



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA DOPRAVNÍ**

Bc. Jan Smeták

**Jízdní charakteristiky cyklisty**

Diplomová práce

**2017**



**K622 ..... Ústav soudního znalectví v dopravě**

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Bc. Jan Smeták**

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

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

Název tématu (česky): **Jízdní charakteristiky cyklisty**

Název tématu (anglicky): Driving Characteristics of Bicyclist

### **Zásady pro vypracování**

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

- Jednostopá vozidla se zaměřením na jízdní kola (historie a vývoj, druhy jízdních kol, konstrukční technologie, bezpečnost)
- Zaměřování dynamiky jízdy - zaměřeno na akcelerometry (historie a vývoj, konstrukce, principy měření, hraniční hodnoty)
- Měřící experiment: návržení, provedení a vyhodnocení: a) dynamiky běžné jízdy kola v běžných podmínkách; b) dynamiky jízdy při extrémním sjezdu; výsledky experimentů vyhodnotit i mezi sebou

- Rozsah grafických prací: dle doporučení vedoucího práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: 1) ŠACHL, Jindřich. Analýza nehod v silničním provozu. Praha : Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2010.  
2) WILSON, D.G.: Bicycle Science, ISBN:9780262731546

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

Datum zadání diplomové práce: **25. června 2016**  
(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: **30. května 2017**  
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia  
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia



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

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

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.



.....  
Bc. Jan Smeták  
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 25. června 2016

## Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli podklady pro vypracování této práce. Zvláště pak děkuji panu Ing. Drahomírovi Schmidtovi, Ph.D. za odborné vedení a konzultování diplomové práce a za rady, které mi poskytoval po celou dobu mého studia. Rád bych také poděkoval panu Ing. Ondřeji Smíškovi za perfektní spolupráci a obětavost při praktickém měření. Dále bych chtěl poděkovat celému týmu Ústavu soudního znalectví v dopravě K622 za umožnění přístupu k mnoha důležitým informacím, materiálům a technologiím. V neposlední řadě je mou milou povinností poděkovat svým rodičům a blízkým za morální podporu, které se mi dostávalo po celou dobu studia.

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS16/255/OHK2/3T/16 Jednostopá vozidla a osobní přepravník - měření dynamiky a vlivu různých faktorů.

## Prohlášení

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

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

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

V Praze dne 30. května 2017

.....  
podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

## JÍZDNÍ CHARAKTERISTIKY CYKLISTY

Diplomová práce

Květen 2017

Bc. Jan Smeták

### **ABSTRAKT:**

Předmětem diplomové práce jsou „Jízdní charakteristiky cyklisty“. Téma je rozebráno z pohledu techniky, vybavení a způsobu měření. Experiment popisuje spojení jízdního kola s akcelerometry a má dokázat odlišnosti mezi klasickou jízdou a náročným sjezdem. Jednotlivé části práce jsou zaměřeny na historii jízdních kol, na jejich rozdělení a stejným způsobem jsou zpracovány i akcelerometry. V diplomové práci je také poukázáno na bezpečnost cyklistiky.

### **ABSTRACT:**

The subject of the master thesis is “Driving characteristics of bicyclist”. The theme is analyzed from the perspective of technique, equipment and method of measurement. The experiment describes the connection of the bicycle with the accelerometers and it should prove the differences between classic ride and hard downhill ride. The individual parts of the thesis are focused on the history of bicycles, the types of bicycles and accelerometers are described the same way. The master thesis also highlights the cycling safety.

**KLÍČOVÁ SLOVA:**

Akcelerometr, jednostopá vozidla, jízdní kolo, bezpečnost cyklistů, dynamika jízdy, pohyb, měření, zpracování dat

**KEY WORDS:**

Accelerometer, single track vehicles, bicycle, safety of cyclists, driving dynamics, movement, measurement, data processing

## Obsah

1	Úvod.....	10
2	Akcelerometry .....	12
2.1	Historie.....	12
2.2	Technologie.....	13
2.2.1	MEMS – Micro Electro-Mechanical Systems .....	13
2.3	Rozdělení.....	14
2.3.1	Polovodičové-piezoelektrické akcelerometry .....	14
2.3.2	Polovodičové-piezorezistivní akcelerometry .....	17
2.3.3	Kapacitní akcelerometry.....	18
2.4	Konstrukce .....	19
2.4.1	Základna .....	19
2.4.2	Setrvačná hmota .....	19
2.4.3	Tlumení .....	19
2.5	Rušivé vlivy .....	20
2.6	Montáž akcelerometru.....	20
2.7	Hraniční hodnoty pro člověka .....	20
3	Jednostopá vozidla.....	21
3.1	Jízdní kolo .....	21
3.1.1	Historie.....	21
3.1.2	Druhy jízdních kol.....	23
3.1.3	Bezpečnost .....	26
3.1.4	Informace o nehodovosti .....	26
3.1.5	Bezpečnost cyklistů.....	29
4	Jízdní charakteristiky cyklisty [21].....	31
4.1	Měření akcelerometrem na jízdním kole.....	31
4.2	Měření pomocí akcelerometru.....	31
4.3	Využití GNSS pro určení polohy .....	32
4.3.1	Struktura systému .....	32
4.3.2	Výpočet polohy.....	33
4.3.3	Metoda měření polohy.....	34



4.4	Gyroskopický senzor úhlové rychlosti.....	34
4.5	Sdružený snímač Xsens MTi-G.....	35
4.5.1	Technické specifikace .....	36
4.5.2	Kálmánův filtr .....	37
4.5.3	Výstupy senzoru.....	39
4.5.4	Orientace snímače .....	40
4.6	SBG Systems – Ellipse2-N: Miniaturní INS/GPS .....	41
5	Měření v rámci předmětu 22AMM .....	42
5.1	Protokol.....	42
6	Měření dynamiky jízdy sjezdového kola .....	53
6.1	Lokalita.....	53
6.2	Trasa.....	54
6.3	Podmínky .....	54
6.4	Jezdec.....	55
6.5	Jízdní kolo .....	55
6.6	Spojení kola s akcelerometrem .....	56
6.7	Způsob vyhodnocení .....	57
6.8	Použité programy, postup a závěr měření .....	58
7	Závěr.....	62
8	Použité zdroje .....	64
9	Seznam obrázků .....	67
10	Seznam tabulek.....	69
11	Seznam grafů .....	69
12	Seznam příloh.....	69
	Příloha 1: Lesy ČR-Povolení k vjezdu motorových vozidel.....	70
	Příloha 2: Ukázka terénu trasy .....	71

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK:

CMOS	Z anglického „Complementary Metal–Oxide–Semiconductor“ – doplňující se kov-oxid.polovodič
GNSS	Globální navigační satelitní systém
GPS	Globální polohový systém
IMU	Inerciální měřící jednotka
MEMS	Mikro-elektro-mechanický systém
XC	Cross-country – disciplína horských kol

## SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN A JEJICH JEDNOTEK:

Značka	Jednotka	Veličina
$a_{x,y,z}$	[m/s <sup>2</sup> ]	okamžité zrychlení ve směru osy X, Y, Z
$\alpha, \beta$	[°]	úhel
$c_x$	[-]	součinitel odporu
$c$	[m/s]	rychlost světla ve vakuu
Dik	[m]	vzdálenost přijímače $k$ od satelitu $i$
G	[m/s <sup>2</sup> ]	gravitační zrychlení
J	[kg.m.s <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti rotujících hmot
$m$	[kg]	hmotnost
Mz	[kg.m]	gyroskopický moment
$\mu$	[-]	součinitel přilnavosti
$\omega_y$	[rad/s]	úhlová rychlost
R	[m]	poloměr křivosti trajektorie
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota
$s$	[m]	vzdálenost
S	[m <sup>2</sup> ]	plocha
$t$	[s]	čas
$v$	[m/s]	okamžitá rychlost
$x_i, y_i, z_i,$	[m]	souřadnice
wt	[-]	šum

# 1 Úvod

Jízdní kolo se stalo celosvětově oblíbeným dopravním prostředkem. Jeho vývoj trval několik dlouhých let, kdy na začátku nebylo jízdní kolo tomu současnému příliš podobné. Jak šel čas a všechny technologie se zdokonalovaly, jízdní kolo nezůstávalo pozadu. Postupně bylo natolik zdokonaleno, že začalo být mezi lidmi čím dál tím více oblíbené a pro svůj nenáročný provoz a efektivitu okamžitě získalo místo v každodenním životě. V dnešní době má jízdní kolo řadu uplatnění. Kromě dopravy z bodu A do bodu B je vnímáno hlavně jako sportovní aktivita a existuje celá řada sportů rozdělených dle druhů jízdních kol. Od klasické silniční cyklistiky a závodů horských kol až po exhibiční závody BMX nebo kolovou.

Technologická vylepšení přinesla i zvýšení komfortu, spolehlivosti, bezpečnosti a také rychlosti jízdy. S rostoucím počtem cyklistů a s jejich integrací do silniční dopravy jsou spojeny i zvýšené nároky na bezpečnost a dopravní opatření. Proto bude také bezpečnosti věnována část třetí kapitoly. Ze statistik vyplývá, že nejnebezpečnějším faktorem při nehodě, ve které je jedním z účastníků cyklista, je skutečnost, zda měl cyklista v době nehody na hlavě přilbu. Konstrukce aut je dnes koncipována tak, aby minimalizovala závažná zranění při střetu s osobami. Zásadnější roli však hraje sekundární náraz, kdy jezdec (osoba) bez přilby dopadne hlavou na tvrdou vozovku. Ta bohužel nepohlčí žádnou energii deformačními zónami, a tak dochází k tragickým následkům. Začínají se vyvíjet speciální druhy airbagů, které mají tuto skutečnost zlepšit.

Dále budou popsány snímače a senzory, kterými lze požadované veličiny měřit. Jedná se především o akcelerometry, obsahující množství senzorů pro různé využití při měření. Ústav soudního znaleství v dopravě disponuje profesionální technikou, což danou problematiku měření značně usnadňuje.

Vývoj akcelerometrů nemá tak bohatou historii jako v případě jízdních kol, ale i rozvoj těchto technologií je velice atraktivní. Akcelerometry se staly součástí mnoha elektronických přístrojů, jako jsou např. mobilní telefony. Díky technologii MEMS se aplikace senzorů stala celkem nenáročným procesem i z hlediska finanční stránky. V této práci budou vysvětleny operace, které snímač během měření propočítává a kombinací výpočtů a dat ze senzorů určuje hodnoty, které lze číselně reprezentovat.

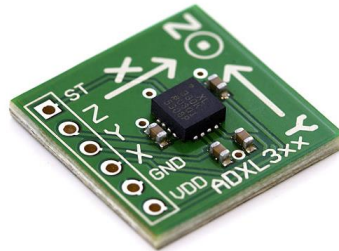
Tato práce analyzuje jízdní charakteristiky cyklisty v podmínkách, při kterých nastávají extrémy, do jakých se běžný cyklista dostane jen zřídka. Jedná se především o zrychlení v ose  $x$  a  $z$ , kdy osa  $x$  vypovídá o maximálních změnách rychlosti a osa  $z$  reprezentuje kladné nebo záporné zrychlení (přetížení) při skocích, jaké jezdec během sjezdu zažívá. Na to je potřeba speciální trénink a zkušenosti, díky kterým je jezdec schopný těmto vlivům odolat. Toto téma

zahrnuje analýzu dat a má za úkol porovnat rozdíly běžné jízdy a extrémního sjezdu. Očekávaný výstup by měl být využitelný k analýze náročnosti zvolené trasy a data by mohla dále sloužit k rozvoji tréninku jezdců pro odvětví horské cyklistiky.

V neposlední řadě vidím potenciál využití získaných informací při analýze dopravních nehod. Z hodnot zrychlení se dá odvodit, jak jsou měřené děje náročné na lidský organismus, což může hrát roli v kritických situacích a vyhodnocení specifických nehod.

## 2 Akcelerometry

Akcelerometr je senzor, který se používá pro měření statického nebo dynamického zrychlení. Dynamické zrychlení je dáno změnou rychlosti pohybujícího se předmětu, ke kterému je akcelerometr připevněn. V případě statického zrychlení využíváme účinky působení zemské gravitace. Akcelerometr je vhodný nejen pro měření odstředivých a setrvačných sil, ale i pro určování pozice tělesa, jeho naklonění nebo vibrací. Nejznámější uplatnění je v automobilovém průmyslu a u mobilních přístrojů. Dá se také využít pro měření vibrací nebo otřesů. [1]



Obrázek 1: Akcelerometr [33]

### 2.1 Historie

První akcelerometry spatřily světlo světa ve 30. letech 20. století. V té době byly představeny první modely piezorezistivních akcelerometrů. Tyto dvouosé akcelerometry byly na trhu k dostání za přibližně 400 dolarů, což byla velmi vysoká cena. Později byly vyvinuty novější akcelerometry, které byly piezoelektrické. Dnes se používají akcelerometry s proměnnou kapacitou, a to hlavně v mobilních telefonech. Nesou označení MEMS a cenově jsou mnohem dostupnější. [2]

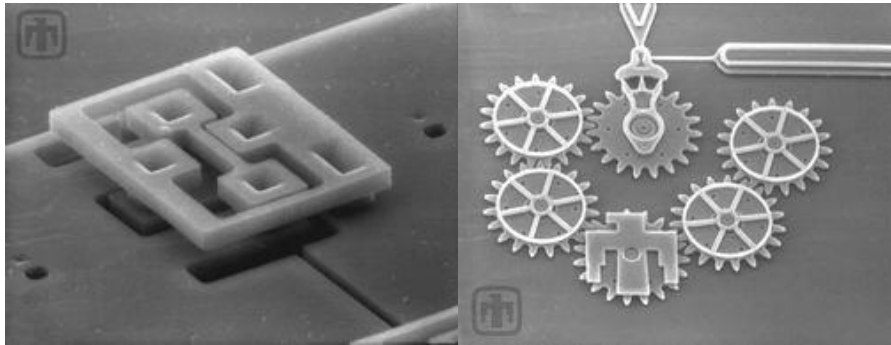
### Historické mezníky

- Princip akcelerometru byl úspěšně ověřen na ruském satelitu Resurs F1 v roce 1992.
- Zdokonalená verze byla testována na americkém raketoplánu Atlantis během letu STS-79 v roce 1996.
- Další model akcelerometru byl použit během letu šesté české družice MIMOSA v roce 2003.
- Za účelem dosažení lepších parametrů a funkčnosti byl vyvinut nový model, který byl testován na ruském satelitu TATIANA 2 v roce 2009.
- Nejnovější model akcelerometru byl vyroben pro misi SWARM, která je součástí programu Pozorování Země Evropské kosmické agentury a pro kterou je generálním dodavatelem EADS Astrium. [3]

## 2.2 Technologie

### 2.2.1 MEMS – Micro Electro-Mechanical Systems

Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) je integrace mechanických elementů, senzorů, akčních členů, řídicí a vyhodnocovací elektroniky na jeden křemíkový substrát prostřednictvím různých výrobních technologií. Zatímco elektronické části jsou vyráběny "tradičními" technologiemi typu CMOS, Bipolar nebo BiCMOS, mikromechanické části jsou zhotovovány prostřednictvím technologií různého selektivního leptání nebo implementováním nových/dalších vrstev. Budoucnost součástek MEMS spočívá v dosažení plně monolitické integrace MEMS s řídicí elektronikou a obvody pro zpracování signálu na substrátu CMOS, tzn. bez nutnosti přidávat/implantovat další vrstvy jiného složení. Plně monolitické řešení má své přednosti v miniaturizaci a zlevnění maximální výroby díky snížení počtu výrobních kroků. [4]



Obrázek 2 a 2: Příklady některých mechanických prvků MEMS  
pružný element (vlevo), ozubená soukolí (vpravo) [4]

Určení rychlosti a vzdálenosti přímo z akcelerace ovšem není bez problémů. Obvykle neznáme přesnou prostorovou orientaci snímače a vlastní měření je zatíženo šumem. Při stanovení rychlosti se chyba projeví odchylkou, která narůstá 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. [5]

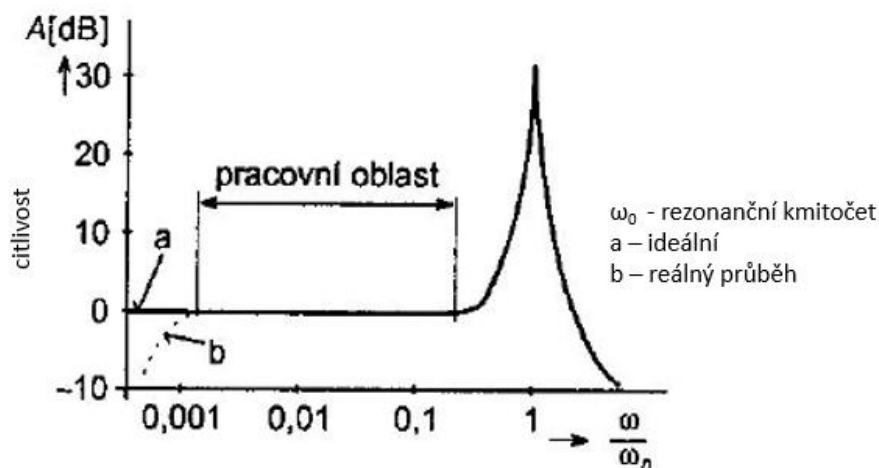
Měření pomocí akcelerometrů nemůže být tedy použito samostatně a musí být doplněno například o měření pomocí GNSS přijímače. Potom zle získat výhody z obou měření.

## 2.3 Rozdělení

Akcelerometry můžeme rozdělit do skupin podle konstrukce na:

- 1) polovodičové – piezoelektrické
- 2) polovodičové – piezorezistivní
- 3) kapacitní
- 4) další (tepelné, s využitím principu tunelování) [6]

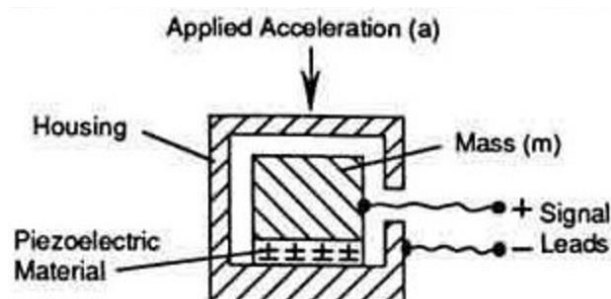
### Frekvenční charakteristika, citlivost, rozsah



Graf 1: Vlastnosti piezoelektrických akcelerometrů [7]

### 2.3.1 Polovodičové-piezoelektrické akcelerometry

Využívají piezoelektrický materiál, který generuje náboj úměrný mechanickému namáhání vzniklému působením akcelerace – vibracemi – principem fungování je přímý piezoelektrický jev. Piezoelektrický efekt generuje na výstupu náboj  $q$  úměrný působící síle. Protože seismická hmota má konstantní hmotnost, výstupní signál v podobě náboje je úměrný akceleraci senzoru. Jednoduchá konstrukce umožňuje senzor napojit na jednoduchý vyhodnocovací obvod. Elektrické napětí vygenerované krystalem je nutné zesílit. [1]



Obrázek 4: Nejjednodušší blokové schéma principu piezoelektrických akcelerometrů. [1]

### Výhody:

- + široký dynamický rozsah
- + pevná a robustní konstrukce
- + velká spolehlivost
- + dlouhodobá stabilita
- + malá citlivost k rušivým vlivům jako je deformace základny pouzdra nebo akustické jevy

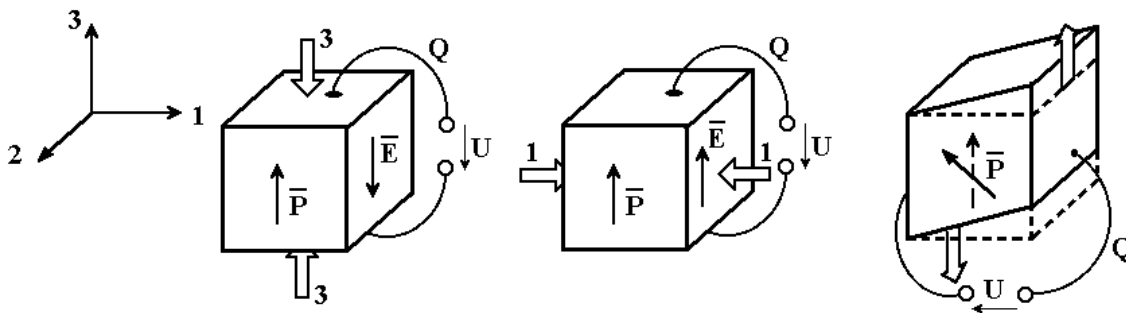
### Nevýhody:

- nemohou být použity pro měření konstantního zrychlení
- velká teplotní závislost piezoelektrického materiálu – kompenzace i vhodným uspořádáním

### Typy:

Podle směru působení deformace vůči ose lze rozlišit:

- stříhový (smykový) piezoelektrický jev
- kompresní podélný, příčný
- ohybový



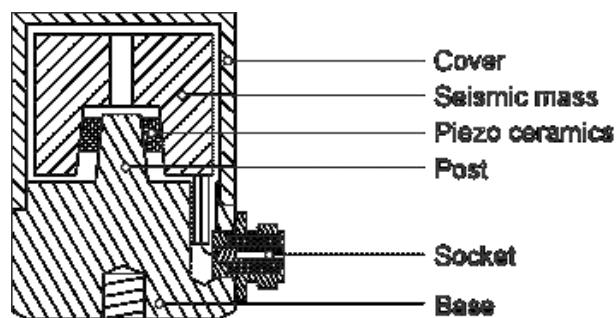
Obrázek 5: Typy akcelerometrů [6]

### Stříhový (smykový) mód

Snímací krystal je umístěn mezi centrálním nosníkem a seismickou hmotou. Při působení zrychlení hmota způsobuje smykové napětí aplikované na snímací krystal. [6]

### Výhody:

- + eliminace teplotních přechodů a ohybů základny

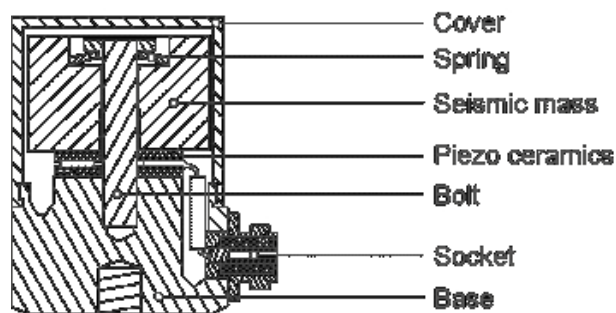


Obrázek 6: Stříhový mód [1]



## Kompresní mód

Základní provedení s nejběžnější strukturou. Toto provedení akcelerometru má jednoduchou konstrukci, vysokou tuhost a odolnost. Nejběžnější typ, tzv. vzpřímená struktura (sendvič piezoelektrického krystalu), která se nachází mezi seismickou hmotou a pevnou montážní základnou. Když je senzor vystaven zrychlení, seismická hmota zvyšuje, nebo snižuje množství síly působící na krystal, jehož elektrický výstup je síle úměrný. Měření tímto akcelerometrem je vysokofrekvenční, má širokopásmový výstup a přesnou frekvenční odezvu. [6]



Obrázek 7: Kompresní mód [1]

### Výhody:

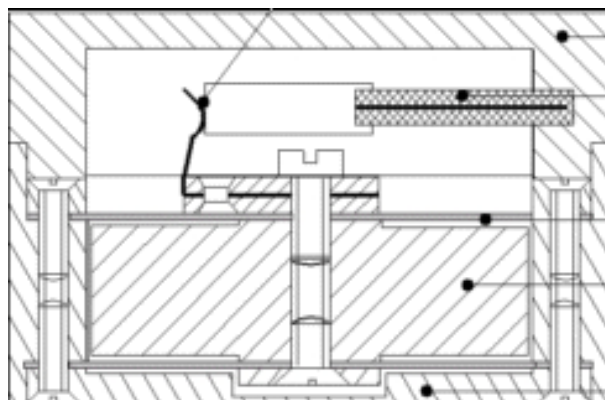
- + robustní struktura
- + vydrží i vysoké krátkodobé přetížení

### Nevýhody:

- senzor více citlivý na ohyb pouzdra a na změny teploty

## Ohybový mód

Snímače jsou tvořeny snímacím krystalem ve tvaru nosníku, který podporuje vznik napětí na krystal při působení zrychlení. [6]



Obrázek 8: Ohybový mód [1]

**Výhody:**

- + nízký profil
- + malá hmotnost
- + výborná teplotní stabilita
- + nízká cena
- + necitlivost na příčný pohyb
- + velmi vysoká citlivost (až 100 V/g)
- + výhodný pro nízké frekvence a nízké přetížení (nízkofrekvenční aplikace, např. měření seismické aktivity)

**Nevýhody:**

- nepoužitelný pro prostředí vystavované velkým nárazům a vibracím

**2.3.2 Polovodičové-piezorezistivní akcelerometry**

Piezorezistivní akcelerometry využívají změny odporu piezomateriálu při mechanickém namáhání, vzniklém působícím zrychlením. Měření odporu piezomateriálu probíhá prostřednictvím základního, nebo polovičního Wheatstoneova můstku. [6]

**Výhody:**

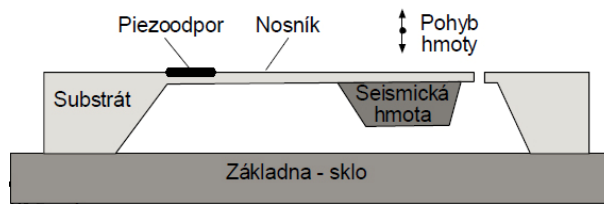
- + jednoduchá konstrukce
- + jednoduchý vyhodnocovací obvod
- + málo náročný na prostor
- + plná integrace
- + možnost měřit stálé zrychlení
- + levné

**Nevýhody:**

- významná závislost výstupu na teplotě

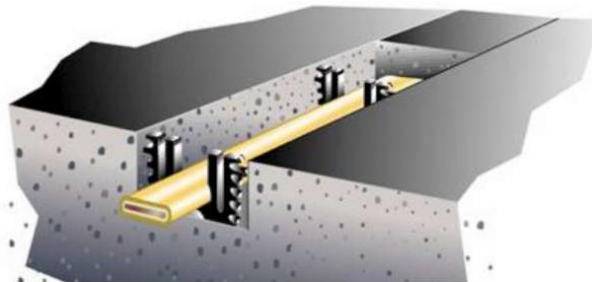
**Princip funkce:**

Nejčastější konstrukci tvoří základní prvek – nosník, na jehož konci je umístěna seismická hmota. Pohybem seismické hmoty dochází ke změně ohmického odporu. Tato změna je úměrná výchylce hmoty. To vše je připevněno k základně, kterou tvoří sklo. [6]



Obrázek 9: Piezorezistivní akcelerometr [7]

Dalším využitím piezorezistivního mechanismu jsou například čítače náprav, které pracují na stejném principu, kdy dochází ke změně odporu snímače, když přes něj přejede kolo dopravního prostředku a snímač je tak mechanicky namáhán.



Obrázek 10: Optický senzor čítače náprav [8]

### 2.3.3 Kapacitní akcelerometry

Akcelerometry s proměnnou kapacitou. Základním prvkem konstrukce je pouzdro, ve kterém kmitá seismická hmota. Konstrukce založena na deskovém kondenzátoru. Kapacitní akcelerometry jsou vhodné pro měření malých dynamických rozsahů zrychlení. [6]

#### Výhody:

- + přesnost
- + velká citlivost

#### Nevýhody:

- velká teplotní a časová odchylka
- vznik elektrostatické síly → chyba měření

#### Princip funkce:

Je to tříelektrodový vzduchový kondenzátor s jednou hmotnou pohyblivou elektrodou. Využívá se nelineární závislosti kapacity  $C$  na vzdálenosti elektrod kondenzátoru  $d$ . Pokud je tedy jedna elektroda pohyblivá a její pohyb je závislý na působící síle, resp. zrychlení, vzniká kapacitní akcelerometr. [6]

## 2.4 Konstrukce

Akcelerometr je složen z těchto částí:

### 2.4.1 Základna

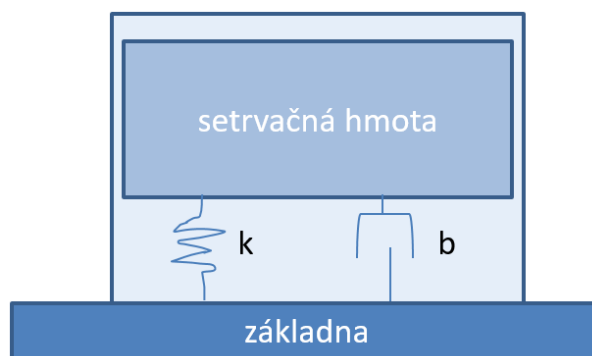
Podstava akcelerometru, která je pevně spojena s měřeným objektem.

### 2.4.2 Setrvačná hmota

Tato hmota je pružně uložena vůči základně a je vyhodnocována její výchylka

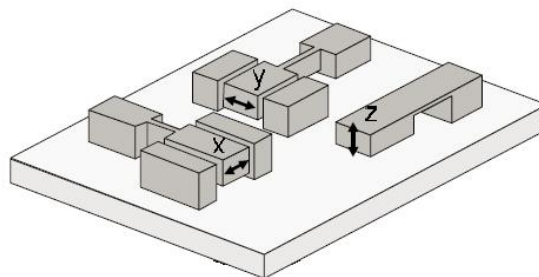
### 2.4.3 Tlumení

Jedná se o proudění vzduchu při pohybu hmoty – viskózní tlumení.



Obrázek 11: Konstrukce akcelerometru. [6]

Akcelerometry mohou být jednoosé a víceosé. Dvouosé nebo tříosé se skládají ze 2 až 3 jednoosých systémů, kde každý z nich je natočený do příslušných směrů a dokáže tak v případě tříosých snímat zrychlení ve všech osách (x,y,z). [6]



Obrázek 12: 2D a 3D akcelerometry [7]

## 2.5 Rušivé vlivy

Měření akcelerometry je ovlivněno následujícími vlivy:

- elektromagnetické pole
- špatná montáž
- deformace základny
- změny teploty
- chemické vlivy, radiace
- vlhkost
- vysoká úroveň hluku
- příčné kmity
- triboelektrický šum (druh kontaktní elektrifikace, kdy určité materiály získávají elektrický náboj poté, co přijdou třením do kontaktu s jiným materiálem. [6])

Každý běžný akcelerometr je kalibrován pro teplotu 20°C. Pokud měření probíhá při extrémních teplotách, používají se speciální akcelerometry.

## 2.6 Montáž akcelerometru

Při montáži akcelerometru musíme především dodržet zásadu absolutně pevného spoje. V případě, že by akcelerometr nebyl pevně spojený s měřeným předmětem, docházelo by k ovlivnění měření a tvorbě chybných dat.

**Využíváme tedy těchto spojů:**

- Šroubový spoj
- Lepený spoj (lepidlo, páska, lepený šroub)
- Magnet
- Vosk
- Kombinace [6]

## 2.7 Hraniční hodnoty pro člověka

Testy za pomoci raketových saní prokázaly, že člověk je schopen přežít a ustát velmi vysoká přetížení, pokud působí postupně a jsou rovnoměrně rozložena. G-Force, neboli přetížení G odpovídá násobkům zemské gravitace, které na člověka působí. 1G odpovídá přibližně 9,81 [m.s<sup>-2</sup>].

Při některých nehodách, například nárazu do pevné překážky, může cestující na velmi krátkou dobu zažít přetížení kolem 50G. Pokud je připoután bezpečnostním pásem, je velká pravděpodobnost, že z nehody vyvázne pouze s povrchovým zraněním. Hodnota přetížení G samozřejmě závisí na rychlosti, konstrukci vozidla a dalších aspektech. Obecně lze ale říci, že pokud je přetížení kolem 75G, nehoda je v 50 % fatální. Zpomalení kolem 80G je považováno téměř vždy jako tragické. [9]

Jezdci Formule 1 běžně při brzdění zažívají přetížení blížící se 7G, stíhací piloti dokonce 9G. Netrénovaný člověk přitom může do bezvědomí upadnout již při dlouhodobějším (v řádu sekund) přetížení 3G.

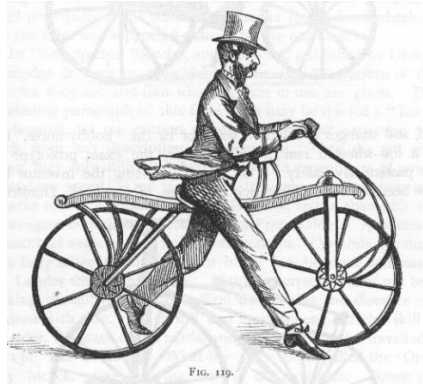
### **3 Jednostopá vozidla**

V klidu, nebo při velmi pomalé jízdě, má jednostopé vozidlo velmi malou stabilitu. S narůstající rychlostí stoupá i stabilita. Tím, jak se kola točí stále rychleji kolem své osy, narůstá i rotační moment a odstředivá síla. Právě odstředivá síla zabraňuje kolům, aby se vychýlila z osy rotace, bez ohledu na to, v jaké poloze se kola točí. [10]

#### **3.1 Jízdní kolo**

##### **3.1.1 Historie**

Na počátku 19. století byl vytvořen první dopravní prostředek, který byl svou konstrukcí podobný dnešnímu jízdnímu kolu. Jeho rám tvořilo těžké masivní dřevo, na kterém bylo umístěno improvizované sedlo připomínající spíše podušku a k rámu byla připevněna loukoťová kola s železnou obručí. Tento druh jízdního kola nedisponoval žádným složitým mechanismem, který by umožňoval pohon nebo brzdění. Uživatel se musel jednoduše odrážet nohama od země, brzdit patami, a jelikož bylo kolo těžké a nemělo na sobě ani minimální prvek odpružení, jízda na něm byla značně nepříjemná. Takový druh kola sestrojil německý baron Karl Wilhelm Friedrich Christian Ludwig Drais von Sauerbronn a pojmenoval ho podle svého jména – Drasina. Psal se rok 1813 a baronovi trvalo celých 5 let, než se mu podařilo svůj vynález patentovat. To obnášelo přesvědčit úředníky, že tento stroj bude mít svoje využití při přepravě osob v běžném životě a bude tak pro společnost užitečný. Proto se v roce 1817 rozhodl podniknout cestu z Mannheimu k francouzským hranicím, směrem ke Štrasburku. Tato trasa byla dlouhá necelých 80 km, a pokud by jí chtěl někdo zdolat pěšky, potřeboval by na to nejméně 16 hodin. Jelikož je tato trasa bez výrazných stoupání, podařilo se mu vzdálenost zdolat za čtyřikrát méně času. To už byl dostatečný důkaz přínosu a v roce 1818 bylo tak patentováno první jízdní kolo. Lidé tento vynález nazývali také “kostitřas“, právě kvůli jízdnímu komfortu.



Obrázek 13: Drezína [11]

Drezína byla postupem času stále více vylepšována a její design se zachoval až do roku 1861. V roce 1839 byly ve Skotsku vynalezeny první pedály, a jelikož zájem o drezínu začal upadat, bylo načase vynález jízdního kola vylepšit. Toho bylo dosaženo právě pedály a klikami, které na „kostitřas“ připevnil Pierre Michaux a nazval ho „vélocipede“. Spojení klik a středu kola však bylo pevné, takže jedno otočení klik znamenalo jednu otáčku kola. Jako u všech vynálezů dopravních prostředků bylo i zde trendem zvyšovat maximální možnou rychlost jízdy. V této době se ještě nevyužívaly převodové mechanismy. Logickým krokem tedy bylo zvětšit obvod kola. Tímto postupem se jízdní kolo dostalo až k podobě proslulého vysokého kola, které mělo ale nevýhodu v nestabilitě a nebezpečnosti při hrozcím pádu. Ovladatelnost nebyla také nijak oslňující. Vzniklo ještě několik modifikací v podobě jednoho velkého kola vpředu a dvou malých vzadu, což mělo vyřešit problém se stabilitou, nicméně jakmile do hry vstoupily převody, začala být opět atraktivní nízká kola, na kterých se dalo díky převodům dosahovat stejných rychlostí jako na kole vysokém. Byl vytvořen tzv. „bezpečnostní bicykl“ a v roce 1885 byl zkonstruován první předchůdce dnešních nízkých kol, „Rover Safety“. Nízká kola dosahovala velmi dobrých výsledků na závodních drahách a vysoká kola tak sesadila z trůnu. Dalším milníkem byl vynález pneumatiky. Ta vznikla již v první polovině 19. století, ale její použití je spojováno se jménem irského zvěrolékaře Johna Boyda Dunlopa. Ten ji instaloval na nízkém kole svého syna a tím tak jízdní kolo a jeho komfort posunul o další významný kus dopředu. Jízdní kolo bylo ale stále bez brzd a volnoběžky, což nebylo úplně bezpečné. Volnoběžný náboj se stal součástí konstrukce v roce 1904. Dále byla vynalezena axiální brzda, která působila ze stran na plochy ráfku kola. Tato varianta je používána dodnes, pokud není kolo vybaveno kotoučovými brzdami. Další variantou brzdění bylo „torpédo“, kdy stačilo sešlápnout pedály proti směru šlapání a vyvinutá síla působila přímo do středu zadního kola. Začala se opět řešit otázka převodů. Cyklisté byli unaveni z namáhavé jízdy do kopce nebo proti větru a též nevyhovovala nutnost rychle šlapat při vyšších rychlostech po rovině a z kopce. Proto technici vyvinuli měnitelný převod, který v roce 1909 byl již na takové úrovni, že bylo možné měnit 3 převody. K velkému pokroku techniky přispěla závodní cyklistika a snaha být nejrychlejší.

Postupně vznikla první galusková kola nebo rychloupínací mechanismy. Po konci druhé světové války začal zájem o kola klesat. Na vině byla stoupající dostupnost automobilů. Ke konci 20. století se ale zájem o kola vrací, hlavně pak o horská kola. Postupně se budují cyklostezky a kolo patří k důležitým článkům osobní dopravy. Nejlépe je na tom Holandsko, Belgie, Dánsko a Německo. [12]

### 3.1.2 Druhy jízdních kol

Jízdní kola lze rozdělit do několika kategorií. Každá kategorie má svá specifika a přímo rozhoduje o tom, na jaký druh jízdy, nebo na jakém povrchu bude kolo použito.

#### BMX

Tato jízdní kola malých rozměrů mají speciální využití hlavně pro triky, které lze na takto malých kolech provádět. Nejčastěji najdou využití ve skate-parcích, na U-rampách, nebo v ulicích měst, kde se skupinky nadšenců do BMX sportu předhánějí, kdo zvládne těžší trik. Parametry BMX kol jsou od běžných jízdních kol odlišné hlavně malými rozměry. Rám má většinou kolem 9 palců a velikost kol je běžně 20 palců. Vhodné jsou tak pro jezdce od 120 do 175 cm. Rám kola musí být velice lehký, ale přitom pevný a odolný. Problém s pevnými materiály je ten, že bývají často křehké, takže jde o kompromis v podobě odlehčeného ocelového rámu. Běžná cena těchto kol se pohybuje od 4 do 20 tisíc korun. (Obrázek 14)



Obrázek 14: BMX [13]

#### Single speed

Jak už název naznačuje, jedná se o jízdní kolo, které má pouze jeden stálý převod, který nelze měnit. Myšlenka vytvořit Single Speed vznikla v USA, kdy bylo zapotřebí urychlit jízdu kurýrů na rovných bulvárech. Kolo tak pozbývá všech nadbytečných doplňků a nenajdeme na něm prakticky žádné prvky výbavy, které nejsou vyloženě spjaté se samotným mechanismem umožňujícím pohyb. Rám je ve většině případů ocelový a na první pohled působí kolo minimalisticky. Využití najde ve městech, kde je potřeba rychlých přesunů při minimu vynaložené energie. Výhodou těchto kol je zajištění i jejich malá poruchovost a nízké nároky na údržbu, jelikož je k pohonu využito základního mechanismu bez převodníku a přehazovačky.



Cenově se tento stylový dopravní prostředek pohybuje v rozmezí od 8 do 20 tisíc korun. (Obrázek 15)



Obrázek 15: Single Speed [14]

### **Silniční kolo**

Silniční kola vynikají především velmi nízkou hmotností a úzkými galuskami. Jsou ideální variantou pro vyznavače silniční cykloturistiky nebo závodů. Díky nízkému valivému a aerodynamickému odporu umožňují dosáhnout vysokých rychlostí. Jedno z nejlehčích kol této kategorie (Merida Scultura Superlite LTD) váží pouhých 4,5 kg, kdy rám tohoto modelu, který je tvořený z vysoce kvalitních karbonových vláken, má hmotnost pouze 680 gramů. Za špičkovou technologii se ale musí připlatit, takže podobná kola mají cenu přes 300 tisíc korun. Silniční kola však nejsou tolik pohodlná, proto se na běžnou jízdu příliš nehodí a jsou určena ryze pro závody, rychlostní cyklistiku a nadšence do silniční cykloturistiky. (Obrázek 16) [15]



Obrázek 16: Silniční kolo [16]

### **Fitness kolo**

Velice podobná konstrukce jako u silničního kola. Pláště kol jsou o něco širší, kolo disponuje více převody a pohodlnější jízda je zajištěna také klasickými řídítky. Dá se stále dosahovat vysokých rychlostí, ale kolo není určeno k závodům a spíše nabízí komfortnější svezení. Cena těchto kol činí v základu kolem 20 tisíc korun. (Obrázek 17)



Obrázek 17: Fitness kolo [17]

### Horské kolo

Oblíbený druh jízdního kola pro svou všestrannost použití. Primárně jsou horská kola určena do terénu, kde nemají problém s překonáním překážek v podobě kamenů, větví, bláta a dalších nástrah, se kterými by si například silniční kolo neporadilo. Zde se již tolik nehledí na váhu kola, ale spíše se klade důraz na robustnost konstrukce, technologické vymoženosti do terénu a komfort jízdy, jelikož zdolání lesních cest a náročných terénních tras není pro nadšence do horské cykloturistiky tolik o rychlosti, jako hlavně o požitku z jízdy a celkového spojení s přírodou. V nabídce se dají najít i supermoderní kola s karbonovým rámem, ale ty pak vyžadují větší opatrnost při jízdě než v případě hliníkových, či ocelových rámu. Karbonové konstrukce jsou velice lehké, pevné, ale pokud nastane silový ráz, který nepůsobí ve směru vláken materiálu, může snadno nastat lom.

Samostatnou kapitolou v tomto segmentu je odpružení. Historicky se na trhu jako první objevila kola s odpruženou přední vidlicí a potom také celoodpružená kola. Jízdní kolo tak umožňuje různé druhy nastavení tvrdosti, zdvihu, nebo celkové uzamčení odpružení, kdy se kolo chová jako model s pevnou konstrukcí, což se hodí hlavně na rovných površích, zejména pak při jízdě po silnici. Cena kvalitnějších horských kol se pohybuje kolem 20 tisíc korun, ale pokud jezdec vyžaduje moderní a kvalitní prvky výbavy, rázem se ocitá na částkách kolem 100 tisíc korun a více. (Obrázek 18)



Obrázek 18: Horské kolo [18]

### 3.1.3 Bezpečnost

Drtivá většina fatálních nehod, při které zemře cyklista v důsledku poranění hlavy, zahrnuje fakt, že cyklista na hlavě neměl cyklistickou helmu. Je to celkem 97 % případů. Z tvrzení odborníků potom často vyplývá, že pokud by cyklista helmu měl, zranění by nebyla tak vážná a v ojedinělých případech by dokonce byl schopný vstát a odejít po svých.

Vhodná by byla i úprava zákona, který nařizuje použít ochrannou přilbu pouze cyklistům, kteří jsou mladší 18 let.

Přesné znění zákona zde:

#### § 58

Cyklista mladší 18 let je povinen za jízdy použít ochrannou přilbu schváleného typu podle zvláštního právního předpisu a mít ji nasazenou a řádně připevněnou na hlavě. [19]

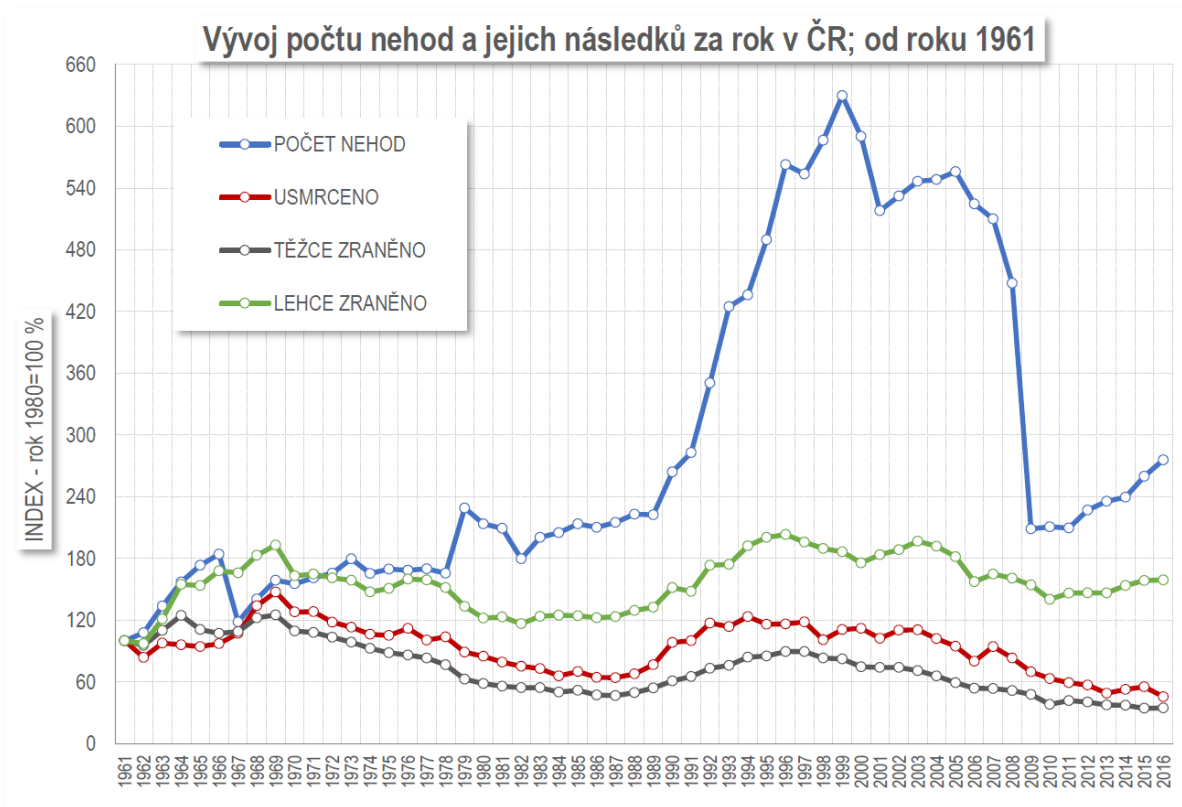
### 3.1.4 Informace o nehodovosti

V roce 2016 Policie České republiky šetřila 98 864 dopravních nehod. Při těchto nehodách bylo 545 osob usmrceno, 2 580 osob zraněno těžce a 24 501 osob zraněno lehce. Celková hmotná škoda odhadnutá policisty na místě dopravní nehody dosáhla 5 804 milionů Kč. [20]

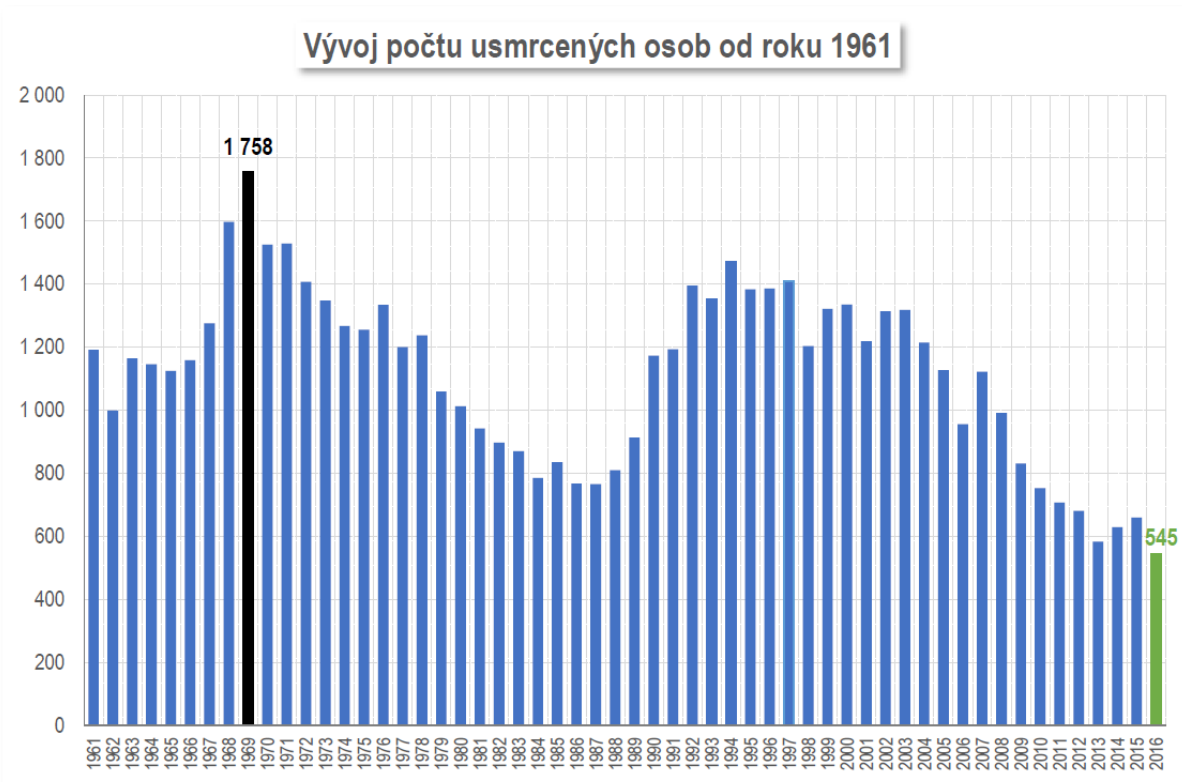
Následující tabulka obsahuje počty dopravních nehod a jejich následků za uplynulých 10 let.

Tabulka 1: Srovnání nehod z hlediska jednotlivých let [20]

Počet nehod a následků, ČR, 2007 - 2016	počet nehod	z toho s následky na životě a zdraví	usmrceno	těžce zraněno osob	lehce zraněno osob
2007	182 736	23 060	1 123	3 960	25 382
2008	160 376	22 481	992	3 809	24 776
2009	74 815	21 706	832	3 536	23 777
2010	75 522	19 676	753	2 823	21 610
2011	75 137	20 487	707	3 092	22 519
2012	81 404	20 504	681	2 986	22 590
2013	84 398	20 342	583	2 782	22 577
2014	85 859	21 054	629	2 762	23 655
2015	93 067	21 561	660	2 540	24 426
2016	98 864	21 386	545	2 580	24 501



Graf 2: Vývoj počtu nehod a jejich následků [20]



Graf 3: Vývoj počtu usmrcených osob [20]

## Osoby usmrcené při dopravních nehodách

V roce 2016 bylo při dopravních nehodách na pozemních komunikacích usmrceno 209 řidičů osobních automobilů, 111 chodců, 91 spolujezdců v osobním vozidle, 59 řidičů motocyklů a 39 cyklistů. Nejvýraznější meziroční pokles počtu usmrcených bylo zaznamenáno u cyklistů (o 29 usmrcených osob) a řidičů motocyklu (o 22 usmrcených). Za povšimnutí však stojí také pokles počtu usmrcených chodců oproti minulému roku (o 20 usmrcených osob). Meziročně se nejvíce zvýšil počet řidičů nákladního automobilu (o 7 osob) usmrcených při dopravních nehodách. [20]

Následující tabulka znázorňuje počet usmrcených osob v závislosti na kategorii osoby. Třetí sloupec vypovídá o rozdílu oproti roku 2015.

Tabulka 2: Počet usmrcených osob v závislosti na kategorii osoby [20]

počet usmrcených	Kategorie osoby	rozdíl
209	řidič osobního vozidla sólo	-19
111	chodec	-20
91	spolujezdec v osobním vozidle sólo	-6
59	řidič motocyklu	-22
39	cyklista	-29
21	řidič nákladního vozidla sólo	7
6	spolujezdec v nákladním automobilu sólo	1
2	řidič nákladního automobilu s přívěsem	2
2	spolujezdec v nákladním automobilu s přívěsem	2
2	řidič nákladního automobilu s návěsem	-3
1	řidič malého motocyklu	-1
1	spolujezdec v osobním vozidle s přívěsem	-4
1	řidič traktoru	-2
0	řidič mopedu	-3
0	spolujezdec na motocyklu	-4
0	řidič osobního vozidla s přívěsem	-5
0	řidič autobusu	-1
0	řidič jiného motorového vozidla	-3
0	spolujezdec v jiném motorovém vozidle	-1
0	řidič jiného nemotorového vozidla	-1
0	cestující ve vlaku	-3

V tabulce 2 je uvedena pozitivní informace o úbytku usmrcených cyklistů, který se oproti roku 2015 snížil o 29.

Další tabulka 3 rozděluje celkový počet nehod do jednotlivých kategorií z pohledu viny. Pokud se opět zaměříme na cyklisty, tak počet nehod, které cyklisté zavinili, klesl oproti roku 2015 o 37 nehod. Z celkového počtu usmrcených cyklistů (39), jich bylo na vině 23, což je téměř 59 %. [20]

Tabulka 3: Nehody podle druhu vozidla [20]

Nehody podle druhu vozidla	počet nehod	rozdíl nehod	tj. rozdíl nehod v %	usmrceno osob	rozdíl usmrcených	tj. rozdíl usmrcených v %
moped	108	15	16,1	0	0	.
malý motocykl	111	-11	-9,0	2	0	.
motocykl	1 609	-60	-3,6	29	-21	-42,0
osobní automobil bez přívěsu	51 681	2 977	6,1	364	-69	-15,9
osobní automobil s přívěsem	488	50	11,4	5	-5	-50,0
nákladní automobil	7 507	505	7,2	55	6	12,2
nákladní automobil s přívěsem	776	40	5,4	5	2	66,7
nákladní automobil s návěsem	2 894	151	5,5	20	-2	-9,1
autobus	1 161	12	1,0	3	-4	-57,1
traktor	269	12	4,7	2	-5	-71,4
tramvaj	111	12	12,1	0	0	.
trolejbus	54	-2	-3,6	0	0	.
jiné motorové vozidlo	190	37	24,2	2	-3	-60,0
jízdní kolo	2 476	-37	-1,5	23	-9	-28,1
povoz, jízda na koni	5	-5	-50,0	0	0	.
jiné nemotorové vozidlo	27	-2	-6,9	0	0	.
vlak	1	1	.	0	0	.
nezjištěno, řidič ujel	16 127	1 026	6,8	10	-4	-28,6
jiný druh vozidla	11	6	120,0	0	0	.

### 3.1.5 Bezpečnost cyklistů

Jako i v jiných odvětvích, tak i z pohledu cyklistiky lze rozdělit bezpečnost cyklistů na aktivní a pasivní. **Aktivní bezpečnost** zahrnuje vše, co pomáhá předcházet nehodám. **Pasivní bezpečnost** obsahuje prvky, které mírní následky nehod. Jedná se nejen o prvky výbavy, které jsou součástí jízdního kola, ale i o prvky výbavy, které má cyklista při jízdě na sobě. Jelikož cyklista kolem sebe nemá žádnou karoserii, deformační zóny a prostor pro přežití, jako v případě automobilů, musí se na bezpečnost klást zvláště vysoké nároky.

#### Aktivní bezpečnost

Základním předpokladem pro bezpečnou jízdu je seřízení kola podle postavy cyklisty tak, aby mohl používat všechny funkce jízdního kola bez omezení. Po výběru správné velikosti rámu je základním faktorem nastavení výšky sedlové tyče, vzdálenost sedla od hlavového složení spolu s výškou řídítek, popř. jejich sklonem.

Jízdní kolo musí být stabilní, dobře zpracované a perfektně seřízené. Často se stává, že lidé tento fakt podceňují a pokud dojde ke kritické situaci, kde je potřeba aby vše fungovalo, jak

má, nastane komplikace. Předpokladem bezpečné jízdy jsou funkční a správně seřízené brzdy, dobře nastavená geometrie kol a správný tlak v pneumatikách.

### **Pasivní bezpečnost**

Pokud k nehodě dojde, dostávají se ke slovu prvky pasivní bezpečnosti, např.:

#### **1) Přilba**

Nejdůležitější ochranný prvek, který by neměl být podceňován. Existují různé druhy přileb, které jsou určeny pro odlišná odvětví. Nejlepší ochranu poskytují integrální přilby, které mají i chránič brady.

#### **2) Chrániče**

Chrániče kolen, loktů, holeních kostí a páteřové chrániče by měly být nezbytnou součástí výbavy každého horského cyklisty.

#### **3) Airbag**

Poslední dobou se na trhu začínají objevovat systémy airbagů, které jsou určeny pro cyklisty jako náhrada přilby, kterou hodně cyklistů nepoužívá z důvodu omezení. Jedná se o límec, který má cyklista kolem krku. Airbag obsahuje snímač (akcelerometr), který v závislosti na zrychlení a náklonu ovládá funkci „vystřelení airbagu“. Jelikož se jedná o krk a hlavu, je použito helium, jakožto „studený plyn“.

Právě tyto systémy je třeba stále zdokonalovat a získávat maximum dat při různých jízdních situacích, což je i z části tématem této diplomové práce.

## 4 Jízdní charakteristiky cyklisty [21]

### 4.1 Měření akcelerometrem na jízdním kole

Měřením jízdních vlastností můžeme určit dynamické charakteristiky vozidel, které se pak dají dále zpracovávat. Využití těchto dat může sloužit jako podklad pro vývoj nových technologických řešení, bezpečnostních prvků, nebo podle nich můžeme analyzovat průběh dopravní nehody a zkoumat tak všechny průběhy, které danou událost doprovázely. Záznam takových veličin je velice cenný a těžko by se dal nahradit obecnými výpočty.

Je potřeba vybrat způsob měření, snímače, jejich umístění a také vhodné nástroje k pozdějšímu zpracování dat. Ke změření požadovaných veličin byly použity snímače Xsens MTi-G a SBG Systems Ellipse2-N. Jedná se o sdružené snímače pro měření jízdní dynamiky, které obsahují akcelerometr, gyroskop, přijímač GPS signálu a další senzory. Pomocí těchto snímačů je možné sledovat i takové parametry, které jsou např. u dvoustopých vozidel nevypovídající. Snímače a jejich senzory jsou detailněji rozebrány v následujících bodech.

### 4.2 Měření pomocí akcelerometru

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. [7] [5]

Akcelerometry mohou sloužit k určení rychlosti a vzdálenosti. To je možné díky tomu, že integrací zrychlení přes čas dostaneme rychlost objektu (1) a integrací rychlosti přes čas dostaneme vzdálenost (2). Obě rovnice jsou uvedeny níže. Akcelerometry dále mohou také detekovat změny úhlu náklonu měřením zemské gravitace nebo mohou měřit vibrace strojů [7]

$$v_{(t)} = \int_{t_0}^t a(t)dt + C \quad (1)$$

$$s_{(t)} = \int_{t_0}^t v(t)dt + C \quad (2)$$

Určení rychlosti a vzdálenosti přímo z akcelerace skýtá několik komplikací. Obvykle neznáme přesnou prostorovou orientaci snímače a vlastní měření je zatížené šumem. Při stanovení rychlosti se chyba projeví odchylkou, která narůstá 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, které narůstají dokonce kvadraticky s časem. [5]

Měření pomocí akcelerometrů nemůže být použito samostatně a musí být doplněno například o měření pomocí GNSS přijímače. [21]



### 4.3 Využití GNSS pro určení polohy

Podstatným problémem u měření trajektorie pomocí akcelometrů je mj. nastavení přesné prostorové orientace. Sdružené snímače pro měření jízdní dynamiky používají data z GNSS modulu pro korekci orientace a polohy. [22]

#### 4.3.1 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, řídicí a uživatelský segment. [23] [24]

**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  $15^\circ$  a to 24 hodin denně ze kteréhokoliv místa na Zemi. [23] [24]

**Řídicí segment** vytváří a udržuje systémový čas, průběžně monitoruje funkci družic, provádí manévry satelitů (korekce drah satelitů) a koordinuje činnost celého systému. Řídicí segment se skládá z jedné hlavní řídicí stanice a několika monitorovacích stanic, které nepřetržitě přijímají signály ze všech družic. Hlavní řídicí 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. [23] [24]

**Uživatelský segment** zahrnuje pozemní přijímače schopné přijímat a zpracovávat družicové GNSS signály. Pasivní přijímače získávají informace o své poloze a čase tak, že dokáží 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. [23] [24] [25]

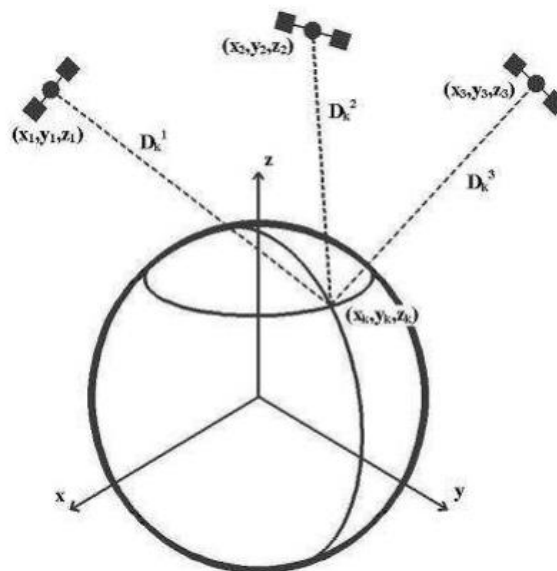
### 4.3.2 Výpočet polohy

Dálkoměrné pasivní systémy dokáží určit polohu přijímače díky známé vzdálenosti od jednotlivých družic. Známe-li souřadnice minimálně tří družic  $(x_i, y_i, z_i, \text{ kde } i = 1, 2, 3)$  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 Obrázek 19. [23]

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

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 nepřímou pomocí kódového měření. [23] [24]



Obrázek 19: Schéma určení polohy ze tří signálů

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. [23] [24]

U kódovaného měření přijímače generují repliku kódu v závislosti na čtení vlastních hodin. Porovnáním repliky a kódu získaného z družice dostanu časový posun  $\tau_{pi}$ , který odpovídá tranzitnímu času mezi družicí a přijímačem. Vynásobením transitního času rychlostí světla získáváme vzdálenost přijímače od družice. [23] [24]

$$D_p^i = c * \tau_{pi} \quad (4)$$

Kde  $c$  je rychlost světla.

Tato vzdálenost, nazývajcí se pseudovzdáleností by ovšem byla zatížena značnou chybou z důvodu desynchronizace časové základny systému GNSS a uživatelem. Tuto chybu přijímače označíme jako  $\delta_p$  a můžeme jí přepočítat na vzdálenost. [23] [24]

$$d = c * \delta_p \quad (5)$$

Pro určení správné polohy musíme přidat do rovnice (3)  $\delta_p$  jako čtvrtou neznámou. Informaci o systémovém čase, a tudíž i o  $\delta_p$ , přijímač dostává z další družice. Pro správný výpočet polohy (6) je tedy nutný příjem signálu minimálně od 4 družic současně. [23] [24]

$$D_c^i = c * \tau_{ci} = c * (\tau_{pi} + \delta_p) = D_p^i + d, i = 1, 2, 3, 4 \quad (6)$$

Kde  $D_c^i$  je pseudovzdálenost mezi satelitem a GNSS přijímačem.

### 4.3.3 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. [24]

U kinematické metody se napřed měří počáteční inicializace a pak přijímač provádí podrobné měření v krátkém časovém kroku. Při výpadu signálu není potřeba nové inicializace, metoda vychází z předpokladu, že ambiguity se určí i za pohybu na základě přesných kódových měření. [23] [24]

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. [23] [24]

Princip spočívá v předpokladu, že chyba naměřená v pseudovzdálenosti je u nepříliš vzdálených přijímačů v okolí retenční 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. [23] [24]

## 4.4 Gyroskopický senzor úhlové rychlosti

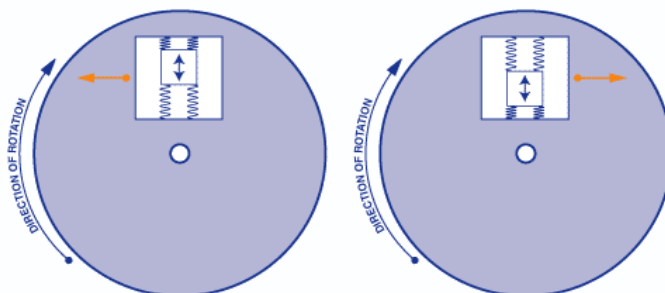
Gyroskop je zařízení sloužící k přímému měření orientace objektu. Obecně gyroskopem nazýváme těleso, které se snaží zachovat svou osu rotace okolo osy kolmé k tomuto tělesu. První mechanické gyroskopy využívaly gyroskopického efektu díky zákonu zachování hybnosti. Po natočení gyroskopu se změní poloha mezi konstantně rotujícím setrvačником a vnějším ramenem o úhel natočení. [26] [27]

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. [26] [27] [28]

MEMS gyroskopy vychází z detekce Coriolisovy síly. Tato setrvačná síla obecně působí na libovolný objekt uvedený do pohybu v rotující soustavě rotující úhlovou rychlostí  $\Omega$ . Coriolisova síla je generována kolmo na spojnici tělesa s osou rotace a její velikost je dána vztahem (7). Princip generování Coriolisovy síly znázorňuje Obrázek 20. [26]

$$\vec{F} = -2 * m * \vec{\Omega} \times \vec{v} \quad (7)$$

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



Obrázek 20: Princip snímače úhlové rychlosti [6]

#### 4.5 Sdružený snímač Xsens MTi-G

Na základě měření v předmětu 22AMM bylo rozhodnuto využít sdružený snímač pro jízdní zkoušky Xsens MTi-G, který je vidět na Obrázek 21.

Snímač se skládá ze 3 hlavních senzorů a dalších pomocných snímačů, které se dají použít ke kontrole kalibrace:

- Třiosý akcelerometr
- Třiosý gyroskop
- GPS
- Teploměr
- Barometr
- Magnetometr

Xsen MTi-G musí být neustále připojen k počítači – notebooku, jelikož do něj v průběhu měření ukládá naměřená data.



Obrázek 21: Sdružený snímač Xsens MTi-G [22]

### 4.5.1 Technické specifikace

Výrobce: Xsens Technologies B. V. (Holandsko)

Rozměry: 58 x 58 x 33 mm

Hmotnost: 68 g

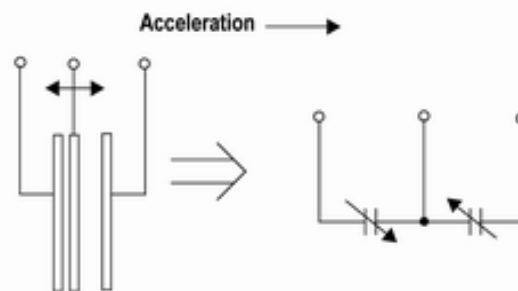
Ideální pracovní teplota: -20 °C až 60 °C

Snímací frekvence: 100 Hz

Hlavní součásti Xsens MTi-G: snímač zrychlení, snímač úhlové rychlosti, GPS anténa

#### Třiosý akcelerometr

Snímač zrychlení ve třech osách pohybu. Rozsah senzoru  $\pm 5$  g. Jednotkou zrychlení je  $[m \cdot s^{-2}]$ . Akcelerometr pro jízdní dynamiku v Xsens MTi-G je vyrobený technologií MEMS a je kapacitní. Jeho struktura a funkce je založena na proměnné kapacitě tříelektrodevého vzduchového kondenzátoru. Využívá se nelineární závislosti kapacity na vzdálenosti elektrod kondenzátoru. Je-li prostřední elektroda v pohybu vlivem zrychlení, viz Obrázek 22, vznikne změna ve vzdálenosti elektrody od kondenzátoru. Změna kapacity kondenzátoru se přepočítá na velikost zrychlení. [6] [22]



Obrázek 22: Princip kapacitního akcelerometru [6]

#### Gyroskop

Snímač úhlové rychlosti ve třech osách. Rozsah senzoru  $\pm 300$  °/s. Jednotkou úhlové rychlosti je  $[rad/s^2, °/s^2]$ . 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. [6]

#### Přijímač GPS signálu

Jde o 50 kanálový GPS přijímač, pomocí kterého se získává aktuální poloha a rychlost vozidla. Anténa GPS je součástí balení, viz Obrázek 23 a k zařízení se připojuje externě. Výstupy z GPS přijímače slouží ke korekci inerciálních výstupů z měření akcelerometru a gyroskopu pomocí Kálmánova filtru. Poloha přijímače se zjišťuje na základě zpoždění

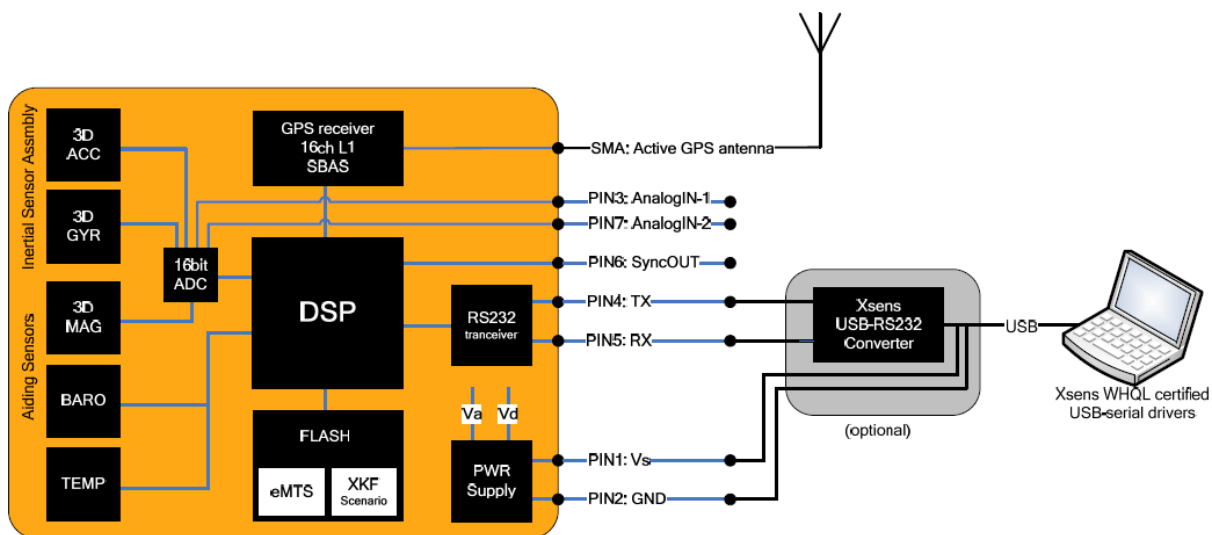
signálu, které vydávají satelity GPS na oběžné dráze. Rychlost z GPS je získaná pomocí Dopplerova jevu, kde se sleduje změna ve frekvenci nosné vlny, která putuje mezi přijímačem a satelitem. Poloha satelitu i přijímače je známá, a proto se může vypočítat absolutní rychlost přijímače. [6] [22]



Obrázek 23: Sdružený snímač Xsens MTi-G a anténa GPS signálu [22]

Další přídavné senzory tvoří snímač magnetického pole, rozsah senzoru  $\pm 750$  mGauss, snímač teploty, rozsah:  $- 55$  °C až  $+ 125$  °C a tlakový snímač, tzv. barometr s rozsahem: 30 až  $120 \cdot 10^3$  Pa. [6] [22]

Architekturu zapojení jednotlivých senzorů pak ukazuje Obrázek 24. Kde DSP je mikroprocesor, SBAS je zkratka Satellite Based Augmentation System, XKF je Kálmánův filtr a ADC převodník analog–digital.



Obrázek 24: Architektura snímače MTi-G [22]

#### 4.5.2 Kálmánův filtr

Stanovení polohy vozidla přímo z akcelerace je velmi 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 Kálmánova filtru. Ten je v zařízení přednastavený a jeho specifikace je 6DOF GPS (XKF-6G). [22]

Obecně se jedná o rekurzivní filtr, který pracuje ve dvou krocích. Prvním krokem je predikce v čase a druhým korekce v čase. Kálmánův filtr pracuje se stavovými veličinami. Pro ně platí, že v každém časovém okamžiku  $t$  v sobě zahrnují veškerou informaci ze svého minulého vývoje. [29] [30]

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

$$x_t = Mx_{t-1} + Nu_t + w_t \quad (17)$$

$$y_t = Ax_t + Bu_t + v_t \quad (18)$$

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). [29]

#### **Predikce:**

$$x_t = Mx_{t-1} + Nu_t \quad (19)$$

$$R_x = R_w + MR_xM' \quad (20)$$

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. Kálmánův gain. (24), (25). Zesílení udává, kolik procent z vypočítané predikce se použije na úpravu stavu. Kálmánův gain musí mít hodnotu menší než 1. Použití 100 % korekce by znamenalo, že filtr není aktivní. [29] [30]

#### **Korekce:**

$$y_p = Ax_{t-1} + Bu_t \quad (21)$$

$$R_y = R_v + AR_xA' \quad (22)$$

$$R_x = R_x - R_xA'R_y^{-1}AR_x \quad (23)$$

$$K_g = R_xA'R_y^{-1} \quad (24)$$

$$x_t = x_t + K_g(y_t - y_p) \quad (25)$$

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

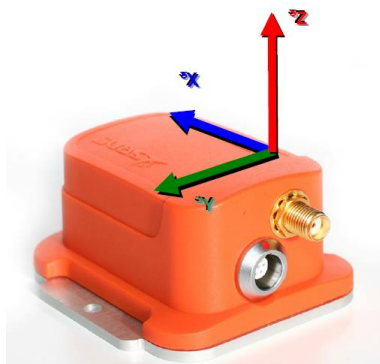
V praxi je v kroku predikce minimalizována chyba z akcelerometru za použití údajů o poloze z GPS přijímače a dat z barometru.

### 4.5.3 Výstupy senzoru

Snímač vyhodnocuje prostřednictvím tří různých módů, kdy každý z nich měří v odlišném souřadném systému, avšak kombinací těchto dat musíme získat ucelenou informaci o poloze, orientaci a kalibrovaných datech snímačů. Vše je zpracováno s jednotnou časovou stopou podle našich zvolených požadavků.

#### Definice souřadných systémů

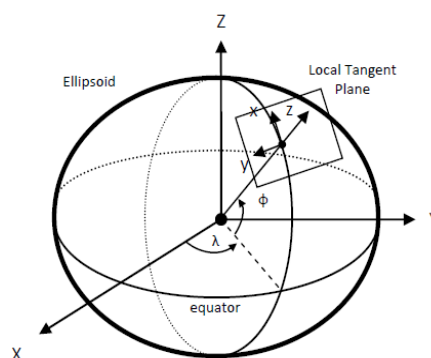
Lokální systém snímače  $S_{x,y,z}$  je pravouhlý souřadný systém samotného senzoru vyznačený na Obrázek 25. Tento systém využívají kalibrovaná data (3D akcelerace; 3D úhlová rychlost; 3D magnetické pole) a odpovídá defaultně NWU (North-West-Up) konvenci. [22]



Obrázek 25: Lokální souřadný systém MTi-G. [22]

Zeměpisné sférické souřadnice MTi-G používá k jednoznačnému určení pozice snímače kdekoli na Zemi. Jsou vyjádřeny třemi souřadnicemi Longitude, Latitude a Altitude (LLA) v souladu s WGS84. [22]

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 Obrázek 26.



Obrázek 26: Schéma LLA a LTP souřadných systémů. [22]



#### 4.5.4 Orientace snímače

Snímač dokáže stanovit svoji 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). Reprezentují rotaci okolo jednotkového vektoru  $n$  o úhel  $\alpha$  (27). [22]

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

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

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. [22]

- rotace kolem těžištní osy x – úhel klopení  $\phi$  – hodnoty [-180°; 180°]
- rotace kolem těžištní osy y – úhel klonění  $\Theta$  – hodnoty [-90°; 90°]
- rotace kolem těžištní osy z – úhel stáčení  $\psi$  – hodnoty [-180°; 180°]

Jednotlivé úhly můžeme spočítat z Eulerových parametrů podle těchto vztahů:

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

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

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

Matice rotací neboli řídicí 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). [22]

$$R_{GS} = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2q_1q_2 - 2q_0q_3 & 2q_0q_2 + 2q_1q_3 \\ 2q_0q_3 + 2q_1q_2 & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2q_2q_3 - 2q_0q_1 \\ 2q_1q_3 - 2q_0q_2 & 2q_2q_3 + 2q_0q_1 & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (31)$$

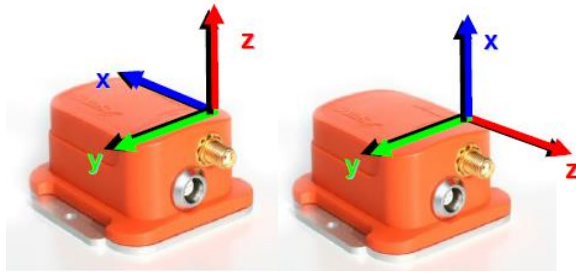
$$R_{GS} = R_{\psi}^Z R_{\Theta}^Y R_{\phi}^X = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \Theta & 0 & \sin \Theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \Theta & 0 & \cos \Theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (32)$$

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

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

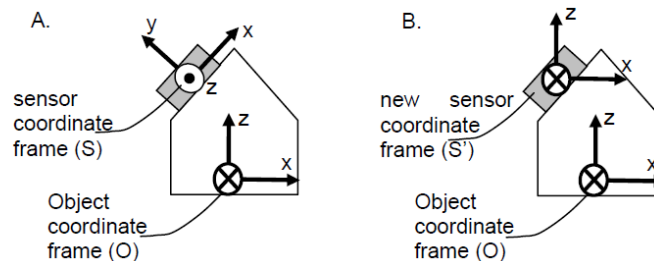
V některých situacích může nastat, že osy snímače přesně neodpovídají osám objektu, který chceme měřit. Proto existují dva způsoby, jak softwarově na výstupu zkoordinovat oba souřadné systémy. Prvním je ruční zadání matice natočení. Pokud je známa poloha snímače, můžeme libovolně pozměnit souřadný systém snímače jako například v rovnici (33). [22]

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



Obrázek 27: Zadání matice natočení. [22]

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. To znamená, že funkce nastaví lokální systém snímače tak, aby výchozí naklonění bylo nulové. [6] [22]



Obrázek 28: Princip funkce Object Reset. [22]

#### 4.6 SBG Systems – Ellipse2-N: Miniaturní INS/GPS

Dalším použitým snímačem byl SBG Ellipse2-N. Tento vysoce výkonný inerciální navigační systém (INS) s integrovaným přijímačem GNSS (Obrázek 29) snímá natočení, nadmořskou výšku, směr a navigační data. Systém, který je založený na MEMS technologii inerciální měřicí jednotky (IMU) a obsahuje tříosý gyroskop, akcelerometr a magnetometr. Využívá Kálmánův filtr, který spojuje inerciální data s GNSS, odometrem a DGPS informacemi pro perfektní orientaci a navigační data při měření v extrémních podmínkách. Snímací frekvence v případě SBG je 200 Hz. [31]



Obrázek 29: SBG Systems - Ellipse2-N [32]

## 5 Měření v rámci předmětu 22AMM

V rámci odborného předmětu „Aplikované měřicí metody v dopravě“, který proběhl jako samostatný intenzivní blok ve dnech 27. 5. – 30. 5. 2016 v Děčíně, jsme se jednou z úloh zabývali měřením s akcelerometry. Níže je výsledný protokol z tohoto měření.

### 5.1 Protokol

Měřicí skupina: Skupina 4 - Michal Šlapák, Jan Smeták, Lukáš Jáneš

Datum: 28. 5. 2016

Čas: 15:30 - 18:30

Místo měření: Děčín, Park na Mariánské louce

Podmínky: Slunečno, teplota 25 °C

### Úloha číslo: 2 – Akcelerometry-kolo

#### Zadání

- Provést tři jízdy na kole s měřením akcelerometry
- Zpracovat data v programu Diadem
- Vykreslit zpracovaná data v grafech

#### Použité přístroje

- Jízdní kolo
- Zařízení NTI-G

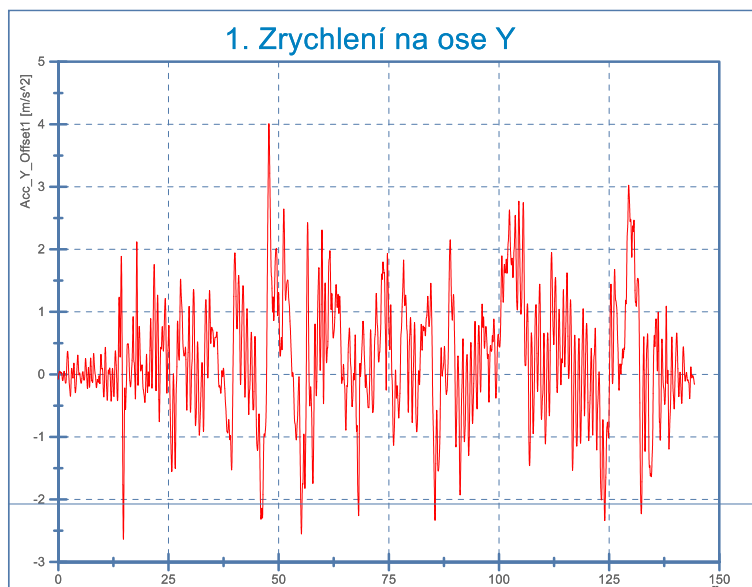
#### Zpracování úlohy

Každý provedl jednu měřicí jízdu na jízdním kole s akcelerometry, gyroskopem a GPS. Poté jsme vyhodnocovali všechna naměřená data v programu Diadem. Nejdříve jsme provedli vyhodnocení dat vypovídající o akceleraci. Zjistili jsme zrychlení v ose x a y. Dále jsme vyhodnocovali naměřené rychlosti z GPS. Jako pomocné vyhodnocení byla využita Fourierova transformace a integrace. Nakonec jsme vyhodnotili průběh trasy a vykreslili ho v programu Google Earth. Všechna zpracovaná data jsme vykreslili do grafů.

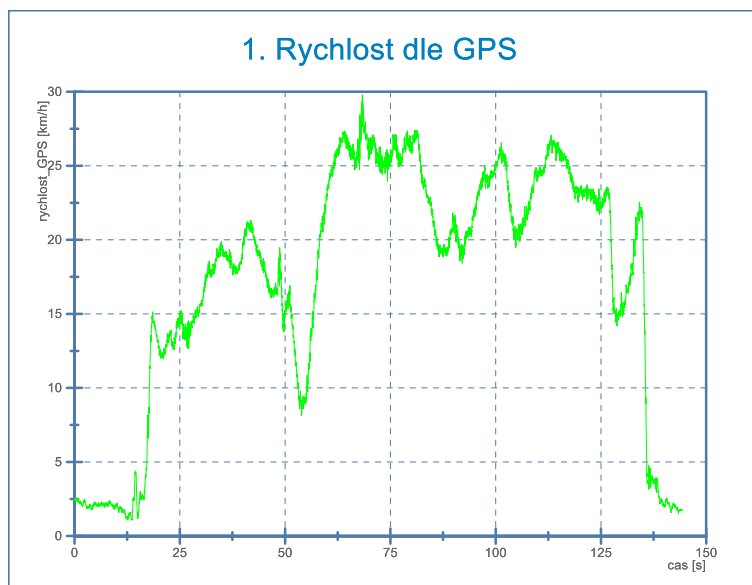
## První jízda



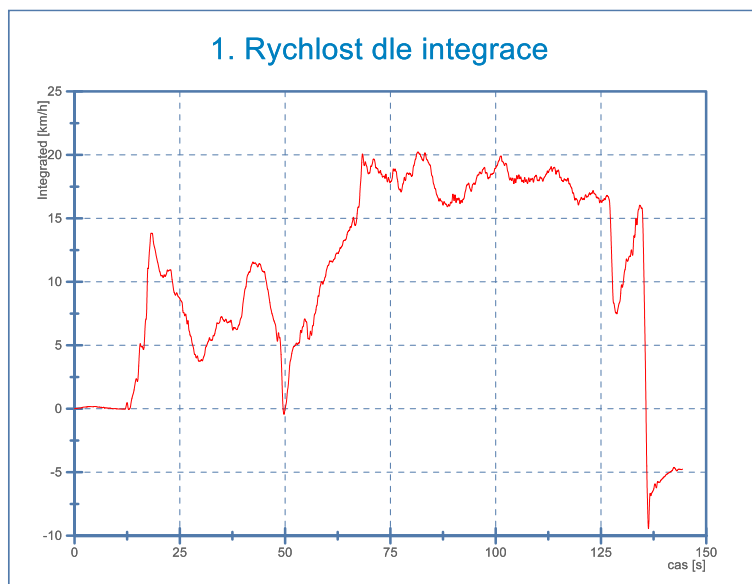
Graf 4: První jízda-Zrychlení na ose X



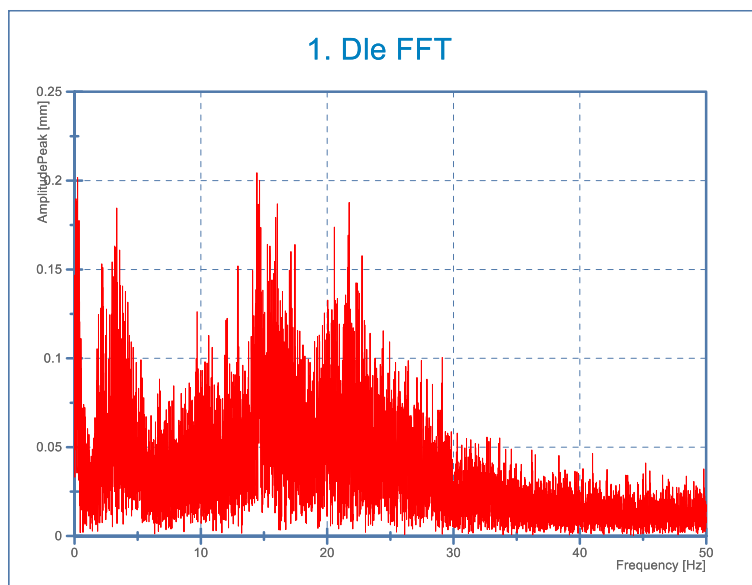
Graf 5: První jízda-Zrychlení na ose Y



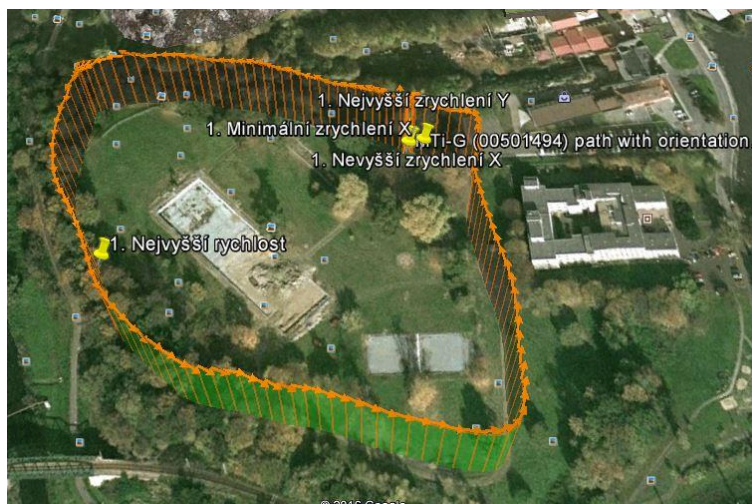
*Graf 6: První jízda-Rychlost dle GPS*



*Graf 7: První jízda-Rychlost dle integrace*



Graf 8: První jízda-Záznam trasy dle Fourierovy transformace

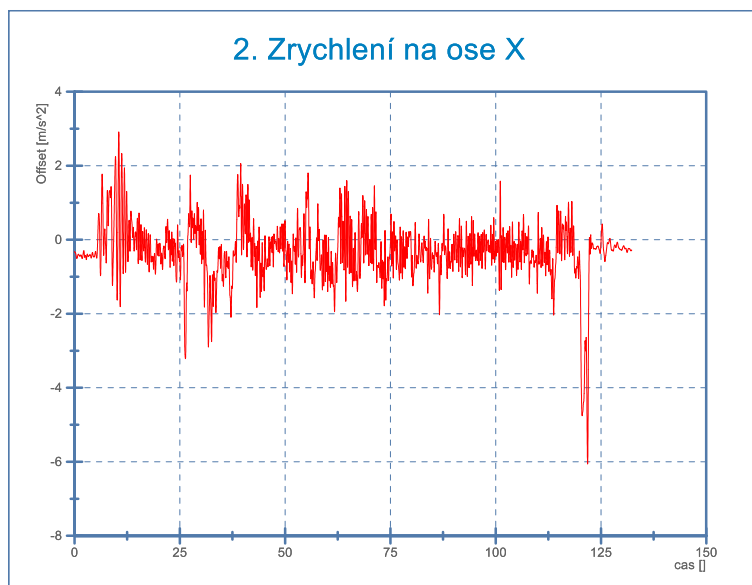


Obrázek 30: První jízda-Zobrazení trasy programem Google Earth

Tabulka 4: Souhrn naměřených hodnot-První jízda

První jízda	Hodnota
nejvyšší zrychlení X ( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-2}$ )	4,54
nejvyšší zpomalení X ( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-2}$ )	-7,28
nejvyšší zrychlení Y ( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-2}$ )	4,01
nejvyšší rychlost ( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ )	29,78

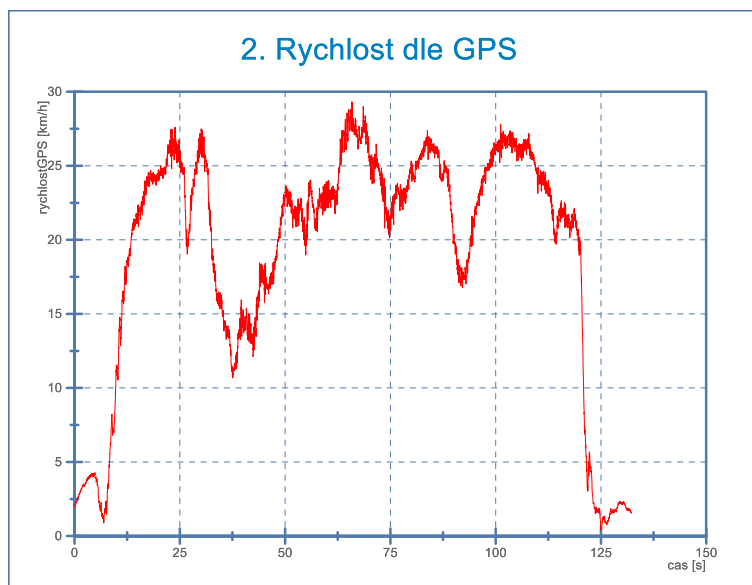
## Druhá jízda



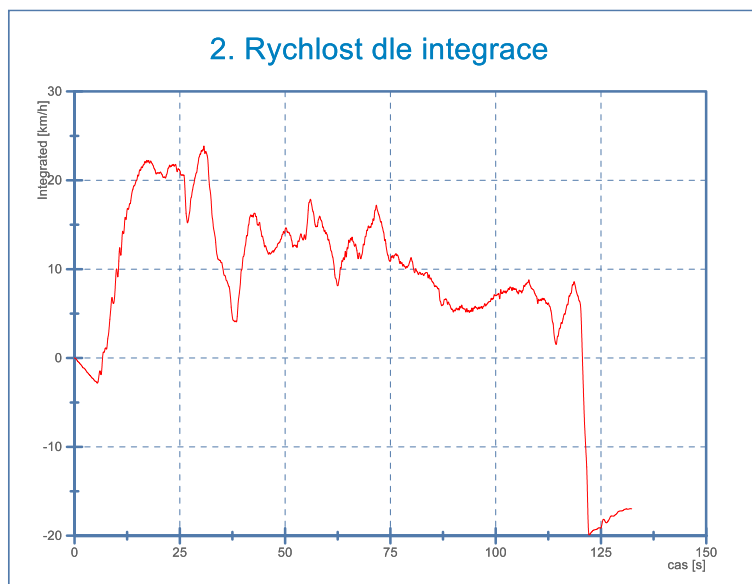
Graf 9: Druhá jízda-Zrychlení na ose X



Graf 10: Druhá jízda-Zrychlení na ose Y

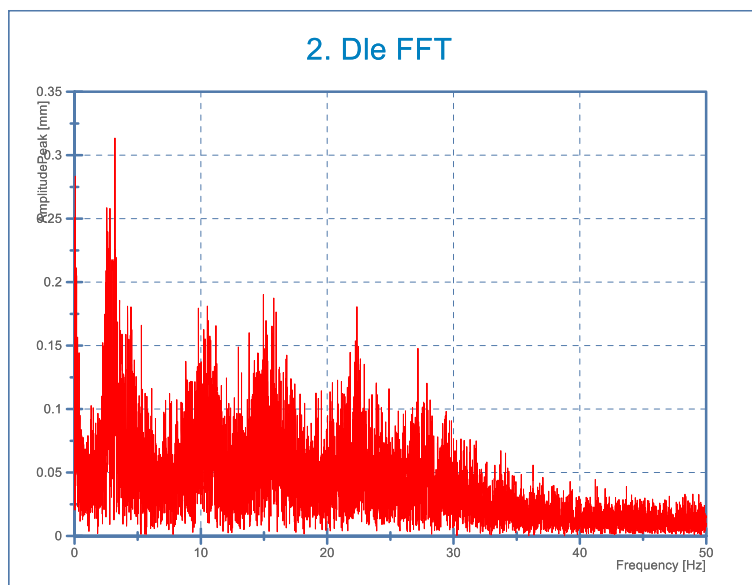


*Graf 11: Druhá jízda-Rychlost dle GPS*

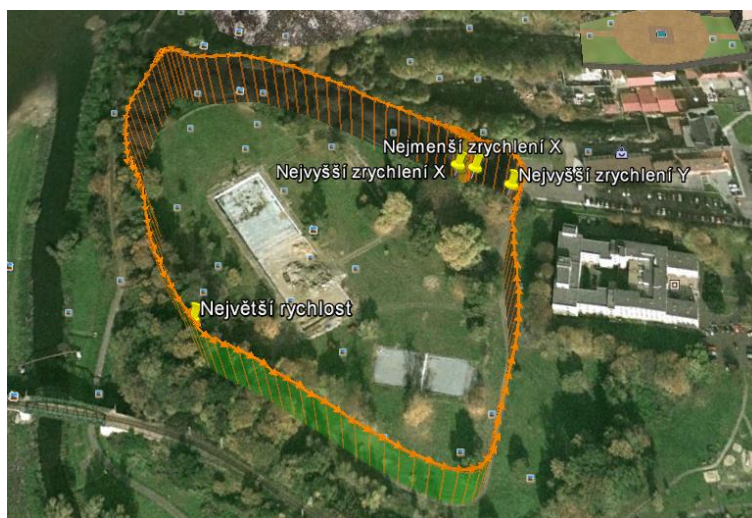


*Graf 12: Druhá jízda-Rychlost dle integrace*





Graf 13: Druhá jízda-Záznam trasy dle Fourierovy transformace

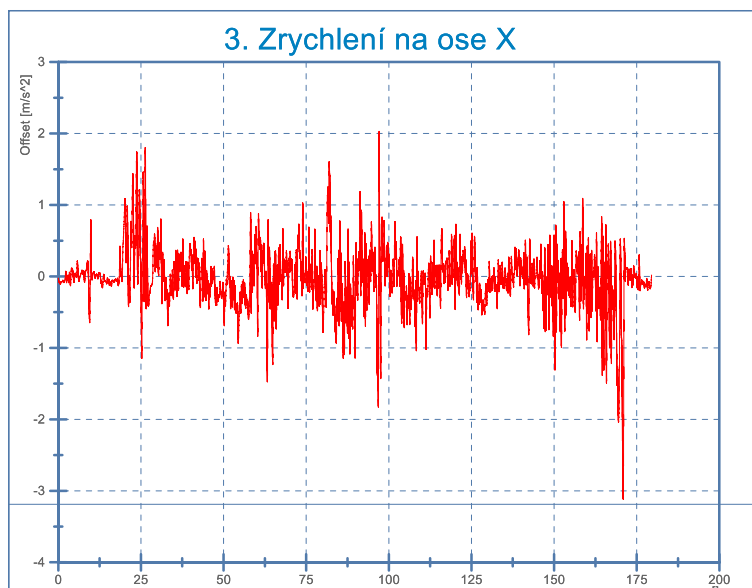


Obrázek 31: Druhá jízda-Zobrazení trasy programem Google Earth

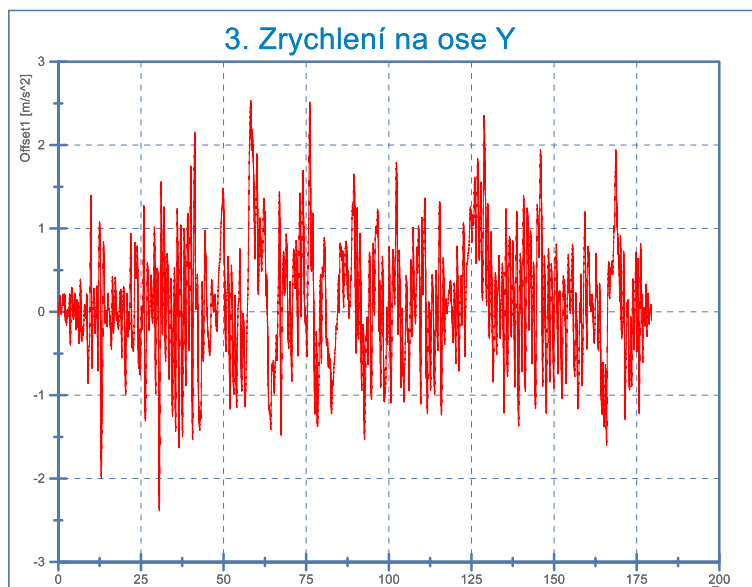
Tabulka 5: Souhrn naměřených hodnot-Druhá jízda

Druhá jízda	Hodnota
nejvyšší zrychlení X ( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-2}$ )	2,91
nejvyšší zpomalení X ( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-2}$ )	-6,05
nejvyšší zrychlení Y ( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-2}$ )	3,42
nejvyšší rychlost ( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ )	29,33

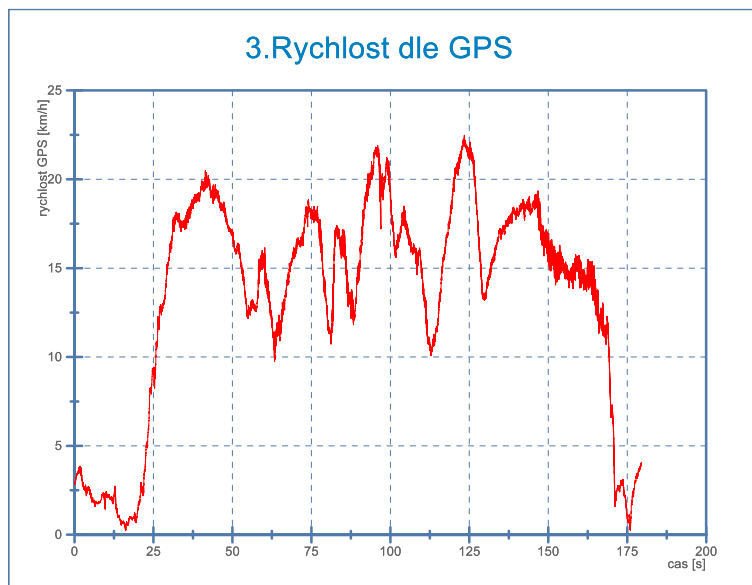
## Třetí jízda



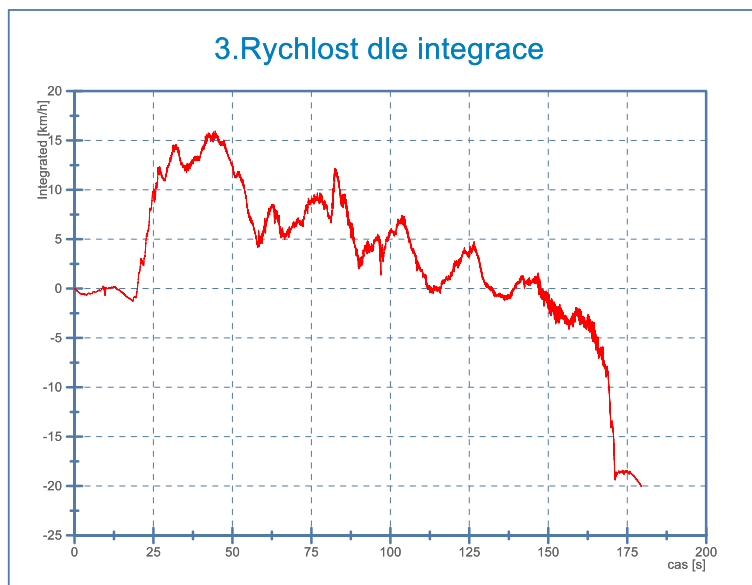
Graf 14: Třetí jízda-Zrychlení na ose X



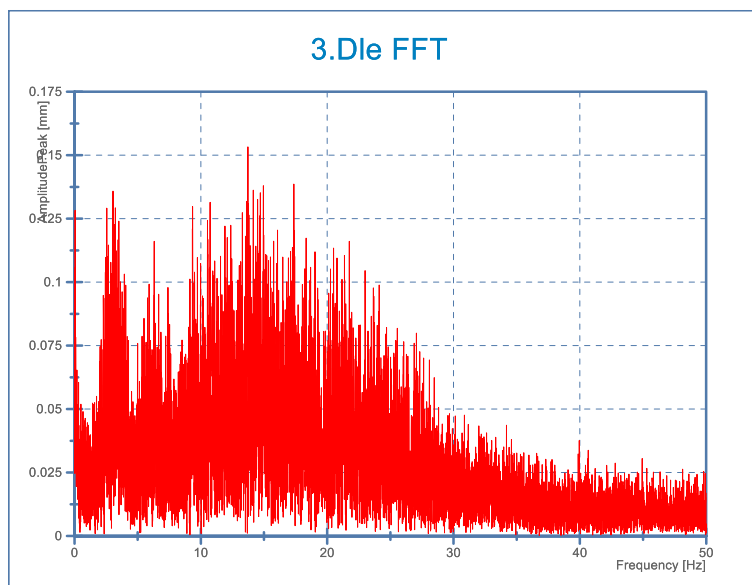
Graf 15: Třetí jízda-Zrychlení na ose Y



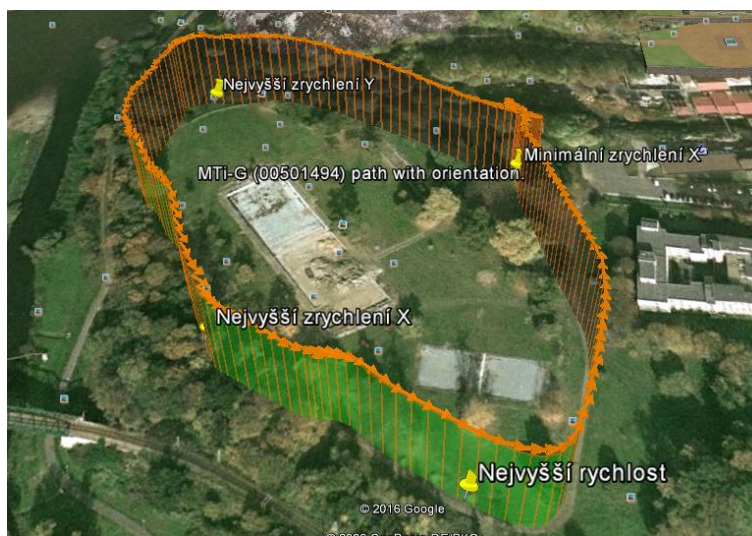
*Graf 16: Třetí jízda-Rychlost dle GPS*



*Graf 17: Třetí jízda-Rychlost dle integrace*



Graf 18: Třetí jízda-Záznam trasy dle Fourierovy transformace



Obrázek 32: Třetí jízda-Zobrazení trasy programem Google Earth

Tabulka 6: Souhrn naměřených hodnot-Třetí jízda

Třetí jízda	Hodnota
nejvyšší zrychlení X ( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-2}$ )	2,03
nejvyšší zpomalení X ( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-2}$ )	-3,12
nejvyšší zrychlení Y ( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-2}$ )	2,54
nejvyšší rychlost ( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ )	22,48

## Fotodokumentace



Obrázek 33: Jízdní kolo, které bylo použito na měření



Obrázek 34: Detail upevnění akcelerometru

## Závěr

Vyhodnotili jsme měření jízdy na kole. Zpracovaná data byla rychlost, polohy a největší zrychlení v osách x a y. Zjistili jsme, že jízdy všech tří měřitelů byly poměrně vyrovnané. Nejvyšší naměřená rychlost dle GPS byla 29,8 km/h, a nejvyšší akcelerace v ose x byla  $4,5 \text{ m/s}^{-2}$  a v ose y byla  $4,1 \text{ m/s}^{-2}$ . Úlohu hodnotíme jako úspěšnou.

## **6 Měření dynamiky jízdy sjezdového kola**

V návaznosti na měření v předmětu 22AMM jsem se rozhodl uskutečnit experiment, který spočívá v analýze jízdnicích charakteristik cyklisty v extrémních podmínkách terénního sjezdu a následného porovnání s běžnou jízdou a výsledky, které byly historicky naměřeny na stejných zařízeních.

Bylo důležité vybrat vhodný termín, místo a také vhodného jezdce. Jako první přicházel v úvahu profesionální jezdec a trať v okolí Litoměřic. Prvotní plán ale nebylo možné z časových důvodů jezdce přizpůsobit termínu měření, a tak se přistoupilo k druhé variantě. Ta se nakonec projevila jako vhodnější z pohledu organizace, spolupráce i použité techniky.

Cílem tohoto měření je prokázat několikanásobně větší hodnoty zrychlení ve všech třech osách měření a vytvořit tak představu silové náročnosti a s tím spojené nároky, které jsou na jezdce kladeny.

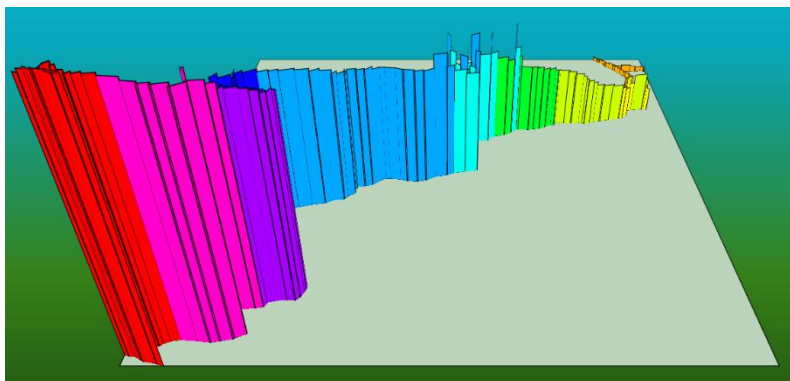
Předpoklad je takový, že získaná data bude možné použít nejen ke srovnání extrémních hodnot sjezdu s hodnotami běžné jízdy, ale i přispět těmito daty k vývoji nových bezpečnostních systému pro rekreační i profesionální cyklisty, nebo upravit trénink profesionálů pro potřebu ustát náročná přetížení.

### **6.1 Lokalita**

Jak již bylo uvedeno výše, z původního plánu se ustoupilo a měření bylo naplánováno na 4. květen 2017 ve městě Děčín, přesněji na Děčínském Sněžníku. Jeho vrchol se nachází 723 m n. m., kde je postavena rozhledna. Hora disponuje množstvím turistických tratí, kdy některé z nich byly přepracovány po vzoru single-trackových tratí, které jsou určeny právě cyklistům. Všechny úpravy turistických tras jsou v naprostém souladu s ekologií. Bylo vyzpozorováno, že pokud se některá z tratí přestane používat a opravovat, do 3 let naprosto splyne s přírodou. Z důvodu přepravy techniky a vybavení na místo startu bylo nutné zajistit povolení k vjezdu, které vydávají Lesy ČR s. p. Cíl sjezdu byl zvolen v ulici Nálepkovala, která je první ulicí po výjezdu z lesa a leží v nadmořské výšce 220 m n. m.

## 6.2 Trasa

Začátek trasy je několik metrů od rozhledny na vrcholu Děčínského Sněžníku. Délka sjezdu je zhruba 4,5 km a jezdec čeká sjezd o celkovém klesání 503 výškových metrů. O profilu trasy vypoovídá Obrázek 35.



Obrázek 35: 3D zobrazení profilu trati

## 6.3 Podmínky

Přednostně, z pohledu měřících zařízení, je pro měření optimální teplota okolo 20 °C, vlhkost zhruba 45 % a jasná obloha, která nikterak nebrání prostupu signálu GPS. Podobná situace je z pohledu aktérů měření. Na rozdíl od měřící techniky, se však jezdec a celý tým měřičů dokáže počasí do jisté míry přizpůsobit. Ačkoliv byl termín naplánovaný tak, aby bylo co nejlepší počasí a celý týden vycházel podle plánu, v den měření se obloha zatáhla a objevil se i déšť. Po příjezdu na parkoviště pod Sněžníkem, kde bylo nutné vše připravit, byla teplota 3 °C, vlhkost atakující hranici 100 % a viditelnost cca 20 metrů. Podle slov jezdce je sjezd v takovýchto podmínkách riskantní a nejde trasu projet zcela naplno. Velkou roli hraje podmáčený terén, kluzké kameny a kořeny stromů, v kombinaci se špatnou viditelností. V některých místech je totiž dosaženo rychlosti blížící se 50 km/h, a tak je nutné včas reagovat na překážky, které se při jízdě v lese mohou nečekaně objevit.

## 6.4 Jezdec

**Jméno a příjmení:** Ondřej Smíšek

**Věk:** 38 let

**Výška:** 175 cm

**Váha:** 68 kg

**Kategorie:** Hobby

**Účast v soutěžích:** 3 ročníky enduroserie.cz,  
celkové 2. místo (rok 2016), maratony, orientační závody, XC



Obrázek 36: Foto ze závodu

## 6.5 Jízdní kolo

**Název:** GT 2015 FORCE X CARBON PRO (Obrázek 37)

**Rám:** Karbonový s technologií Force Optimized Construction se 150 mm zdvihu pro 27,5" kola

**Technologie pružení:** Angle Optimized s pevnou Maxle osou 12x142 mm

**Tlumič:** Fox Float X CTD Boost Valve s úpravou Kashima

**Vidlice:** RockShox Pike RCT3 se 160 mm zdvihu, zamykáním a kónickým sloupkem řízení

**Brzdy:** Shimano XT se 180 mm kotouči Center Lock IceTech



Obrázek 37: GT 2015 FORCE X CARBON PRO

### **Dodatečné úpravy z důvodu odlehčení na závody a pro celkově lepší vlastnosti:**

- Karbonová řídítka Renthal, šířka 74 cm
- Karbonové kliky SRAM X0, převodník 32 zubů
- Pedály XPEDO
- Přední plášť Maxxis Shorty, kombinace 3 směsí, dodatečná vrstva butylové gumy (lepší adheze pneumatik, zvýšení odolnosti proti proražení)
- obě kola bezdušová

**Cena v základní výbavě:** 159 999 Kč

**Cena po úpravách:** cca 180 000 Kč



## 6.6 Spojení kola s akcelerometrem

Oproti měření v předmětu 22AMM, které probíhalo na klasickém horském kole, mělo měření sjezdu výrazná specifika. Jako první bylo nutné vyřešit, kam snímače připevnit a také jakým způsobem. Montáž nosiče nad zadní kolo nepřipadala v úvahu, jelikož se zadní kolo při propružení dosahuje úrovně sedla. Jinam nosič připevnit nelze, tudíž se muselo přistoupit k upevnění snímačů přímo na rám jízdního kola. Toho bylo docíleno kombinací více metod upevnění. Nejprve byla aplikována oboustranná lepicí páska, která nemá vysoký lepicí účinek, ale zajistila ochranu laku karbonového rámu. Na pásku bylo možno lehce uchytit snímače a předběžně tak nastavit jejich polohu (Obrázek 38 a 39). Dále byly snímače zajištěny plastovými stahovacími pásky a celé ustavení polohy bylo zajištěno několika vrstvami silně lepicí černé pásky.



Obrázek 38: Snímač Xsens MTi-G



Obrázek 39: Snímač SBG Systems – Ellipse2-N

Výsledek montáže snímačů je vidět na následujícím Obrázek 40.



Obrázek 40: Uchycení snímačů na rám kola

Z kabelů snímačů byl vytvořen svazek směřující do batohu na jezdcova záda, kde byl umístěn notebook a zdroj napětí. Svazek nesměl zasahovat do prostoru zadního kola, ale současně musel mít dostatečnou rezervu v případě změny jezdcovy polohy (např. při skoku) aby nedošlo k vytržení kabelů z konektorů, což by znamenalo neplatné měření.

## 6.7 Způsob vyhodnocení

Pro velkou náročnost sjezdu byly uskutečněny pouze 2 jízdy, během kterých nebylo možné zkontrolovat průběh měření. Po skončení měření byla všechna data uložena v notebooku, který měl jezdec po dobu měření v batohu na zádech. Byla získána následující data:

### **Snímač SBG Systems – Ellipse2-N**

cesta1.sbg

cesta2.sbg

### **Snímač Xsens MTi-G**

MT\_00501494\_001.mtb

MT\_00501494\_002.mtb

MT01.kmz

MT02.kmz

### **Navigace Garmin**

05-KVĚ-17 071206 -Garmin.gpx

### **Navigace Teasi**

20170504\_112728-TEASI.gpx

### **Mobilní telefon Samsung**

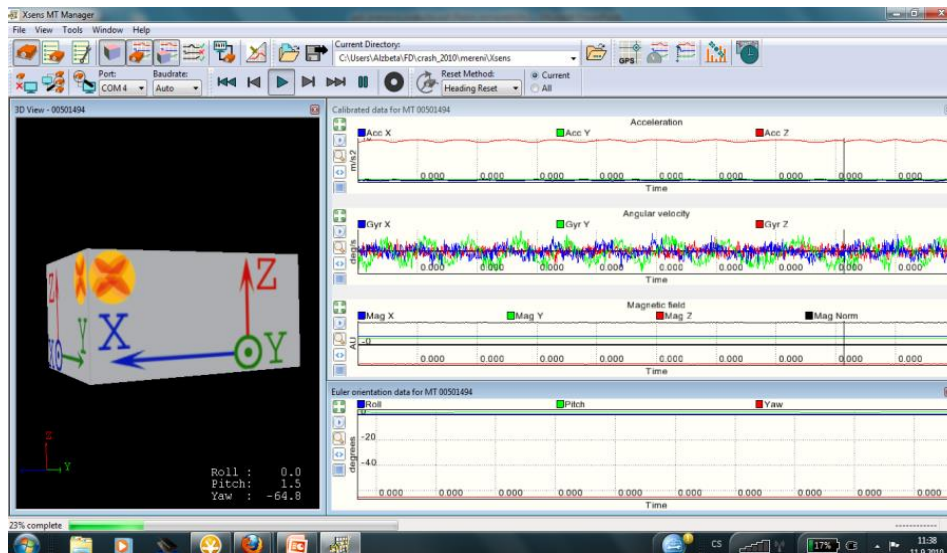
2017-05-04\_11-05-50.gpx

Soubory s příponou \*.sbg a \*.mtb obsahují tyto informace: datum, čas, úhly natočení, rychlost, nadmořskou výšku, zeměpisnou délku a šířku, zrychlení (osy x, y, z), celkovou akceleraci a další veličiny.

Soubory \*.kmz a \*.gpx jsou navigační data pro kontrolu trasy a jejího průběhu. Hlavní rozdíl mezi těmito formáty je ten, že na rozdíl od KMZ je GPX bezztrátový a obsahuje všechna data měření, která se pomocí polohy a času dají vyhodnotit. Formát KMZ je spíše pro vykreslení průběhu trasy, např. v programu Google Earth.

## 6.8 Použité programy, postup a závěr měření

Veškerá data, která proudí ze snímačů, jsou nepřetržitě zaznamenávána a zpracovávána programem MT Manager. Ten nabízí několik scénických režimů (filtrů) pro sběr dat. Ty lze využít v případech, kdy je měření zatíženo šumem a dalšími nespojitými odchylkami. Z předchozích měření vyplynula vhodnost použití scénického režimu „Automotive“.



Obrázek 41: Pracovní prostředí programu MT manager [22]

Soubory ze snímačů bylo nutné převést do textové podoby a pomocí programu PSPad naformátovat text do požadované formy. Formát textu včetně oddělovačů byl důležitý pro následné vložení do programu Excel, kde se s daty dál pracovalo.

Pro daný experiment bylo zapotřebí znát hodnoty zrychlení ve všech osách a také rychlost, která se právě pomocí souřadnic dopočítala. Všechny průběhy bylo potřeba importovat do programu DIAdem, který ze zadaných průběhů zrychlení a času dokáže vykreslit grafy, se kterými lze dále pracovat. DIAdem nabízí několik nástrojů k zobrazení, kontrole, analýze a zpracování naměřených hodnot.

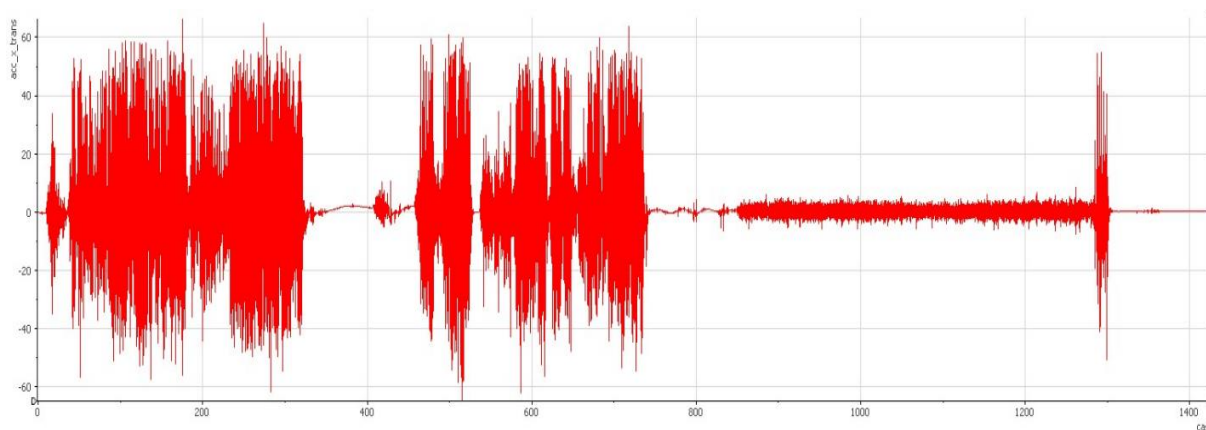
Naměřené hodnoty vykazovaly již podle první kontroly v textovém editoru velké odchylky a nereálné hodnoty, což se potvrdilo i výslednými grafy v programu DIAdem. Celé první měření bylo znehodnoceno špatně načtenou polohou snímačů, což dokázala i výsledná poloha trasy, nacházející se tisíce kilometrů od místa měření. Data z druhé jízdy jsou neúplná a jak už bylo zmíněno-hodnoty jsou nereálné. Správné hodnoty zrychlení byly naměřeny až za cílem trasy při přejezdu na parkoviště, kde se technika odpojila a měření skončilo.

Nesprávnost naměřených hodnot byla zapříčiněna následujícími vlivy:

- Špatný satelitní signál (vlivem lesnatého terénu a špatného počasí byl obtížný příjem signálu z družic a jelikož nebylo z časových důvodů možné ověřit správnost měřené polohy, byla tato chyba objevena až při analýze naměřených dat.
- Jízdní kolo nemá (na rozdíl od dvoustopých vozidel) danou rovinu, kdy se nachází v ustálené poloze. Kalibrace a snímání zrychlení zatíženo vysokým šumem a jak už bylo uvedeno výše-každá chyba se v průběhu měření násobí a měření je znehodnocené. Toto pomáhá odbourat Kálmánův filtr, avšak pokud je poloha chybná již v začátku měření, pak jsou následné odchylky opravovány právě pomocí těchto počátečních dat, která také nejsou správná.

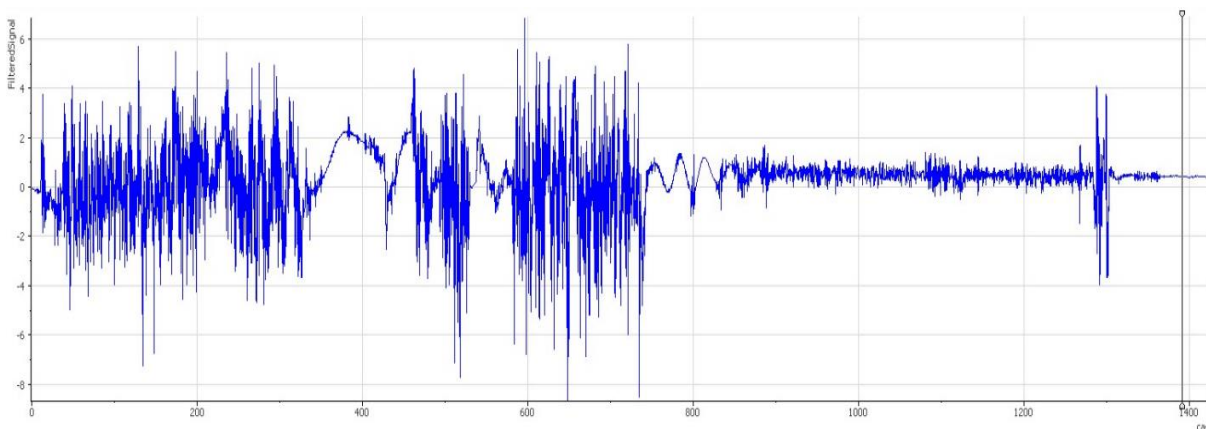
Podle dřívějších postupů byl v programu DIAdem aplikován digitální IIR filtr s módem „low pass“ (dolní propust), kde byl nastaven frekvenční limit 1,5 Hz a parametry IIR filtru nastaveny na mód „Butterworth“ (vyrovnání nebo zploštění křivky podle zadaného stupně) a průběhy byly přepočítány. Tyto filtry však pouze ořízly výstup o maximální hodnoty, avšak velikosti zrychlení i rychlosti jsou stále nereálné.

Příklad výsledné podoby grafu je vidět na Graf 19



Graf 19: Nefiltrované hodnoty 2. jízdy

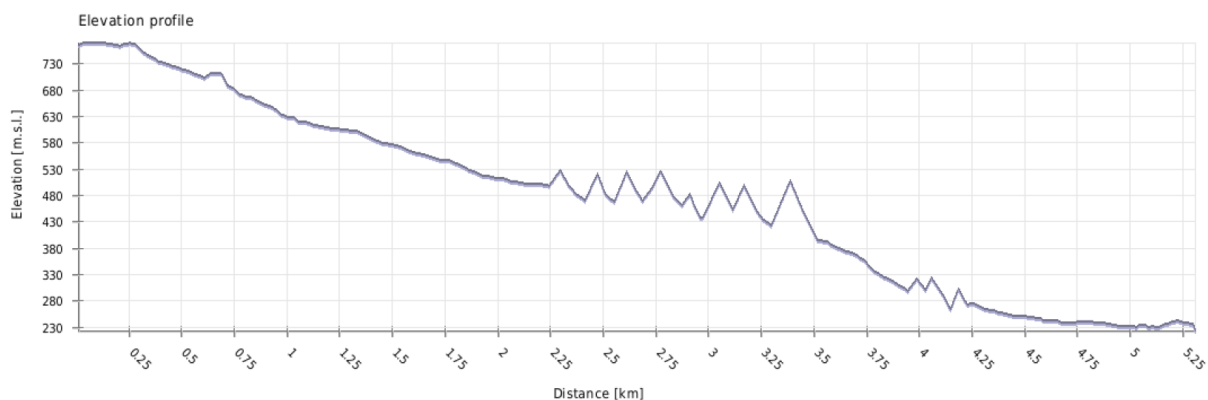
Osa x reprezentuje čas [s], osa y zrychlení [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ]. Jak je vidět, hodnoty zrychlení v ose x přesahují  $60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  a průběh není kontinuální. Můžeme vidět, že přibližně pravdivé hodnoty byly změřeny až po dojezdu do cíle. Zde totiž končí les, prostupnost signálu je lepší a jezdec volným tempem mířil k místu, kde bylo potřeba techniku z kola odstrojit a celý experiment ukončit. Oblast kolem 400. sekundy je důkazem úplného výpadku signálu. Určená trasa byla projeta za 13 minut. Právě za touto hranicí 780 sekund jezdec zastavil a hodnoty zrychlení se ustálily kolem nulových hodnot. Další grafy zrychlení v osách y a z vykazují stejný průběh. Velikost šumu je velice vysoká, proto byl aplikován digitální filtr (viz popis výše). Výsledný graf průběhu je znázorněn na Graf 20.



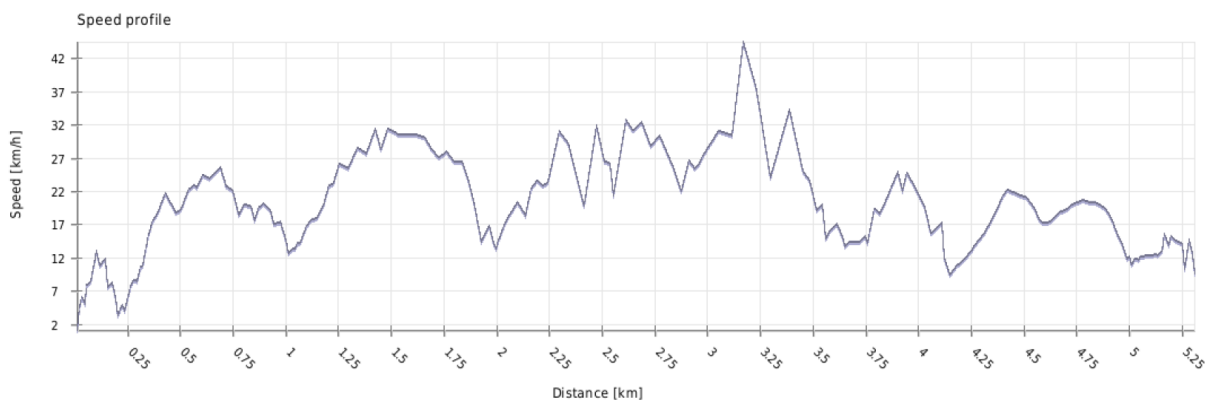
Graf 20: Filtrované hodnoty 2. jízdy

Limitní hodnoty byly odfiltrovány a signál byl vyhlazen. Bohužel je i tak zřejmé, že hodnoty jsou nevyhovující, i když blíže k těm reálným. Pokud by signál neobsahoval tolik šumu a chyb, bylo by možné tímto postupem dosáhnout zajímavých výsledků. V případě správné funkce by bylo možné srovnat hodnoty při klasické jízdě a při extrémním sjezdu. Tyto informace by šlo dále použít například pro trénink závodních jezdců, nebo k dalšímu vývoji bezpečnostních prvků, jako v případě již výše zmíněného airbagu pro cyklisty.

Jezdec měl u sebe také mobilní telefon s aplikací Locus PRO, která zaznamenává trasu pomocí GPS signálu do formátu \*.gpx. Naměřená data jsou k nahlédnutí níže:



Graf 21: Průběh klesání v závislosti na trase



Graf 22: Průběh rychlosti v závislosti na trase

Celý experiment hodnotím jako úspěšný z hlediska spolupráce celého měřícího týmu a jezdce. Měření bylo uskutečněno za použití profesionální techniky a podařilo se získat očekávané výstupy. Z hlediska naměřených hodnot nevyšel experiment podle předpokladů a data byla zkreslena z výše uvedených důvodů. Experiment byl přínosem pro budoucí měření, kdy je potřeba se na problematické aspekty zaměřit a určit opatření vedoucí k objektivním výsledkům, např. výběrem odlišné lokality, měřeného objektu, či výběrem snímačů a způsobem instalace (kalibrace).

## 7 Závěr

Tato diplomová práce se v úvodní kapitole zabývá akcelerometry. Nachází se zde popis, o jaký senzor se jedná a na jakém principu funguje. Pozornost je věnována také historii a mezníkům, které ovlivnily rozvoj a potvrdily funkčnost těchto senzorů. Následuje popis technologie MEMS, která je při výrobě akcelerometrů využívána a také princip činnosti. Dalším bodem je rozdělení akcelerometrů, kde jsou kromě samotného rozdělení a popisu odlišností zhodnoceny výhody a nevýhody druhů akcelerometrů. Celá kapitola je doplněna obrázky pro lepší představu popisovaného. Jsou zde detailně rozebrány polovodičové-piezoelektrické, polovodičové-piezorezistivní, kapacitní a další druhy akcelerometrů. Na závěr jsou uvedeny rušivé vlivy, které mohou ovlivnit kvalitu měření a správnost naměřených hodnot. Závěr této kapitoly patří druhům montáže akcelerometrů a nastíněny jsou hraniční hodnoty zrychlení (potažmo přetížení), kterým je člověk schopný odolat.

Třetí kapitola pojednává o jednostopých vozidlech, přesněji o jízdním kole. Toto téma je zpracováno nejprve z hlediska historie, kdy je velice zajímavá představa vývoje a množství překážek a technologických nástrah, které muselo jízdní kolo zdolat, než spatřilo světlo světa v podobě, která byla zprvu velice vzdálena dnešní konstrukci. Hlavní průkopník tohoto vynálezu (Karl Wilhelm Friedrich Christian Ludwig Drais von Sauerbronn) musel ujít dlouhou cestu, než se mu vůbec podařilo vynález prosadit. Z pohledu dnešní doby je to důležitý milník v oboru přepravy osob a dalších odvětví, která jsou s tímto vynálezem spojena. Tato kapitola se také zabývá rozdělením jízdních kol. Uvedeny jsou prakticky všechny používané druhy tohoto dopravního prostředku. Některé z nich jsou tak specifické, že jejich využití v jiném prostředí, než na které jsou stavěna, je takřka nemožné. Uvedeny jsou i orientační ceny, za které je možné daný typ kola pořídit. Na rozdělení jízdních kol plynule navazuje část nazvaná „Bezpečnost“. V té je možné získat základní informace o znění zákona, souvisejícím s bezpečností cyklistů, ale také nahlédnout do tabulek nehodovosti. K dispozici je srovnání mezi lety 2007 až 2016 a uvedené čísla jsou více než zajímavá. Trendem poslední doby je totiž úbytek počtu mrtvých při nehodách a pokles nehod téměř na polovinu. To je signál, že bezpečnost dopravy se ubírá správným směrem a dosavadní vývoj technologií a úpravy zákonu jsou ku prospěchu. Následují grafy, ze kterých lze vyčíst rapidní nárůst dopravních nehod po roce 1989. Počet usmrcených osob však dlouhodobě klesá a oproti roku 1969 klesl na méně než třetinu. Z pohledu cyklistiky jsou čísla také velice příznivá. Bezpečnost cyklistů se dá pojmut i z pohledu aktivní a pasivní bezpečnosti, což je předmětem další části kapitoly.

Tématem čtvrté kapitoly jsou jízdní charakteristiky cyklisty. Zde jsou detailně zpracovány principy, kterými lze danou problematiku vyřešit. Obsahem je popis měření pomocí akcelerometru nebo nutnost použití GNSS. Struktura systému GNSS se dělí na tři základní

složky, které jsou postupně rozebrány. Následuje metoda výpočtu polohy a měření polohy. Nedílnou součástí snímače je i gyroskopický senzor, jehož princip činnosti je rovněž rozebrán. Dále je pozornost směřována ke konkrétním snímačům, které byly při praktickém měření použity. Detailně je rozebrán sdružený snímač Xsens MTi-G, včetně Kálmánova filtru, výstupů senzoru a vysvětlena je i orientace snímače. Následuje popis snímače SBG – Ellipse2-N, který při měření sekundoval prvnímu snímači.

Do páté kapitoly byl vložen protokol, který byl vytvořen v rámci předmětu 22AMM, kdy probíhal podobný experiment, avšak jednalo se o jízdu na klasickém kole, v nenáročném terénu a bez výrazných převýšení. Protokol byl důležitý pro účely srovnání naměřených veličin s plánovaným experimentem extrémního sjezdu.

Předmětem šesté kapitoly je samotné praktické měření dynamiky jízdy sjezdového kola. Vycházelo se ze zkušeností z předchozích let a celý průběh experimentu je detailně analyzován. Musela se vybrat lokalita trasy, termín a jezdec. Vše bylo dohodnuto s dostatečným časovým předstihem, ale nakonec se muselo přistoupit ke změně z časových důvodů jezdce. Podmínky, za kterých měření probíhalo jsou popsány v následujícím bodě práce. Dále jsou seskupeny informace o jezdcí, použitém jízdním kole a všech modifikacích, které kolo podstoupilo z důvodu vylepšení jízdních vlastností. Spojení jízdního kola s akcelerometrem probíhalo ve ztížených podmínkách na parkovišti pod Děčínským Sněžníkem. Celý postup je popsán a doplněn fotodokumentací. Následuje způsob vyhodnocení, popis dat, které byly výstupem měření a použité programy. V závěru měření jsou shrnuty všechny informace, které byly měřením shromážděny. Jsou uvedeny grafy s hodnotami, které bohužel nenaplnily očekávání, avšak jsou platnými výsledky měření. Důvody, které vedly k ovlivnění naměřených hodnot jsou sepsány a vysvětleny. Jezdec měl u sebe mobilní telefon s aplikací pro záznam trasy. Tato data jsou použita v závěru kapitoly a doplněna grafy.

Na závěr diplomové práce jsou zhodnoceny výstupy měření, které vnímám jako kladné.

Již během bakalářské práce, kdy bylo zapotřebí analyzovat velmi rychlé děje, byla spolupráce s ústavem bezproblémová. V případě závěrečné práce magisterského studia tomu nebylo jinak a vše proběhlo podle plánu.



## 8 Použité zdroje

1. **Vojáček, Antonín** . Principy akcelerometrů - 1. díl - Piezoelektrické. *automatizace.hw.cz*. [Online] 14. leden 2007. [Citace: 1. květen 2017.] <http://automatizace.hw.cz/clanek/2007011401>.
2. **Walter, Patrick**. The history of the accelerometer. *Sound and vibration magazine*. [Online] 2006. [Citace: 1. květen 2017.] <http://www.sandv.com/downloads/0701walt.pdf>.
3. **Serenum**. Kapacitní akcelerometr. *SERENUM*. [Online] [Citace: 1. květen 2017.] <http://serenum.cz/?p=229&lang=cs>.
4. **Vojáček, Antonín**. MEMS - díl 1. - Co to je a jak to vypadá ? *vyvoj.hw.cz*. [Online] 19. listopad 2016. [Citace: 1. květen 2017.] <http://vyvoj.hw.cz/clanek/2006111901>.
5. **Bureš, Jiří, a další**. Určování trajektorie z akcelerometrického měření. *Teorie, věda a výzkum*. [Online] Teorie, věda a výzkum [online]. 2010, 2010(1), 6 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.romodis.cz/files/177493458.pdf>, leden 2010. [Citace: 1. květen 2017.] <http://www.romodis.cz/files/177493458.pdf>.
6. **Lenková, Alžběta**. Prezentace předmětu "Měřící metody a technika v dopravě" (22MMT). *DYNAMICKÁ MĚŘENÍ V DOPRAVĚ - snímače (akcelerometry, tenzometrie)*. Praha : ČVUT FD , 2010.
7. **Husák, Miroslav**. 8. Akcelerometry. *Readgur*. [Online] [Citace: 1. květen 2017.] <http://readgur.com/doc/172537/08-akcelerometry.pdf>.
8. **TE Connectivity Corporation**. TRAFFIC SENSORS. *TE Connectivity*. [Online] [Citace: 1. květen 2017.] <http://www.te.com/usa-en/products/sensors/traffic-sensors.html?tab=pgp-story>.
9. **Tarantola, Andrew**. Why the Human Body Can't Handle Heavy Acceleration. *GIZMODO*. [Online] 1. říjen 2014. [Citace: 1. květen 2017.] <http://gizmodo.com/why-the-human-body-cant-handle-heavy-acceleration-1640491171>.
10. **Technické MS**. Jednostopá vozidla. *MATES - Technické mateřské školy*. [Online] [Citace: 1. květen 2017.] <http://www.technicke-ms.cz/rady-a-tipy/strojirenstvi-doprava/jednostopa-vozidla/>.
11. **Kubišta, Josef** . Kolo. *Pepcak*. [Online] [Citace: 1. květen 2017.] <http://www.pepcak.webzdarma.cz/pict0002.JPG>.
12. **Neumann, Tomáš a Neumannová, Jana**. Cyklistika a její historie. *kolemkola.cz*. [Online] 2008. [Citace: 1. květen 2017.] <http://www.kolemkola.cz/cyklistika.html>.
13. **Sunday Bikes**. BMX Rad Gary Young Freecoaster. *Kunstform*. [Online] 28. srpen 2016. [Citace: 1. květen 2017.] <https://www.kunstform.org/images/Sunday-Bikes-Soundwave-2017-BMX-Rad-Gary-Young-Freecoaster-20160828112241-1.jpg>.
14. **Mango**. Singlespeed. *Mango Bikes*. [Online] 2017. [Citace: 1. květen 2017.] <https://cdn.mangobikes.com/wp-content/uploads/ss-aqua.jpg>.

15. **Merida.** SCULTURA SUPERLITE LTD. *MERIDA-BIKES*. [Online] 2017. [Citace: 1. květen 2017.] [https://www.merida-bikes.com/en\\_int/bikes/road-fitness/road-race/2016/scultura-superlite-ltd-4684.html](https://www.merida-bikes.com/en_int/bikes/road-fitness/road-race/2016/scultura-superlite-ltd-4684.html).
16. **Cervélo.** Cervélo S5 Ultegra Road Bike. *Road*. [Online] 2016. [Citace: 1. květen 2017.] [http://road.cc/sites/default/files/styles/main\\_width/public/cervelo-s5-ultegra-road-bike-2016.jpg?itok=9lcU1MwF](http://road.cc/sites/default/files/styles/main_width/public/cervelo-s5-ultegra-road-bike-2016.jpg?itok=9lcU1MwF).
17. **Giant.** Fast Road CM 1 Black. *Giant-Bicycles*. [Online] 2017. [Citace: 1. květen 2017.] [https://giantcdn-qu2qwwwv2de7wv85rz.stackpathdns.com/remote/www.giant-bicycles.com/\\_upload\\_us/bikes/models/xxl/2017/FastRoad-CM-1-Black.jpg?width=1028&height=685&mode=pad&bgcolor=white&anchor=middlecenter](https://giantcdn-qu2qwwwv2de7wv85rz.stackpathdns.com/remote/www.giant-bicycles.com/_upload_us/bikes/models/xxl/2017/FastRoad-CM-1-Black.jpg?width=1028&height=685&mode=pad&bgcolor=white&anchor=middlecenter).
18. **Author.** Ninja DH team matte black. *Author Bicycles*. [Online] 2017. [Citace: 1. květen 2017.] [http://cz.author.eu/data/x\\_db\\_produkty/5593/main/ua42882201\\_ninja\\_dh\\_team\\_matte\\_black\\_\\_hp\\_silver\\_f.jpg](http://cz.author.eu/data/x_db_produkty/5593/main/ua42882201_ninja_dh_team_matte_black__hp_silver_f.jpg).
19. **Policie České republiky.** Zákon o pozemních komunikacích - Zákon č. 13/1997 Sb. *Zákony pro lidi*. [Online] 21. únor 1997. [Citace: 1. květen 2017.] <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1997-13>.
20. —. Statistika nehodovosti 2016. *Policie České republiky*. [Online] 2016. [Citace: 1. květen 2017.] <http://www.policie.cz/clanek/statistika-nehodovosti-900835.aspx?q=Y2hudW09Mg%3d%3d>.
21. **Kobosil, Martin.** Měření dynamiky jízdy systému řidič-motocykl. *Diplomová práce*. Praha : ČVUT FD, 2016.
22. **XSens.** Manuál měřicího zařízení MTi-G.
23. **Tesař, Pavel.** Úvod do GNSS. *athena.fsv.cvut*. [Online] 5. červen 2007. <ftp://athena.fsv.cvut.cz/EMEG/uvodGNSS.pdf>.
24. **Láska, Zdeněk, a další.** Globální navigační satelitní systémy a jejich využití v praxi: Učební texty k semináři. *Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a senzorických technologií*. [Online] 9. září 2010. [Citace: 1. květen 2017.] [http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura\\_08\\_1009.pdf](http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_08_1009.pdf).
25. **Šebesta, Jiří.** GLOBÁLNÍ NAVIGAČNÍ SYSTÉMY. *Ústav Radioelektroniky*. [Online] 1. leden 2012. [Citace: 1. květen 2017.] [http://www.urel.feec.vutbr.cz/~sebestaj/RAR/literatura/Globalni\\_navigacni\\_systemy.pdf](http://www.urel.feec.vutbr.cz/~sebestaj/RAR/literatura/Globalni_navigacni_systemy.pdf).
26. **Burg, Aaron, a další.** MEMS GYROSCOPES AND THEIR APPLICATIONS. *McCormick School of Engineering and Applied Science, Northwestern University*. [Online] [Citace: 1. květen 2017.] McCormick School of Engineering and Applied Science, Northwestern University.

27. **Pearson, Cef Terry.** How a gyroscope works. *Gyroscopes*. [Online] 1. únor 1997. [Citace: 1. květen 2017.] <http://www.gyroscopes.org/how%5Cagwa4.pdf>.
28. **Vojáček, Antonín.** Jak pracují nové 3D MEMS akcelerometry Freescale ? *vyvoj.hw.cz*. [Online] 30. duben 2007. [Citace: 1. květen 2017.] <http://vyvoj.hw.cz/soucastky/jak-pracuji-nove-3d-mems-akcelerometry-freescale.html>.
29. **Nagy, Ivan.** Stochastické systémy. *Staff.utia.cas*. [Online] [Citace: 1. květen 2017.] <http://staff.utia.cas.cz/suzdaleva/pdfka/StSysTexty.pdf>.
30. **Chmelař, Pavel.** *Diplomová práce*. [Online] 2011. [Citace: 1. květen 2017.] [http://dspace.upce.cz/bitstream/handle/10195/39401/ChmelařP\\_StabilizacePolohy\\_PR\\_2011.pdf;jsessionid=7254461B08BBE5A145F07D6A84F28813?sequence=1](http://dspace.upce.cz/bitstream/handle/10195/39401/ChmelařP_StabilizacePolohy_PR_2011.pdf;jsessionid=7254461B08BBE5A145F07D6A84F28813?sequence=1).
31. **SBG Systems.** Ellipse2-N: Miniature INS/GPS. *SBG Systems*. [Online] 2017. [Citace: 1. květen 2017.] <https://www.sbg-systems.com/products/ellipse-n-miniature-ins-gps>.
32. **Unmanned Systems Technology®.** Inertial Navigation Systems, INS/GPS, AHRS, and IMU for Unmanned Systems. *Unmanned Systems Technology*. [Online] 2017. [Citace: 1. květen 2017.] <http://www.unmannedsystemstechnology.com/tag/sbg-systems/>.
33. **Sparkfun.** Triple Axis Accelerometer Breakout - ADXL330. *sparkfun*. [Online] [Citace: 1. květen 2017.] <https://www.sparkfun.com/products/retired/692>.

## 9 Seznam obrázků

Obrázek 1: Akcelerometr [33].....	12
Obrázek 2 a 3: Příklady některých mechanických prvků MEMS pružný element (vlevo), ozubená soukolí (vpravo) [4] .....	13
Obrázek 4: Nejjednodušší blokové schéma principu piezoelektrických akcelerometrů. [1] ...	14
Obrázek 5: Typy akcelerometrů [6].....	15
Obrázek 6: Střihový mód [1] .....	15
Obrázek 7: Kompresní mód [1].....	16
Obrázek 8: Ohybový mód [1].....	16
Obrázek 9: Piezorezistivní akcelerometr [7].....	18
Obrázek 10: Optický senzor čítače náprav [8] .....	18
Obrázek 11: Konstrukce akcelerometru. [6].....	19
Obrázek 12: 2D a 3D akcelerometry [7].....	19
Obrázek 13: Drezína [11] .....	22
Obrázek 14: BMX [13] .....	23
Obrázek 15: Single Speed [14].....	24
Obrázek 16: Silniční kolo [16].....	24
Obrázek 17: Fitness kolo [17].....	25
Obrázek 18: Horské kolo [18] .....	25
Obrázek 19: Schéma určení polohy ze tří signálu.....	33
Obrázek 20: Princip snímače úhlové rychlosti [6] .....	35
Obrázek 21: Sdružený snímač Xsens MTI-G [22].....	35
Obrázek 22: Princip kapacitního akcelerometru [6].....	36
Obrázek 23: Sdružený snímač Xsens MTI-G a anténa GPS signálu [22].....	37
Obrázek 24: Architektura snímače MTi-G [22].....	37
Obrázek 25: Lokální souřadný systém MTi-G. [22] .....	39
Obrázek 26: Schéma LLA a LTP souřadných systémů. [22].....	39
Obrázek 27: Zadání matice natočení. [22].....	41
Obrázek 28: Princip funkce Object Reset. [22] .....	41
Obrázek 29: SBG Systems - Ellipse2-N [32].....	41
Obrázek 30: První jízda-Zobrazení trasy programem Google Earth.....	45
Obrázek 31: Druhá jízda-Zobrazení trasy programem Google Earth .....	48
Obrázek 32: Třetí jízda-Zobrazení trasy programem Google Earth.....	51
Obrázek 33: Jízdní kolo, které bylo použito na měření .....	52
Obrázek 34: Detail upevnění akcelerometru.....	52
Obrázek 35: 3D zobrazení profilu trati .....	54

Obrázek 36: Foto ze závodu.....	55
Obrázek 37: GT 2015 FORCE X CARBON PRO.....	55
Obrázek 38: Snímač Xsens MTi-G.....	56
Obrázek 39: Snímač SBG Systems – Ellipse2-N.....	56
Obrázek 40: Uchycení snímačů na rám kola .....	56
Obrázek 41: Pracovní prostředí programu MT manager [22].....	58

## 10 Seznam tabulek

Tabulka 1: Srovnání nehod z hlediska jednotlivých let [20].....	26
Tabulka 2: Počet usmrcených osob v závislosti na kategorii osoby [20] .....	28
Tabulka 3: Nehody podle druhu vozidla [20].....	29
Tabulka 4: Souhrn naměřených hodnot-První jízda .....	45
Tabulka 5: Souhrn naměřených hodnot-Druhá jízda.....	48
Tabulka 6: Souhrn naměřených hodnot-Třetí jízda .....	51

## 11 Seznam grafů

Graf 1: Vlastnosti piezoelektrických akcelerometrů [7].....	14
Graf 2: Vývoj počtu nehod a jejich následků [20] .....	27
Graf 3: Vývoj počtu usmrcených osob [20] .....	27
Graf 4: První jízda-Zrychlení na ose X.....	43
Graf 5: První jízda-Zrychlení na ose Y .....	43
Graf 6: První jízda-Rychlost dle GPS.....	44
Graf 7: První jízda-Rychlost dle integrace.....	44
Graf 8: První jízda-Záznam trasy dle Fourierovy transformace .....	45
Graf 9: Druhá jízda-Zrychlení na ose X .....	46
Graf 10: Druhá jízda-Zrychlení na ose Y.....	46
Graf 11: Druhá jízda-Rychlost dle GPS .....	47
Graf 12: Druhá jízda-Rychlost dle integrace .....	47
Graf 13: Druhá jízda-Záznam trasy dle Fourierovy transformace.....	48
Graf 14: Třetí jízda-Zrychlení na ose X.....	49
Graf 15: Třetí jízda-Zrychlení na ose Y .....	49
Graf 16: Třetí jízda-Rychlost dle GPS.....	50
Graf 17: Třetí jízda-Rychlost dle integrace.....	50
Graf 18: Třetí jízda-Záznam trasy dle Fourierovy transformace .....	51
Graf 19: Nefiltrované hodnoty 2. jízdy.....	60
Graf 20: Filtrované hodnoty 2. jízdy .....	60
Graf 21: Průběh klesání v závislosti na trase.....	61
Graf 22: Průběh rychlosti v závislosti na trase .....	61

## 12 Seznam příloh

Příloha 1: Lesy ČR-Povolení k vjezdu motorových vozidel

Příloha 2: Fotografická ukázka terénu trasy



LESY ČESKÉ REPUBLIKY s.p. Hradec Králové

Lesní správa DĚČÍN

### Výjimka ze zákazu

vjezdu a stání motorových vozidel v lesích LČR s.p.  
(§ 20 odst. 4 zákona 289/1995 Sb.)

Vlastník vozidla:	ČVUT-Děčín
Státní poznávací značka:	5P8 4306
Platí pro lesní cesty na území:	Asfaltka na Vys. Sněžník, Bělská
Oprávnění pro činnost:	měření dynamiky jízdy cyklisty
Evidenční číslo:	64 / 17

UPOZORNĚNÍ: Vjezd a stání je povolen pouze na vlastní nebezpečí!  
Toto oprávnění neumožňuje jezdit a stát s motorovými vozidly mimo majetek ve správě LČR s.p.  
Při vjezdu na lesní cesty umístit viditelně za předním sklem!

Platí pro období:	4.5.2017
Razítko:	Lesy České republiky, s.p. [02] Smyslova 1106/19, Hradec Králové IČ: 221 221 221 Lesní správa Děčín Sokolova 486/2, Děčín I-Děčín, 405 02 Děčín
Podpis:	
Platí pro období:	
Razítko:	
Podpis:	
Platí pro období:	
Razítko:	
Podpis:	

FMFGACST15H

#### Podmínky pro dočasného držitele

„Výjimky ze zákazu vjezdu a stání motorových vozidel v lesích“

- 1) Výjimka se vydává pouze pro vyznačený účel, zneužití je trestné.
- 2) Výjimka platí pouze pro lesy v majetku státu s právem hospodařit pro Lesy České republiky, s.p., v územním obvodu Lesní správy Děčín.
- 3) Držitel potvrzení není zbaven odpovědnosti a povinností dle Lesního zákona č. 289/1995 Sb.
- 4) Po skončení platnosti výjimky je povinen držitel tuto neprodleně vrátit Lesní správě Děčín, která vede jejich evidenci.
- 5) Výjimka musí být viditelně umístěna ve vozidle a na požádání předložena policii ČR a lesní stráží.
- 6) Při jízdě po lesní cestě je nutno přizpůsobit rychlost jízdy stavu a povaze vozovky, jakož i ostatním okolnostem. Maximální povolená rychlost je stanovena na 30 km/h. Správce lesů neodpovídá za případné škody vzniklé pro závadu ve sjízdnosti lesní cesty, při pádu stromů apod.
- 7) Při průjezdu lesem je zakázáno používat zvukových výstražných znamení.
- 8) Při setkání s vozidlem správce lesa je držitel výjimky povinen dát přednost tomuto vozidlu, případně couvat na nejbližší místo umožňující vyhnoutí obou vozidel.
- 9) Odstavení vozidla v lese musí být provedeno tak, aby nebránilo provozu lesního hospodářství.

Příloha 2: Ukázka terénu trasy

