-2,5	3,5	-2,0	3,4	62	5
3. kolo	-2,8	3,0	-2,9	3,0	59	6
4. kolo	-2,3	3,3	-2,9	4,0	61	5
5. kolo	-2,3	3,2	-2,6	3,2	64	6



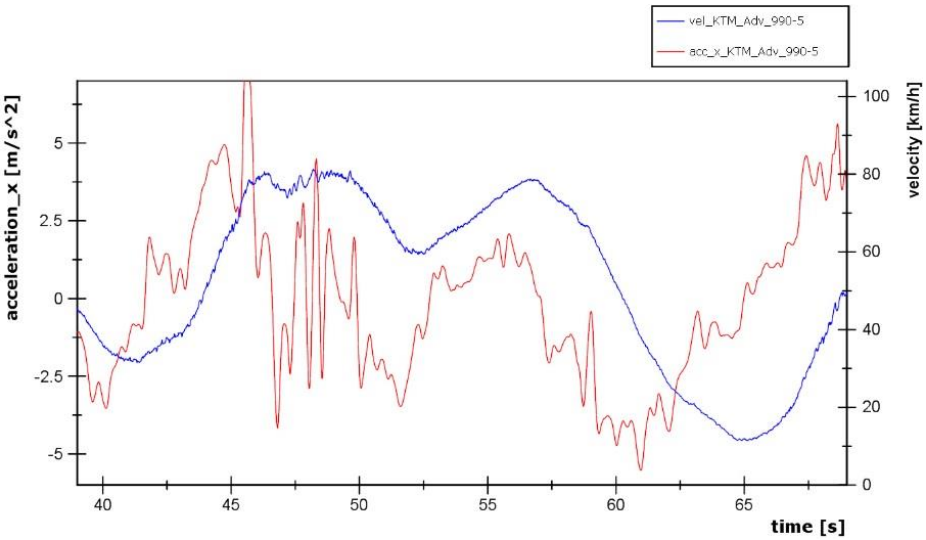
Obrázek 44: Zrychlení v ose x a rychlost, 3. kolo, H-D Electra Glide.

Vysoká hmotnost i nižší výkon motocyklu Harley-Davidson Electra Glide Jiřího Kobosila se projevují v nejnižších hodnotách brzdného zpomalení i v nižší rychlosti průjezdu druhým obloukem (tabulka 9). Nízká naměřená maximální rychlosti vypovídá o klidné a vyrovnané jízdě.

Při pohledu na graf na obrázku 44 je patrná plynulost této jízdy, kdy například jezdec začíná zpomalovat již 10 vteřin před nájezdem do druhého oblouku.

Tabulka 10: Naměřené hodnoty rychlostí a zrychlení pro motocykl KTM 990 Adventure.

	1. oblouk		2. oblouk		$v_{(MAX)}$ [km/h]	$v_{(MIN)}$ [km/h]
	$a_{x_(MIN)}$ [m/s^2]	$a_{x_(MAX)}$ [m/s^2]	$a_{x_(MIN)}$ [m/s^2]	$a_{x_(MAX)}$ [m/s^2]		
1. kolo	-1,7	3,5	-2,8	3,8	66	5
2. kolo	-2,6	4,3	-4,0	3,4	79	7
3. kolo	-3,0	4,1	-3,0	3,5	77	10
4. kolo	-3,1	3,1	-4,2	3,7	79	6
5. kolo	-3,3	4,2	-4,3	4,2	80	12



Obrázek 45: Zrychlení v ose x a rychlost, 5. kolo, KTM 990 Adventure.

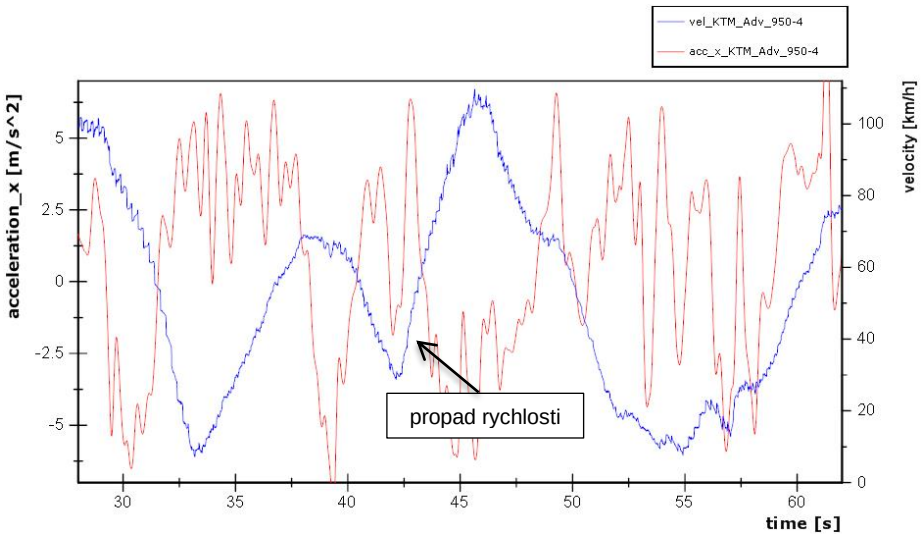
KTM 990 Adventure Martina Kobosila má nejlepší poměr hmotnost / výkon ze všech testovaných motocyklů. V tomto měření dosahuje druhých nejlepších hodnot zrychlení i zpomalení (tabulka 10) a druhé největší $v_{_(MIN)}$ při průjezdu druhým obloukem.

Při porovnání grafů na obrázku 43 a 45 je zřejmý důvod, proč Jiří Nikl dosahoval celkově lepších časů než Martin Kobosil. Zatímco Jiří Nikl na úseku mezi oblouky zvyšoval neustále svoji rychlost až do okamžiku než musel začít brzdit, Martin Kobosil po výjezdu z prvního oblouku ustálil svoji rychlost okolo 80 km/h a rychleji už si nedovolil jet. Zde hrála roli opatrnost jezdce na KTM.

Tabulka 11: Naměřené hodnoty rychlostí a zrychlení pro motocykl KTM 950 Adventure.

	1. oblouk		2. oblouk		$v_{_(MAX)}$ [km/h]	$v_{_(MIN)}$ [km/h]
	$a_{x_(MIN)}$ [m/s^2]	$a_{x_(MAX)}$ [m/s^2]	$a_{x_(MIN)}$ [m/s^2]	$a_{x_(MAX)}$ [m/s^2]		
1. kolo	-5,3*	4,1*	-4,2*	4,1*	90	3
2. kolo	-5,8*	3,9*	-3,2*	4,1*	92	12
3. kolo	-5,8*	4,8*	-3,9*	3,7*	105	7
4. kolo	-5,5*	4,5*	-4,8*	3,9*	108	9
5. kolo	-4,8*	4,5*	-4,4*	3,8*	102	19

* hrubý odhad hodnoty z důvodu velkého šumu



Obrázek 46: Zrychlení v ose x a rychlost, 4. kolo, KTM 950 Adventure.

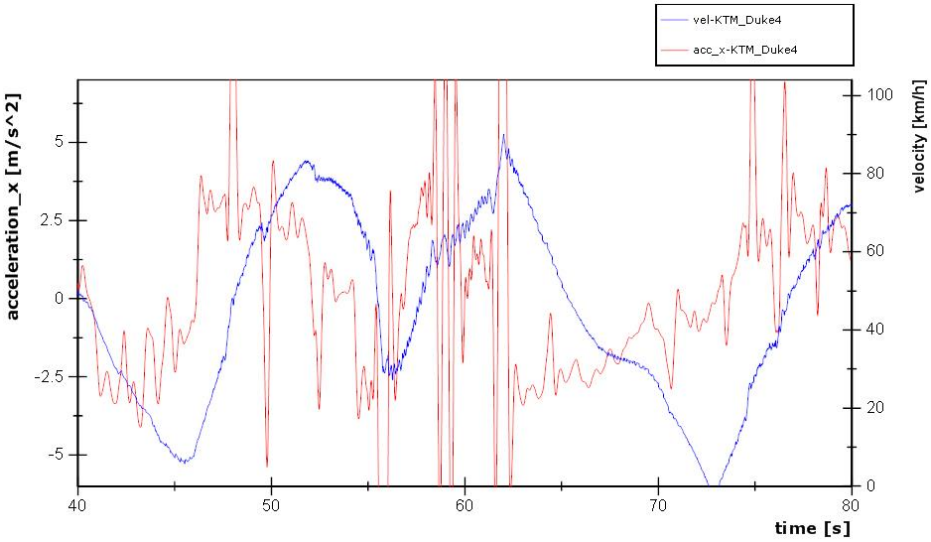
Tabulka 11 ukazuje, že Tomáš Procházka na motocyklu KTM 950 Adventure dosahoval nejvyšších hodnot zpomalení i zrychlení. Také dosahoval nejvyšší maximální rychlosti mezi oblouky i měl nejrychlejší průjezd druhým obloukem.

Tomáš Procházka zná perfektně chování svého motocyklu a dokáže jet na hranici jeho možností. Bohužel celé jeho měření je zatíženo hrubou chybou snímače jak je vidět na obrázku 46. Tato chyba způsobila velký šum naměřených hodnot zrychlení a chybně naměřené hodnoty rychlosti na místech, které jezdec projížděl po zadním kole (wheelie).

Tabulka 12: Naměřené hodnoty rychlostí a zrychlení pro motocykl KTM Duke 390.

	1. oblouk		2. oblouk		$v_{_(MAX)}$ [km/h]	$v_{_(MIN)}$ [km/h]
	$a_{x_(MIN)}$ [m/s^2]	$a_{x_(MAX)}$ [m/s^2]	$a_{x_(MIN)}$ [m/s^2]	$a_{x_(MAX)}$ [m/s^2]		
1. kolo	-2,4	2,8	-3,2	3,2	82	2
2. kolo	-3,7*	3,4	-2,8*	2,3*	78	4
3. kolo	-3,2	2,9*	-3,0	2,8	92	2
4. kolo	-3,3	3,2	-3,2*	2,2	91	0
5. kolo	-3,4*	3,1	-2,9	2,9	99	2

* hrubý odhad hodnoty z důvodu velkého šumu



Obrázek 47: Zrychlení v ose x a rychlost, 4. kolo, KTM Duke 390.

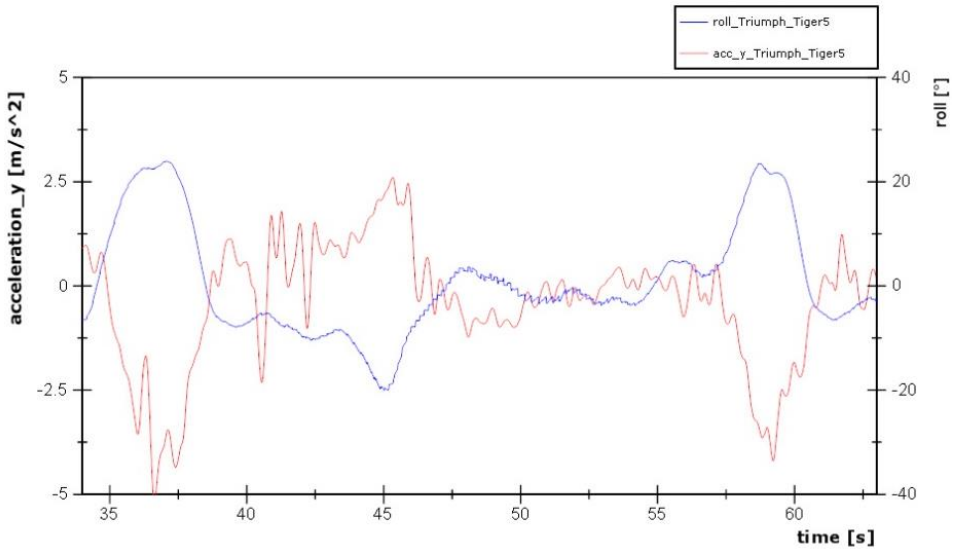
Jiří Horáček se svým lehkým motocyklem KTM Duke dosahoval poměrně zajímavých hodnot zpomalení. Při zrychlení ovšem jeho motocykl ztrácel oproti výkonnějším motocyklům ostatních testovacích jezdců. Je ale možné, že zde hrálo roli nedostatek zkušeností tohoto jezdce.

Zajímavý při pohledu do tabulky 12 je údaj $v_{_(MIN)}$. Průjezd ostrým pravotočivým obloukem dělal nezkušenému jezdci problémy, kdy například ve 4. kole, znázorněném na obrázku 47, dokonce zastavil svůj motocykl a až následně se znovu rozjel.

V následujících tabulkách jsou uvedeny výsledky měření úhlu klopení pro oba oblouky. $\Psi_{_(max)}$ značí maximální úhel klopení, $a_{y_(MAX)}$ maximální zrychlení v ose y, $v_{(\Psi_(max))}$ značí rychlost v místě maximálního úhlu klopení. Přiložený obrázek vždy ilustruje naměřené hodnoty v jednom vybraném kole.

Tabulka 13: Naměřené hodnoty při průjezdu obloukem pro motocykl Triumph Tiger 1200.

	1. oblouk			2. oblouk		
	$\Psi_{_(max)}$ [°]	$a_{y_(MAX)}$ [m/s^2]	$v_{(\Psi_(max))}$ [km/h]	$\Psi_{_(max)}$ [°]	$a_{y_(MAX)}$ [m/s^2]	$v_{(\Psi_(max))}$ [km/h]
1. kolo	27	4,3	44	21	3,4	13
2. kolo	25	3,8	33	23	3,4	21
3. kolo	25	4,1	39	23	3,9	23
4. kolo	24	4,2	33	25	3,9	22
5. kolo	24	4,1	25	23	3,6	26



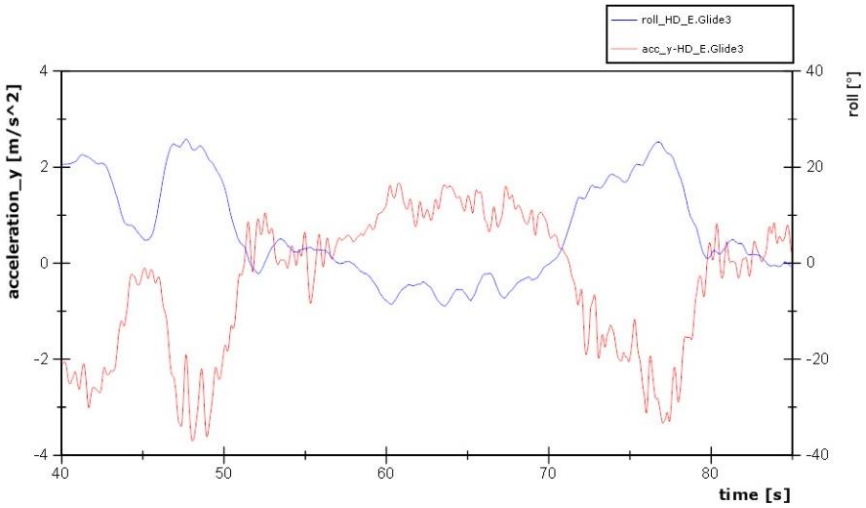
Obrázek 48: Zrychlení v ose y a úhel klopení, 5. kolo, Triumph Tiger 1200.

Jiří Nikl zaznamenával vysokou rychlost v místně maximálního naklopení motocyklu. Tomu odpovídají i vysoké hodnoty zrychlení v ose y. První oblouk projížděl s úhlem klopení okolo 25°, druhý pak okolo 23°.

Při pohledu na obrázek 48 můžeme vidět ukázkové projetí oběma oblouky. Jiří Nikl rychle a plynule naklopil motocykl do požadovaného úhlu klopení a následně zpět. Z grafu je také krásně vidět jak je zrychlení v ose y kompenzováno úhlem klopení tak, aby výslednice sil směřovala do vozovky a motocykl mohl bezpečně projet obloukem.

Tabulka 14: Naměřené hodnoty při průjezdu obloukem pro motocykl H-D Electra Glide.

	1. oblouk			2. oblouk		
	$\Psi_{_(max)}$ [°]	$a_{y_(MAX)}$ [m/s^2]	$v_{(\Psi_(max))}$ [km/h]	$\Psi_{_(max)}$ [°]	$a_{y_(MAX)}$ [m/s^2]	$v_{(\Psi_(max))}$ [km/h]
1. kolo	25	3,5	13	25	2,9	4
2. kolo	24	3,1	20	25	2,9	10
3. kolo	25	3,4	21	25	3,1	8
4. kolo	25	3,4	17	25	3,1	8
5. kolo	25	3,6	12	20	2,6	11



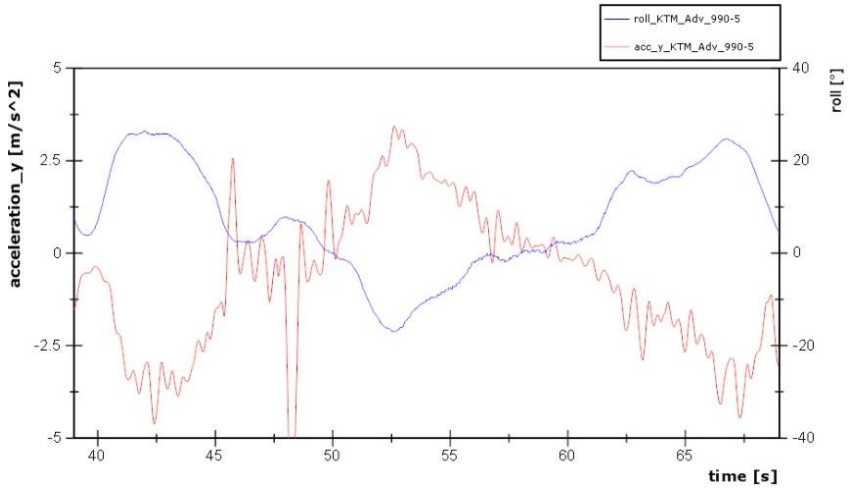
Obrázek 49: Zrychlení v ose y a úhel klopení, 3. kolo, H-D Electra Glide.

Jiří Kobosil projížděl oba oblouky s úhlem klopení okolo 25°. Rychlost průjezdu oběma oblouky byla nižší než u motocyklu Triumph Tiger a tomu odpovídají i nižší naměřené hodnoty zrychlení.

Na obrázku 49 opět vidíme plynulé a rychlé naklopení motocyklu do prvního oblouku. Jinak je tomu u druhého oblouku, kde šířka zaznamenaného klopení je o poznání větší a náběh je pozvolný. Jiří Kobosil vedl svůj motocykl H-D Electra Glide tímto obloukem pomaleji vzhledem k vysoké hmotnosti svého stroje.

Tabulka 15: Naměřené hodnoty při průjezdu obloukem pro motocykl KTM 990 Adventure.

	1. oblouk			2. oblouk		
	$\Psi_{_(max)}$ [°]	$a_{y_(MAX)}$ [m/s^2]	$v_{(\Psi_(max))}$ [km/h]	$\Psi_{_(max)}$ [°]	$a_{y_(MAX)}$ [m/s^2]	$v_{(\Psi_(max))}$ [km/h]
1. kolo	21	3,0	21	18	2,3	9
2. kolo	23	3,4	23	22	2,9	10
3. kolo	24	3,7	30	21	2,9	18
4. kolo	23	3,8	25	21	3,0	8
5. kolo	26	3,9	36	24	3,7	18



Obrázek 50: Zrychlení v ose y a úhel klopení, 5. kolo, KTM 990 Adventure.

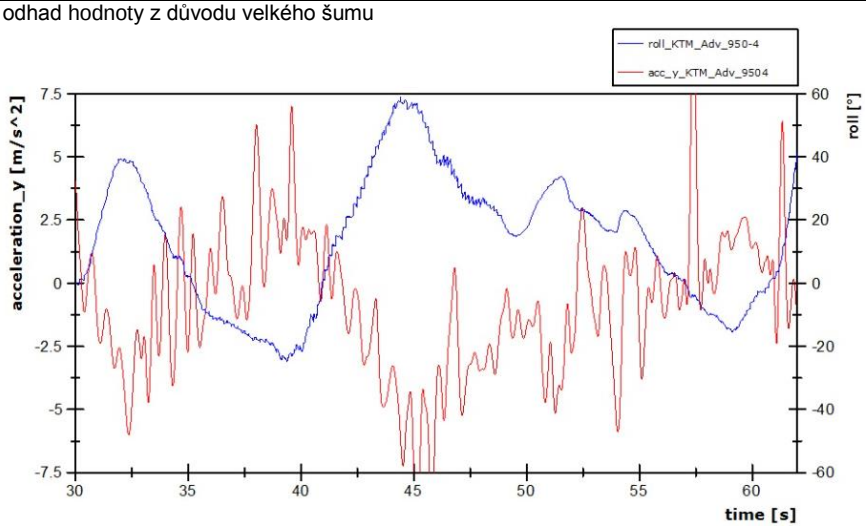
U Martina Kobosila byl ze všech jezdců nejvíce patrný trend zlepšování celkového času a podobný trend můžeme vidět i v tabulce 15. Tento jezdec postupně zvyšoval rychlost v místě maximálního úhlu klopení a tím zvyšoval i hodnoty zrychlení v ose y. První oblouk projížděl pod úhlem okolo 24°, druhý přibližně 22°.

V grafu na obrázku 50 je vidět výrazné naklopení motocyklu na levou stranu v úseku mezi dvěma pravotočivými oblouky. Větší šířka zaznamenaného klopení je u prvního oblouku způsobena pomalejším naklopením motocyklu zpět do vodorovné polohy. Průjezd druhým obloukem je podobný jako u motocyklu Jiřího Kobosila a řidič zde také ztrácel.

Tabulka 16: Naměřené hodnoty při průjezdu obloukem pro motocykl KTM 950 Adventure.

	1. oblouk			2. oblouk		
	$\Psi_{_(max)}$ [°]	$a_{y_(MAX)}$ [m/s^2]	$v_{(\Psi_(max))}$ [km/h]	$\Psi_{_(max)}$ [°]	$a_{y_(MAX)}$ [m/s^2]	$v_{(\Psi_(max))}$ [km/h]
1. kolo	30	4,4*	15	43	4,8*	23
2. kolo	35	4,2*	36	34	4,3*	14
3. kolo	35	4,6*	19	36	4,8*	35
4. kolo	38	4,9*	32	33	4,5*	28
5. kolo	33	3,3*	28	28	3,5*	37

* hrubý odhad hodnoty z důvodu velkého šumu



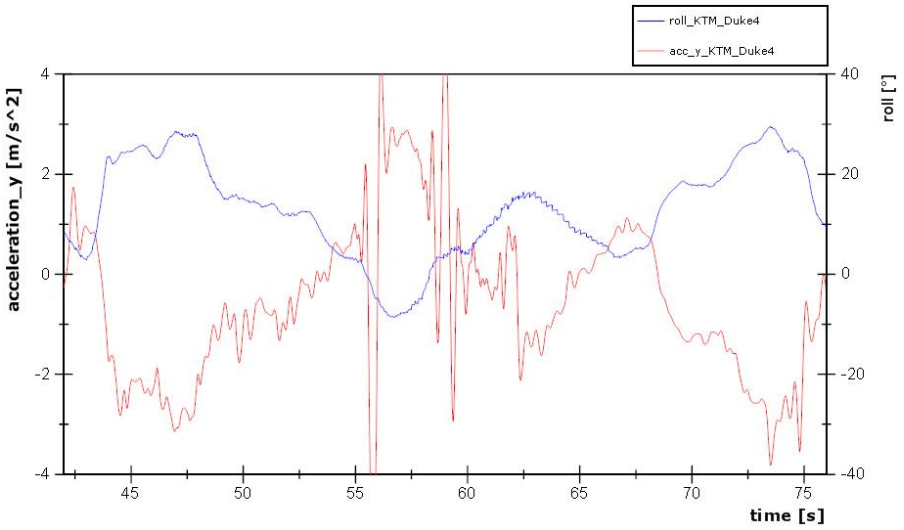
Obrázek 51: Zrychlení v ose y a úhel klopení, 4. kolo, KTM 950 Adventure.

Tomáš Procházka dosahoval bezesporu nejvyššího úhlu klopení, zrychlení v ose y i rychlosti ze všech jezdců. Bohužel celé měření jeho jízdy je zatížené hrubou chybou a je otázka, nakolik jsou údaje v tabulce 15 věrohodné.

Při pohledu do grafu na obrázku 51 jsou jednoznačně chybně naměřené údaje klopení i zrychlení mezi 35 – 50 vteřinou. Po precizně projetém prvním oblouku (30s – 35s) řidič zvedl motocykl vlivem akcelerace na zadní kolo a snímač začal chybně zaznamenávat dalších 15 vteřin. V tomto období je modrý signál na obrázku 51 více zašuměný. Dá se předpokládat, že snímač začal ukazovat přibližně správné hodnoty kolem 50. vteřiny, kdy už byl motocykl ve druhém oblouku.

Tabulka 17: Naměřené hodnoty při průjezdu obloukem pro motocykl KTM Duke 390.

	1. oblouk			2. oblouk		
	$\Psi_{_(max)}$ [°]	$a_{y_(MAX)}$ [m/s^2]	$v_{(\Psi_(max))}$ [km/h]	$\Psi_{_(max)}$ [°]	$a_{y_(MAX)}$ [m/s^2]	$v_{(\Psi_(max))}$ [km/h]
1. kolo	24	2,3	22	26	2,7	6
2. kolo	32	3,7	23	28	3,1	8
3. kolo	32	3,9	20	26	2,5	10
4. kolo	28	2,8	20	29	3,0	6
5. kolo	32	3,8	23	30	3,2	19



Obrázek 52: Zrychlení v ose y a úhel klopení, 4. kolo, KTM Duke 390.

Začátečník Jiří Horáček dosahoval zajímavých hodnot úhlu klopení. Ty u prvního oblouku dosahovali přes 30°. To ale neodpovídá naměřené rychlostí a zrychlení. Je pravděpodobné, že signál úhlu klopení je ovlivněn předchozí jízdou Tomáše Procházky a je posunutý.

Na obrázku 52 vidíme větší šířky zaznamenaného klopení pro oba oblouky. To svědčí o nízké rychlosti a nezkušenosti řidiče s řízením svého motocyklu. Také je patrné naklopení motocyklu na levou stranu v úseku mezi oblouky.

5.5. Závěry z měření

Průběh jednotlivých kol

Zkušení jezdci mají vyrovnané časy za jednotlivá kola. Znají dobře chování svého motocyklu a dokážou jet na hraně od prvního kola. Křivky jednotlivých parametrů mají v každém kole podobný průběh.

U méně zkušených jezdců je markantnější trend zlepšování časů, kdy každým kolem řidič nejen, že lépe poznává trať, ale i získává větší jistotu nad svým motocyklem. U začátečníků nemají křivky jednotlivých parametrů podobný průběh. Vlivem řady chyb a nejistot vedou svůj motocykl v každém kole jinak.

Brzdění

Většina současných motocyklů má srovnatelně kvalitní brzdy. Hlavní rozdíly jsou v hmotnosti stroje a umu řidiče. Těžší stroje typu cruiser dosahují nižších hodnot zpomalení než lehčí sportovní motocykly.

Na motocyklech bez ABS hraje zásadní roli při brzdění dovednost řidiče. Zkušený řidič dokáže na srovnatelném stroji brzdit výrazně lépe než méně zkušený. Tento rozdíl je větší než u řidičů osobních automobilů to z důvodu větší komplexnosti a náročnosti brzdného manévru na motocyklu než v osobním automobilu.

Ovladatelnost

Ovladatelnost motocyklu ovlivňuje nejen hmotnost a geometrie vozidla, ale zejména zkušenosti řidiče. I s velkým cestovním motocyklem dokáže zkušený řidič obratně projíždět oblouky s velmi malým poloměrem, zatímco méně zkušený řidič na agilním motocyklu může mít velké problémy.

Úhel klopení

Motocykl zatočí na tu stranu, na kterou se naklopí. Velikost úhlu klopení se pak odvíjí od rychlosti vozidla. Všechny kategorie motocyklů projížděli vybrané oblouky s podobným úhlem klopení, který byl pro danou rychlost optimální.

Z pohledu zkoumání dynamiky jízdy motocyklu se jako zajímavější ukazuje zkoumat celý průběh naklopení motocyklu v oblouku než jen maximální hodnoty. Zkušení řidiči motocykl rychle a plynule naklopí do optimálního úhlu klopení a následně zpět do vodorovné polohy. Celková doba celého manévru je kratší než u méně zkušených jezdců, kteří jakoby hledají optimální úhel klopení pozvolnějším naklopením motocyklu a zpět.

Závěr

Vnímání jízdy na motocyklu během let prošlo vývojem. Před pár desítkami let byl motocykl považován zejména za levnější dopravní prostředek pro přepravu mezi dvěma body. V posledních letech se ovšem tento pohled na motocykly diametrálně změnil. Dnešní řidiči mají vztah k motocyklům jako ke svému koníčku. Jízdu na motocyklu popisují pojmy jako svoboda, volnost či radost z jízdy.

Motocykly jsou často prostředkem vyjádření osobnosti řidiče, téměř každý motocykl je originál, vyladěný k řidičovu obrazu. Pro mnoho motocyklistů je jízda v jedné stopě životním stylem. Toto tvrzení podpoří i pohled do statistik Svazu dovozců automobilů. Nejvíce se prodává exkluzivita, styl a image. Motocyklové značky, které dokážou zákazníkovi nabídnout více než produkt, jsou například Harley – Davidson, Ducati, KTM, Triumph nebo BMW.

Tato radost, kterou motocykly přinášejí, je ovšem vykoupena vysokou mírou nebezpečí, kterou tento koníček přináší. Aby se dala lépe zacílit prevence, či zpřesnit analýza dopravních nehod je potřeba a zkoumat a empiricky měřit specifické návyky JMV.

Právě nalezení, popis a měření těchto návyků pro systém řidič – motocykl si klade za cíl tato práce. Snaží se podat komplexní přehled o základních zákonitostech pohybu jednostopých motorových vozidel, o způsobu a problematice samotného měření dynamiky jízdy motocyklů a závěrem popisuje vztahy mezi typem motocyklu, jezdcem a jízdními vlastnostmi vozidla. Práce je přehledně rozdělena do pěti kapitol, ve kterých se dotýká vždy jedné části zmíněné problematiky měření dynamiky jednostopých motorových vozidel.

Kapitola „Kategorizace motocyklů“ zmiňuje rozdělení vozidel z pohledu legislativy. Legislativní rozdělení ovšem nereflektuje značné rozdíly v konstrukci, designu či využití vozidel. Proto se mezi uživateli zažilo běžné rozdělení dle konstrukce. Toto rozdělení se neřídí žádným zákonem ani technickou normou, a proto může být zdrojem nepochopení či dokonce kontroverze. Rozdělení, jak je popsáno v této kapitole, vychází z mého subjektivního pohledu na tuto problematiku.

Následuje kapitola „Specifika jednostopých motorových vozidel“. Ta v první části přináší stručný a ucelený pohled na dynamiku jízdy motocyklu z pohledu fyziky. Z hlediska dopravní techniky se jedná o popis jízdních vlastností vozidla. Při zkoumání vlivu těžiště a dalších parametrů na stabilitu je nutné opět nahlížet na jednostopá motorová vozidla jako na systém řidič – motocykl. Další specifika najdeme při pohledu na bezpečnost motocyklů. Bohužel u motocyklů se nedaří takový pokrok na poli bezpečnosti, jaký můžeme vidět v současné době u osobních automobilů a to zejména z důvodu, že pasivní bezpečnost u motocyklů je odkázána na helmu a oblečení motocyklisty. Poslední část této kapitoly se věnuje statistikám

nehodovosti, jejíž rozbor je neodmyslitelnou součástí komplexního pohledu na bezpečnost JMV.

Kapitola „Problematika měření jízdy motocyklu“ popisuje samotné fyzikální a technické principy jednotlivých snímačů potřebných pro kompletní záznam dynamiky jízdy motocyklu. Použitou měřicí technikou je sdružený snímač pro jízdní zkoušky Xsens MTi-G, který v sobě sdružuje tříosý akcelerometr, tříosý gyroskop, GPS přijímač a další pomocné senzory. V této kapitole je rozebrána technická specifikace tohoto snímače.

Předposlední kapitola „Měření a zpracování dat“ popisuje metodiku správného umístění a zapojení snímače na motocykl, včetně validačního experimentu, který probíhal se dvěma zapojenými snímači paralelně. Následně se věnuje zpracování a očištění naměřených dat, které je nezbytné pro správnou interpretaci naměřeného signálu.

Poslední kapitola „Měření dynamiky jízdy motocyklů“ popisuje experiment, při kterém se měřila dynamika jízdy motocyklů různých kategorií s jezdci napříč věkovým a zkušenostním spektrem. Tohoto experimentu se zúčastnilo 5 jezdců, kteří testovali své motocykly na silničním okruhu v Bělé pod Bezdězem. Analyzovány byly časy a průběh parametrů jednotlivých kol, zrychlení, rychlosti a úhly klopení. Bohužel samotné měření se neobešlo bez komplikací, které alespoň přinesly cenné zkušenosti do další praxe.

U méně zkušených jezdců byl vidět výrazný trend zlepšování časů, kdy každým kolem získávali větší jistotu nad svým motocyklem, zatímco zkušení jezdci vykazovali vyrovnané časy za jednotlivá kola. Rozdíly ve zkušenostech jezdců byly patrné také při zkoumání brzdění či ovladatelnosti. Jako zajímavý se ukázal fakt, že z pohledu dynamiky jízdy motocyklu je lepší zkoumat celý průběh klopení motocyklu v oblouku než jen maximální hodnoty úhlu klopení.

Celá tato práce naplnila svůj potenciál a poskytuje ucelený pohled na měření dynamiky jízdy jednostopých motorových vozidel. Zároveň přinesla cenné zkušenosti, které budou sloužit jako základy dalšího výzkumu na Ústavu soudního znalectví v dopravě, podpořeného grantem Studentské grantové soutěže ČVUT.

V dalším výzkumu bude nezbytné definovat, podle jakých technicky objektivních parametrů budou jednotlivé motocykly a jezdci rozděleny do kategorií. U motocyklů se jako nejzajímavější parametr jeví poměr výkon / hmotnost. Jezdci budou rozřazeni na základě dotazníku. Ke zkoumání budou sloužit empiricky naměřená data o chování jak motocyklů, tak řidičů za různých podmínek z pohledu dynamiky.

Cílem tohoto výzkumu bude vytvoření znalostní databáze parametrů jízdy motocyklů, jako jsou například hodnoty pro normální a krizové brzdění, či hodnoty popisující průjezd motocyklu obloukem. Tuto databázi bude možné využít v oblasti cílené prevence či analýzy dopravních nehod motocyklů.

Ekonomickým dopadům z dopravních nehod motocyklů a hodnocení rizik dopravních nehod motocyklů různých kategorií pro účely pojišťovnictví se zabývám i ve svém paralelním studiu oboru Logistika a řízení dopravních procesů na Fakultě dopravní ČVUT v Praze.

Použité zdroje

[1] Statistika nehodovosti [online]. Policie ČR 2015 [cit. 2015-08-10]. Dostupné z: http://www.policie.cz/clanek/statistika-nehodovosti-900835.aspx

[2] Zákon o podmínkách provozu vozidel na pozemních komunikacích. In: č. 56/2001 Sb. 2013.

[3] VLK, František. Teorie a konstrukce motocyklů. Brno: František Vlk, 2004. ISBN 80-239-1601-7.

[4] Skútr. Wikipedia [online]. 2013 [cit. 2013-10-28]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Sk%C3%BAtr

[5] Motocykl. Wikipedie [online]. 2013 [cit. 2013-10-29]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Motocykl

[6] Kawasaki GTR 1400. Wenix XF [online]. 2012 [cit. 2016-02-24]. Dostupné z: http://www.wenix.xf.cz/obrazky/kawasaki-gtr-1400-4.jpg

[7] Yamaha R1. Total motorcycle [online]. 2013 [cit. 2016-02-24]. Dostupné z: http://www.totalmotorcycle.com/modelhistorytimelines/2009-Yamaha-R1-YZFR1b.jpg

[8] Suzuki Bandit 650. Total motorcycle [online]. 2008 [cit. 2015-08-20]. Dostupné z: http://www.totalmotorcycle.com/photos/2008models/2008-Suzuki-Bandit1250ABSa.jpg

[9] KTM Adventure. Motorcycle specs [online]. 2006 [cit. 2016-02-24]. Dostupné z: http://www.motorcyclespecs.co.za/Gallery/KTM%20990%20Adventure%2006%20%202.jpg

[10] Yamaha WR 250 X. Raptor and Rocket [online]. 2008 [cit. 2015-08-20]. Dostupné z: http://www.raptorsandrockets.com/images/Yamaha/2008Y/WR250X_1.jpg

[11] Cruiser Victory. Polaris [online]. 2016 [cit. 2016-02-24]. Dostupné z: http://polaris.hs.llnwd.net/o40/vic/2016/img/motorcycles/family/cruisers/modal/gunner/image-2.jpg

[12] KASANICKÝ, Gustáv. Analýza nehod jednostopých vozidiel. 1. vyd. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2000, 450 s. ISBN 80-710-0598-3.

[13] VLK, František. Dynamika motorových vozidel /. vyd. 2. Brno: Prof.Ing.František Vlk,DrSc., nakladatelství a vydavatelství, 2006, 432 s. ISBN 80-239-0024-2.

[14] Záklon rejdové osy. Autolexicon [online]. 2013 [cit. 2013-11-08]. Dostupné z: http://cs.autolexicon.net/obr_clanky/cs_zaklon_rejdove_osy1.jpg

[15] VLK, František. Ovladatelnost a stabilita motocyklu. 2004. Dostupné z: http://www.sinz.cz/archiv/docs/si-2004-06-303-311.pdf

[16] KOVANDA, Jan. Konstrukce automobilů: pasivní bezpečnost. Dotisk 1. vyd. Praha: ČVUT, 1996. ISBN 80-010-1459-2.

[17] Bezpečnost silničního provozu. Motocykly - pneumatiky, podvozek, brzdy a jejich vliv na bezpecnost silničního provozu [online]. 2013 [cit. 2014-02-10]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/usi/dokumenty/dokumenty-ke-stazeni-f23776/bezpecnost-vozidel-silnicniho-provozu-materialy-k-predmetu-d75943/10-12-motocykly-pneumatiky-brzdy-podvozky-elektronicke-bezpecnostni-systemy-pasivni-ochrana-technika-jizdy-p70456

[18] FIRST, J. Zkoušení automobilů a motocyklů. Praha: S&T CZ, 2008. ISBN 978-80-254-1805-5.

[19] KOBOSIL, Martin. Základní ekonomická analýza nehod jednostopých motorových vozidel. Děčín, 2015. Bakalářská práce. ČVUT v Praha, Fakulta dopravní.

[20] Ročenka Dopravy 2013. Praha: Ministerstvo dopravy, 2013. ISSN 1801-3090. Dostupné z: https://www.sydos.cz/cs/rocenka_pdf/Rocenka_dopravy_2013.pdf

[21] Statistiky motocyklistů. Statistiky motocyklistů [online]. 2013 [cit. 2015-08-20]. Dostupné z: http://www.ibesip.cz/data/web/soubory/statistika/CR/2012/motocykliste.pdf

[22] LENKOVÁ, Alžběta. Sdružený snímač pro jízdní zkoušky Xsens MTi-G. Prezentace k předmětu 22MMT. Praha, 2010.

[23] Akcelerometry. Katedra mikroelektroniky FEL ČVUT V PRAZE [online]. [cit. 2016-03-09]. Dostupné z: http://www.micro.feld.cvut.cz/home/x34ses/prednasky/08%20Akcelerometry.pdf

[24] Určování trajektorie z akcelerometrického měření. ROMODIS [online]. [cit. 2016-03-09]. Dostupné z: http://www.romodis.cz/files/177493458.pdf

[25] MTi-G User Manual and Technical Documentation. 2009.

[26] Úvod do GNSS [online]., 19 [cit. 2016-03-10]. Dostupné z: ftp://athena.fsv.cvut.cz/EMEG/uvodGNSS.pdf

[27] GNSS v jejich využití praxi [online]. , 72 [cit. 2016-03-10]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_08_1009.pdf

[28] Globální navigační systémy [online]. , 132 [cit. 2016-03-10]. Dostupné z: http://www.urel.feec.vutbr.cz/~sebestaj/RAR/literatura/Globalni_navigacni_systemy.pdf

[29] MEMS Gyroscopes and their applications [online]. , 13 [cit. 2016-03-16]. Dostupné z: http://clifton.mech.northwestern.edu/~me381/project/done/Gyroscope.pdf

[30] PEARSON, Cef. How a gyroscope wokrs [online]. 1999, , 4 [cit. 2016-03-16]. Dostupné z: http://www.gyroscopes.org/how%5Chagwa4.pdf

[31] VOJÁČEK, Antonín. Jak pracují nové 3D MEMS akcelerometry Freescale ? Vyvoj.hw.cz [online]. 2007 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: http://vyvoj.hw.cz/soucastky/jak-pracuji-nove-3d-mems-akcelerometry-freescale.html

[32] NAGY, Ivan. Stochastické systémy [online]. , 156 [cit. 2016-03-17]. Dostupné z: http://staff.utia.cas.cz/suzdaleva/pdfka/StSysTexty.pdf

[33] CHMELAŘ, Pavel. Stabilizace polohy létajícího objektu pomocí inerciálních senzorů [online]. Pardubice, 2011 [cit. 2016-03-17]. Dostupné z: http://dspace.upce.cz/bitstream/handle/10195/39401/ChmelarP_StabilizacePolohy_PR_2011.pdf;jsessionid=7254461B08BBE5A145F07D6A84F28813?sequence=1. Diplomová práce. Univerzita Pardubice

[34] Motokatalog. Motorkari.cz [online]. [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: http://www.motorkari.cz/motokatalog/

[35] Motorland Bělá. E-sportfoto.cz [online]. [cit. 2016-05-06]. Dostupné z: https://www.e-sportfoto.cz/obrazek/3/motorland-bela-letecke-foto-arealu-stranka-01-obraz-0001-jpg

Seznam tabulek

Tabulka 1: Poměr výkonu a hmotnosti pro vybrané dopravní prostředky. 15
Tabulka 2: Registrované motocykly a automobily v ČR v letech 2004 – 2013. [19] 25
Tabulka 3: Registrované motocykly v ČR s objemem válce nad 125 ccm3. [19] 25
Tabulka 4: Počet zúčastněných motocyklů na DN a jejich následky do 24 hodin. [1] 26
Tabulka 5: Hlavní příčiny nehod zaviněných řidičem motocyklu. [1] 28
Tabulka 6: Pořadí jezdců a klimatické podmínky. 52
Tabulka 7: Časy prvních pěti kol pro jednotlivé motocykly ve vteřinách. 58
Tabulka 8: Naměřené hodnoty rychlostí a zrychlení pro motocykl Triumph Tiger 1200. 64
Tabulka 9: Naměřené hodnoty rychlostí a zrychlení pro motocykl H-D Electra Glide. 64
Tabulka 10: Naměřené hodnoty rychlostí a zrychlení pro motocykl KTM 990 Adventure. 65
Tabulka 11: Naměřené hodnoty rychlostí a zrychlení pro motocykl KTM 950 Adventure. 66
Tabulka 12: Naměřené hodnoty rychlostí a zrychlení pro motocykl KTM Duke 390. 67
Tabulka 13: Naměřené hodnoty při průjezdu obloukem pro motocykl Triumph Tiger 1200. . 68
Tabulka 14: Naměřené hodnoty při průjezdu obloukem pro motocykl H-D Electra Glide. 68
Tabulka 15: Naměřené hodnoty při průjezdu obloukem pro motocykl KTM 990 Adventure. . 69
Tabulka 16: Naměřené hodnoty při průjezdu obloukem pro motocykl KTM 950 Adventure. . 70
Tabulka 17: Naměřené hodnoty při průjezdu obloukem pro motocykl KTM Duke 390. 71

Seznam grafů

Graf 1: Vývoj počtu usmrcených a těžce zraněných. [1] 27
Graf 2: Porovnání závažnosti DN a počtu usmrcených osob. [1] 28
Graf 3: Poměr zaviněných a nezaviněných DN a úmrtí. [1] 29

Seznam obrázků

Obrázek 1: Silniční cestovní, silniční sportovní a naked bike. [6][7][8] 14
Obrázek 2: Enduro, supermoto a cruiser. [9][10][11] 14
Obrázek 3: Úhel osy řízení a závlek předního kola. [14] 17
Obrázek 4: Osy klopení, řízení a stáčení motocyklu. [15] 18
Obrázek 5: Vznik gyroskopického momentu Mz. [12] 18
Obrázek 6: Vliv naklopení motocyklu na těžiště. [12] 19
Obrázek 7: Působení odstředivé síly v náklonu. [12] 21
Obrázek 8: Rozdíl šířky jízdního koridoru při přímé jízdě a při jízdě obloukem. [12] 22
Obrázek 9: Schéma určení polohy ze tří signálu. 32
Obrázek 10: Princip snímače úhlové rychlosti. [22] 34
Obrázek 11: Sdružený snímač Xsens MTi-G. [25] 35
Obrázek 12: Princip kapacitního akcelerometru. [22] 36
Obrázek 13: Sdružený snímač Xsens MTI-G a anténa GPS signálu. [25] 36
Obrázek 14: Architektura snímače MTi-G. [25] 37
Obrázek 15: Lokální souřadný systém MTi-G. [25] 39
Obrázek 16: Schéma LLA a LTP souřadných systémů. [25] 39
Obrázek 17: Ruční zadání matice natočení. [25] 41
Obrázek 18: Princip funkce Object Reset. [25] 41
Obrázek 19: Rozhraní MT manager. [25] 42
Obrázek 20: Snímané veličiny. 44
Obrázek 21: Umístění snímače na motocyklu KTM Adventure. 44
Obrázek 22: Osazení motocyklu měřicí technikou (vlevo), měřící počítače (vpravo). 45
Obrázek 23: Umístění snímače vzadu (vlevo), umístění snímače vpředu (vpravo). 45
Obrázek 24: Průběh zrychlení motocyklu od obou senzorů. 46
Obrázek 25: Detailní průběh zrychlení motocyklu od obou senzorů. 47
Obrázek 26: Systém před transformací (vlevo) a po transformaci (vpravo). 48
Obrázek 27: Transformace souřadnic. 49
Obrázek 28: Filtrace signálu. 50
Obrázek 29: Motorland Bělá. [35] 51
Obrázek 30: Testovací motocykly na silničním okruhu Motorland Bělá. 52
Obrázek 31: Triumph Tiger 1200 Explorer. 53
Obrázek 32: Harley-Davidson Electra Glide Classic. 54
Obrázek 33: KTM 990 Adventure R. 55
Obrázek 34: KTM LC8 950 Adventure S. 56
Obrázek 35: KTM Duke 390. 57

Obrázek 36: Projetá trasa v mapovém podkladu Google Earth. Motocykl H-D El. Glide. 58
Obrázek 37: Rychlost v jednotlivých kolech, Triumph Tiger. 59
Obrázek 38: Rychlost v jednotlivých kolech, H-D Electra Glide. 60
Obrázek 39: Rychlost v jednotlivých kolech, KTM 990 Adventure. 61
Obrázek 40: Rychlost v jednotlivých kolech, KTM 950 Adventure. 62
Obrázek 41: Rychlost v jednotlivých kolech, KTM Duke. 62
Obrázek 42: Vyznačený úsek ve spodní části okruhu. Zdroj: https://maps.google.cz/. 63
Obrázek 43: Zrychlení v ose x a rychlost, vyznačené veličiny, 5. kolo, Triumph Tiger 1200. 64
Obrázek 44: Zrychlení v ose x a rychlost, 3. kolo, H-D Electra Glide. 65
Obrázek 45: Zrychlení v ose x a rychlost, 5. kolo, KTM 990 Adventure. 65
Obrázek 46: Zrychlení v ose x a rychlost, 4. kolo, KTM 950 Adventure. 66
Obrázek 47: Zrychlení v ose x a rychlost, 4. kolo, KTM Duke 390. 67
Obrázek 48: Zrychlení v ose y a úhel klopení, 5. kolo, Triumph Tiger 1200. 68
Obrázek 49: Zrychlení v ose y a úhel klopení, 3. kolo, H-D Electra Glide. 69
Obrázek 50: Zrychlení v ose y a úhel klopení, 5. kolo, KTM 990 Adventure. 69
Obrázek 51: Zrychlení v ose y a úhel klopení, 4. kolo, KTM 950 Adventure. 70
Obrázek 52: Zrychlení v ose y a úhel klopení, 4. kolo, KTM Duke 390. 71