



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

MĚŘENÍ ODKLONU KOLA BĚHEM JÍZDY

MEASUREMENT OF CAMBER DURING DRIVING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. ALEŠ VOJTĚŠEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PETR PORTEŠ, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Aleš Vojtěšek

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Automobilní a dopravní inženýrství (2301T038)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Měření odklonu kola během jízdy

v anglickém jazyce:

Measurement of camber during driving

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhněte způsob měření odklonu kola automobilu vůči vozovce.

Cíle diplomové práce:

Proveďte rozbor možností měřit během jízdy odklon kola automobilu vůči vozovce. Zvolte snímače a navrhněte konstrukční řešení komponent měřicího systému. Proveďte měření a změřené signály vyhodnoťte.

Seznam odborné literatury:

GILLESPIE, T. D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1992. ISBN 1-56091-199-9.

□

REIMPELL, J., STOLL, H., BETZLER, J. W. The Automotive Chassiss. 2nd edition. Oxford: Butterworth - Heinemann, 2001. 444 s. ISBN 0-7506-5054-0.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Petr Porteš, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 19.11.2014

L.S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty



ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je navrhnout měření a následně změřit změnu úhlu odklonu kola během jízdy. Pro tento zadaný úkol byly použity na uchycení senzorů některé díly od firmy Corrsys-Datron a zbývající prvky bylo potřeba vyrobit. Kompletním systémem následně proběhlo měření a výstupní data byla programem Matlab vykreslena a vyhodnocena. Na základě vyhodnocení dat je možné přesně určit vzájemnou polohu kola vůči vozovce a karoserii.

KLÍČOVÁ SLOVA

Geometrie zavěšení kol, statické měření, dynamické měření, úhel naklopení kola, úhel klopení vozidla, úhel odklonu kola

ABSTRACT

The subject of this master's thesis is design measurement and measure change wheel camber angle during driving. For this task were used parts from Corrsys-Datron and remaining elements needed to be manufactured. With complete system measurements were done and outputs data were displayed by Matlab and evaluated. Based on data evaluation is possible exactly determine relative position of the wheel to the road surface and to the body of vehicle.

KEYWORDS

Suspension geometry, static measurement, dynamic measurement, inclination angle, vehicle roll angle, camber angle



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VOJTĚŠEK, A. *Měření odklonu kola během jízdy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 81 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Porteš, Ph.D.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Petra Porteše, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 28. května 2015

.....
Aleš Vojtěšek



PODĚKOVÁNÍ

Za cenné připomínky a rady týkající se diplomové práce bych chtěl touto cestou poděkovat doc. Ing. Petru Portešovi, Ph.D. Také bych rád poděkoval své rodině za podporu po celou dobu mého studiu na vysoké škole.

OBSAH

Úvod	10
1 Řízení a jeho základní požadavky	11
2 Geometrie zavěšení kol	13
2.1 Úhel odklonu kola.....	13
2.1.1 Kladný odklon	14
2.1.2 Záporný odklon	15
2.2 Příklon rejdové osy	16
2.3 Poloměr rejdu.....	16
2.3.1 Kladný poloměr rejdu	17
2.3.2 Záporný poloměr rejdu	17
2.3.3 Nulový poloměr rejdu.....	17
2.4 Záklon rejdové osy.....	18
2.5 Úhel sbíhavosti	18
3 Možnosti měření odklonu kola	20
4 Statické měření odklonu kola	21
4.1 Mechanická měřidla.....	21
4.2 Optické přístroje	22
4.3 Elektronické a kamerové zařízení.....	22
4.3.1 Bosch Luchs	22
4.3.2 Beissbarth	23
4.3.3 ATT/Nusbaum.....	24
5 Dynamické měření.....	26
5.1 KISTLER.....	26
5.1.1 Systém DCA	27
5.1.2 RV-4 Sensors.....	31
5.2 AICON 3D Systems.....	33
5.2.1 WheelWatch	34
6 Příprava pro měření	38
6.1 Senzory	38
6.2 Inerciální a navigační systém.....	38
6.3 Měřicí ústředna	39

6.4	Uchycení pro senzory	39
6.4.1	Zařízení dostupné na ústavu	40
6.4.2	Výroba zbylých součástí.....	40
6.5	Automobil	42
6.6	Místo měření	42
6.7	Dodatečné pomůcky	43
7	Měření odklonu kola během jízdy	44
7.1	Souřadný systém vozidla	44
7.2	Názvosloví měřených veličin.....	44
7.2.1	Úhel naklopení kola.....	45
7.2.2	Úhel klopení vozidla.....	45
7.2.3	Úhel odklonu kola	46
7.3	Montáž zařízení na vozidlo	46
7.4	Samotné měření	50
8	Grafický výstup	52
8.2	Měření č. 4	53
8.3	Měření č. 5	57
8.4	Měření č. 6	61
9	Vyhodnocení výsledků	65
	Závěr.....	73
	Použité informační zdroje.....	74
	Seznam symbolů a zkratk	76
	Seznam obrázků a tabulek	77
	Seznam výkresů.....	80
	Seznam příloh	80

ÚVOD

Zjištění vlastností automobilu a jeho chování v různých jízdních situacích je několik možností. Existují počítačové simulace, které dokáží s dobrou přesností odhadnout tyto jízdní vlastnosti, ale vždy to budou jen simulace a výsledek se může od reality někdy dosti lišit. Proto reálné měření, které bylo správně na začátku nachystáno a proběhlo bez jakékoliv chyby, bude vždy tím nejpřesnějším zjišťováním výsledných parametrů. Především s vývojem automobilů jsou čím dál větší nároky na dobré jízdní vlastnosti, ale hlavně také na nižší opotřebování pneumatik, a proto automobilky musí správně zvolit nastavení zavěšení vozidla k uspokojení těchto základních vlastností. Dost často jsou to kompromisy, které konstruktéři musí podstoupit v rámci ideálního nastavení zavěšení a celého podvozkového systému.

Pro správné nastavení je tedy potřeba znát parametry, které zavěšení ovlivňují. Je možné zkoušet například metodou „pokus, omyl“, ale v dnešní době snižování nákladů, kdy hraje velkou roli ve výzkumu čas a s tím spojené výdaje, je potřeba tuto metodu urychlit a přímo mít možnost sledovat změny parametrů během jízdy a rychleji reagovat úpravou nastavení. Velmi důležité u závodních vozů, kde se o něco méně hledí na výdrž pneumatik, je možnost dobře připravit vozidlo a jeho jízdní vlastnosti pro maximální držení stopy, především při průjezdech zatáčkami vyšší rychlostí, kde vůz získává vysokou výhodu.

V této práci jsou na úvod vysvětleny základní pojmy zavěšení kola vozidla a poté se práce zabývá jen jedním z hlavních parametrů, a to úhlem odklonu kola. Byl proveden rozbor možností, jak měřit odklon kola automobilu ve statické poloze a následně jaké existují možnosti měřit v dynamickém stavu. Z možností měření pro dynamický stav byla vybrána jedna, která byla reálně proveditelná se zařízením na ústavu a vyrobením několika nezbytných prvků. Následně proběhlo měření odklonu kola během jízdy a vyhodnocení změřených dat.

1 ŘÍZENÍ A JEHO ZÁKLADNÍ POŽADAVKY

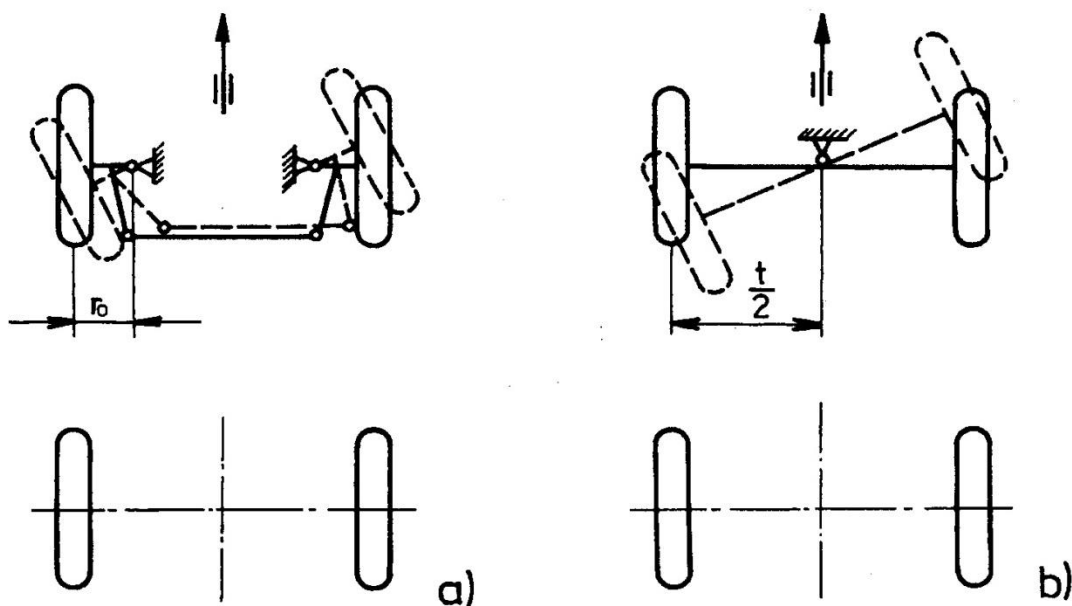
Řidiči vozidla slouží řízení k udržování přímé jízdy nebo ke změně směru vozidla.

Konstrukční řešení řízení se dělí na:

- řízení jednotlivými koly
- řízení celou nápravou

U řízení motorových vozidel se nejběžněji používá konstrukční řešení řízení jednotlivými koly, která jsou natáčena kolem rejdového čepu („osy řízení“). U nákladních automobilů se dvěma předními nápravami se natáčí kola obou náprav. [1]

Řízení celou nápravou se používá jen u nákladních přívěsů.



Obr. 1 Dva druhy řízení: a) řízení předními koly, b) řízení celou nápravou[1]

Řízení musí také splňovat určité požadavky, která jsou na něj kladena. Základními požadavky jsou: [1]

- rychlá, snadná a hlavně bezpečná ovladatelnost. V konstrukčním řešení mechanismu řiditelné nápravy a geometrie zavěšení kol nesmějí vznikat kmity a rázy, které se poté přenášejí do řízení
- řídicí ústrojí nesmí mít větší vůle, než jaké jsou stanoveny zákonem
 - Vozidla s maximální konstrukční rychlostí nad 100 km/h mohou mít maximální vůli ve volantu 18 °.
 - Vozidla s maximální konstrukční rychlostí od 25 km/h do 100 km/h, mají přípustnou vůli do 27 °.
 - Vozidla, která nepřekračují maximální konstrukční rychlost 25 km/h, mají hranici přípustné vůle 36 °.



- po projetí zatáčky se řízená kola musejí samovolně vracet do přímého směru, nebo aby byla potřebná síla pro vrácení kol mnohonásobně menší než k uvedení kol do zatáčky (pro vozidla se strojním řízením tato podmínka neplatí)
- pro vozidla, která nejsou vybavena posilovačem řízení, platí, že pro vychýlení vnitřního kola o 35° zprava do stejné polohy vlevo nesmí být počet otáček větší než 5. To platí také pro vychýlení kola z jedné krajní polohy do druhé, pokud není docíleno vychýlení řízeného kola 35° . Krajiní vychýlení je nutno omezit dorazy
- u motorových vozidel, jejichž hmotnost připadající na řízenou nápravu přesahuje 3,5 t, musí být vozidlo vybaveno posilovačem řízení. V důsledku poruchy tohoto zařízení musí být možnost řídit vozidlo silou řidiče. Tato síla nesmí být větší než 600 N
- při změně směru jízdy do oblouku o poloměru 12 m rychlostí 10 km/h nesmí ruční síla na volantu překročit 250 N



2 GEOMETRIE ZAVĚŠENÍ KOL

Základním parametrem dobrých jízdních vlastností každého vozidla při jízdě přímým směrem či průjezdem zatáčky je správné nastavení geometrie zavěšení kol. Při správném nastavení dochází během jízdy k odvalování kola. Pod pojmem geometrie zavěšení kol rozumíme geometrické parametry, které se u nápravy nastavují, aby bylo dosaženo během provozu požadovaných vlastností nápravy. Jde tedy o správné postavení kola vůči vozovce.

Toto nastavení je nutné proto, aby:

- vozidlo mělo při jízdě požadovanou stabilitu
- míra opotřebení pneumatik byla co nejmenší
- bylo možné kolo vozidla po vozovce vézt v požadované stopě
- opotřebení ložisek vzhledem k zatížení bylo optimálně rozložené

Tyto požadavky se nastavují pro každé vozidlo zvlášť, jelikož konstruktéři musí počítat s dalšími parametry, které zásadně ovlivňují chování vozidla (druh vozidla, hmotnost, výkon, pohon nápravy...)

Parametry přímo určující geometrii zavěšení kol vozidla jsou:

- úhel odklonu kola
- příklon rejdové osy
- poloměr rejdu
- záklon rejdové osy
- úhel sbíhavosti

Pokud je geometrie zavěšení nastavena špatně, kola se nejen odvalují, ale také smýkají. To má velký vliv na jízdní vlastnosti, které se tím podstatně zhoršují, rapidně klesá míra bezpečnosti, také se zvyšuje opotřebení pneumatik vozidla a roste spotřeba paliva.

Geometrii se doporučuje kontrolovat při každé výměně pneumatik, výměně některého dílu podvozku vozidla nebo také po možném mechanickém nárazu způsobeném njetím do většího výmolu či nehodou.

2.1 ÚHEL ODKLONU KOLA

Úhel odklonu kola γ je sklon střední roviny kola vůči svislé ose vozidla.[1] Uvádí se ve stupních a minutách.

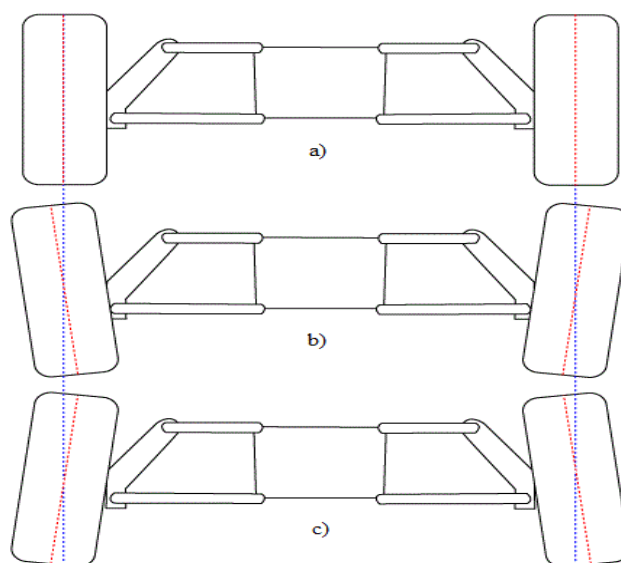
Tento úhel může být:

- kladný
- záporný

Při jízdě přes nerovnosti u nezávislého zavěšení kvůli propružení kola dochází ke změně úhlu odklonu, naklápění kola a vlivem setrvačnosti vzniká moment, který přes zavěšení kola bočně

naklápí karoserii. Ve stopě pneumatiky se vytváří boční síly zapříčiněné odklonem kola, které negativně působí namáháním na prvky zavěšení a rám vozidla.[1]

Při jízdě přímým směrem je z hlediska jízdních vlastností ideální nulový sklon střední roviny kola od svislé osy vozidla. V případě průjezdu zatáčkou se karoserie vozidla vlivem odstředivé síly začne naklápět na vnější stranu zatáčky a odklony kol na obou stranách se mění. Vnitřní kola se začínají od karoserie vzdalovat, zatímco vnější se přibližují. Pro zlepšení jízdních vlastností a stability při průjezdu zatáčkou vysokou rychlostí by měl odklon kola na vnější straně zatáčky vyrovnávat naklápění karoserie. Cílem je dosažení maximální kolmosti střední roviny kola vůči vozovce pro zachycení maximálních bočních sil působících na kola vozidla.[1]

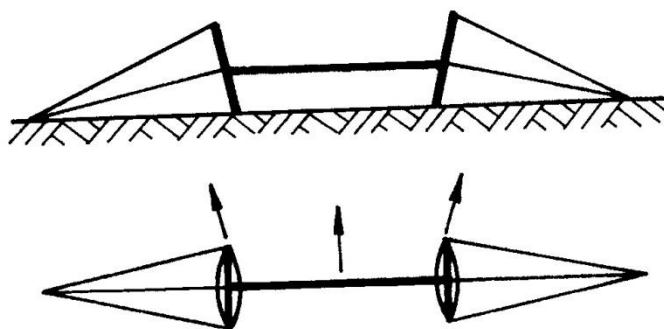


Obr. 2 Odklon kola a) nulový, b) kladný, c) záporný [4]

2.1.1 Kladný odklon

Vlivem kladného odklonu kolo tvoří ve styku s rovnou vozovkou kuželovou plochu a má snahu se odvalovat po kružnici se středem v průsečíku osy kola s rovinou vozovky. Díky odvalování se kol od sebe se může snižovat jejich nepříznivé kmitání, ale v případě dokonalého uložení je kmitání vynulováno a kolo prokluzuje po vozovce, čímž se zvyšuje opotřebení pneumatik.[1]

Kladný odklon je vhodný při zatížení vozidla pro odvalování se kol kolmo po mírně klenuté vozovce. Vzniká zde stejné opotřebení pneumatiky, zlepšuje se jízdní stabilita při jízdě v přímém směru a zmenšuje poloměr rejdu. Hodnoty bývají nejčastěji v rozmezí 5' až 10'. [1]



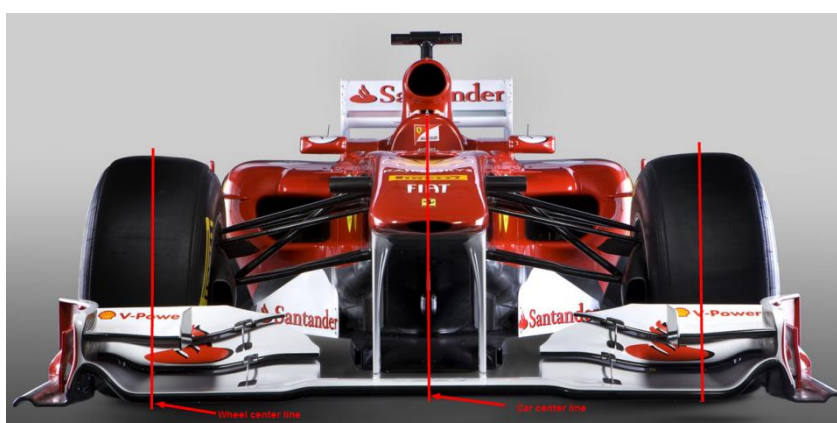
Obr. 3 Kuželový efekt kladného odklonu kola [1]

2.1.2 ZÁPORNÝ ODKLON

Záporný odklon napomáhá odvalování kol směrem dovnitř vozidla. Tímto nastavením se zlepšuje boční vedení při průjezdu zatáčkou, jelikož střední rovina vnějšího kola má tendenci směřovat kolmo k vozovce, ale zvyšuje se opotřebení vnitřních stran běhounů pneumatik při jízdě v přímém směru. [1]

Velikost záporného odklonu u osobních automobilů mohou mít v zatíženém stavu hodnoty -1° až -2° , u nákladních vozidel bývá zpravidla hodnota odklonu větší. U sportovních vozidel, kde opotřebení pneumatik hraje spíše podřadnější roli než jízdní stabilita a maximální rychlost při průjezdech zatáčkami, se volí záporný odklon již v nezatíženém stavu. [1]

Nastavení odklonu kola sériových vozidel je v praxi výsledkem kompromisu mezi jízdními vlastnostmi a opotřebení pneumatik. Tuto hodnotu udává výrobce vozidla.



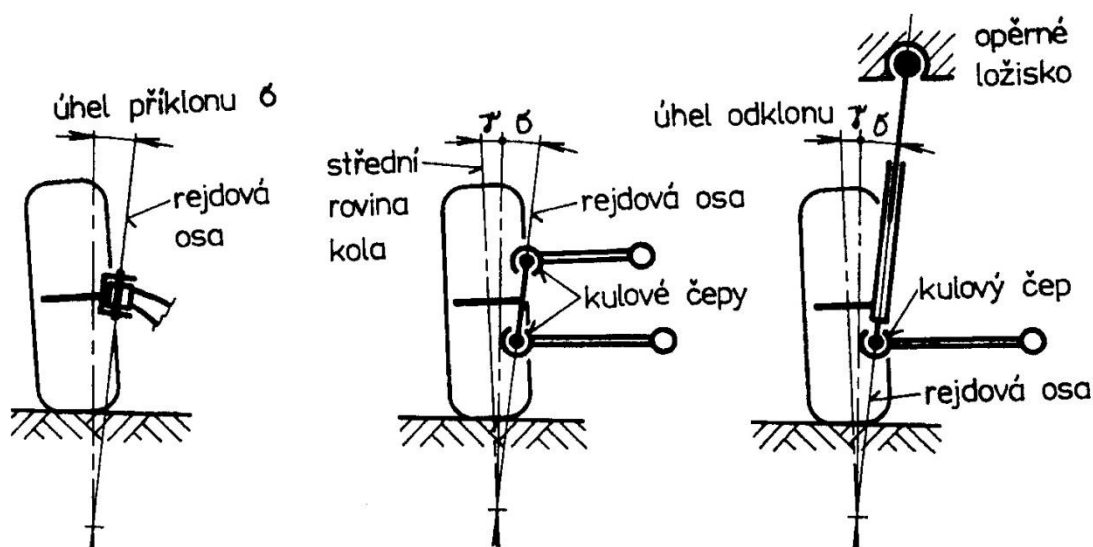
Obr. 4 Nastavení záporného odklonu kola formule 1 [5]

2.2 PŘÍKLON REJDOVÉ OSY

Příklon rejdové osy σ je definován jako průmět úhlu sevřeného rejdovou osou a svislicí do roviny rovnoběžné s příčnou rovinou vozidla.[1] Uvádí se ve stupních a minutách.

Vozidla s lichoběžníkovou nápravou mají rejdovou osu danou spojnicí středů horního a spodního kuželového čepu. U nápravy typu McPherson je rejdová osa dána spojnicí středu horního závěsného ložiska a středu spodního kulového čepu uloženého v příčném rameni. Může platit, že rejdová osa je totožná s osou vzpěry McPherson, ale častěji se volí konstrukce, kde je spodní kulový čep posunut dovnitř kola (za účelem zmenšení poloměru rejdu nebo získání jeho záporné hodnoty) a rejdová osa je excentrická (větší příklon).[1]

Příklon rejdové osy spolu s odklonem kola v jejich optimálním nastavení vytváří kombinovaný úhel, který působí příznivě na stabilitu vozidla. Hlavním přínosem správně nastaveného příklonu rejdové osy je samočinné vrácení řízených kol do přímého směru jízdy. Vlivem příklonu dochází při natáčení řízených kol k jejich zvedání. Při uvolnění volantu po zatáčení tlačí zatížení přední nápravy přední kola do přímé polohy díky účinku vratného momentu. [1][2]



Obr. 5 Průběh rejdové osy a) tuhá náprava, b) lichoběžníková náprava, c) náprava McPherson [1]

2.3 POLOMĚR REJDU

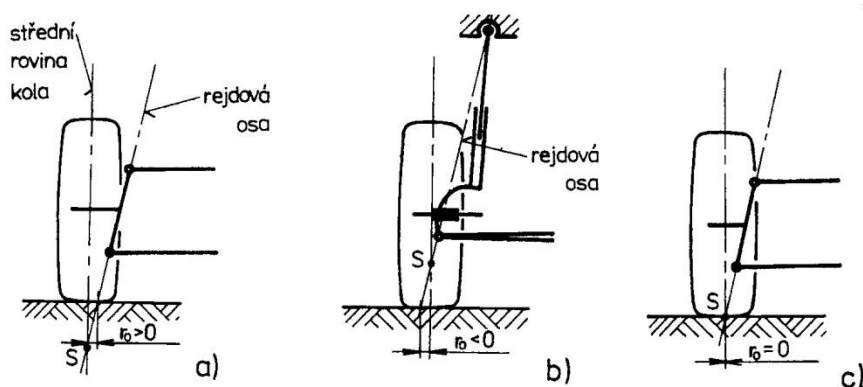
Poloměr rejdu r_0 je vzdálenost mezi průsečíkem rejdové osy s rovinou vozovky a středem styku pneumatiky, promítnutá do roviny rovnoběžné s příčnou rovinou vozidla. [1]

Poloměr rejdu může být:

- kladný
- záporný

- nulový

Na poloměru rejdu závisí velikost vratného momentu. Jsou-li hodnoty kladného poloměru rejdu větší, zvětšuje se tím i tento vratný moment. S rostoucím poloměrem rejdu je ale přední náprava citlivější na podélné síly. [1]



Obr. 6 Poloměr rejdu a) kladný, b) záporný, c) nulový [1]

2.3.1 Kladný POLOMĚR REJDU

Průsečík rejdivé osy s rovinou vozovky leží na bližší straně od středu styku pneumatiky k podélné ose vozidla. Hodnoty se udávají v milimetrech.

Při brzdění jsou přední kola natáčena do rozbíhavosti (směrem ven) vzhledem k působícím brzdícím silám, kdy při rozdílné přilnavosti kol je kolo s vyšší přilnavostí natáčeno více. Vozidlo poté nedrží přímý směr a tzv. táhne do strany. Důraz je kladen na zachování přiměřené ovládací síly, zabránění kmitání kol a hodnotu poloměru rejdu co nejmenší (u osobních vozidel se udává max. 40 mm, u nákladních max. 60 mm).[1]

2.3.2 ZÁPORNÝ POLOMĚR REJDU

Průsečík rejdivé osy s rovinou vozovky leží na vzdálenější straně od středu styku pneumatiky k podélné ose vozidla. Hodnoty se udávají v milimetrech.

V dnešní době se u většiny osobních a lehkých užitkových vozidel s přední poháněnou nápravou nastavuje záporný poloměr rejdu. Brzdná síla působící na kola je natáčí do sbíhavosti (směrem dovnitř), což má stabilizující účinek na řízení, kdy řidič i při nesouměrném brzdění (vlivem rozdílného povrchu vozovky pod brzděnými koly, při poruše jednoho okruhu u diagonálního zapojení brzd nebo defektu přední nápravy) nemusí měnit natočení předních kol. Stejného účinku se využívá také při přejezdu nerovností.[1]

2.3.3 NULOVÝ POLOMĚR REJDU

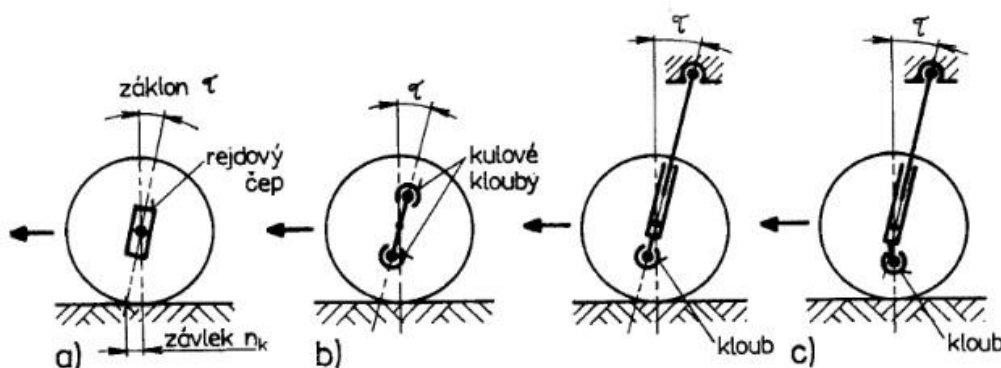
Průsečík rejdivé osy s rovinou vozovky je totožný se středem styku pneumatiky. Je potřebná velká síla v řízení pro natočení kola do rejdu u stojícího vozidla. Při brzdění jsou kola natáčena ven, ale působící moment na kola je podstatně menší než při kladném poloměru rejdu.[1]

2.4 ZÁKLON REJDOVÉ OSY

Záklon rejdové osy τ je průmět úhlu sevřeného rejdovou osou a svislicí do roviny rovnoběžné s podélnou rovinou vozidla. Je uvažován kladně, je-li rejdová osa skloněna vzad a záporně, je-li skloněna vpřed. [1]

Hodnoty záklonu se udávají ve stupních. Lze jej také určit, jako vzdálenost mezi průsečíkem rejdové osy s rovinou vozovky a středem styku pneumatiky, promítnutá do roviny rovnoběžné s podélnou rovinou vozidla. Tato vzdálenost se obvykle nazývá závlek a je uvažován jako kladný, je-li průsečík před středem styku pneumatiky a záporný, je-li za ním. [2]

Kladný (pozitivní) závlek se využívá kvůli vratnému momentu, který vzniká při natočení kol v zatáčce, kde se vnitřní kolo nadzvedává a vnější kolo je stlačováno. Díky tomuto vratnému momentu se po projetí zatáčkou kola vrací do přímého směru. Ve směru jízdy působí hnací síla a vlivem záklonu vzniká moment, který zvětšuje úhel rejdu. U osobních automobilů se z tohoto důvodu volí na přední hnané nápravě nulový záklon rejdové osy. Vozidla s motorem umístěným u zadní nápravy mají přední nápravu méně zatíženou, a proto se zde volí větší úhel záklonu než u vozidel s motorem u přední nápravy. Hodnoty úhlu záklonu jsou u této koncepce maximálně do 10° . [1][2]



Obr. 7 Záklon rejdové osy; a) tuhá náprava s rejdovým čepem, b) lichoběžníková náprava s kulovými klouby, c) náprava McPherson [1]

2.5 ÚHEL SBÍHAVOSTI

Úhel sbíhavosti δ_o je průmět úhlu mezi podélnou osou vozidla a střední rovinou kola do roviny vozovky. [1] Hodnoty se uvádějí ve stupních a minutách, ale také mohou být uvedeny jako rozdíly vzdáleností. Tyto vzdálenosti označujeme jako L_1 a L_2 a jedná se o vzdálenost mezi koly před osou, která prochází středy kol a vzdáleností mezi koly za touto osou.

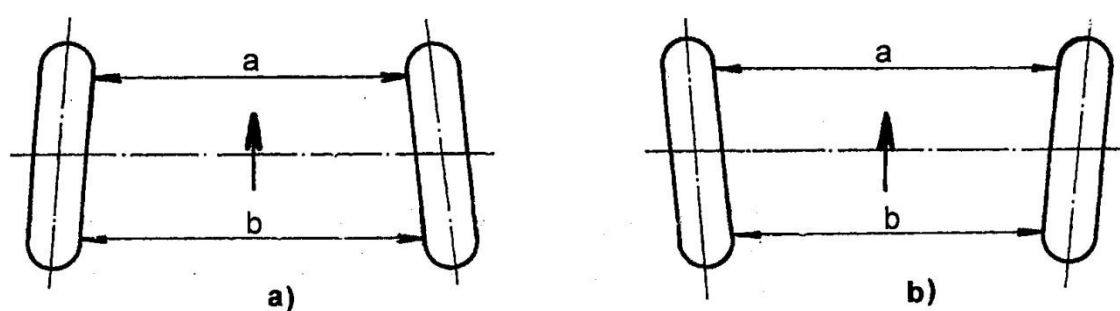
Známe-li průměr ráfku d_r a vzdálenosti mezi okraji ráfků L_1 a L_2 , můžeme pro mechanické zjištění úhlu sbíhavosti použít vztah:



$$\delta_o = \arcsin \frac{L_2 - L_1}{d_r}. [1] \quad (1)$$

Nastavení sbíhavosti předních kol má význam, aby se kola odvalovala paralelně při přímé jízdě. Vlivem sbíhavosti vznikají na předních kolech malé boční síly, které mají tendenci kola natáčet do přímého směru. Tyto síly vyvolávají vůči rejdovým osám momenty. [1]

U vozidel s pohonem předních kol se využívá malé sbíhavosti. Zlepšuje se tak jízdní stabilita automobilu při brzdění motorem. Volí se pro osobní vozidla v rozmezí od 0 mm až 3 mm, u nákladních vozidel až 8 mm. [1]



Obr. 8 Sbíhavost kol [1]



3 MOŽNOSTI MĚŘENÍ ODKLONU KOLA

Jak již bylo zmíněno, odklon kola je důležitou součástí celkové geometrie zavěšení kol jak předních, tak i zadních. Tyto prvky se navzájem ovlivňují, a je proto důležité, aby byly nastaveny konstrukčně správně podle určitých kritérií a požadavků. K tomu nám slouží několik možností, jak měřit tato nastavení. Měřidel existuje velká škála od jednoduchých ručně ovladatelných přístrojů, které měří jeden určitý parametr, až po velká celogarážová zařízení, kde lze změřit kompletní geometrii zavěšení kol vozidla s výčtem jednotlivých parametrů.

Tato zařízení jsou velmi přesná ve statické poloze vozidla, ale mají zásadní nevýhodu, a to, že nemohou změřit parametry zavěšení v dynamickém stavu vozidla, neboli při jízdě. V tomto stavu se mění chování celého zavěšení, hlavně při průjezdech zatáčkami a tato data o změnách jsou velmi důležitou informací pro konstruktéry, k ideálnímu nastavení geometrie náprav jak při jízdě v přímém směru, tak pro dobrou jízdní stabilitu v zatáčkách. Tato nevýhoda je již v dnešní době anulována, jelikož existuje několik zařízení, která měří data přímo při jízdě v dynamickém stavu a konstruktéři s těmito daty mohou ihned pracovat a doladovat různé parametry nastavení zavěšení.



4 STATICKÉ MĚŘENÍ ODKLONU KOLA

Statické měření nám již napovídá, že měřený objekt (vozidlo), bude ve stavu statickém, neboli nepojízděném nebo také ukotveno k měřicímu zařízení. Při měření jde o určování úhlových, případně délkových veličin k daným rovinám v prostoru, většinou k základní rovině (podlaha) a dvěma rovinám na ni kolmých (podélná a příčná rovina vozidla).

Nástroje na měření můžeme rozdělit podle principů, na jejichž základě pracují:

- mechanická měřidla
- optické přístroje
- elektronická a kamerová zařízení

4.1 MECHANICKÁ MĚŘIDLA

Měření odklonu kola mechanickým měřidlem je nejstarším způsobem zjištění úhlu odklonu kola. Jde o přímé spojení zařízení s kolem a odečtení veličiny ze stupnice na přístroji. Použití takových přístrojů je velmi snadné a rychlé, výhodou je také přemístitelnost a malá hmotnost přístroje, ale v dnešní době mohou být spíše orientační, jelikož v porovnání s ostatními nemají tak vysokou míru přesnosti.

Většina mechanických přístrojů na měření odklonu kola vypadá podobně. Jde o svislou tyč, která se třemi body upevní na ráfek kola z vnitřní strany. Jedním bodem nahoře a dvěma u spodního okraje ráfku. Tímto se stabilizuje měřicí nástroj a poté se odečte hodnota z měřicí stupnice nebo ukazatele displeje.



Obr. 9 Měření odklonu kola mechanickým měřidlem[6][8][7]

Omezení použitelnosti nástroje může být dáno velikostí ráfku kola, ale jinak jsou tyto měřidla v porovnání s jinými levnou náhradou pro orientační zjištění odklonu kola.

Další nevýhody těchto měřicích přístrojů:

- nelze kontrolovat vzájemné postavení náprav
- nelze zabezpečit výchozí orientaci polohy kol



- úhlové hodnoty jsou snímány z mechanických dotyků a to má za následek velkou míru nepřesností
- při odečítání ze stupnice mohou nastat další nepřesnosti

4.2 OPTICKÉ PŘÍSTROJE

Optické přístroje jsou již o něco složitější než mechanická měřidla a také ve většině případů rozměrnější s více prvky, proto se především používají na místech, kde přijíždějí vozidla jedno po druhém, jako jsou opravárenské dílny, garáže či výzkumné prostory.

Tyto přístroje jsou založeny na nepřímém měření polohy kol, kombinují se s měřicími labelami a mechanickými měřidly. Můžeme je rozdělit na přístroje s přímou projekcí a nepřímou projekcí.[3]

U první skupiny přístrojů se na kola upevňují a vystředí držáky, které jsou osazeny projektory. Další projekční plochy je nutno umístit na další nápravu nebo dle použitého zařízení také mimo vozidlo. Nutností je, aby tyto držáky byly v rovnoběžné rovině s rovinou souměrnosti kola. Projektor promítá na projekční plochy paprsek a pro nastavení v horizontální a vertikální rovině se využívá libel. Na takto osvětlených projekčních plochách se nachází stupnice pro jednotlivá měření. [3]

Druhá skupina s nepřímou projekcí využívá na držácích zrcadla. Umístí se na kola, kde na říditelných kolech jsou tři zrcadlové plochy (jedna kolmá k ose rotace kola a ostatní dvě lomené k podélné svislé rovině pod úhlem $\pm 20^\circ$) a na neříditelných kolech je zrcadlová plocha pouze jedna kolmá na osu rotace. Měření probíhá tak, že paprsek ze světelného projektoru projde skrz stupnici umístěnou v optice projektoru, odrazí se od zrcadlové plochy umístěné na kole zpět na čelní bílou plochu projektoru. Výsledkem je úhel zobrazený na stupnici čelní plochy projektoru (vychýlení zrcadla = vychýlení kola). [3]

4.3 ELEKTRONICKÉ A KAMEROVÉ ZAŘÍZENÍ

Hlavním rozdílem mezi elektronickým a optickým zařízením je zdroj světelného paprsku. Elektronické přístroje využívají infračervený paprsek a projekční plocha je tvořena CCD kamerou.

4.3.1 BOSCH LUCHS

Představeno na veletrhu Automechanika 2004, kde získal ocenění za inovaci v kategorii opravy a automobilový servis. Tato metoda je výsledkem spolupráce firem Bosch a BMW.[9] Systém nejen že umí měřit tradiční metodou na zvedáku, ale také změří geometrii kol již při projíždění okolo měřicího zařízení.

Přípravou vozidla na měření tímto systémem je rozmístění několika magnetických značek, při umístění na hliníkové díly také samolepících. V okolí každého měřeného kola se rozmístí 5 těchto značek a poté se na kolo ještě uchytlí magnetický adaptér, na kterém je dalších 5 značek. Dohromady je na vozidle 40 označených bodů. Dále se rozmístí čtyři měřicí sloupky kolem zvedáku. Sloupek je vybaven dvěma kamerami, každá umístěna mezi kruhovými LED



diodami. Potenciální chyby, které mohou nastat lidským faktorem při umístění kolového adaptéru, dokáže systém vyrovnat.[9]



Obr. 10 Technik připravuje vozidlo k měření zařízením Bosch Luchs[9]

Po přípravě měřicího prostoru a rozmístění značek na vozidle technik přijede s vozidlem na zvedák, kolem kterého jsou měřicí sloupky. Kamery zaregistrují označená místa na vozidle díky osvětlení světelnými záblesky z různých pohledů a počítačový program z obrazových údajů je schopen vypočítat geometrii podvozku. Poté při volném polohování na otočných deskách dochází k přesnému proměření odklonu kola a sbíhavosti. Tyto údaje jsou nepřetržitě aktualizovány a zobrazeny na displeji monitoru pro informování obsluhy. Jestliže je potřeba vozidlo na zvedáku zvednout kvůli seřízení, mohou být taktéž měřicí sloupky vyzvednuty do potřebné výšky. Tím dostává technik okamžité údaje při změně nastavení geometrie podvozku. Jakmile technik dokončí svoji práci seřizování, dochází k finální kontrole měření.[9]



Obr. 11 Vozidlo během měření zařízením Bosch Luchs[9]

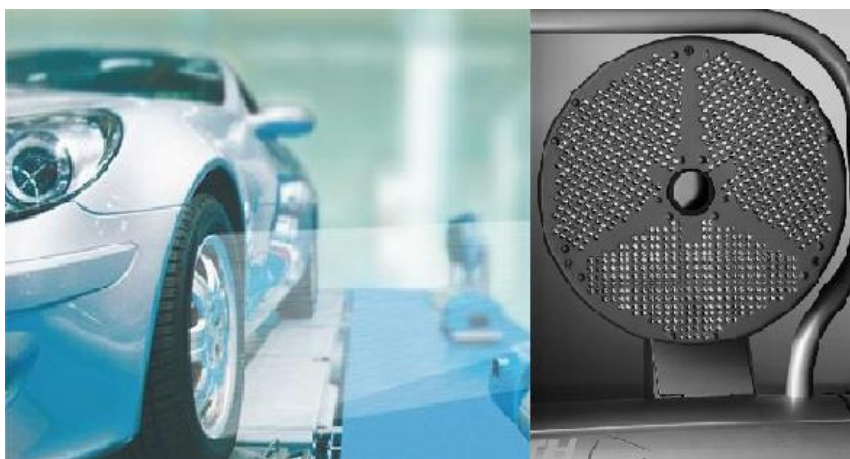
4.3.2 BEISSBARTH

Součástí tohoto systému je zvedák s otočnými deskami pro přední kola a čtyři stojany, tzv. T-Pod. Na každé straně umístěny dva a vybaveny duálními digitálními CCD kamerami. Udává se ideální vzdálenost kamer od vozidla zhruba 70 centimetrů. Duální kamery mají rozdílný



úhel snímání a ve výsledku spojením těchto dvou pohledů z různých úhlů vzniká prostorový pohled, který je následně zobrazen na monitoru zobrazovacího zařízení. Pro intenzivní osvětlení kamer jsou dokola umístěné LED diody, které pracují v neviditelném spektru (pro každou kameru 900 LED diod). Díky kvalitním CCD kamerám s rozlišením 2048 pixelů dokáže program přesně vyhodnotit geometrii kola, ale dokonce změří velikost ráfku a tvar, rozliší barvu a stupeň znečištění. Systém je schopen pracovat s jakýmkoliv ráfkem a při zhoršených podmínkách, kdy například do dílny pronikají ostré světelné paprsky, není jeho měření ovlivněno těmito faktory.[10]

Postup měření je velmi jednoduchý a intuitivní, jelikož technik najede s vozidlem na zvedák a poté se řídí instrukcemi systému, zobrazenými na monitoru. Zařízení si pomocí CCD kamer a osvětlení LED diod odměří pozici každého kola a díky vyhodnocovacímu zařízení, umístěného v kole, vypočítá stereoskopické obrazy a určí prostorové umístění každého kola. Systém je doplněn integrovaným programem IRES, který nasnímané obrazy ráfků vyhodnotí a po zpracování se data zobrazí na monitoru. Technik může díky zabudovanému programu okamžitě po vyhodnocení vytisknout protokol s 3D zobrazením zákazníkovi.[10]



Obr. 12 Měření systémem BEISSBARTH a měřicí kamera s LED diody[10]

4.3.3 ATT/NUSBAUM

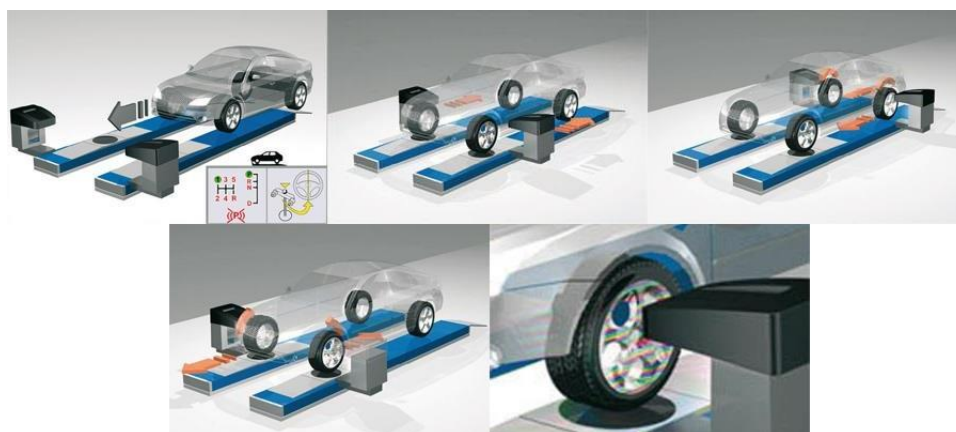
Další z metod bezdotykového měření geometrie podvozku vozidel ve spolupráci dvou společností ATT a Nussbaum. Tento systém měření používá například automobilka Porsche na konci výrobní linky pro finální kontrolu geometrie kol nových automobilů.

Zařízení se skládá z nůžkového zvedáku s integrovanými lineárními vodícími dráhami pro pohyb robotů po obou stranách vozidla. Roboti jsou vybaveni vysílacím a snímacím zařízením, tzv. systémem CCT (Colour Coded Triangulation). Tento systém pochází z lékařské technologie pro rozpoznávání lidských obličejů. Pomocí paprsku se promítá na kolo definovaný obraz, který tvoří velké množství barevných rovnoběžek a ty se v závislosti na pozici kola sbíhají nebo rozbíhají. Obraz snímá kamera z definovaného úhlu a přenáší data do počítače, kde se vyhodnocují a tvoří trojrozměrný model s přesnou pozicí kola a vypíší se hodnoty geometrie podvozku. Zvedák je navíc vybaven patentovaným systémem SST (Safety



Star Technology). Přesná poloha zvedáku je kontrolována čidly umístěnými ve zvedacím zařízení a při případné nesouměrnosti upraví výšku do ideální polohy. Díky tomuto systému je zvedák v dokonalé rovině a jakékoliv pozici a je zajištěno bezpečné a přesné měření.[11]

I zde je postup měření geometrie podvozku jednoduchý, kdy technik zajede vozidlem na zvedák a zadá do počítače informace o vozu. Podle databáze zařízení pozná, jaké má vozidlo rozměry. Na řadu přichází kompenzace házivosti posunem desek pod koly automobilu. Ty se pohybují vždy v opačném smyslu, nejprve pod pravým kolem dozadu a pod levým dopředu, poté naopak. Tím je systém schopen odměřit i vozidla s pohonem všech kol. Poté začne samotné měření. Nejprve roboti přeměří zadní kola, následuje opětovná kompenzace a pak roboti přejedou na přední nápravu a přeměří ji. Technik po dokončení práce robotů natočí kola do pravého a levého rejdu a tím je kontrola geometrie hotová. Počítač vše vyhodnotí a vypíše závěrečný protokol.[11]



Obr. 13 Postup měření systému ATT/NUSSBAUM[11]



5 DYNAMICKÉ MĚŘENÍ

K ideálnímu nastavení geometrie zavěšení kol vozidla je zapotřebí znát chování automobilu při jízdě, a tudíž měřit tyto parametry a jejich odchylky během jízdy. Konstruktéři poté mohou s těmito daty pracovat a přizpůsobit tak nastavení vozidla k daným účelům, od běžného silničního vozidla, přes terénní až po závodní automobily.

Systémy zabývající se měřením odklonu během jízdy jsou již sofistikované zařízení, která musí být dobře přizpůsobená na podmínky, které mohou nastat a nastávají během měření. Tyto zařízení se skládají z několika dílů v jeden celek, který musí být dostatečně tuhý, aby odolával vibracím pro správnost měření.

Systémy, které jsou již na trhu a zabývají se právě touto problematikou, rozeberu v následujících odstavcích. Jedná se o dvě zařízení firmy Kistler, a to zařízení Dynamic Camber Angle Measurment (DCA) a RV-4 Sensors (Wheel Vector Sensors) a jako poslední zařízení WheelWatch od firmy AICON.

5.1 KISTLER

Firma Kistler byla založena v roce 1959 jako Kistler Instrumente AG s cílem být celosvětovou špičkou pro prodej kompletních měřicích nástrojů, které zahrnovaly senzory, konektory, kabely a napájecí zesilovače. Od té doby se společnost stále rozrůstá a v současné době, se sídlem ve Winterthur ve Švýcarsku, zahrnuje 30 firem na území více jak 50 různých států a celosvětově zaměstnává přes 1300 lidí. Společnost se stala jednou z největších dodavatelů dynamických měřicích senzorů, které měří tlak, sílu, zrychlení a moment. Tyto přístroje se používají k měření a analýzám fyzikálních procesů, řízení průmyslových procesů a optimalizaci výrobků ve vývoji motorů a monitorování technologie vozidel, zpracování plastů, obrábění kovů, montážní a testovací techniky. K vývoji a výrobě senzorů patří také vývoj a výroba elektroniky a podpůrného softwaru.[12]

Společnost se dělí na tři základní odvětví:

- Automotive Research and Test (ART)
- Industrial Process Control (IPC)
- Sensor Technology (ST)

Odvětví automobilového výzkumu a testování (ART) zahrnuje mnoho sekcí, kde také nalezneme obor testování dynamiky vozidla a odolnosti. Právě tento obor se zabývá mimo jiné měřením odklonu kola během jízdy pomocí speciálního vybavení a k tomu vyvinutých senzorů a příslušenství, jelikož je nezbytné spolehlivé testování pro vývoj a technologii vozidel. Tento systém se nazývá DCA (Dynamic Camber Angle) Measurment a byl vyvinut firmou Corrsys-Datron Sensor-systeme, kterou v roce 2009 koupila společnost Kistler. Je součástí kompletního systému pro měření jízdních vlastností nebo může být použito samostatně.[12]



Obr. 14 Systém pro měření jízdních vlastností společnosti Kistler [13]

5.1.1 SYSTÉM DCA

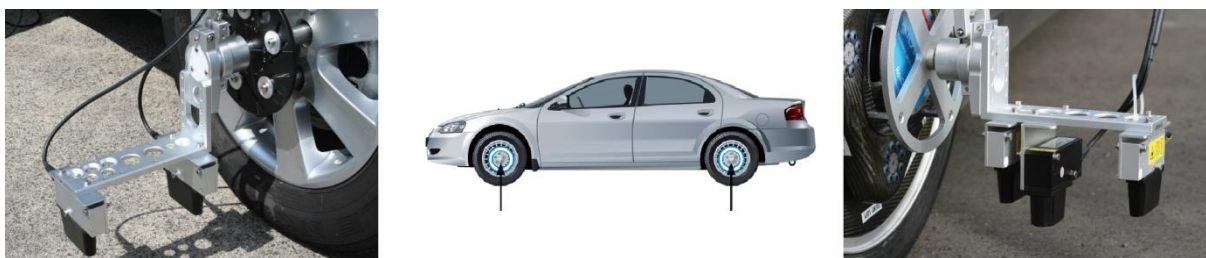
Hlavním parametrem, který tedy toto zařízení měří, je dynamický odklon kola během jízdy. Ten je důležitý pro účinné navržení konstrukce zavěšení vozidla a tím dosažení ideálních jízdních vlastností. Samozřejmě je to jeden z více parametrů, které jsou potřeba správně navrhnout, aby vozidlo jak při jízdě v přímém směru tak v zatáčkách mělo dobrou přilnavost a nebyly nadměrně opotřebovávány pneumatiky. [17]

Systém se skládá z několika částí:

- upevnění na kola
- stabilizační tyč
- držák senzorů
- senzory
- napájení a kabeláž

UPEVNĚNÍ NA KOLA

Zařízení DCA je vybaveno kruhovým kotoučem, který je potřeba správně zvolit pro určitou rozteč upevňovacích šroubů. Tento kruhový kotouč se poté upevňuje pomocí kleští přímo na šrouby kola. Jsou samozřejmě dané rozmezí roztečí šroubů, pro které jsou upevňovací kotouče dostupné a také je potřeba z nabídky vybrat velikosti upevňovacích kleští, které bývají standardně na výběr z rozměrů: 17, 19 a 21 mm, dále 14, 20, 22, 23, 24, 26, 27 a 30 mm. Jiný rozměr se dá objednat na vyžádání.[17]



Obr. 15 Upevnění na kolo a možnost kombinace s dalším zařízením[15]

Toto zařízení může být upevněno na přední i zadní kola, jak je ukázáno na obr. 15 a lze tedy měřit současně na obou nápravách úhly odklonů kol. Další výhodou tohoto systému je možnost kombinace s jiným zařízením pro měření odlišných veličin, jako například se systémem RoaDyn® S625 CFR WFT a senzorem SFII-P pro měření úhlu skluzu pneumatiky.

STABILIZAČNÍ TYČ

Důležitým prvkem, který zajišťuje, aby probíhalo měření správně, je stabilizační tyč. Ta kompenzuje pohyby kola vozidla při jízdě, kdy kolo pruží, natáčí se a odklání od svých rovin.

Tyč je spojena s držákem senzorů, který udržuje ve správné poloze a s karoserií vozidla pomocí přísavek, které nijak nepoškozují vozidlo, a přitom se dá použít tento systém uchycení na většinu vozidel.



Obr. 16 Stabilizační tyč - vlevo uchycení na vozidlo pomocí magnetu, vpravo pomocí přísavek[15]

DRŽÁK SENZORŮ

Pro měření senzory je nepostradatelné přesné a pevné uchycení těchto senzorů. K tomuto úkolu slouží speciální držák do tvaru L, který nese senzory a zastává ještě jednu důležitou



funkci a tou je možnost doladění výškové vzdálenosti od země po senzor, jelikož senzory pracují v určitém rozmezí, které je potřeba přesně dodržet.

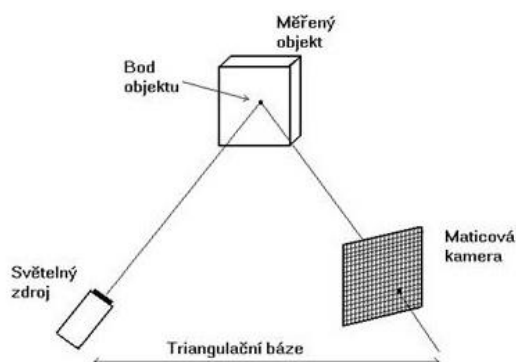
Držák se vyrábí z hliníku, jelikož je potřeba, aby vozidlo bylo co nejméně ovlivňováno navyšující hmotností těchto zařízení a prvky systému, které zvyšují hmotnost neodpružených hmot a tudíž i celkové chování nápravy vozidla. Přibližná hmotnost zařízení se senzory tohoto systému je 3,4 kg.



Obr. 17 Držák senzorů systému DCA[13]

SENZORY

Nabídka senzorů je velmi široká pro různé aplikace, ale pro měření odklonu kola během jízdy se využívá v systému DCA senzor HF. Jde o bezkontaktní laserový senzor pro měření výškové vzdálenosti. Tento senzor využívá princip optické triangulace, kde zdroj světla spolu se snímačem a osvětleným bodem na zkoumaném objektu tvoří tzv. triangulační trojúhelník. Viditelný červený laser je zaměřen na povrch, nejčastěji silnice. Tento úhel zdroje svírající s triangulační bází je neměnný. Odražený paprsek je směřovaný na lineární CCD pole uvnitř senzoru. Výsledná vzdálenost mezi senzorem a objektem je poté vypočítána z velikosti úhlu, který je určen proměnnou pozicí světelného bodu odraženého paprsku na CCD poli snímače a na základě znalosti triangulační báze.[13][14]



Obr. 18 Princip optické triangulace [14]

Při výběru tohoto senzoru je důležité vědět, v jaké výšce bude senzor pracovat. Řada HF senzorů nabízí možnost výběru ze tří senzorů, které se liší pracovním rozsahem a rozlišením. Další technické specifikace, společné pro senzory řady HF, jsou zobrazeny v Tab.1.

Tab. 1 Tabulka specifikace senzorů[13]

Specifikace senzorů		HF-250C	HF-500C	HF-750C
Měřicí rozsah	[mm]	100 ... 350	125 ... 625	150 ... 900
Rozlišení	[mm]	0,1	0,2	0,3
Linearita	[%]	±0,2	±0,2	±0,3
Vzorkovací frekvence	[kHz]	0,3 ... 8		
Zdroj světla	-	Laser		
Výkon laseru	[mV]	<5		
Vlnová délka	[nm]	660		
Velikost bodu (přibližně)	[mm]	1x2		

Výstup signálu

Analogový výstup	[V]	0 ... 10
------------------	-----	----------

Rozhraní

CAN (Motorola/Intel)	-	2.0B
RS-232C	-	yes

Získání výsledného úhlu odklonu kola se poté realizuje pomocí použití dvou HF senzorů stejného typu (například HF-500C), umístěných na držáku a porovnáním relativní změny výšky od povrchu vozovky.



Obr. 19 Bezkontaktní laserový senzor řady HF [13]

5.1.2 RV-4 SENSORS

Zařízení taktéž od firmy Kistler, které je schopné měřit pozici a orientaci kola vozidla a jeho změny. RV-4 Sensor využívá 5 vysoce přesných úhlových snímačů, které dokáží společně měřit orientaci v osách x, y, z, úhel natočení kol a také úhel odklonu kola. Všechny snímače jsou součástí zařízení, takže zde nejsou žádné externí úchyty, které by ovlivňovaly funkci snímačů. Celý systém je vyroben z kvalitních materiálů pro robustní design a je odolný vůči vodě, oleji či protimrznoucím směsím ostřikovačů.

Uchycení systému na kolo vozidla se realizuje pomocí dodávaného disku a kleštin pro spojení s kolem na jeho šrouby. Disk je spojen přímo s měřicím zařízením a ze strany karoserie se pro stabilizaci systému používá přísavného držáku, který je na kapotě vozidla.



Obr. 20 RV-4 Sensors a uchycení na vozidle pomocí přísavného zařízení na kapotě [13]

Jak již bylo zmíněno, toto zařízení dokáže měřit několik parametrů nápravy najednou. V Tab.2 jsou vypsány data tohoto zařízení pro maximální výchylky měřených os, úhlu natočení kol a úhlu odklonu kola, dále přesnost těchto hodnot, vzorkovací frekvence. Další důležité informace a technická data pro použití a následné vyhodnocování výsledků jsou v Tab.3.

Tab. 2 Specifikace zařízení RV-4 Sensors[13]

RV-4 Sensors specifikace

Měřicí rozsah	-	-
Osa X	[mm]	±150
Osa Y	[mm]	±150
Osa Z	[mm]	±200
Úhel odklonu kola	[°]	±10
Úhel natočení kola	[°]	±45
Přesnost měření	-	-
Osa X	[mm]	±1
Osa Y	[mm]	±0,7
Osa Z	[mm]	±1
Úhel odklonu kola	[°]	±0,2
Úhel natočení kola	[°]	±0,1
Vzorkovací frekvence	[Hz]	125



Tab. 3 Technická data systému RV-4 Sensors[13]

Technická data

Výstup signálu	-	-
Osy X, Y, Z	[V]	±10
Základní nastavení	[mV/mm]	60
Úhel odklonu kola	[V]	±10
Základní nastavení	[mV/°]	1000
Úhel natočení kola	[V]	±10
Základní nastavení	[mV/°]	200

Rozhraní

CAN (Motorola/Intel)	-	2.0B
USB (Full Speed)	-	2.0
RS-232C	-	yes

Hmotnost zařízení

1 x senzor + 1 x upevnění na kolo + 4-bodový přísavný držák	[kg]	12
Hmotnost neodpružených hmot ke kolu (přibližně)	[kg]	2,5

5.2 AICON 3D SYSTEMS

Jedná se o společnost, která se zabývá vývojem a výrobou široké škály 3D metrologických systémů a jejich kompletním dodavatelstvím. Byla založena v roce 1990 a sídlí ve městě Braunschweig, v jeho technologickém parku. V roce 2012 se ke společnosti přidala firma Breuckmann, která poskytuje 3D optické systémy pro bezkontaktní měření, digitalizaci a kontrolu. Zaměření těchto optických systémů je v oblasti technického a průmyslového inženýrství, ale také jsou tyto systémové řešení použity při měření lidského těla, v oblasti umění a kultury. Společnost AICON 3D Systems spolupracuje s mnohými výrobci automobilů, dodavateli v leteckém průmyslu, v oblasti stavby lodí a obnovitelných zdrojů energie.[18]

Základní rozdělení portfolia společnosti:

- MoveInspect Technology
- TubeInspect Products
- Breuckmann Scanner

Hlavní oblastí našeho zájmu je sekce MoveInspect Technology, která nabízí širokou škálu přenosných souřadnicových měřicích systémů, které pracují s vysokorychlostní digitální kamerou pro sběr dat se vzorkovací frekvencí až 1000 Hz na dobu neurčitou. Díky těmto měřicím systémům je možné měřit díly od několika milimetrů až do několika metrů ve



velikosti. Jelikož jsou všechny komponenty přenosné, můžeme jednoduše měřit přímo na místě testování.

MoveInspect Technology systémy:

- **WheelWatch** - měření parametrů pohybu kol vozidla
- EngineWatch - měření pohybu motoru vozidla
- DPA - měření ruční kamerou signalizačních bodů
- MoveInspect XR - měření a snímání větších objektů
- MoveInspect HR - měření flexibilním souřadnicovým zařízením
- MoveInspect HF - měření rychlých pohybů objektů
- MoveInspect DPS - měření 3D figuríny
- ProCam - měření před a po nárazových zkoušek

5.2.1 WHEELWATCH

WheelWatch je zařízení, jak již sám název napovídá, pro sledování kola vozidla a zachycování jeho změn během jízdy. Sleduje několik parametrů najednou, jako jsou úhel odklonu kola, úhel natočení kol, pružení kola a tlumičů, vůle mezi pneumatikou a karoserií a další.

Hlavní výhodou tohoto zařízení je jeho optický měřicí systém, který není pevně spojen s kolem vozidla, ale sleduje jej pomocí vysokorychlostní digitální kamery.

Celý systém se skládá z několika komponent, které umožňují jednoduchou instalaci na většinu osobních automobilů. Tyto komponenty jsou:

- měřicí disk na kolo (Wheel Adapter)
- nosič kamery uchycený na kapotě
- kamera

MĚŘICÍ DISK NA KOLO (WHEEL ADAPTER)

Pro nízkou hmotnost a k zamezení negativního ovlivňování nápravy vozidla je disk vyrobený z uhlíkových vláken. Při jeho průměru, který činí 400 mm (16"), je docílena výsledná hmotnost disku menší než 500 gramů. Instalace disku je zajištěna ještě druhým menším diskem, který se přimontuje přímo na šrouby kol a poté je na něj přišroubován čtyřmi šrouby hlavní disk.[19]

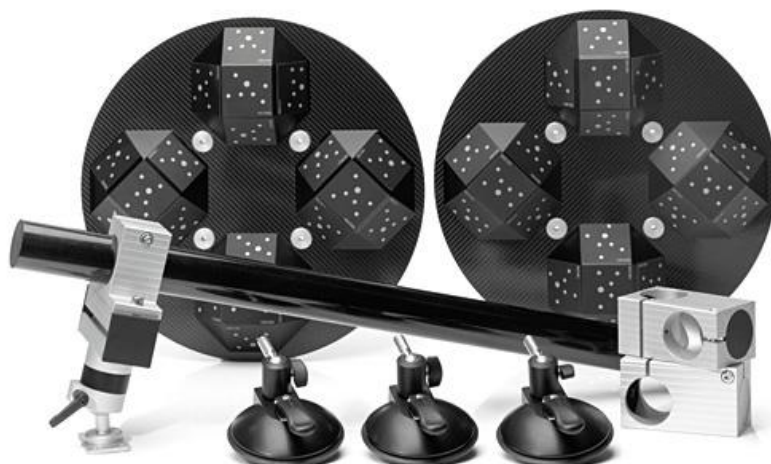
Z hlavního disku vystupují 4 výčnělky pro zachycování aktuální pozice, na kterých jsou umístěny reflexní body pro snímání vysokorychlostní kamerou. Tyto reflexní body jsou specificky umístěny a porovnávány s pevnými (referenčními) body na karoserii vozidla.

NOSIČ KAMERY UCHYCENÝ NA KAPOTĚ

V tomto případě se jedná o systém uchycení, který nespojuje měřicí zařízení s kolem vozidla. Tím se držák pro uchycení kamery podstatně zjednodušil a tvoří jej pouze robustní tyč, která



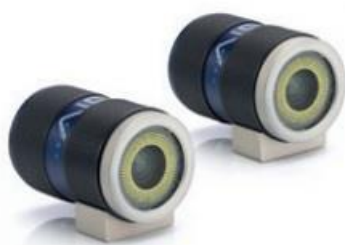
je odolná vůči ohybům a také dostatečně absorbuje nežádoucí vibrace, přísavky na kapotu vozidla a hliníkové úchyty, kterými se tyč upevní na přísavky do stabilizované polohy, ale také na konci tyče drží kameru v nastaveném sklonu pro snímání reflexních bodů na disku kola a na karoserii.



Obr. 21 AICON Wheel Adapter (disk na kola) s reflexními body a sada uchycení na kapotu[19]

KAMERA

Jelikož se zde snímají reflexní body umístěny na kole a referenční body na karoserii, je zapotřebí použít kameru. Pro jedno kolo se využívá jedné kamery. Jde o vysokorychlostní digitální kameru CMOS, která má v sobě integrovaný vysoce výkonný blesk a vyhodnocující FPGA obrazový procesor. Díky tomu může toto zařízení zaznamenat vysoký počet reflexních bodů v dynamických podmínkách bez časového omezení.



Obr. 22 Vysokorychlostní digitální kamera CMOS [20]

Kamera je schopna měřit všech 6 stupňů volnosti kola, jeho odklon vůči vozovce, natočení a vůle kol, absolutní hodnotu polohy kola při různých jízdních manévrech, stlačení odpružení



nápravy. Tyto hodnoty je kamera schopná měřit a vyhodnocovat až do rychlosti 250 km/h. Poloha kamery vzhledem k vozidlu nemusí být pevná a stabilní, jelikož stále přepočítává svoji pozici díky referenčním bodům na blatníku vozidla, a tím je velmi odolná vůči vibracím a dalším negativním ovlivňováním při měření. Pouze je důležité dodržení doporučené vzdálenosti kamery od kola, který je zhruba 0,5 m, aby ve výhledu kamery byl měřicí disk a také byly viditelné referenční body na karoserii. V Tab.4 jsou zobrazeny hlavní parametry kamery a celého systému.[20]

Tab. 4 Specifikace kamery a systému WheelWatch[20]

Specifikace kamery		Vysokorychlostní CMOS kamera
Rozlišení	[pixels]	1280 x 1024
Max. vzorkovací frekvence	[Hz]	500
Rychlost závěrky	[μ s]	10 ... 100
Čočka (ohnisková vzdálenost)	[mm]	10
Blesk (prstencové LED světlo)	[μ s]	10 ... 100
Přenos dat		TCP/IP
Napájecí zdroj	[V]	12

Specifikace systému		
Měřený objem	[mm]	1000 x 1000 x 500
Poziční přesnost X, Y, Z	[mm]	$\pm 0,1$
Rozsah měření úhlu odklonu	[°]	± 45
Úhlová přesnost	[°]	$\pm 0,015$
Vzdálenost kamery od disku (přibližně)	[m]	0,5

Z tabulky je patrné, že měření úhlu odklonu kola je velmi přesné a systém i pro ostatní parametry měření pracuje s vysoce přesnými hodnotami. Spouštění a ukončení měřicího systému je možné přímo z kabiny vozidla na pokyn posádky.



Obr. 23 AICON WheelWatch při montáži a měření během jízdy [21]



6 PŘÍPRAVA PRO MĚŘENÍ

Pro samotné měření bylo nejprve potřeba promyslet systém měření, který bude využit v praktické části vzhledem k možnostem vybavení ústavu a schopnosti výroby dodatečných součástí pro získání adekvátních dat a jejich následnému vyhodnocení. Vybraný systém byl od firmy Corrsys-Datron, protože pro měření budou využity prvky uchycení, které má ústav školy k dispozici a dodatečné díly se vyrobí. K tomu bude dále využit inerciální a navigační systém a poté všechny signály budou zpracovány v měřicí ústředně.

6.1 SENZORY

Senzory byly využity dva druhy od dvou společností, které byly Corrsys-Datron a Texys. Od prvně jmenované to byly dva senzory HT-250 a od druhé tři senzory Texense RHS. Jedná se o výškové senzory, které pracují na bázi laseru a druhý zmiňovaný na bázi pulsního bodového zdroje LED. V Tab.5 jsou vypsaná hlavní technická data obou senzorů z katalogových manuálů pro porovnání, např. měřicí rozsah, vzorkovací frekvence, výstupní signál, aj.

Tab. 5 Technická data výškových senzorů HT-250 a Texense RHS

Technická data senzorů		HT-250	Texense RHS
Měřicí rozsah	[mm]	80 ... 330	50 ... 400
Rozlišení	[mm]	0,1	0,1 ... 1
Linearita		$\leq \pm 0,2 \%$	$\pm 0,6 ... \pm 0,3 \text{ mm}$
Vzorkovací frekvence	[Hz]	6500	333
Zdroj světla		Laser	pulsní bodový LED
Vlnová délka zdroje	[nm]	660	660
Typ paprsku		bod	kruh
Velikost bodu/ kruhu (průměr)	[mm]	1x2	8
Napájení	[V]	12	12
	[mA]	90	80
Analogový výstup	[V]	0 ... 10	0 ... 5
Provozní teplota	[°C]	-10 ... 50	0 ... 50
Třída ochrany		IP 65	IP 67

6.2 INERCIÁLNÍ A NAVIGAČNÍ SYSTÉM

Pro zachycení zrychlení ve všech osách a polohy při jízdě byl využit inerciální a navigační systém. Jednalo se o typ RT3002 od firmy Oxford Technical Solution. Uvnitř kompaktní jednotky se nacházejí tři úhlové senzory (gyroskop), tři akcelerometry a GPS přijímač. Všechny výstupy jsou vypočítávány v reálném čase a to s vysokou vzorkovací frekvencí 100 Hz. Pro připojení slouží kabel CANbus, RS232 nebo Ethernet.[22]



Obr. 24 Inerciální a navigační systém RT3002 [22]

Signály z GPS modu budou následně využity pro porovnání změny odklonu kola v různých jízdních situacích, jak se mění zrychlení vozu ve všech směrech, hlavně příčné zrychlení vozidla při průjezdu zatáčkou.

6.3 MĚŘICÍ ÚSTŘEDNA

Měřicí ústředna, která bude sbírat data od všech senzorů a následně vyhodnocovat, je typ Datalogger-cDAQ vytvořený na základě NI CompactDAQ. Uvnitř tohoto zařízení je hlavní výpočetní jednotka cDAQ-9139, která je osazena dvou-jádrovým procesorem Intel Core i7 o frekvenci 1,33 GHz, 32 GB vnitřní paměti a 2 GB DDR3 800 MHz paměti RAM. Tato jednotka je schopná pojmout až 50 měnitelných I/O modulů (vstup/výstup) a připojení je možné několika způsoby (4x vysoce rychlostní USB, 2x Gigabit Ethernet, 2x sériový port a 1x MXI-Express port).[23]

V našem případě jsme využili I/O modulů NI9219 a NI9862. První jmenovaný je modul pro analogový vstup od senzorů a druhý pro vstup od GPS jednotky přes CANbus kabel.[24][25]



Obr. 25 Vnitřní systém měřicí ústředny (výpočetní jednotka cDAQ-9139 a dva přídavné moduly NI9219 a NI9862[23][24][25])

6.4 UCHYCENÍ PRO SENZORY

K uchycení senzorů bylo využito zařízení složené z dílů, jež byly dostupné na ústavu školy a vyrobených prvků. Návrh nových dílů by se měl vyznačovat dobrou smontovatelností s dostupným zařízením a možností variabilního umístění několika senzorů najednou a jejich možné poziční kombinace. Pro schopnost měření na různých typech vozidel je také potřeba



myslet na výškově nastavitelný držák, kdy senzory mají od výrobce doporučenou počáteční výšku, anebo také výpočtem z měřicího rozsahu senzor umístit do středové hladiny pro schopnost měřit v obou směrech s dostatečným rozsahem.

6.4.1 ZAŘÍZENÍ DOSTUPNÉ NA ÚSTAVU

Jedná se o součástky, které celý systém upevňují na kolo vozidla a zabraňují díky spojením s karoserií otáčivému pohybu dílu, na který se poté přišroubuje vyrobený prvek, který ponese senzory.

Součástí jsou kleštiny, které se přímo namontují na matice šroubů kola, dále disk, jež vystředí díl, na který se umístí vyrobený prvek, stabilizační tyč a sada přísavek na karoserii vozidla k úplnému zajištění a pro zabránění rotačního pohybu.



Obr. 26 Zařízení dostupné na ústavu

6.4.2 VÝROBA ZBYLÝCH SOUČÁSTÍ

Ke kompletnímu systému pro měření bylo potřeba vyrobit několik součástek. Hlavním prvkem byl držák ve tvaru „L“ a dále pomocné díly pro uchycení senzorů.

Z rovného pásu plechu tloušťky 5 mm se odstříhly dva pásy, které na šířku měřily 70 mm. Tyto pásy se navařily pod úhlem 90 ° a zarovnaly, aby výsledný „L“ kus měřil 100 x 200 mm. Pro výrobu pomocných dílů k uchycení senzorů jsme využili dutý obdélníkový profil o rozměrech 40 x 60 mm. Úhlopříčně byl rozříznut, kdy jsme dostali dva malé „L“ kusy, které byly následně opracovány a zabroušeny. Tím jsme měli přichystány všechny díly k následnému kroku a tím bylo návrh a vyvrtávání všech děr.



Obr. 27 Výroba součástek pro uchycení senzorů

Nejprve se musely přesně odměřit vzdálenosti děr na dodaném prvku, ke kterému poté měl být přimontován hlavní držák 4 šrouby. Vzhledem k možnosti výškového nastavení bylo na držáku navrženo a vyvrtáno několik děr, které umožňují uchycení ve třech variantách, kdy od spodní varianty po horní je rozdíl 36 mm. Pokud by se měřilo na kolech, kde horní varianta by byla stále blízko vozovky a znemožňovala tak správnou funkci senzorů, držák by se poté otočil o 180 ° a tím nastanou další tři výškové varianty. Tím dostaneme celkový rozdíl hraničních variant 139 mm.

Následoval návrh uchycení senzorů. Také zde bylo navrženo několik možností kombinace uchycení, kdy pro měření odklonu kola je potřeba dvou výškových snímačů a případně místo pro další senzory. Senzory HT-250 mají uchycení z boku a vývod pro napojení kabelu vrchem, proto návrh počítal s uchycením na malý „L“ úchyt, kde senzor bude umístěn z venkovní části, aby vývod kabelu nezasahoval do uchycení. Větší díl se ale již neobešel bez vyvrtání děr pro kabel senzoru. Bylo docíleno uchycení až tří senzorů typu HT-250 v několika kombinacích a dalším osazením tří senzorů RHS. Výkresy vyrobených součástí v příloze.



Obr. 28 Postup výroby hlavního dílu uchycení

6.5 AUTOMOBIL

Vozidlo, na kterém následné měření probíhalo, bylo od amerického výrobce Ford. Jednalo se o typ Ford Focus ve variante combi. Rok výroby testovaného automobilu je 2007 a řadí se do skupiny tzv. MKII. Pohonná jednotka je 1.6 Duratec Ti-VCR 16V (115 Hp), benzinový řadový čtyřválec o objemu 1596 cm³. Tento vůz je vybaven zadním nezávislým zavěšením Control blade, kdy se kola vzájemně neovlivňují, ale hlavně Ford s tímto systémem přišel kvůli oddělení komponentů tlumení a pružení. Jsou tedy namontovány odděleně a velkou výhodou je díky tomu úspora místa, kdy do prostoru kufru nevedou komponenty ze zadní nápravy a tím jej nezmenšují o boční výstupy, které známe z mnoha jiných vozidel. Vozidlo bylo obuto na zimních pneumatikách velikosti 195/65, disky kol R15.



Obr. 29 Zadní zavěšení Control blade vozidla Ford Focus combi MKII.

6.6 MÍSTO MĚŘENÍ

Dalším důležitým prvkem k úspěšnému měření bylo nalézt vhodné místo, kde by se daly provádět různé jízdní manévry. U místa byl kladen důraz hlavně na bezpečnost, kdy bylo třeba zajistit volnou dráhu bez nejrušnějších narušitelů, dále také aby bylo dostatečně



prostorné pro manévry v různých jízdních rychlostech a kvalita povrchu. Po zvážení požadavků a vybrání několika možných míst, byla tato místa prohlédnuta a vybráno jedno, které velmi vyhovovalo zmíněným požadavkům. Jednalo se o přilehlé parkoviště hypermarketu Globus v Brně v Ivanovicích, kde jsou dvě parkoviště. Z těchto parkovišť je spodní méně využívané a je zde odlehlý ovál s ideálními parametry pro jízdní manévry v přímém směru či průjezdy do zatáčky (na mapě označeno červeně).



Obr. 30 Pohled na místo měření z Google Maps [26]

6.7 DODATEČNÉ POMŮCKY

K uskutečnění měření byly ještě potřeba nejrůznější nástroje, jako jsou:

- záložní baterie
- matice na šrouby kola na klíč velikosti 17 mm
- silná lepicí páska
- oboustranná lepicí páska
- silný provázek
- vodováha
- vysouvací metr

7 MĚŘENÍ ODKLONU KOLA BĚHEM JÍZDY

Před samotným měřením, kdy již byly všechny komponenty uchycení, senzory, kabeláž a měřicí ústředna připraveny, bylo nutné zvolit souřadný systém vozidla, jelikož od něj se budou odvíjet kladné a záporné hodnoty všech naměřených veličin.

Poté se již mohl systém osadit na vozidlo a otestovat. Vybralo se měřené kolo, kterým bylo, při pohledu ve směru osy X, levé zadní kolo, kvůli lepšímu uchycení systému na karoserii a také nevytáčením kola při jízdě do zatáčky a tím způsobené síly v uchycení.

7.1 SOUŘADNÝ SYSTÉM VOZIDLA

Zvolení souřadného systému vozidla bylo důležitým krokem ke správnému měření všech veličin, jelikož tyto veličiny jsou mezi sebou provázány a je nutné dodržet řádné orientace kladných os pro kombinace těchto veličin. Vzhledem k použití jednotky inerciálního a navigačního systému RT3002, která má vlastní souřadnicový systém, byl této jednotce přizpůsoben souřadnicový systém vozidla a směry všech kladných os se tedy shodovaly. Na obr.31 je zvolený souřadnicový systém vozidla, který zobrazuje směry všech kladných os. Kladná osa X směřuje vpřed a leží v podélné rovině souměrnosti vozidla, kladná osa Y směřuje vpravo od řidiče a kladná osa Z směřuje dolů.



Obr. 31 Zvolený souřadnicový systém vozidla

7.2 NÁZVOSLOVÍ MĚŘENÝCH VELIČIN



Jelikož senzory budou měřit pouze výškové hodnoty, je potřeba nějakým způsobem následně přepočítat hlavní parametry, které budou dále využity pro práci a vyhodnocení. Těmito parametry jsou:

- úhel naklopení kola (Inclination angle)
- úhel klopení vozidla (Vehicle roll angle)
- úhel odklonu kola (Camber angle)

7.2.1 ÚHEL NAKLOPENÍ KOLA

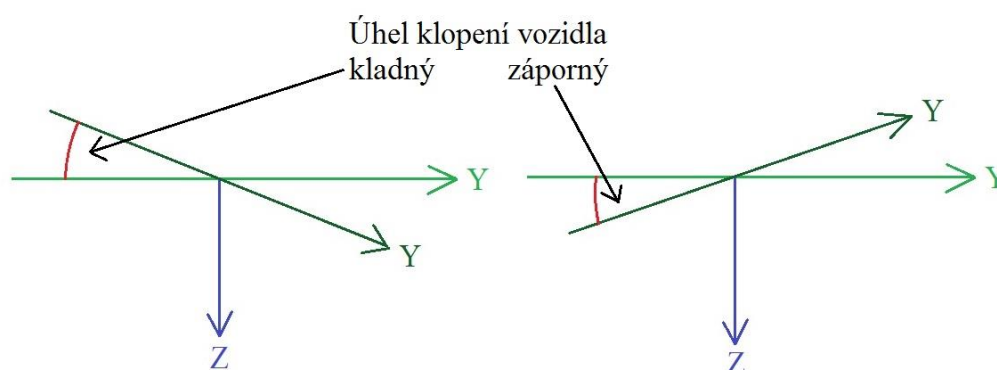
Úhel odklonění střední roviny kola od kolmice k vozovce (ČSN 30 0034).



Obr. 32 Znáznornění úhlu naklopení kola vůči vozovce ve směru osy X
(osa Y - rovina vozovky, osa Z - kolmice k vozovce)

7.2.2 ÚHEL KLOPENÍ VOZIDLA

Úhel mezi osou Y vozidla a rovinou vozovky (ČSN 30 0034).



Obr. 33 Znáznornění úhlu klopení vozidla ve směru osy X (světle zelená osa Y - rovina vozovky, tmavě zelená osa Y - osa vozidla)

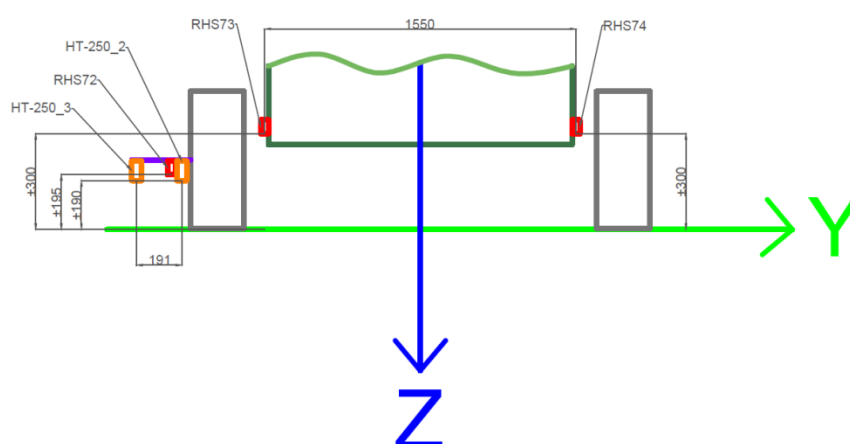
7.2.3 ÚHEL ODKLONU KOLA

Sklon střední roviny kola vůči ose Z vozidla (ČSN 30 0034).

Při znalosti úhlu naklopení kola a úhlu klopení vozidla můžeme následně porovnáním vyhodnotit úhel odklonu kola vůči karoserii.

7.3 MONTÁŽ ZAŘÍZENÍ NA VOZIDLO

Osazování systému na vozidlo probíhalo v areálu VUT FSI. Na obr. 34 jsou schématicky zobrazeny pozice všech senzorů, vzdálenosti mezi senzory stejného druhu a přibližné výškové vzdálenosti od vozovky [mm].



Obr. 34 Schématické zobrazení všech výškových senzorů (pohled zezadu vozidla ve směru osy X)

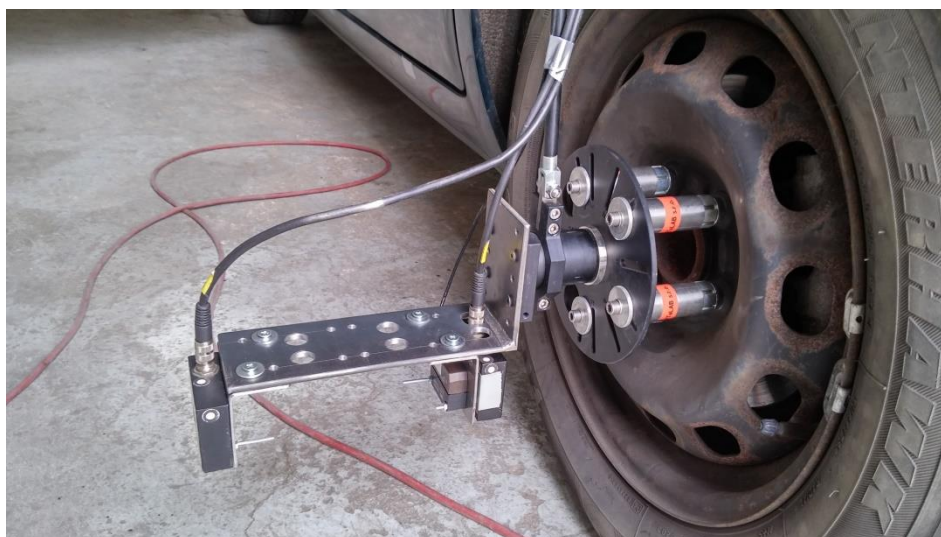
Nejprve bylo potřeba připravit vozidlo pro montáž kleštín. Kleštiny se uchycují na matice šroubů kola o velikosti klíče

17 mm. Na vozidle jsou originální matice velikosti 19 mm, proto bylo potřeba zajistit náhradní na daný rozměr kleštín a na velikost šroubů kola M12. Po uchycení kleštín následovala montáž rotačního disku spojeného se stabilizační tyčí a přísavkami. Rotační disk se vystředil díky pěti šroubům na kleštínách a přísavky zajistily kolmou pozici stabilizační tyče vůči vozovce při pohledu ve směru kladné osy Y.



Obr. 35 Montáž systému uchycení na kolo vozidla

Následovala příprava uchycení senzorů na držák. Jak bylo rozhodnuto, na držáku měly být umístěny dva výškové snímače HT-250 a jeden snímač Texense RHS. Tato kombinace, jelikož senzory HT-250 budou hlavními měřicími senzory a snímač RHS bude kontrolní. Na pomocná menší „L“ prvky se přišroubovaly senzory, na jeden z jedné strany HT-250 a zevnitř RHS, na druhém samostatný druhý snímač HT-250. Při uchycení na hlavní držák byla vzdálenost senzorů HT-250 od sebe rovných 191 mm. Takto přichystaný držák se senzory bylo poté možné uchytit čtyřmi šrouby na čtvercový díl připraveného zařízení na kole.



Obr. 36 Držák s uchycenými senzory pro měření odklonu kola během jízdy

Po uchycení systému, pro měření odklonu kola byly uchyceny další dva snímače přímo na karoserii vozidla pro zjištění jejího naklápění. Těmito senzory byly dva zbývající Texense RHS. Jejich pozice byla odměřena 400 mm od předního kraje zadních dveří po obou stranách automobilu a využívaly spodní linii prahů pro uchycení. Vodováhou byla doladěna kolmá

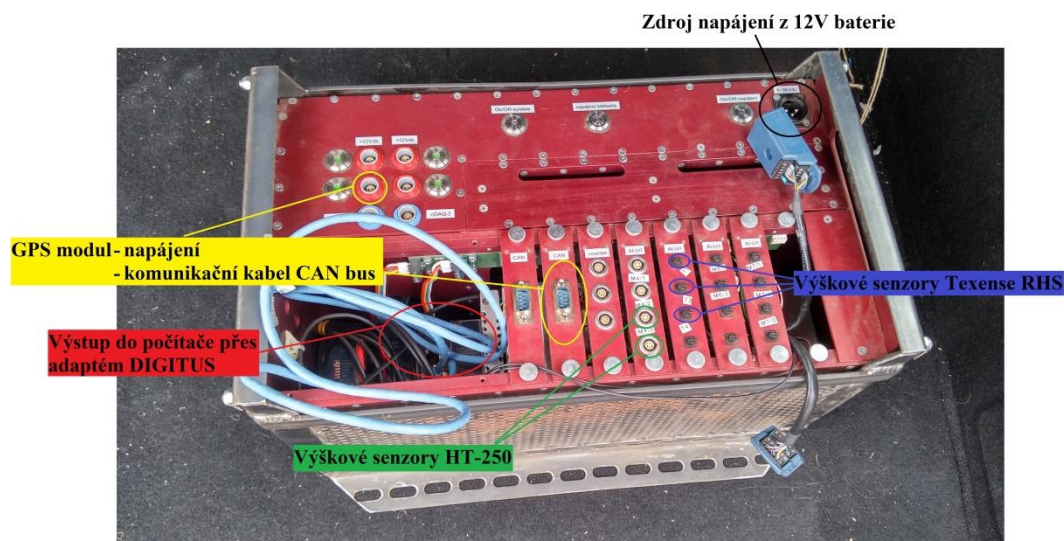
poloha senzorů vzhledem k zemi a následně silnou lepicí páskou zajištěna tato pozice. Vzdálenost senzorů napříč vozidlem od sebe činila 1550 mm.

Posledním senzorem, který se umisťoval, byl inerciální a navigační systém (GPS modul). Jeho pozice byla uvnitř vozu v zavazadlovém prostoru, kde se také umístila vyhodnocující stanice. Nejprve bylo potřeba stanici usadit a zajistit proti posunům či jakémukoliv pohybu. Využit zde byl silný provázek a pozice za nesklopenou sedačkou. Poté se ke stanici díky oboustranné lepicí pásce přichytil GPS modul, kde byla důležitá velmi stabilní pozice bez možnosti pohybů všemi směry, které by znehodnocovaly signály a výsledná data zrychlení. K GPS modulu se ještě připojovala kabelem na střechu vozidla anténa, která se přichytila magnetem do přesné pozice nad GPS modul, a odměřila se výšková vzdálenost mezi těmito komponenty, která se následně zadávala do nastavení. Tato hodnota byla 900 mm.

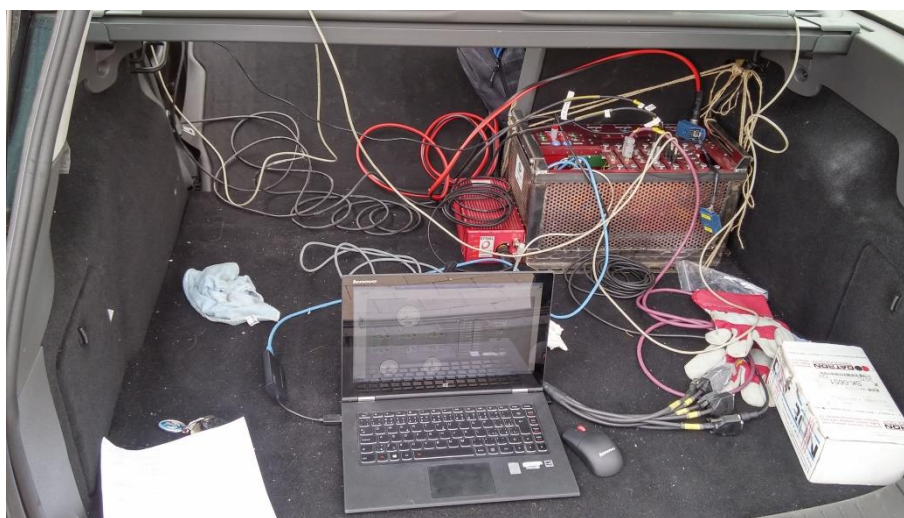


Obr. 37 Přichystané venkovní senzory (3 na držáku, po 1 pod zadními dveřmi na každé straně, anténa pro inerciální a navigační systém na střeše vozidla)

Po umístění všech senzorů a uchycení stanice s GPS modulem bylo možné propojit všechny systémy kabeláží a zjistit jejich správnou funkci otestováním. Kabeláž ze všech pěti senzorů vedla přímo do vyhodnocovací stanice, GPS modul byl propojen hlavním kabelem, který měl několik výstupů pro připojení. Zajištěno muselo být jeho napájení kabelem a připojení přes CAN bus kabel se stanicí a propojení s anténou na střeše vozidla. Pro uvedení kompletního měřicího systému do provozu byla vyhodnocující stanice napojena na 12V zdroj, který dodávala záložní baterie umístěná za sedadlem spolujezdce.

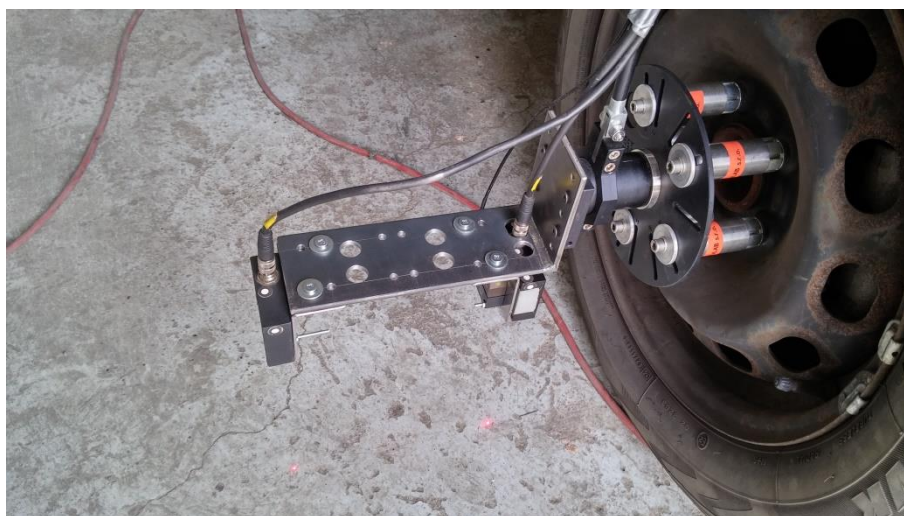


Obr. 38 Napojení kabelů do měřicí ústředny



Obr. 39 Pohled do zavazadlového prostoru a pozice umístění měřicí ústředny a GPS modulu

Před výjezdem na měření se ještě musel celý systém otestovat, jestli senzory pracují správně a mají dostatečně volný měřicí rozsah. Otestování senzorů proběhlo při napojeném počítači, kdy v programu LabVIEW bylo možné sledovat aktuální data ze snímačů. Čistým papírem se poté zespolu měnila výška laseru senzorů. Následovala testovací jízda v areálu VUT FSI a kontrola záznamu dat.



Obr. 40 Viditelný test laseru senzorů HT-250

7.4 SAMOTNÉ MĚŘENÍ

Jak již bylo zmíněno, měření proběhlo na parkovišti u Globusu v Ivanovicích, dne 30. 4. 2015. Teploměr ukazoval 13 °C, obloha zatažená.

Před odjezdem od garáží VUT FSI se kvůli bezpečnosti muselo odmontovat všechno externí zařízení, a proto po příjezdu na místo měření bylo zase potřeba vše správně nasadit. Po montáži znovu proběhl rychlý test všech senzorů, zkouška záznamu dat a následná debata, jak by asi mělo probíhat měření a jízdní manévry.

Prvním výjezd pro měření byl spíše otestováním techniky, zdali v různých situacích pracuje spolehlivě a neuvolní se žádné mechanické spojení. Po klidnějším objíždění okruhu po dobu několika minut bylo měření zastaveno, proběhla kontrola naměřených dat a ujištění, že díly jsou uchyceny pevně na svých místech.

Po prohlédnutí prvního datového záznamu bylo jasné vidět, že jízda musí být extrémnější, tzv. na hraně, především průjezdy zatáček. Při pomalém průjezdu se karoserie vozidla tak zásadně nenaklání. Dalo by se říci skoro vůbec, a tudíž i měřený odklon kola se nebude nijak výrazně měnit.

Instrukce pro další jízdu byly tedy zrychlení průjezdu zatáčkami k dosažení vyššího bočního přetížení. Po projetí několika zatáček byla jízda přerušena z důvodu uvolnění přísavek ke karoserii. Závadou bylo uchycení přísavek příliš vysoko, kde je již horní pružina dosti stlačena a vznikaly zde síly, které působily v negativním směru na přísavky při vyšším zatížení průjezdem zatáčky. Incident se obešel bez jakéhokoliv poškození zařízení díky přichystanému bezpečnostnímu uchycení dvěma provázky z obou stran. Provedla se tedy úprava uchycení přísavek, které se připevnilo o něco níže na výstupek blatníku.



Obr. 41 Změna uchycení přísavek, vlevo před uvolněním, vpravo po uvolnění

Následující jízda byla bohužel také ještě ovlivněna chybou. Nešlo zde již o mechanickou závadu, nýbrž o chybu v ukládání dat softwaru. Po jízdě trvající několik minut a připojení notebooku, se zjistilo, že záznam dat trval přesně 30 s a poté již systém data neukládal.

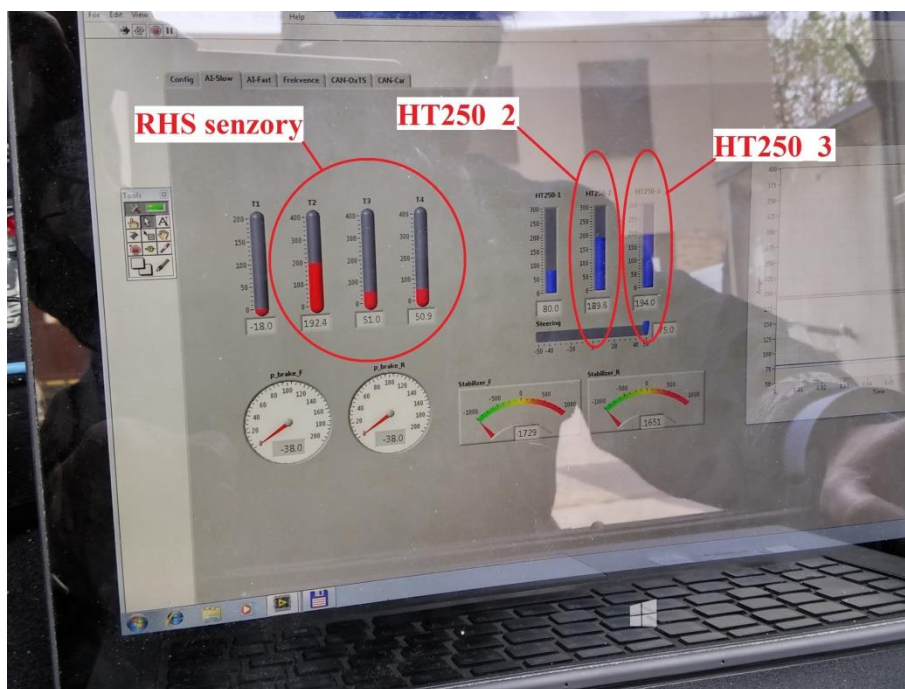
V další jízdě nakonec technika fungovala správně. V pořadí 4. jízda byla o něco kratší, trvala 256 s, jelikož jsme se ještě obávali o ztrátu dat, ale vše bylo zaznamenáno a také při prvním pohledu na výsledky odpovídaly představám. Poté se zajely ještě dvě měřené jízdy, při kterých také nedošlo k žádným problémům. Poslední jízdy měly trvání 379 s a 380 s.



8 GRAFICKÝ VÝSTUP

Software, který měl na starosti záznam dat, byl program LabVIEW. Tento program se nakonfiguroval tak, aby přímo zobrazoval výšková data, která šla z měřicí ústředny, umístěné v zavazadlovém prostoru.

Do ústředny přicházely signály od senzorů, která tato analogová data ve voltech převedla vnitřním systémem již na výškové hodnoty a pomocí LabVIEW bylo možné tyto hodnoty od všech senzorů zobrazit a zaznamenat. Na obr. 42 je pohled na nakonfigurované prostředí softwaru LabVIEW, kde jsou vyznačeny zobrazované hodnoty senzorů HT-250. Sensory RHS na karoserii v tu chvíli nebyly připevněné, pouze senzor RHS72. Jeho hodnoty již byly pozorovatelné v ukazateli T2.



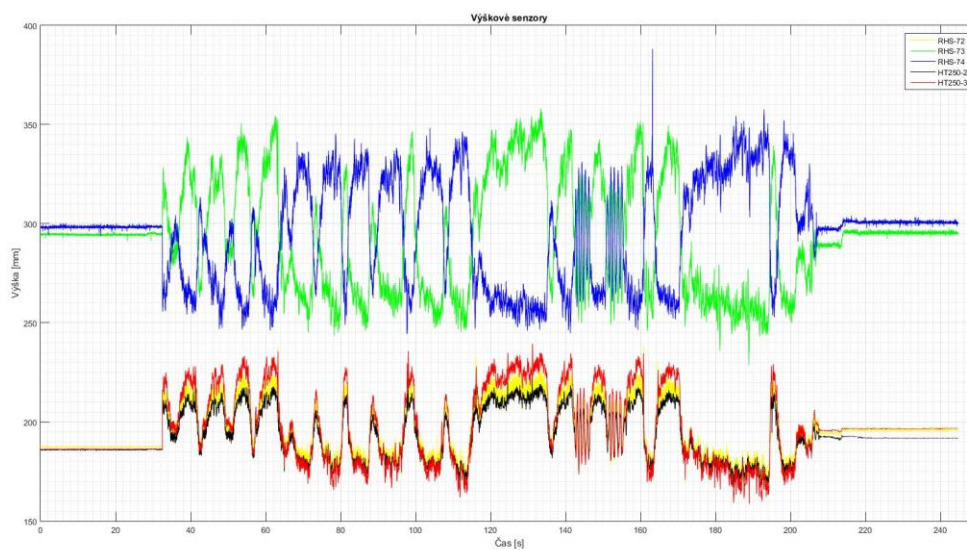
Obr. 42 Prostředí softwaru LabVIEW s ukazateli hodnot senzorů

Data se z programu LabVIEW exportovala do souborů s koncovkou .mat (soubor matlabu).

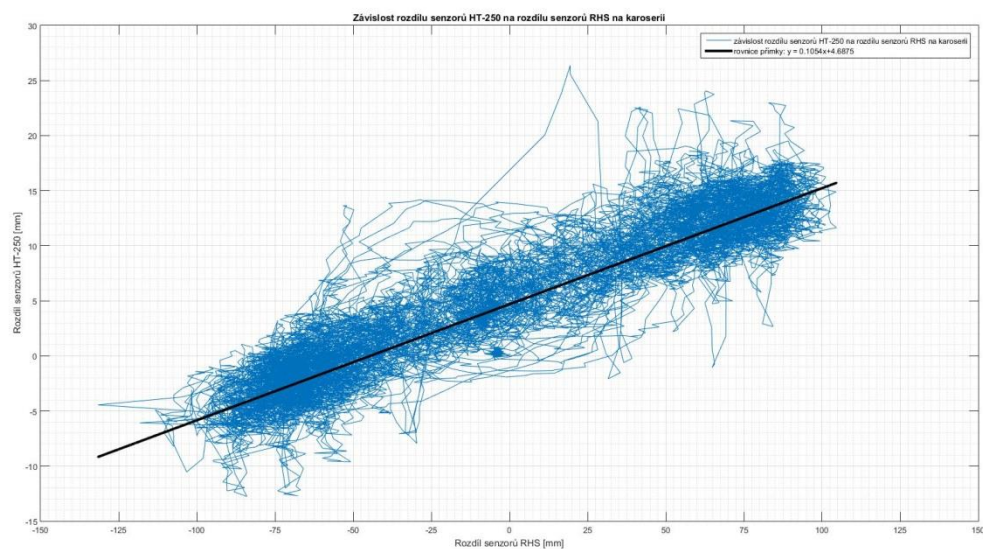
Vyexportovaná data byla poté nahrána do programu MATLAB, ve kterém jsme úpravou a naprogramováním získali grafické závislosti parametrů.



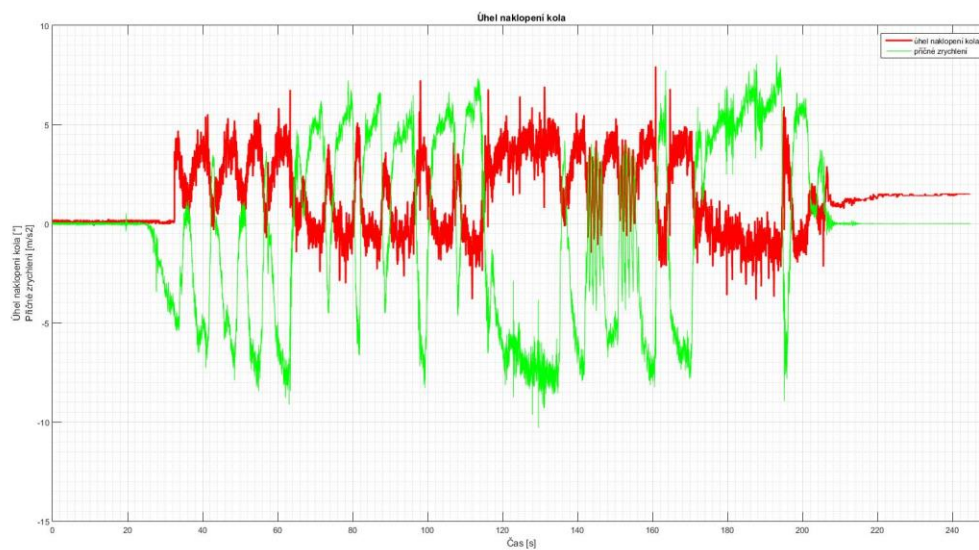
8.2 MĚŘENÍ Č. 4



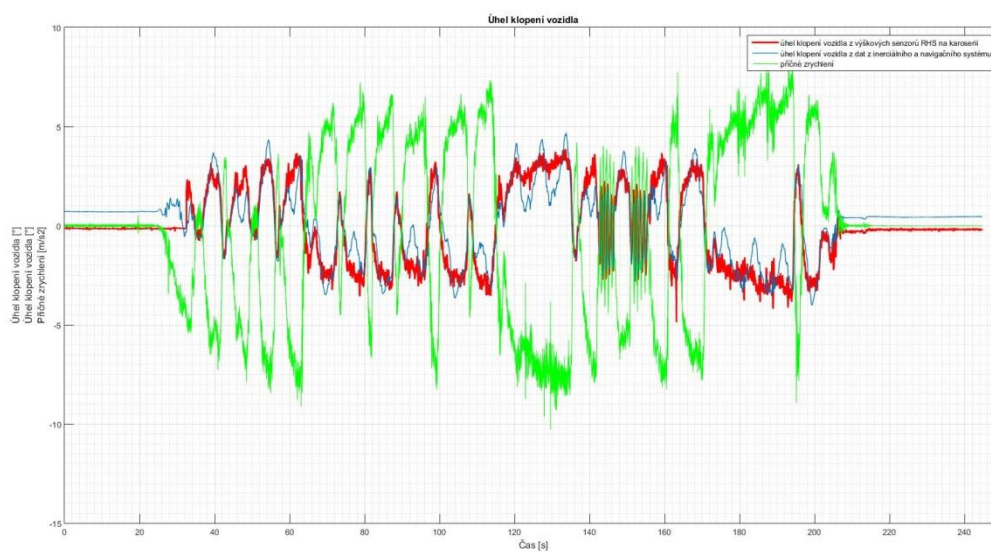
Obr. 43 Výškové senzory HT-250 a RHS (měření č. 4)



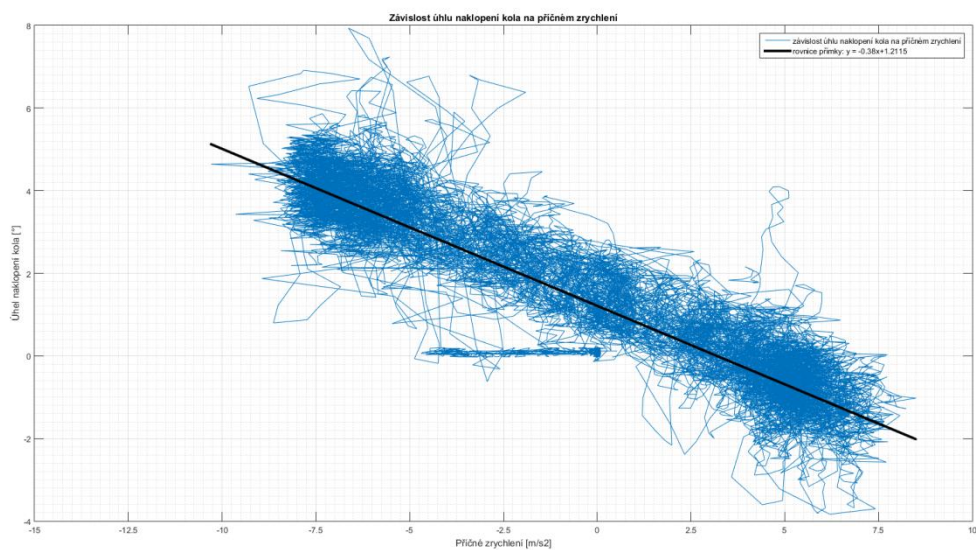
Obr. 44 Závislost rozdílu senzorů HT-250 na rozdílu senzorů RHS na karoserii (měření č. 4)



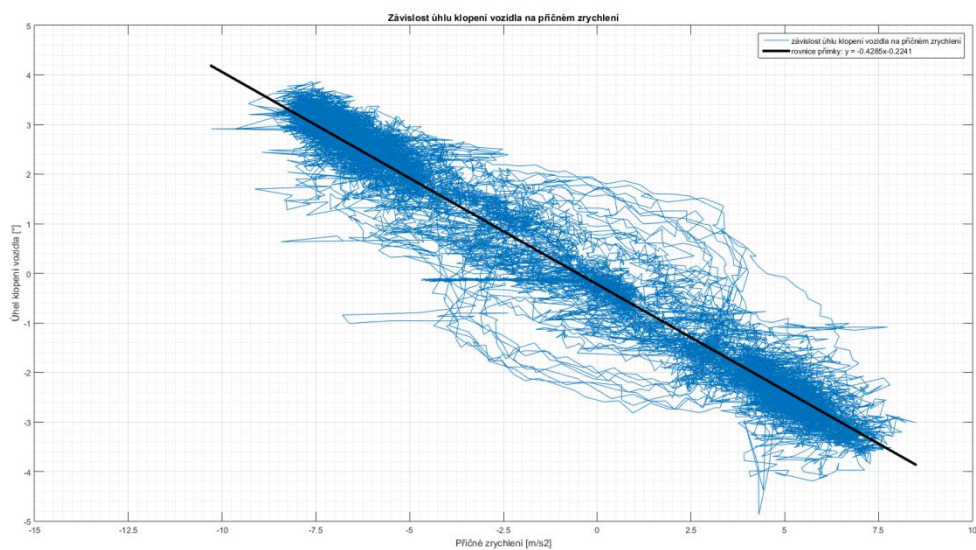
Obr. 45 Úhel naklonění kola s vykreslením příčného zrychlení (měření č. 4)



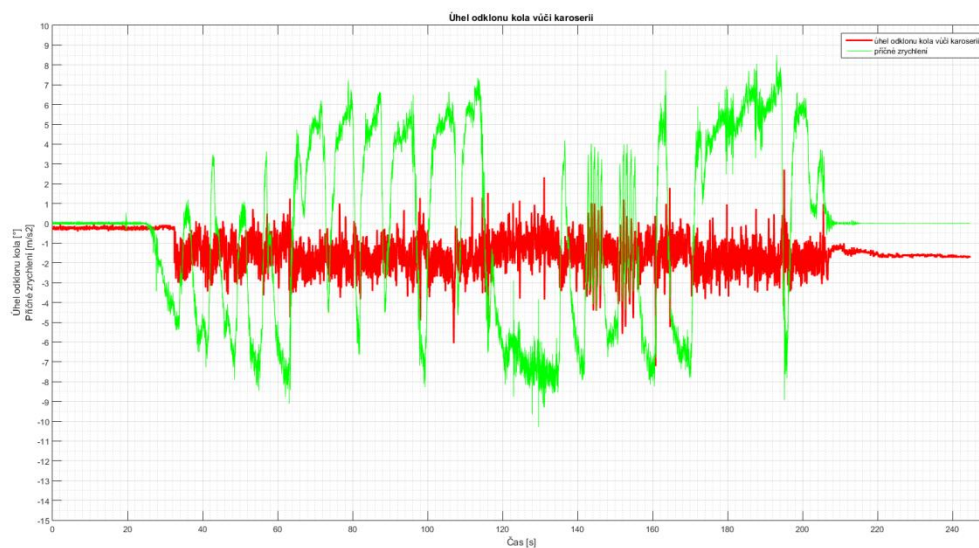
Obr. 46 Porovnání úhlu klopení vozidla ze senzorů RHS a z inerciálního a navigačního systému s vykreslením příčného zrychlení (měření č. 4)



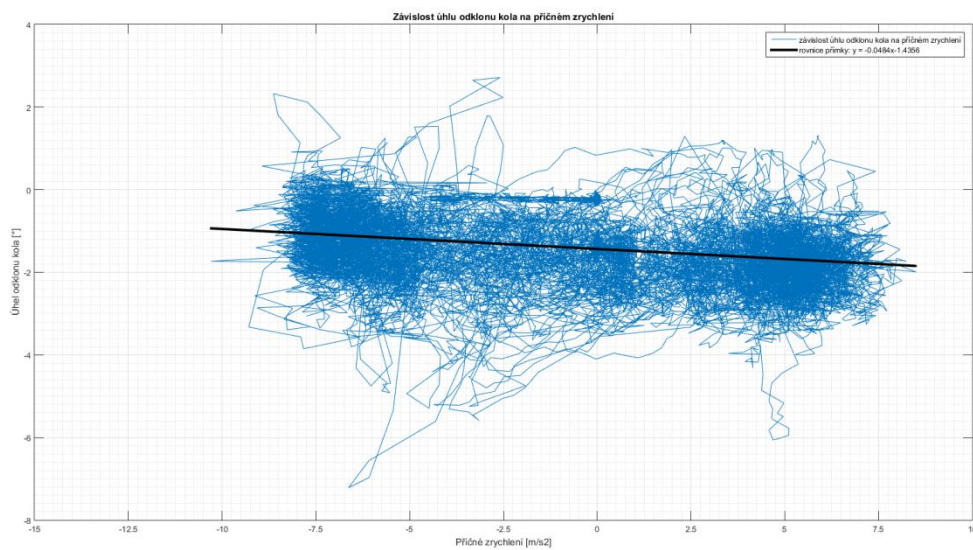
Obr. 47 Závislost úhlu naklonění kola na příčném zrychlení (měření č. 4)



Obr. 48 Závislost úhlu klopení vozidla na příčném zrychlení (měření č. 4)



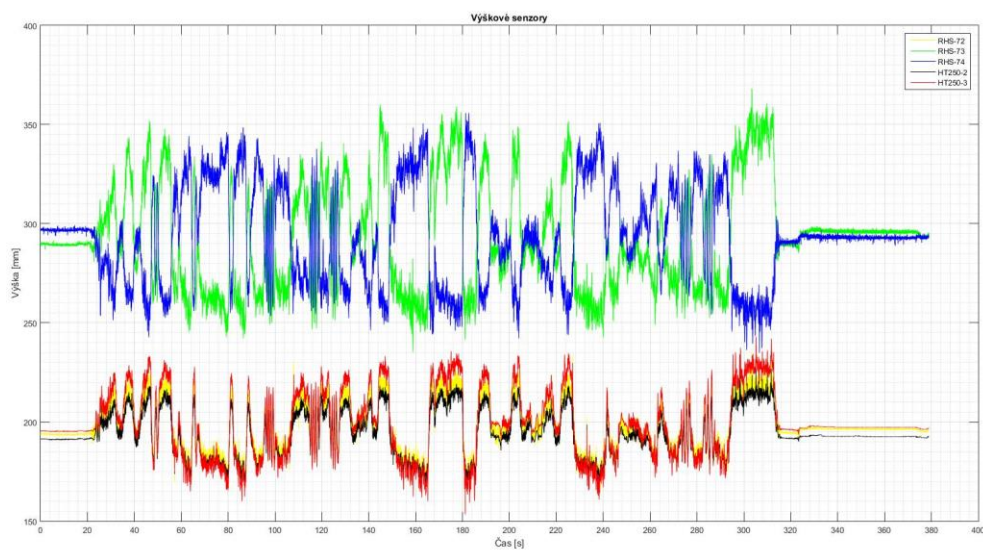
Obr. 49 Úhel odklonu kola vůči karoserii s vykreslením příčného zrychlení (měření č. 4)



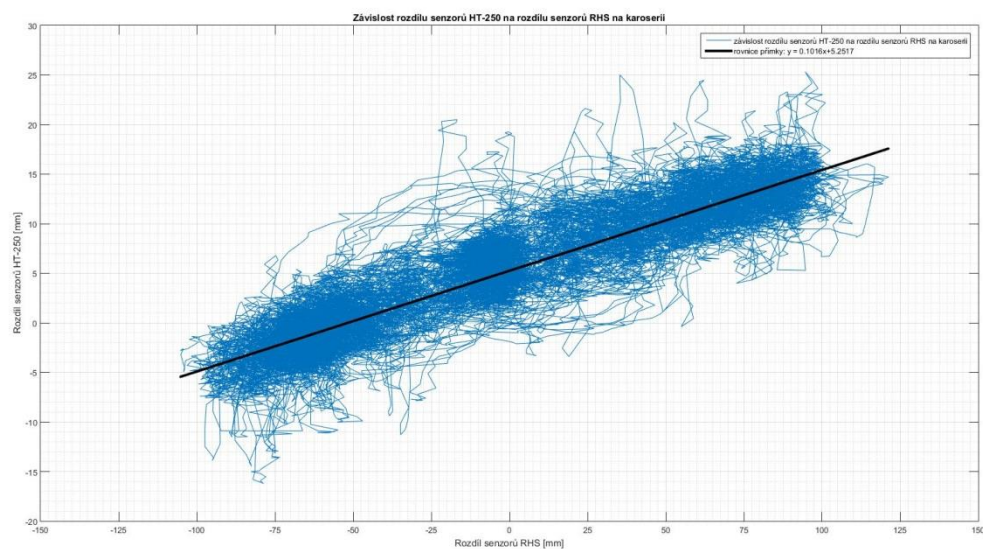
Obr. 50 Závislost úhlu odklonu kola na příčném zrychlení (měření č. 4)



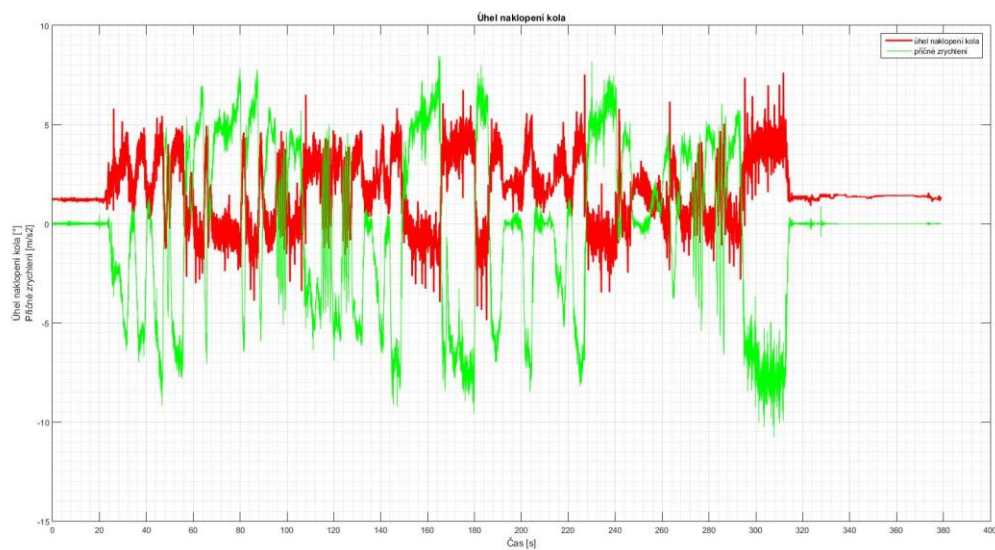
8.3 MĚŘENÍ Č. 5



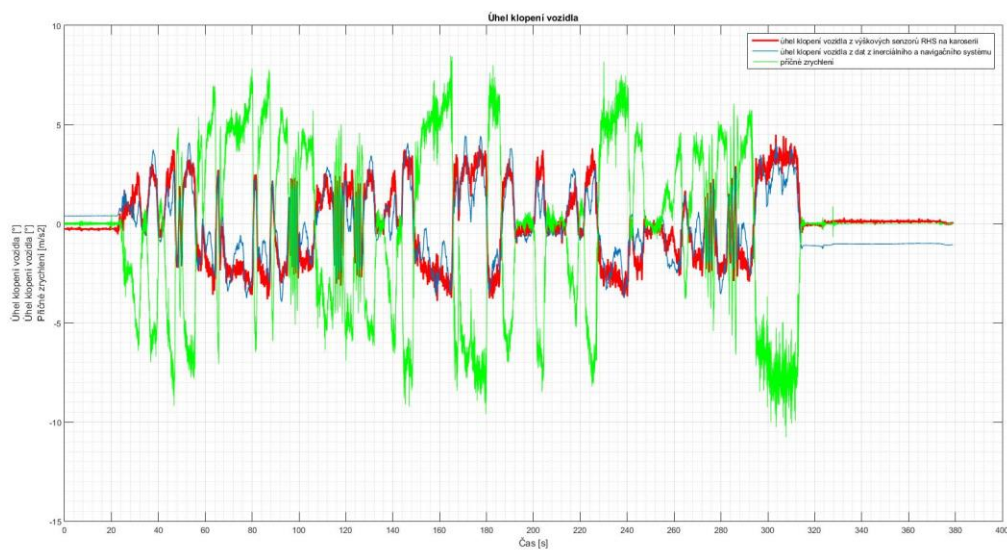
Obr. 51 Výškové senzory HT-250 a RHS (měření č. 5)



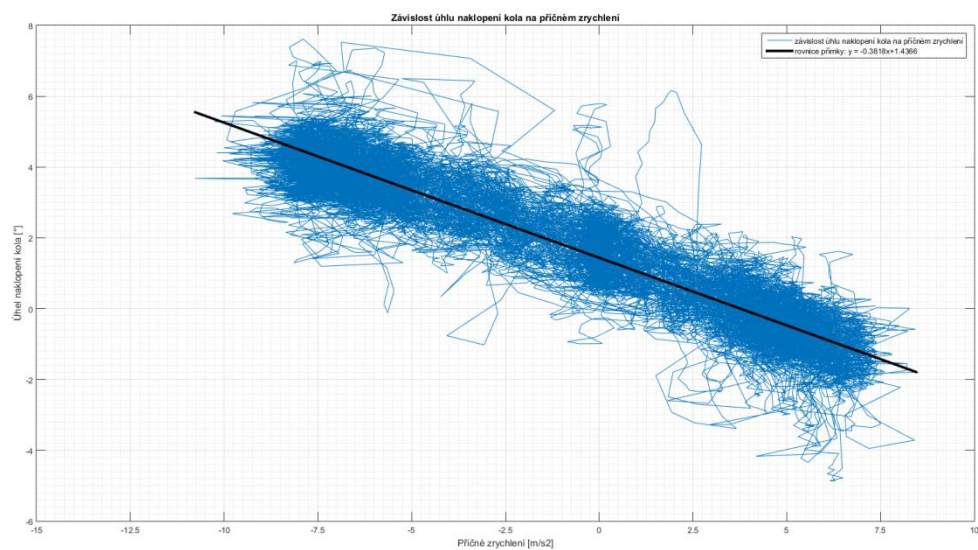
Obr. 52 Závislost rozdílu senzorů HT-250 na rozdílu senzorů RHS na karoserii (měření č. 5)



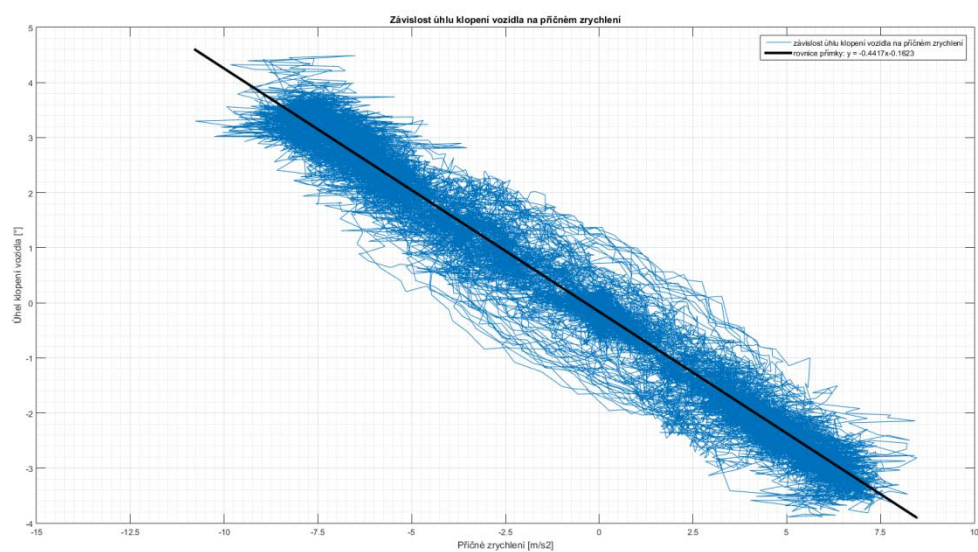
Obr. 53 Úhel naklonění kola s vykreslením příčného zrychlení (měření č. 5)



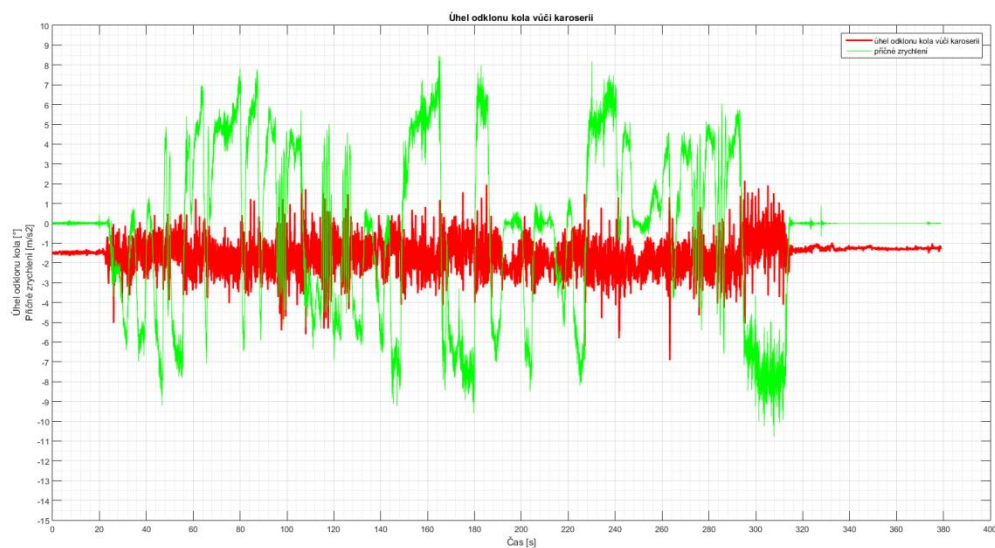
Obr. 54 Porovnání úhlu klopení vozidla ze senzorů RHS a z inerciálního a navigačního systému s vykreslením příčného zrychlení (měření č. 5)



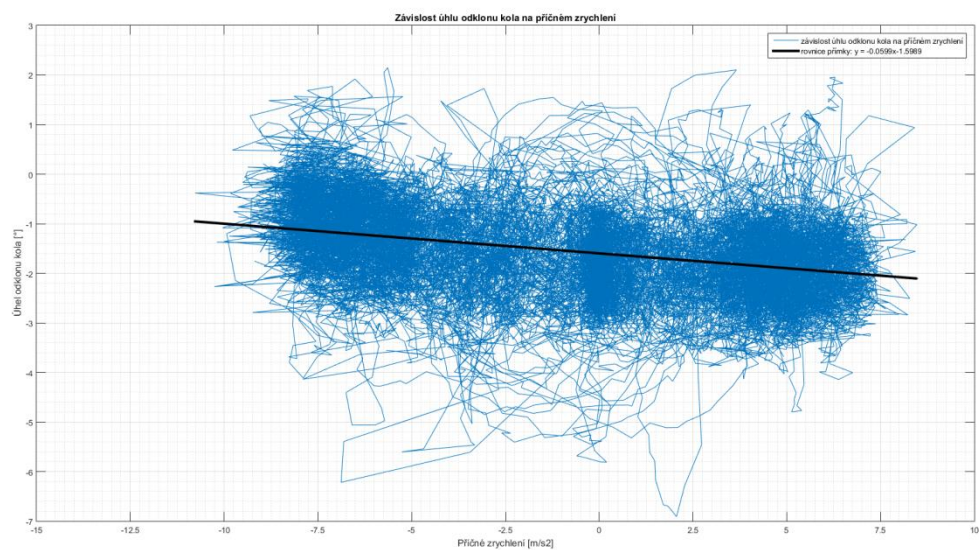
Obr. 55 Závislost úhlu naklonění kola na příčném zrychlení (měření. č 5)



Obr. 56 Závislost úhlu klopení vozidla na příčném zrychlení (měření č. 5)



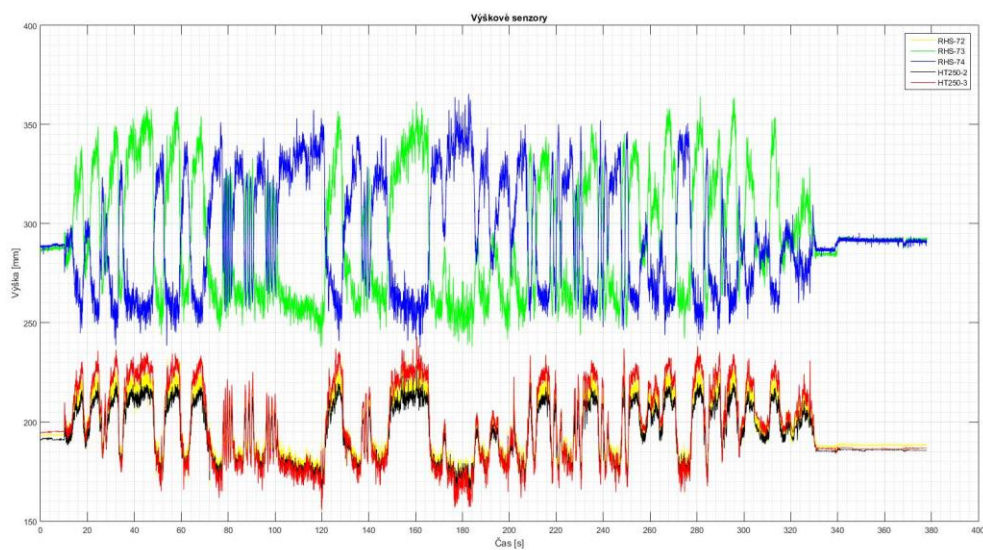
Obr. 57 Úhel odklonu kola vůči karoserii s vykreslením příčného zrychlení (měření č. 5)



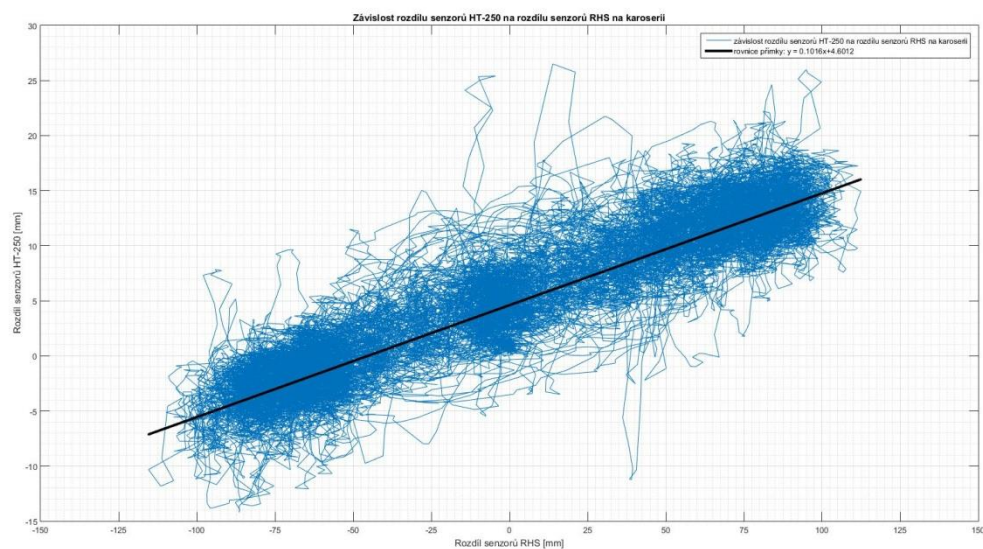
Obr. 58 Závislost úhlu odklonu kola na příčném zrychlení (měření č. 5)



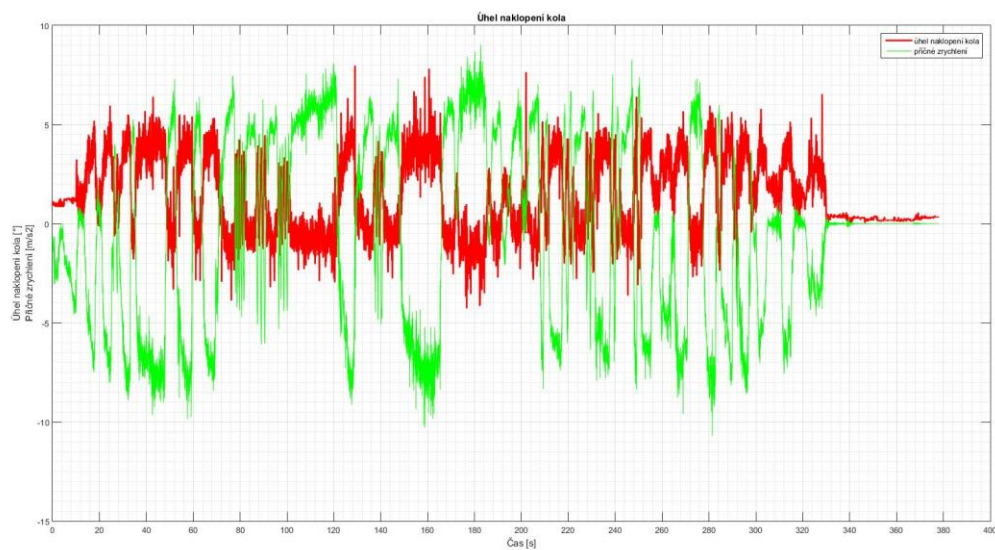
8.4 MĚŘENÍ Č. 6



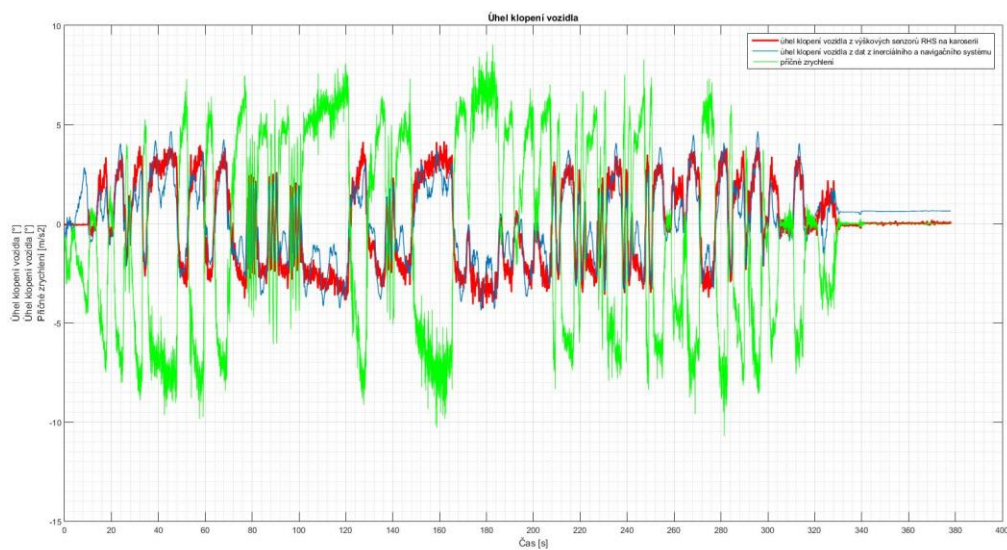
Obr. 59 Výškové senzory HT-250 a RHS (měření č. 6)



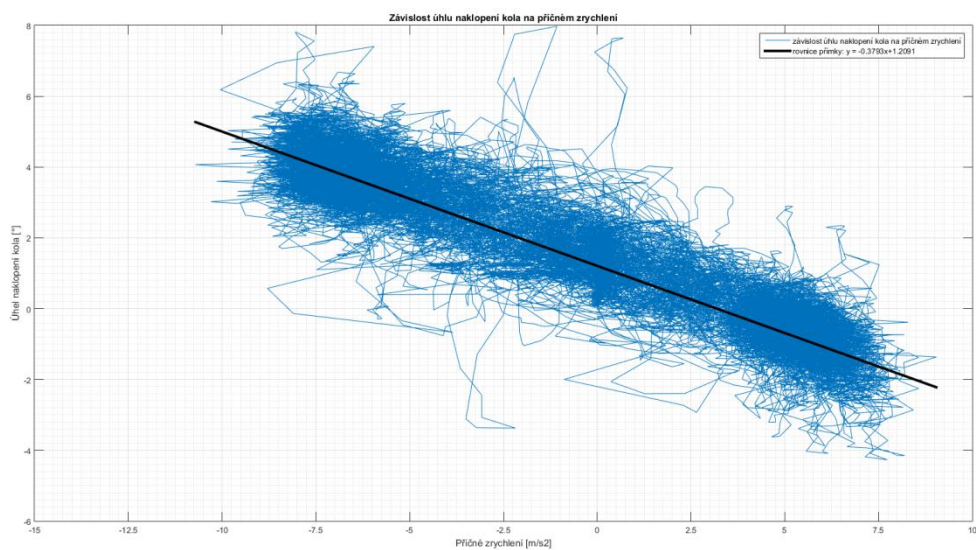
Obr. 60 Závislost rozdílu senzorů HT-250 na rozdílu senzorů RHS na karoserii (měření č. 6)



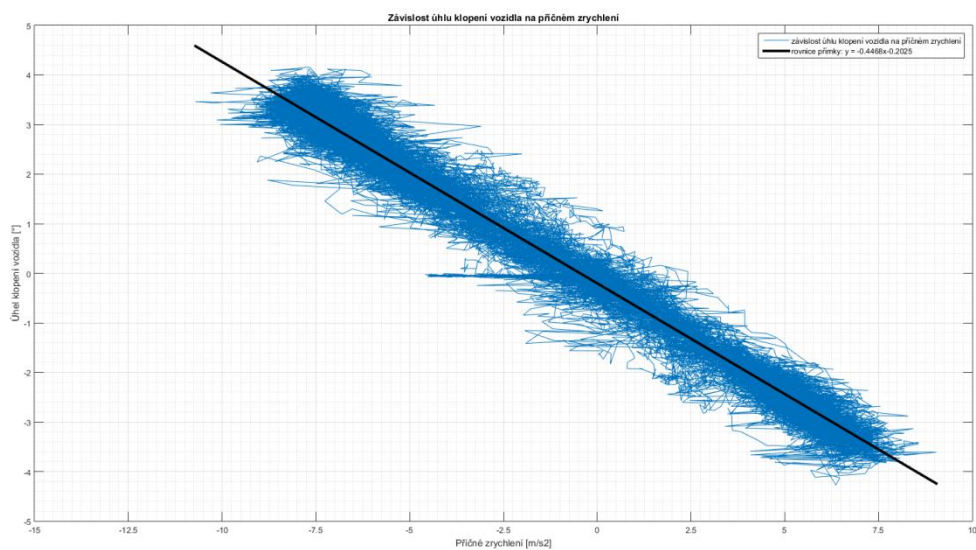
Obr. 61 Úhel naklonění kola s vykreslením příčného zrychlení (měření č. 6)



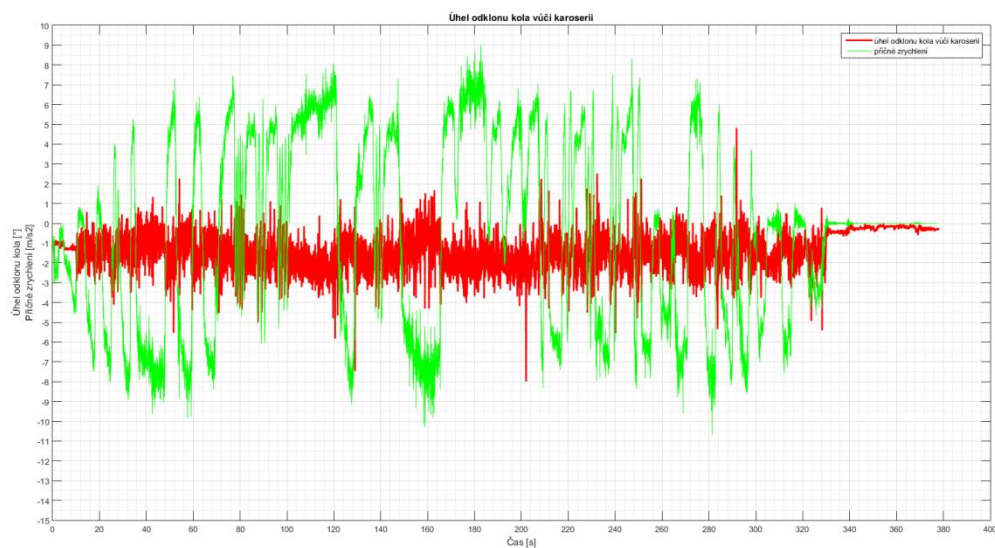
Obr. 62 Porovnání úhlu klopení vozidla ze senzorů RHS a z inerciálního a navigačního systému s vykreslením příčného zrychlení (měření č. 6)



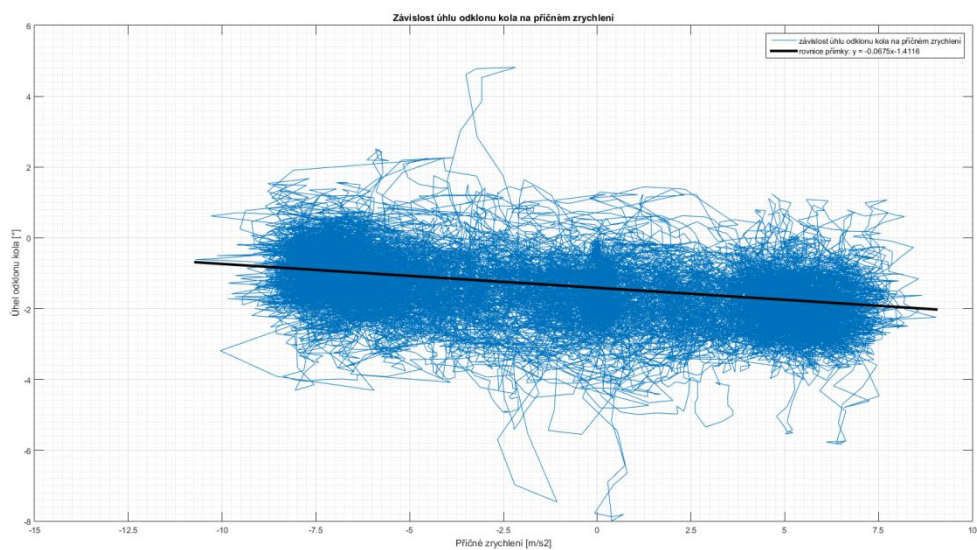
Obr. 63 Závislost úhlu naklonění kola na příčném zrychlení (měření č. 6)



Obr. 64 Závislost úhlu klopení vozidla na příčném zrychlení (měření č. 6)



Obr. 65 Úhel odklonu kola vůči karoserii s vykreslením příčného zrychlení (měření č. 6)



Obr. 66 Závislost úhlu odklonu kola na příčném zrychlení (měření č. 6)



9 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Po úpravě naměřených dat v programu Matlab, kdy mezi záznamy výškových senzorů a inerciálního a navigačního systému vzniklo časové posunutí, které bylo potřeba anulovat, jsme byli schopni vykreslit grafické závislosti měřených a následně dopočítaných parametrů.

Toto posunutí se týkalo všech zaznamenaných jízd měření, které proběhly bez chyby. Jednalo se o jízdy č. 4, 5 a 6. U měření č. 4 bylo posunutí záznamu o 1300 hodnot (13 s), měření č. 5 mělo posunutí pouze o 8 hodnot (0,08 s) a poslední měření č. 6 mělo posunutí o 1288 hodnot (12,88 s). Posunutí mohlo být důsledkem komunikace mezi senzory a měřicí ústřednou, kdy senzory jsou propojeny analogovým kabelem a GPS modul kabelem CANbus.

Prvním výstupem, který jsme byli schopni vykreslit, byl graf zobrazení hodnot všech výškových senzorů, viz obr. 43, 53, 59. V horní části grafu se nacházejí křivky senzorů RHS, které byly umístěny na karoserii a při sledování jejich průběhu je jasně viditelné, jak se při průjezdu zatáčkou naklápěním karoserie ve stejný okamžik jeden senzor přibližuje vozovce a senzor na opačné straně vozidla se vzdaluje. Již z průběhů těchto senzorů jsme schopni určit, na kterou stranu vozidlo zatáčelo, jelikož se karoserie vozidla vůči odstředivé síle naklápí na vnější zatáčky. Senzor na vnitřní straně se tedy zvedá od roviny vozovky a senzor na vnější straně se k vozovce přibližuje.

Ve spodní části grafu jsou zobrazeny průběhy hodnot senzorů, které byly umístěny na kole na držáku. Nejbližše kolu byl umístěn senzor HT-250_2 (černá křivka), vedle něj kontrolní senzor RHS72 (žlutá křivka) a na opačném konci držáku byl druhý senzor HT-250_3 (červená křivka). Přední část průběhů měření č. 5 (do 22 s) a č. 6 (do 12 s) ukazují, že střední rovina kola vozidla není kolmá na rovinu vozovky, tedy je mírně naklopeno, jelikož vzdálenější senzor HT-250_3 ukazuje vyšší hodnotu než senzor blíže kolu. Tato diference může být z malé části ovlivněna instalací snímačů.

Pro měření č. 4 se přední část grafu liší od ostatních a výškové hodnoty tří senzorů jsou zde skoro stejné, nejspíše zde došlo k chybě, jelikož jsou všechny výškové hodnoty v klidovém stavu o dost nižší než na ostatních měřeních a také na konci tohoto grafu jsou vidět vyšší hodnoty v klidovém stavu při zastavení vozidla.

Prostřední průběh senzoru RHS72 by měl kopírovat senzor HT-250_2, jelikož byli umístěny velmi blízko u sebe na pomocném „L“ profilu uchycení a vzdálenost jejich zdroje paprsku od sebe byla 20 mm, ale vzdálenost zdroje od vozovky již byla jiná. Bylo to dáno uchycením, protože senzor RHS má menší rozměry, a proto zachycuje o něco vyšší výškovou hodnotu.

Byl proveden test porovnání průběhů senzorů HT-250_2 a senzoru RHS72, kde jsme vzali hodnoty obou senzorů ve stejném časovém okamžiku a odečetli je. Těchto odečtení bylo zvoleno více, abychom dostali průměrnou hodnotu výškového rozdílu, a o tu jsme ponížily hodnoty průběhu senzoru RHS72. Následně byl vykreslen graf porovnání průběhu senzoru HT-250_2 a nového upraveného průběhu senzoru RHS72 se zobrazením detailů v maximálních a minimálních hodnotách (pro měření č. 4 – příloha 1 a 2, pro měření č. 5 –



příloha 6 a 7, pro měření č. 6 – příloha 11 a 12). Jde vidět, že průběh RHS72 kopíruje průběh senzoru HT-250_2, ale právě díky tomu, že je o 20 mm posunut dále od kola (od středu otáčení) bude mít vyšší rozsah měřených hodnot. Jak lze pozorovat na následujících detailech tak v maximálních hodnotách (detail 1) má vyšší výšková data a zase naopak v minimálních hodnotách (detail 2) jsou jeho výšková data nižší. To poukazuje na správnost měření senzorů na držáku.

Funkci toho, že vzdálenější senzor od středu otáčení má větší rozsah, lze vidět na grafu vykreslení výškových senzorů bez RHS72 (pro měření č. 4 – příloha 1, pro měření č. 5 – příloha 6, pro měření č. 6 – příloha 11). Vzdálenější senzor na držáku HT-250_3 pracuje ve vyšších hodnotách, ale také při extrémních minimálních hodnotách ukazuje menší výškový údaj než senzor blíže ke středu otáčení HT-250_2. Právě tyto hodnoty dokazují, že se kolo naklápí v různých jízdních situacích.

Pro další výpočty a vykreslení grafických závislostí bylo potřeba znát výškové rozdíly senzorů stejného typu. Prvním rozdílem byly hodnoty senzorů RHS73 a RHS74 na karoserii a druhým rozdílem hodnoty výškových senzorů na držáku HT-250_2 a HT-250_3. Na obr. 44, 52 a 60 jsou zobrazeny tyto hodnoty v jejich vzájemné závislosti. Již při pohledu na graf je patrná určitá linearita rozdílů. Pro přesnou hodnotu závislosti byl graf proložen přímkou a vypsána její rovnice (pro jednotlivá měření):

$$y_{r4} = 0,1054x + 4,6875 \quad (2)$$

$$y_{r5} = 0,1016x + 5,2517 \quad (3)$$

$$y_{r6} = 0,1016x + 4,6012 \quad (4)$$

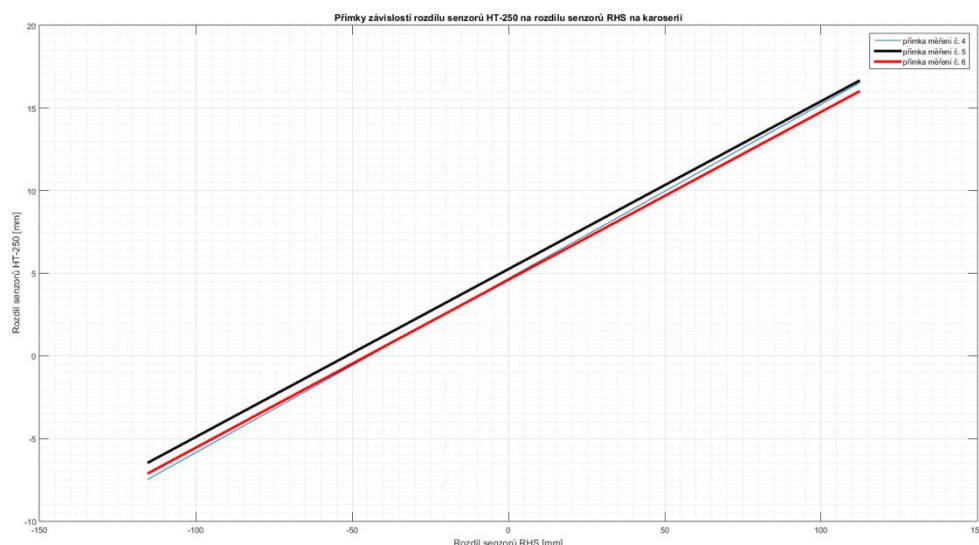
x ... rozdíl senzorů RHS [mm]

y_{r4} ... rovnice přímky závislost rozdílů senzorů HT-250 na rozdílů senzorů RHS na karoserii pro měření č. 4 [mm]

y_{r5} ... rovnice přímky závislost rozdílů senzorů HT-250 na rozdílů senzorů RHS na karoserii pro měření č. 5 [mm]

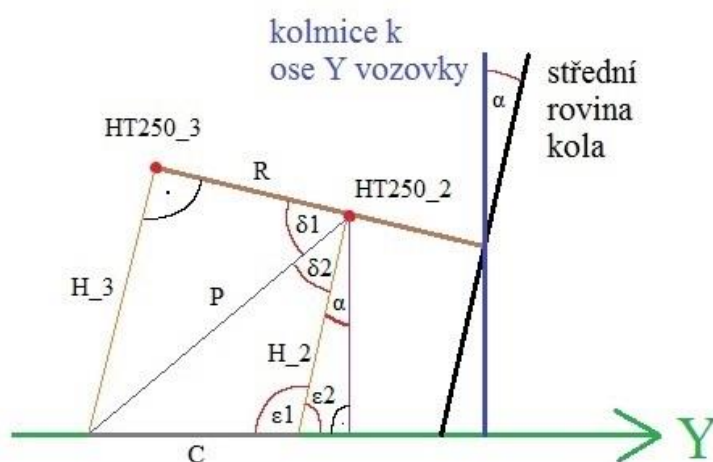
y_{r6} ... rovnice přímky závislost rozdílů senzorů HT-250 na rozdílů senzorů RHS na karoserii pro měření č. 6 [mm]

Rovnice závislostí rozdílů jsou si velice podobné, hlavně rovnice z měření č. 5 a 6, kde je x -ová závislost stejná, pouze jsou přímky od sebe výškově posunuty o konstantní hodnotu, viz obr. 67.



Obr. 67 Přímky závislosti rozdílů senzorů HT-250 na rozdílů senzorů RHS

Dalším krokem vyhodnocení bylo zjistit, jak se mění úhel naklopení kola α vůči kolmici na vozovku. Pro výpočet byl využit již získaný rozdíl senzorů na držáku HT-250 a také odměřená vzdálenost jejich polohy. Tato vzdálenost byla odměřena při měření a činila 191 mm. Výsledky bylo možné získat dvěma způsoby. Prvním z nich byl složitější, který bral ohledy na všechny úhly a naklonění laseru senzoru vůči vozovce a druhým výpočtem byl jednodušší se zanedbáním úhlu naklonění laserů senzorů.



Obr. 68 Znázornění uvažování výpočtu úhlu naklopení kola

Znázornění složitějšího výpočtu s ohledy na úhly při naklopení je na obr. 68. Hodnotu R mezi senzory HT250 známe a také známe výškové hodnoty H_2 (data ze senzoru HT250_2) a H_3



(data ze senzoru HT250_3) z měření. Z těchto znalostí jsme schopni dopočítat ostatní velikosti stran a úhlů vyznačených na obrázku a následně dojít k výslednému úhlu α , který představuje úhel naklopení kola.

$$p = \sqrt{H_3^2 + R^2} \quad (5)$$

$$\delta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{H_3}{R}\right) \quad (6)$$

$$\delta_2 = 90 - \delta_1 \quad (7)$$

$$c = \sqrt{p^2 + H_2^2 - 2 \cdot p \cdot H_2 \cdot \cos \delta_2} \quad (8)$$

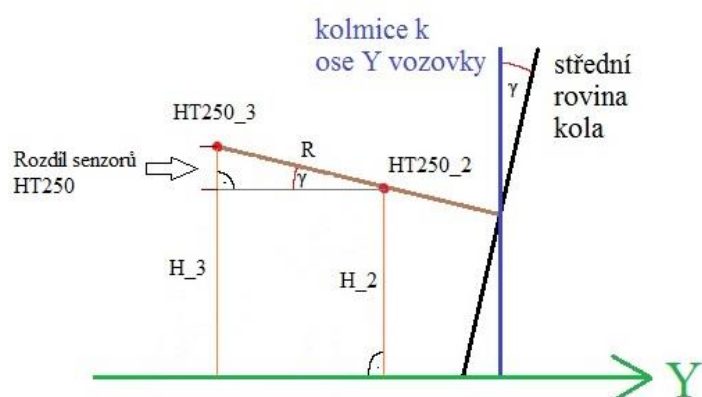
Pro výpočet ε_1 bylo potřeba dostat tento úhel z cosinovy věty:

$$p = \sqrt{c^2 + H_2^2 - 2 \cdot c \cdot H_2 \cdot \cos \varepsilon_1} \quad (9)$$

$$\varepsilon_1 = \cos^{-1}\left(\frac{c^2 + H_2^2 - p^2}{2 \cdot c \cdot H_2}\right) \quad (10)$$

$$\varepsilon_2 = 180 - \varepsilon_1 \quad (11)$$

$$\alpha = 90 - \varepsilon_2 \quad (12)$$



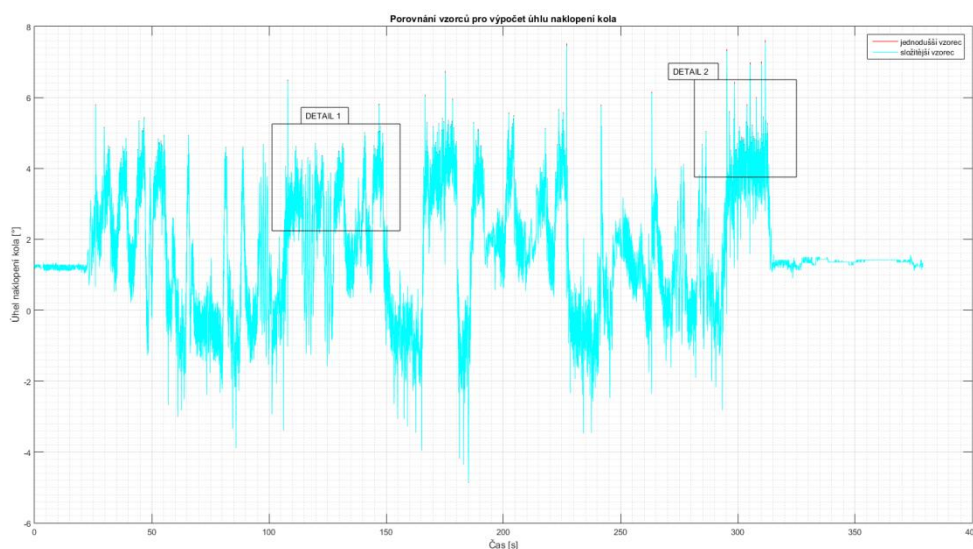
Obr. 69 Znázornění jednoduššího výpočtu úhlu naklopení kola

Z obr. 69 je patrné, že pro výpočet jednodušším vzorcem bude potřeba rozdíl senzorů HT-250 a jejich vzájemná vzdálenost. Výsledkem bude přímo úhel naklopení kola.



$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{\text{Rozdíl senzorů HT} - 250}{R}\right) \quad (13)$$

Pro další vyhodnocování jsme použili druhý vzorec se zanedbáním úhlů, jelikož tyto úhly jsou velmi malé, cos takového úhlu se téměř rovná 1 a můžeme tedy považovat výškovou vzdálenost senzorů za kolmou k rovině vozovky. Pro představu rozdílu jsem porovnal grafy naklopení kola při datech z 5. měření, kde první průběh využívá jednodušší vzorec a druhý je složitější, obr. 70. Lze pozorovat jen nepatrné odchylky hodnot pro vyšší úhel odklonu kola. Detail 1 a 2 viz příloha 16.



Obr. 70 Porovnání výsledných hodnot ze dvou vzorců pro výpočet úhlu naklopení kola (data z měření č. 5)

Tento vypočítaný úhel naklopení kola jsme vykreslili v grafu a pro porovnání jeho změn byl do grafu přidán také průběh příčného zrychlení. Jak lze z grafu vyčíst, tak v klidném stavu je již kolo naklopeno, což jsme předem zmiňovali z grafy průběhů výškových signálů. Například při měření č. 5 v čase 160 s, kdy vozidlo projíždí pravotočivou zatáčkou a působí na něj přetížení 0,5 g, úhel naklopení kola jen mírně zasáhl do záporných hodnot (zhruba -1 °). Naopak, když následně vozidlo vjelo do levotočivé zatáčky, hodnota úhlu naklopení kola se pohybovala kolem 4 °, viz obr. 53.

Následující parametr, který bylo potřeba dopočítat, byl úhel klopení vozidla β , pro který jsme využili vypočítaný rozdíl senzorů RHS umístěných na karoserii a také vzdálenost mezi nimi, která činila 1550 mm.

$$\beta = \sin^{-1}\left(\frac{\text{Rozdíl senzorů RHS}}{1550}\right) \quad (14)$$



Na obr. 46, 54 a 62 je tento úhel klopení vozidla vykreslen spolu s příčným zrychlením pro lepší orientaci a ještě doplněn pro porovnání o úhel klopení z inerciálního a navigačního systému. Porovnání dvou průběhů úhlu klopení je vidět, že GPS modul má více neklidný průběh, pravděpodobně kvůli nedokonalému umístění a možnosti malých posuvů v zavazadlovém prostoru. S ohledem na nedokonalost uložení se dá říci, že kopíruje úhel klopení vozidla ze senzorů RHS.

Při pohledu na průběh úhlu klopení vozidla ze senzorů RHS se zdá být osa Y vozidla v klidovém stavu téměř rovnoběžná s osou Y vozovky (začátek a konec grafu). Při průjezdech zatáčkami se již vozidlo naklápí na vnější stranu vozovky. Maximální hodnoty úhlu klopení vozidla dosahují téměř k 4 °, což představuje výškový rozdíl RHS senzorů po bocích karoserie vozidla skoro 100 mm, viz příloha 3, 8 a 13.

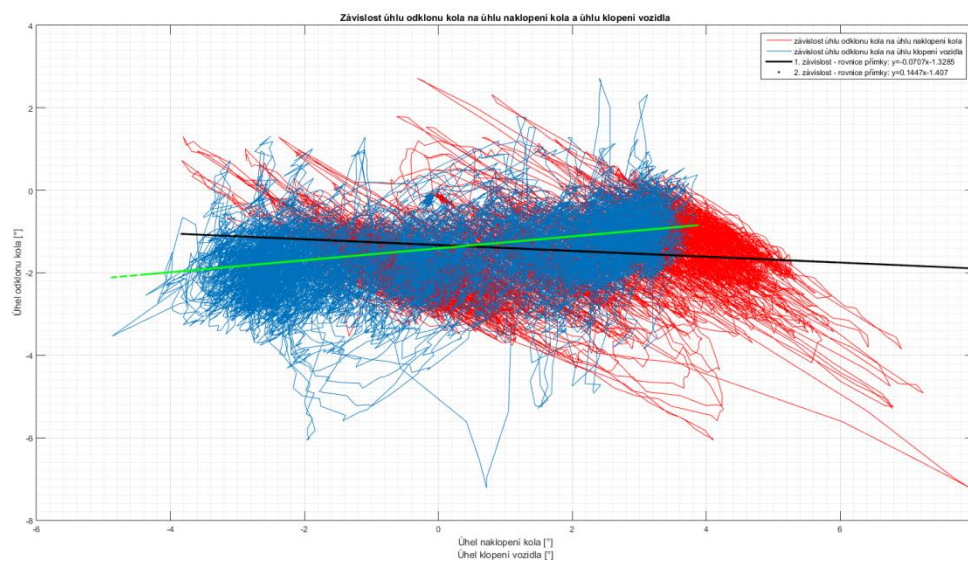
Pro jasnou představu změny průběhu úhlu naklopení kola a úhlu klopení karoserie při jízdě a především během průjezdu zatáčkami jsme je vykreslili do grafů v závislosti se změnou příčného zrychlení (úhel naklopení kola obr. 47, 55 a 63, úhel klopení vozidla obr. 48, 56 a 64). Z grafů je vidět, že průběh změny úhlu klopení vozidla je strmější (při pohledu jasně prokazující, ale lehce klame rozsahem y-ové osy), proto je důležité sledovat rovnice přímek, jež to potvrzují, byť je rozdíl menší než napovídá obrázek.

Výsledným parametrem měření bylo zjištění úhlu odklonu kola γ . Porovnáním úhlu naklopení kola a úhlu klopení vozidla jsme dostali výsledný úhel odklonu kola.

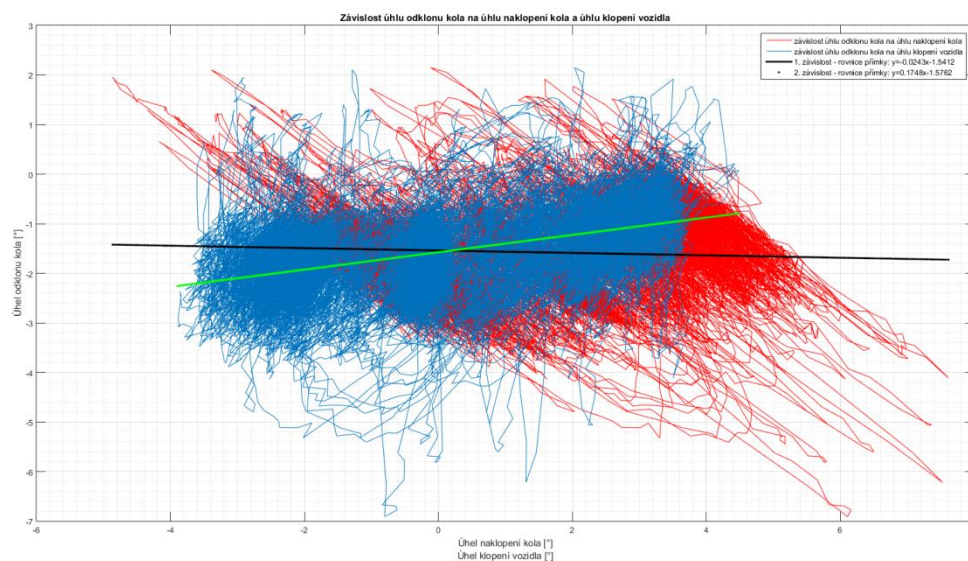
$$\gamma = \beta - \alpha \quad (15)$$

Pohledem na grafický výstup tohoto úhlu, obr. 49, 57 a 65, s vykreslením příčného zrychlení je vidět, že se úhel odklonu kola pohybuje většinou v záporných hodnotách, jen v ojedinělých případech je střední rovina kola naklopena do kladné hodnoty. Tento jen se vyskytuje pouze v případě, kdy vozidlo jede do levotočivé zatáčky s vysokým příčným zrychlením. Karoserie vozidla se naklápí na vnější stranu, kolo je odlehčováno a snaží se vyrovnat vysoké naklopení karoserie svým postavením do kolmého stavu k vozovce proti klopení karoserie. Tím se úhel odklonu kola dostává ke kladným hodnotám. Naopak při rychlém průjezdu pravotočivou zatáčkou, se karoserie naklopí na měřené kolo a stlačuje jej. V tomto případě při stlačení by naklopení kola vůči vozovce bylo velmi vysoké a kolo by nemělo dobrou přilnavost, a proto se mění směrem k negativnímu úhlu odklonu kola (vůči karoserii).

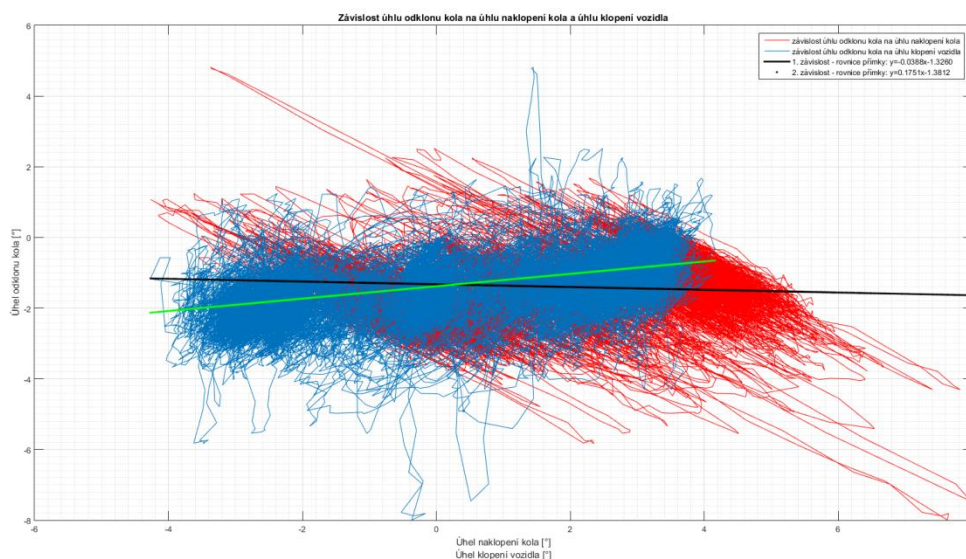
Tímto měřením jsme došli tedy k závěru, že střední rovina kola se vždy, při jakékoliv jízdě situaci, naklápí proti klopení karoserii vozidla (viz obr. 71, 72 a 73.), jelikož při kolmém postavení má pneumatika největší styk s vozovkou a tudíž dokáže zachytit největší příčné zrychlení. Proto se zavěšení uzpůsobuje tak, aby kolo kompenzovalo naklápění karoserie a zůstávalo v co nejideálnějším postavení vůči vozovce.



Obr. 71 Závislost úhlu odklonu kola na úhlu naklonění kola a úhlu klopení vozidla (data z měření č. 4)



Obr. 72 Závislost úhlu odklonu kola na úhlu naklonění kola a úhlu klopení vozidla (data z měření č. 5)



Obr. 73 Závislost úhlu odklonu kola na úhlu naklopení kola a úhlu klopení vozidla (data z měření č. 5)

Pro zvýšení představy všech testovacích jízd byl vykreslen profil jízdy k jednotlivým měřením a graf rychlosti, podélného a příčného zrychlení (příloha 5, 10, 15).



ZÁVĚR

Diplomová práce je zaměřena na podvozkovou část vozidla, přesněji na geometrii zavěšení kol. Obsahem úvodní části této diplomové práce bylo seznámit se základními parametry, které přímo ovlivňují geometrii zavěšení kol vozidla, popsat jejich funkci a obvyklé nastavení.

Další části se již zabývaly hlavním parametrem zavěšení kol, který měla tato práce za úkol, a tím byl úhel odklonu kola. Bylo vysvětleno, jak se tento úhel měří a jaké jsou varianty ve statické poloze vozidla, následně jaké existují možnosti měřit úhel odklonu kola automobilu během jízdy v dynamickém stavu. Varianty od firmy Kistler a firmy Aicon3D byly poté důkladněji rozebrány a jejich hlavní části (uchycení, vlastnosti snímání) popsány a zobrazeny specifikace.

Praktická část diplomové práce se rozdělila na tři oddíly. Prvním oddílem bylo navrhnout metodu měření a zajistit kompletní vybavení pro jeho uskutečnění. Jednalo se tedy o zvolení senzorů a následné uchycení na vozidlo, kde bylo potřeba vyrobit prvky uchycení, které spolu se zařízením, dostupným na ústavu automobilního a dopravního inženýrství, tvořilo jeden systém uchycení senzorů. K tomu byl vypůjčen inerciální a navigační systém pro zjišťování polohy a zrychlení ve všech osách a neméně důležitým zařízením byla také měřicí ústředna pro vyhodnocení signálů ze senzorů. Posledními body tohoto oddílu byla volba vozidla a místa měření.

Druhý oddíl bylo čistě měření úhlu odklonu kola během jízdy. Na vybraném místě proběhlo několik jízd, mezi kterými se vyskytly jak mechanické tak i softwarové chyby. Obojí jsme dokázali vyřešit a poté zaznamenat několik jízd, které proběhly úspěšně. Tyto jízdy byly v pořadí 4., 5. a 6., proto byly označeny jako měření č. 4, 5 a 6.

Třetí, poslední oddíl se zabýval následným vykreslením a vyhodnocením zaznamenaných dat. V programu Matlab byla tato data načtena a naprogramováním byly vykresleny grafické závislosti výškových senzorů, vypočítaných rozdílů senzorů stejného typu a hlavních parametrů, kterými byly úhel naklopení kola, úhel klopení vozidla a úhel odklonu kola. Poté následovalo vyhodnocení.

Z mého pohledu jsem se dozvěděl několik zajímavých faktů o práci zavěšení kol vozidla a také při měření a vyhodnocení výsledků jsem byl překvapen, do jakých číselných a úhlových hodnot se měření úhlu odklonu kola dostává, i když jízda nebyla na horní hraně a vozidlo nám neustřelilo. Myslím si, že jízdní manévry, kterými bylo vozidlo vystaveno, se v běžném provozu tak často nestávají, a proto tento běžný automobil je na průměrnou jízdu zcela dostačuje.

Jinak je to samozřejmě pro sportovní automobily a závodní speciály, které se k jejich pomyslné hraně dosti často přibližují a zjištění, díky měření, ideálního nastavení parametrů zavěšení může být velkou výhodou nad konkurencí.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] VLK, F. *Podvozky motorových vozidel*. 3. přeprac., rozš., aktualiz. Vyd. Brno: Prof.Ing.František Vlk, DrSc, 2006, 464 s. ISBN 80-239-6464-x.
- [2] JAN, Z., ŽDÁNSKÝ, B., ČUPERA, J. *Automobily: Podvozky*. Avid, Třetí vydání, Brno, 2007. ISBN 978-80-87143-18-6.
- [3] VLK, F. *Zkoušení a diagnostika motorových vozidel*. VLK, První vydání, Brno, 2000. ISBN 80-234-6573-0.
- [4] What is Caster, Camber, And Toe Alignment Adjustments?. *TownFairTire* [online]. [cit. 2014-11-20]. Dostupné z: <http://www.townfairtire.com/wheel-alignment/caster-camber-and-toe-alignments/>
- [5] F1 car setup. *F1 Framework* [online]. 2012, 9.4. [cit. 2014-11-20]. Dostupné z: <http://f1framework.blogspot.cz/2012/04/f1-car-setup.html>
- [6] Fastrax Camber/Caster Gauge. *Eastwood* [online]. [cit.2014-12-05]. Dostupné z: <http://www.eastwood.com/fastrax-camber-caster-gauge.html>
- [7] Camber tool. *The h-body organisation* [online]. 2009, 12.10. [cit. 2014-12-05]. Dostupné z: <http://forums.h-body.org/viewtopic.php?f=10&t=28515>
- [8] SmartCamber. *WatkinsSmartRacingProducts* [online]. [cit. 2014-12-05]. Dostupné z: <http://www.smartracingproducts.com/smartcamber.html>
- [9] Autopříslušenství prvovýbava. *Press.Bosch* [online]. 09/2004 [cit. 2014-12-10]. Dostupné z: http://press.bosch.cz/detail.asp?f_id=359
- [10] Bezdotyková geometrie. *Pneurevue* [online]. 06/2004 [cit. 2014-12-10]. Dostupné z: <http://www.pneurevue.cz/aktualni-cislo-1/pneu-revue-4-06/bezdotykova-geometrie.html>
- [11] KLIŠ, K. *Zařízení pro měření geometrie kol*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 45 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Hejtmánek
- [12] The Kistler Group. *Kistler* [online]. [cit. 2015-01-20]. Dostupné z: <http://www.kistler.com/cz/en/about-us/company/the-kistler-group/>
- [13] Complete Systems from Kistler for Vehicle Dynamics Testing. *Kistler* [online]. [cit. 2015-01-20]. Dostupné z: <http://www.kistler.com/cz/en/applications/automotive-research-test/vehicle-dynamics-durability/dynamics-testing/>
- [14] Optické metody měření 3D objektů. *Electrorevue* [online]. [cit. 2015-01-25]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html#kap2.1>



- [15] Standard Mounting Units. *Kistler* [online]. [cit. 2015-01-25]. Dostupné z: http://www.kistler.com/fileadmin/files/divisions/automotive-research-test/vehicles-dynamics-and-durability/dynamics-testing/MountingBrochure_200-695e-05.13.pdf
- [16] Measurement Systems for Vehicle Dynamics, Tire- and Durability Testing. *Kistler* [online]. [cit. 2015-01-25]. Dostupné z: <http://www.kistler.com/fileadmin/files/divisions/automotive-research-test/vehicles-dynamics-and-durability/200-632e-05.13.pdf>
- [17] Optical Sensor System for Measuring Dynamic Camber Angle. *Kistler* [online]. [cit. 2015-01-25]. Dostupné z: http://www.jr-france.com/site/sites/default/files/users/admin/Corrsys_Datron/DCA_FT_000-884e_010311.pdf
- [18] About us. *Aicon 3D* [online]. [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: <http://aicon3d.com/about-us.html>
- [19] MoveInspect Technology. *Aicon 3D* [online]. [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: <http://aicon3d.com/products/moveinspect-technology/wheelwatch/at-a-glance.html>
- [20] Vehicle Dynamics. *Aicon 3D* [online]. [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: http://www.aicon3d.com/fileadmin/user_upload/produkte/en/moveinspect/WheelWatch/Brochure_Vehicle_Dynamics_EN.pdf
- [21] WheelWatch on test track. *Aicon 3D* [online]. 2014, 21.11. [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=BpyFEuu5W3c>
- [22] RT3000 v2 Family. *Oxts* [online]. [cit. 2015-03-20]. Dostupné z: <http://www.oxts.com/products/rt3000-family/>
- [23] cDAQ-9139. *National Instruments* [online]. [cit. 2015-03-20]. Dostupné z: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/cs/nid/210718>
- [24] NI 9219. *National Instruments* [online]. [cit. 2015-03-20]. Dostupné z: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/cs/nid/208789>
- [25] NI 9862. *National Instruments* [online]. [cit. 2015-03-20]. Dostupné z: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/cs/nid/209347>
- [26] Google Maps. *Google* [online]. [cit. 2015-03-20]. Dostupné z: <https://www.google.cz/maps/@49.2610753,16.5795045,601m/data=!3m1!1e3?hl=cs>



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

ART		Automotive Research and Test
CANbus		Controller Area Network - sběrnice
CCD		Charge-Coupled Device
CCT		Colour Coded Triangulation
CMOS		Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
DCA		Dynamic Camber Angle
I/O		Input/Output
IPC		Industrial Process Control
RHS		Ride Height Sensor
SST		Safety Star Technology
ST		Senzor Technology
USB		Universal Serial Bus
c	[mm]	vzdálenost průsečíků laserů s vozovkou ze senzorů HT-250
d _r	[mm]	průměr ráfku
H ₂	[mm]	výšková hodnota senzoru HT-250_2
H ₃	[mm]	výšková hodnota senzoru HT-250_3
L ₁	[mm]	vzdálenost mezi koly před osou
L ₂	[mm]	vzdálenost mezi koly za osou
p	[mm]	přepona trojúhelníku tvořeným výškovou hodnotou senzoru HT-250_3 a vzdáleností mezi senzory HT-250
R	[mm]	vzdálenost mezi senzory HT-250
r ₀	[mm]	poloměr rejdu
y _{r4}	[-]	měření č. 4 - rovnice přímky závislosti rozdílu senzorů HT-250 na rozdílu senzorů RHS na karoserii
y _{r5}	[-]	měření č. 5 - rovnice přímky závislosti rozdílu senzorů HT-250 na rozdílu senzorů RHS na karoserii
y _{r6}	[-]	měření č. 6 - rovnice přímky závislosti rozdílu senzorů HT-250 na rozdílu senzorů RHS na karoserii
α	[°]	úhel naklopení kola
β	[°]	úhel klopení vozidla
γ	[°]	úhel odklonu kola
δ ₁	[°]	pomocný úhel pro výpočet úhlu naklopení kola
δ ₂	[°]	pomocný úhel pro výpočet úhlu naklopení kola
ε ₁	[°]	pomocný úhel pro výpočet úhlu naklopení kola
ε ₂	[°]	pomocný úhel pro výpočet úhlu naklopení kola
δ ₀	[°]	úhel sbíhavosti
γ	[°]	úhel odklonu kola
σ	[°]	příklon rejdové osy
τ	[°]	záklon rejdové osy



SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obr. 1 Dva druhy řízení: a) řízení předními koly, b) řízení celou nápravou[1]	11
Obr. 2 Odklon kola a) nulový, b) kladný, c) záporný [4]	14
Obr. 3 Kuželový efekt kladného odklonu kola [1]	15
Obr. 4 Nastavení záporného odklonu kola formule 1 [5]	15
Obr. 5 Průběh rejdové osy a) tuhá náprava, b) lichoběžníková náprava, c) náprava McPherson [1]	16
Obr. 6 Poloměr rejdu a) kladný, b) záporný, c) nulový [1]	17
Obr. 7 Záklon rejdové osy; a) tuhá náprava s rejdovým čepem, b) lichoběžníková náprava s kulovými klouby, c) náprava McPherson [1]	18
Obr. 8 Sbíhavost kol [1]	19
Obr. 9 Měření odklonu kola mechanickým měřidlem[6][8][7]	21
Obr. 10 Technik připravuje vozidlo k měření zařízením Bosch Luchs[9]	23
Obr. 11 Vozidlo během měření zařízením Bosch Luchs[9]	23
Obr. 12 Měření systémem BEISSBARTH a měřicí kamera s LED diody[10]	24
Obr. 13 Postup měření systému ATT/NUSSBAUM[11]	25
Obr. 14 Systém pro měření jízdních vlastností společnosti Kistler [13]	27
Obr. 15 Upevnění na kolo a možnost kombinace s dalším zařízením[15]	28
Obr. 16 Stabilizační tyč - vlevo uchycení na vozidlo pomocí magnetu, vpravo pomocí přísavek[15]	28
Obr. 17 Držák senzorů systému DCA[13]	29
Obr. 18 Princip optické triangulace [14]	30
Obr. 19 Bezkontaktní laserový senzor řady HF [13]	31
Obr. 20 RV-4 Sensors a uchycení na vozidlo pomocí přísavného zařízení na kapotě [13]	32
Obr. 21 AICON Wheel Adapter (disk na kola) s reflexními body a sada uchycení na kapotu[19]	35
Obr. 22 Vysokorychlostní digitální kamera CMOS [20]	35
Obr. 23 AICON WheelWatch při montáži a měření během jízdy [21]	37
Obr. 24 Inerciální a navigační systém RT3002 [22]	39
Obr. 25 Vnitřní systém měřicí ústředny (výpočetní jednotka cDAQ-9139 a dva přídavné moduly NI9219 a NI9862[23][24][25]	39
Obr. 26 Zařízení dostupné na ústavu	40
Obr. 27 Výroba součástek pro uchycení senzorů	41
Obr. 28 Postup výroby hlavního dílu uchycení	42
Obr. 29 Zadní zavěšení Control blade vozidla Ford Focus combi MKII.	42
Obr. 30 Pohled na místo měření z Google Maps [26]	43
Obr. 31 Zvolený souřadnicový systém vozidla	44
Obr. 32 Znázornění úhlu naklonění kola vůči vozovce ve směru osy X (osa Y - rovina vozovky, osa Z - kolmice k vozovce)	45
Obr. 33 Znázornění úhlu klopení vozidla ve směru osy X (světle zelená osa Y - rovina vozovky, tmavě zelená osa Y - osa vozidla)	45
Obr. 34 Montáž systému uchycení na kolo vozidla	47



Obr. 35 Držák s uchycenými senzory pro měření odklonu kola během jízdy	47
Obr. 36 Přichystané venkovní senzory (3 na držáku, po 1 pod zadními dveřmi na každé straně, anténa pro inerciální a navigační systém na střeše vozidla)	48
Obr. 37 Napojení kabelů do měřicí ústředny	49
Obr. 38 Pohled do zavazadlového prostoru a pozice umístění měřicí ústředny a GPS modulu	49
Obr. 39 Viditelný test laseru senzorů HT-250	50
Obr. 40 Změna uchycení přísavky, vlevo před uvolněním, vpravo po uvolnění	51
Obr. 41 Prostředí softwaru LabVIEW s ukazateli hodnot senzorů	52
Obr. 42 Výškové senzory HT-250 a RHS (měření č. 4)	53
Obr. 43 Závislost rozdílu senzorů HT-250 na rozdílu senzorů RHS na karoserii (měření č. 4)	53
Obr. 44 Úhel naklopení kola s vykreslením příčného zrychlení (měření č. 4)	54
Obr. 45 Porovnání úhlu klopení vozidla ze senzorů RHS a z inerciálního a navigačního systému s vykreslením příčného zrychlení (měření č. 4)	54
Obr. 46 Závislost úhlu naklopení kola na příčném zrychlení (měření č. 4)	55
Obr. 47 Závislost úhlu klopení vozidla na příčném zrychlení (měření č. 4)	55
Obr. 48 Úhel odklonu kola vůči karoserii s vykreslením příčného zrychlení (měření č. 4)	56
Obr. 49 Závislost úhlu odklonu kola na příčném zrychlení (měření č. 4)	56
Obr. 50 Výškové senzory HT-250 a RHS (měření č. 5)	57
Obr. 51 Závislost rozdílu senzorů HT-250 na rozdílu senzorů RHS na karoserii (měření č. 5)	57
Obr. 52 Úhel naklopení kola s vykreslením příčného zrychlení (měření č. 5)	58
Obr. 53 Porovnání úhlu klopení vozidla ze senzorů RHS a z inerciálního a navigačního systému s vykreslením příčného zrychlení (měření č. 5)	58
Obr. 54 Závislost úhlu naklopení kola na příčném zrychlení (měření č. 5)	59
Obr. 55 Závislost úhlu klopení vozidla na příčném zrychlení (měření č. 5)	59
Obr. 56 Úhel odklonu kola vůči karoserii s vykreslením příčného zrychlení (měření č. 5)	60
Obr. 57 Závislost úhlu odklonu kola na příčném zrychlení (měření č. 5)	60
Obr. 58 Výškové senzory HT-250 a RHS (měření č. 6)	61
Obr. 59 Závislost rozdílu senzorů HT-250 na rozdílu senzorů RHS na karoserii (měření č. 6)	61
Obr. 60 Úhel naklopení kola s vykreslením příčného zrychlení (měření č. 6)	62
Obr. 61 Porovnání úhlu klopení vozidla ze senzorů RHS a z inerciálního a navigačního systému s vykreslením příčného zrychlení (měření č. 6)	62
Obr. 62 Závislost úhlu naklopení kola na příčném zrychlení (měření č. 6)	63
Obr. 63 Závislost úhlu klopení vozidla na příčném zrychlení (měření č. 6)	63
Obr. 64 Úhel odklonu kola vůči karoserii s vykreslením příčného zrychlení (měření č. 6)	64
Obr. 65 Závislost úhlu odklonu kola na příčném zrychlení (měření č. 6)	64
Obr. 66 Přímková závislost rozdílu senzorů HT-250 na rozdílu senzorů RHS	67
Obr. 67 Znázornění uvažování výpočtu úhlu naklopení kola	67
Obr. 68 Znázornění jednoduššího výpočtu úhlu naklopení kola	68



Obr. 69 Porovnání výsledných hodnot ze dvou vzorců pro výpočet úhlu naklopení kola (data z měření č. 5)	69
Obr. 70 Závislost úhlu odklonu kola na úhlu naklopení kola a úhlu klopení vozidla (data z měření č. 4)	71
Obr. 71 Závislost úhlu odklonu kola na úhlu naklopení kola a úhlu klopení vozidla (data z měření č. 5)	71
Obr. 72 Závislost úhlu odklonu kola na úhlu naklopení kola a úhlu klopení vozidla (data z měření č. 5)	72
Tab. 1 Tabulka specifikace senzorů[13]	30
Tab. 2 Specifikace zařízení RV-4 Sensors[13]	32
Tab. 3 Technická data systému RV-4 Sensors[13]	33
Tab. 4 Specifikace kamery a systému WheelWatch[20]	36
Tab. 5 Technická data výškových senzorů HT-250 a Texense RHS	38



SEZNAM VÝKRESŮ

2015-DP-116190-01	Výkres hlavního L profilu pro uchycení
2015-DP-116190-02	Výkres pomocných prvků pro uchycení

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Měření č. 4 - Graf výškových senzorů bez RHS72 Měření č. 4 - Porovnání senzoru HT250-2 se senzorem RHS72 (upraveno)
Příloha 2	Měření č. 4 - Detail č. 1 pro porovnání senzorů HT250-2 a RHS72 (upraveno) Měření č. 4 - Detail č. 2 pro porovnání senzorů HT250-2 a RHS72 (upraveno)
Příloha 3	Měření č. 4 - Graf rozdílu senzorů HT-250 s vykreslením příčného zrychlení Měření č. 4 - Graf rozdílu senzorů RHS na karoserii s vykreslením příčného zrychlení
Příloha 4	Měření č. 4 - Graf závislosti rozdílu senzorů HT-250 na příčném zrychlení Měření č. 4 - Graf závislosti rozdílu senzorů RHS na karoserii na příčném zrychlení
Příloha 5	Měření č. 4 - Graf rychlosti, podélného zrychlení a příčného zrychlení Měření č. 4 - Graf profilu jízdy
Příloha 6	Měření č. 5 - Graf výškových senzorů bez RHS72 Měření č. 5 - Porovnání senzoru HT250-2 se senzorem RHS72 (upraveno)
Příloha 7	Měření č. 5 - Detail č. 1 pro porovnání senzorů HT250-2 a RHS72 (upraveno) Měření č. 5 - Detail č. 2 pro porovnání senzorů HT250-2 a RHS72 (upraveno)
Příloha 8	Měření č. 5 - Graf rozdílu senzorů HT-250 s vykreslením příčného zrychlení Měření č. 5 - Graf rozdílu senzorů RHS na karoserii s vykreslením příčného zrychlení
Příloha 9	Měření č. 5 - Graf závislosti rozdílu senzorů HT-250 na příčném zrychlení Měření č. 5 - Graf závislosti rozdílu senzorů RHS na karoserii na příčném zrychlení
Příloha 10	Měření č. 5 - Graf rychlosti, podélného zrychlení a příčného zrychlení Měření č. 5 - Graf profilu jízdy
Příloha 11	Měření č. 6 - Graf výškových senzorů bez RHS72 Měření č. 6 - Porovnání senzoru HT250-2 se senzorem RHS72 (upraveno)
Příloha 12	Měření č. 6 - Detail č. 1 pro porovnání senzorů HT250-2 a RHS72 (upraveno) Měření č. 6 - Detail č. 2 pro porovnání senzorů HT250-2 a RHS72 (upraveno)
Příloha 13	Měření č. 6 - Graf rozdílu senzorů HT-250 s vykreslením příčného zrychlení Měření č. 6 - Graf rozdílu senzorů RHS na karoserii s vykreslením příčného zrychlení
Příloha 14	Měření č. 6 - Graf závislosti rozdílu senzorů HT-250 na příčném zrychlení Měření č. 6 - Graf závislosti rozdílu senzorů RHS na karoserii na příčném zrychlení
Příloha 15	Měření č. 6 - Graf rychlosti, podélného zrychlení a příčného zrychlení

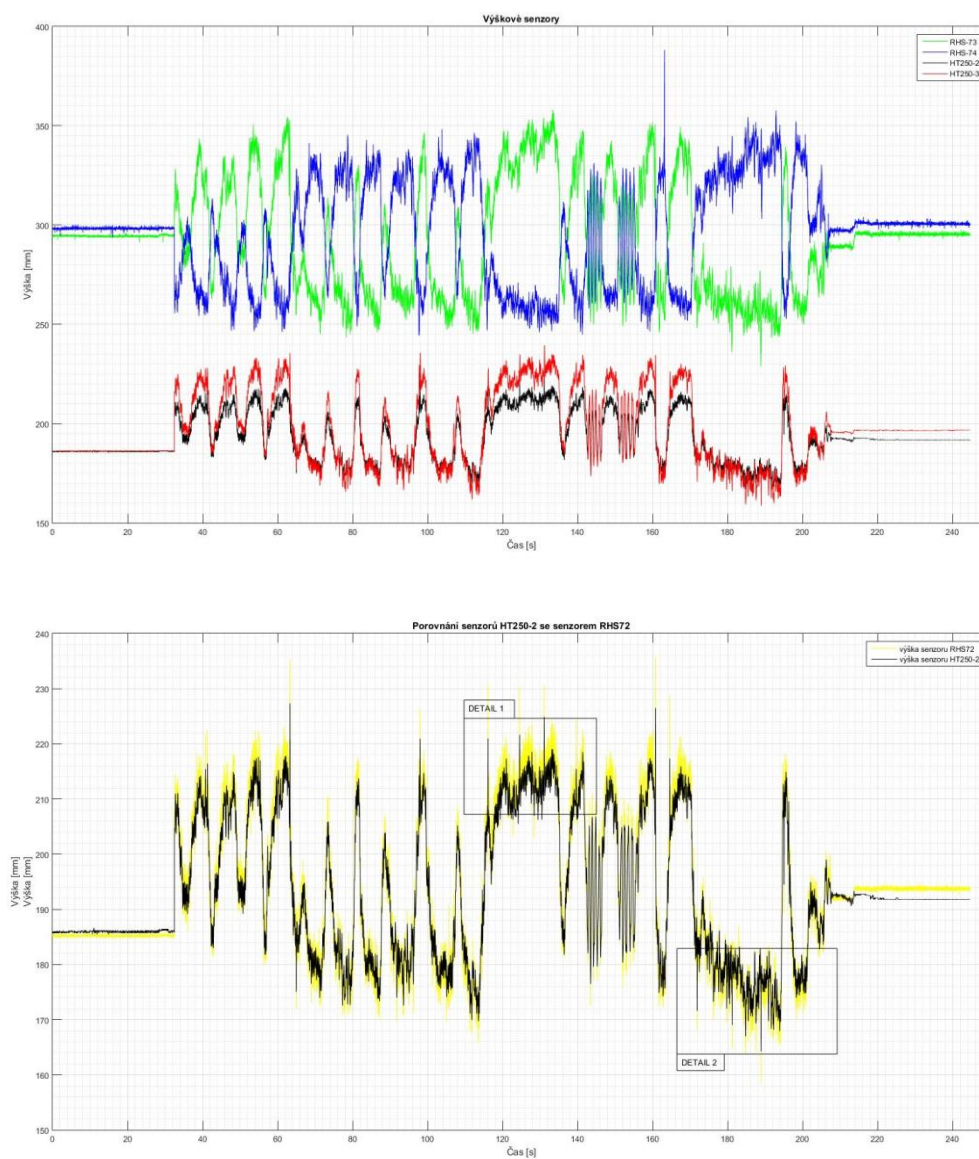


	Měření č. 6 - Graf profilu jízdy
Příloha 16	Detail 1 pro porovnání výsledných hodnot ze dvou vzorců pro výpočet úhlu naklopení kola (měření č. 5)
	Detail 2 pro porovnání výsledných hodnot ze dvou vzorců pro výpočet úhlu naklopení kola (měření č. 5)



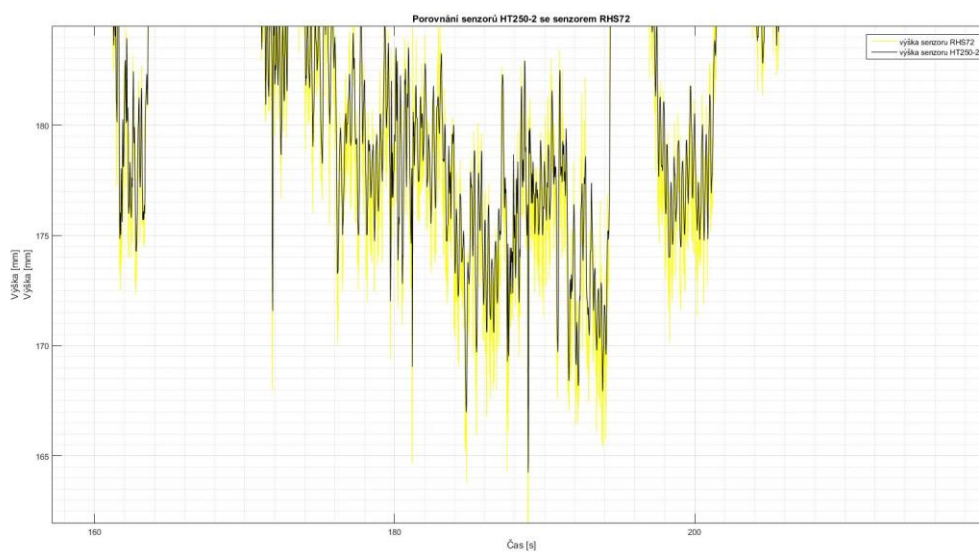
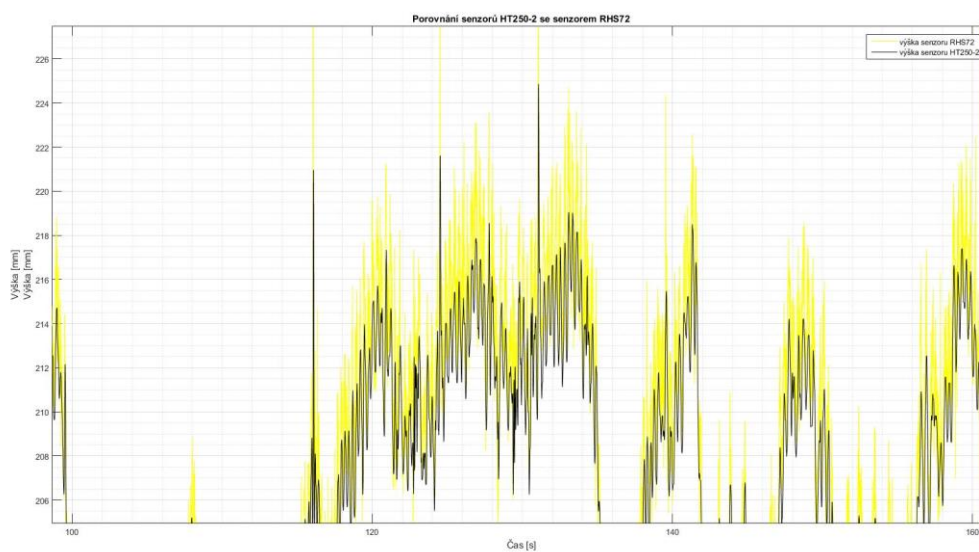
Příloha 1 - Měření č. 4 - Graf výškových senzorů bez RHS72

Měření č. 4 - Porovnání senzoru HT250-2 se senzorem RHS72 (upraveno)



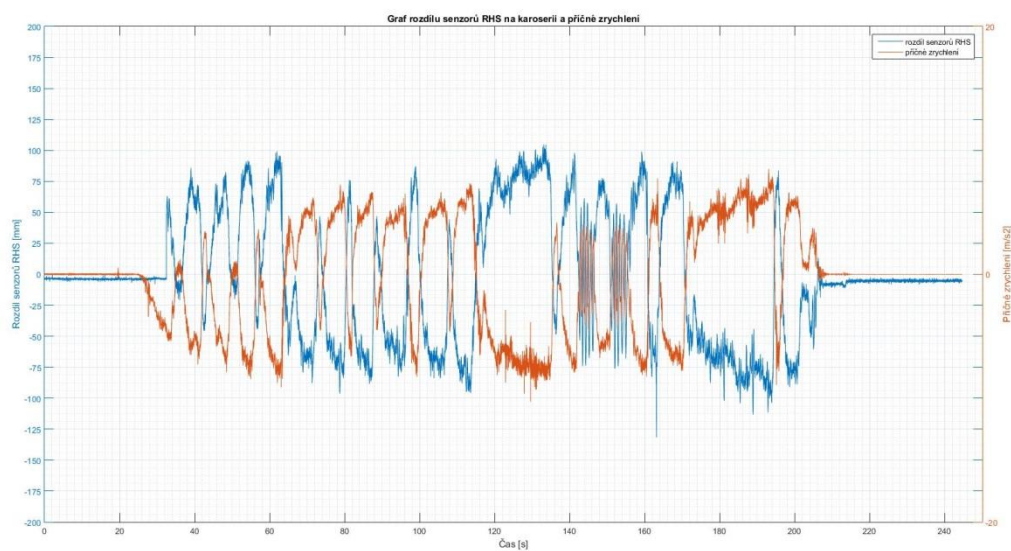
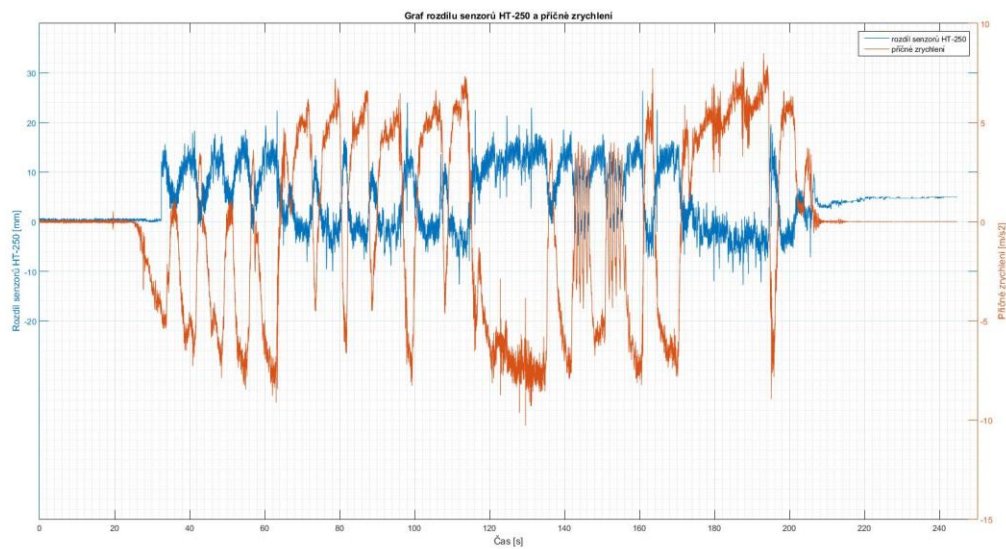


Příloha 2 - Měření č. 4 – Detail č. 1 pro porovnání senzorů HT250-2 a RHS72 (upraveno)
Měření č. 4 – Detail č. 2 pro porovnání senzorů HT250-2 a RHS72 (upraveno)



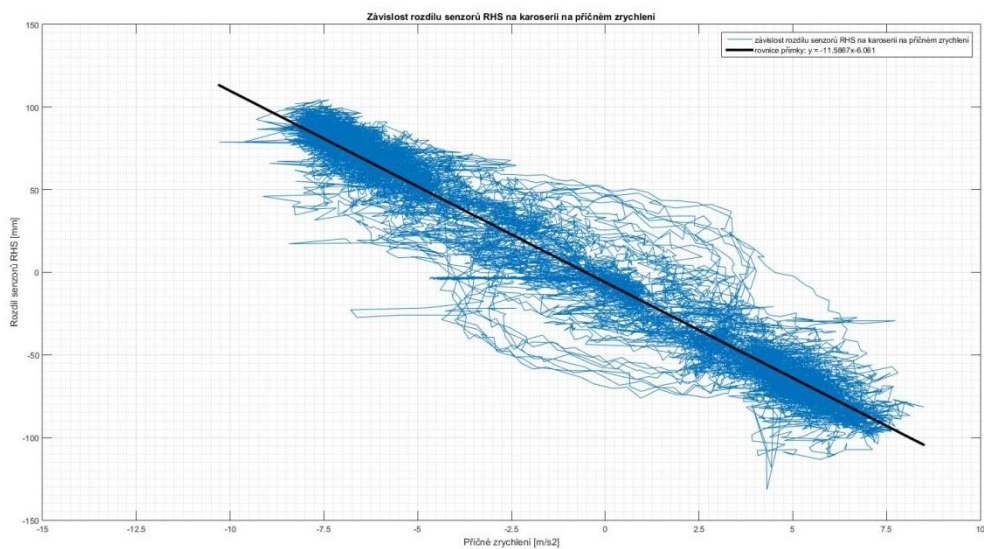
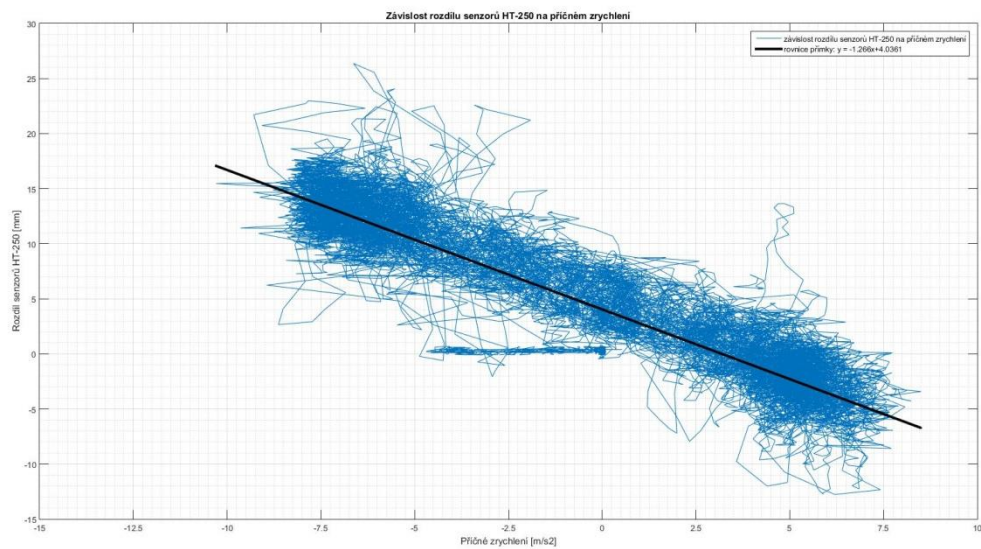


Příloha 3 - Měření č. 4 - Graf rozdílu senzorů HT-250 s vykreslením příčného zrychlení
Měření č. 4 – Graf rozdílu senzorů RHS na karoserii s vykreslením příčného zrychlení



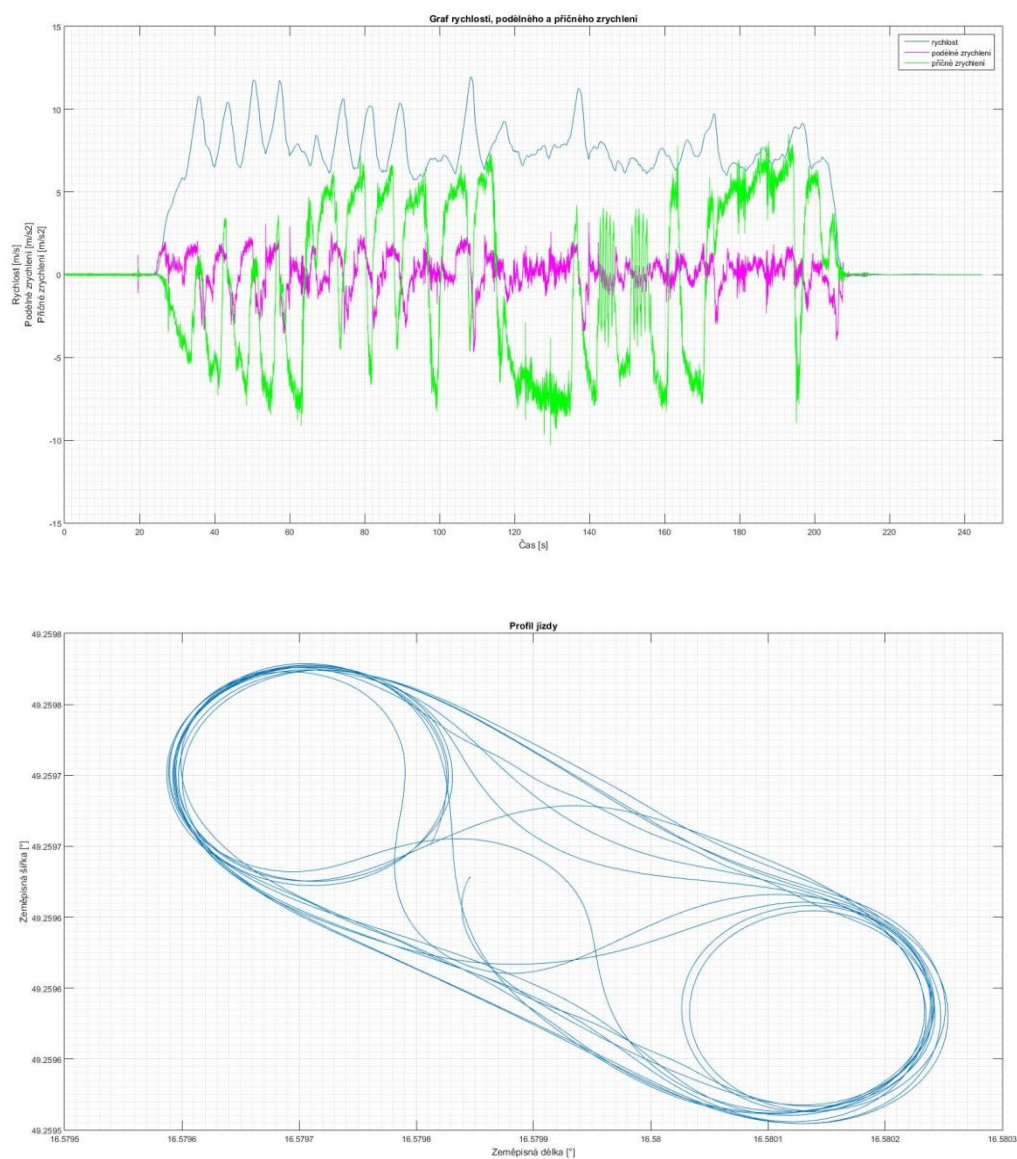


Příloha 4 - Měření č. 4 – Graf závislosti rozdílu senzorů HT-250 na příčném zrychlení
Měření č. 4 – Graf závislosti rozdílu senzorů RHS na karoserii na příčném zrychlení





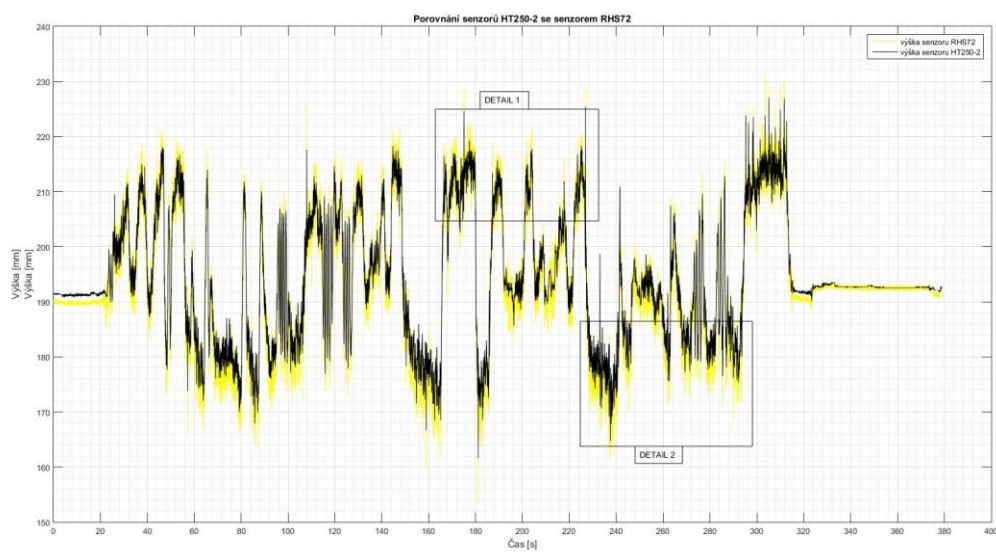
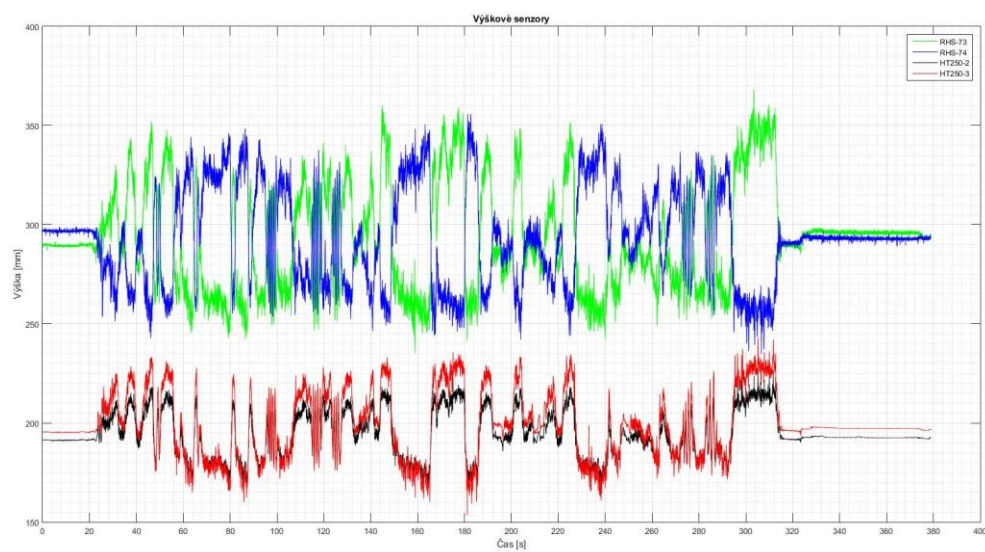
Příloha 5 - Měření č. 4 – Graf rychlosti, podélného zrychlení a příčného zrychlení
Měření č. 4 – Graf profilu jízdy





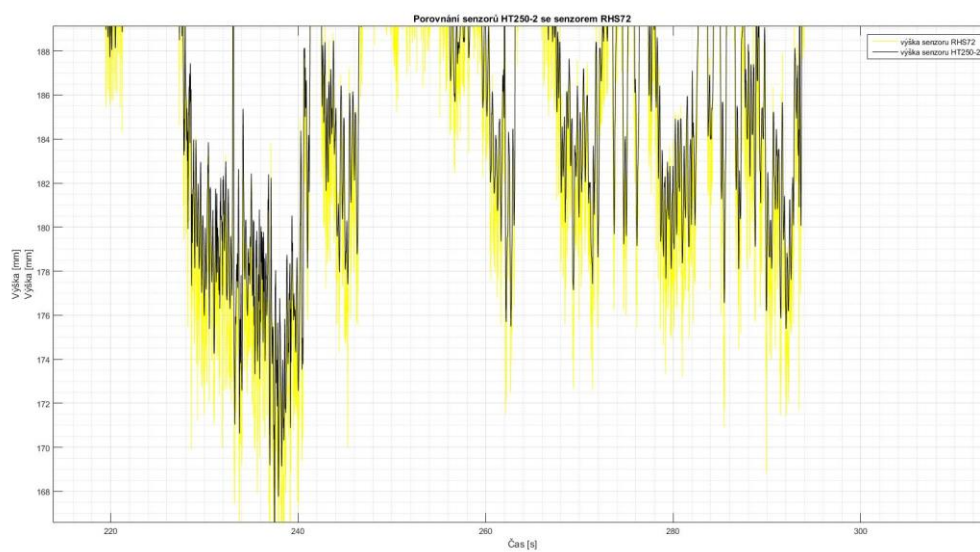
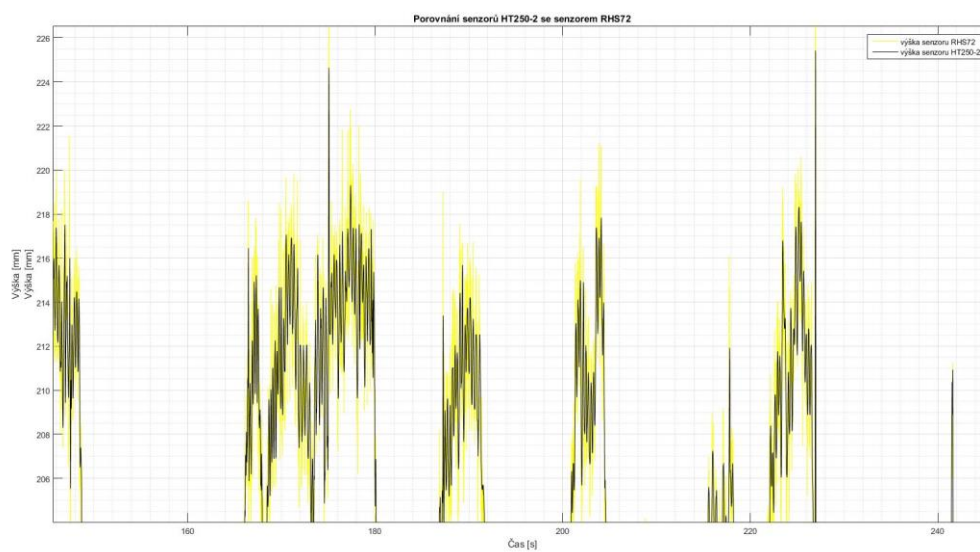
Příloha 6 - Měření č. 5 - Graf výškových senzorů bez RHS72

Měření č. 5 - Porovnání senzoru HT250-2 se senzorem RHS72 (upraveno)



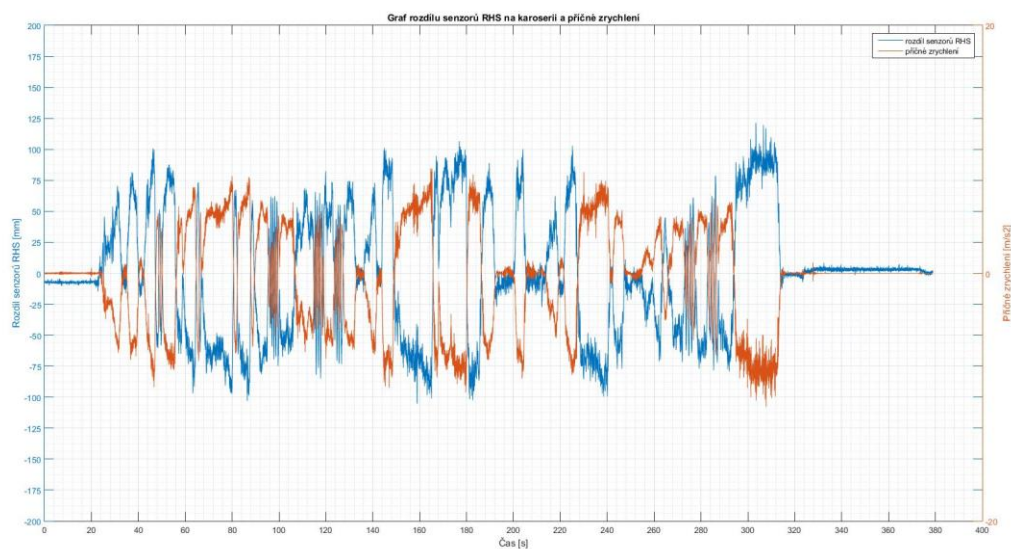
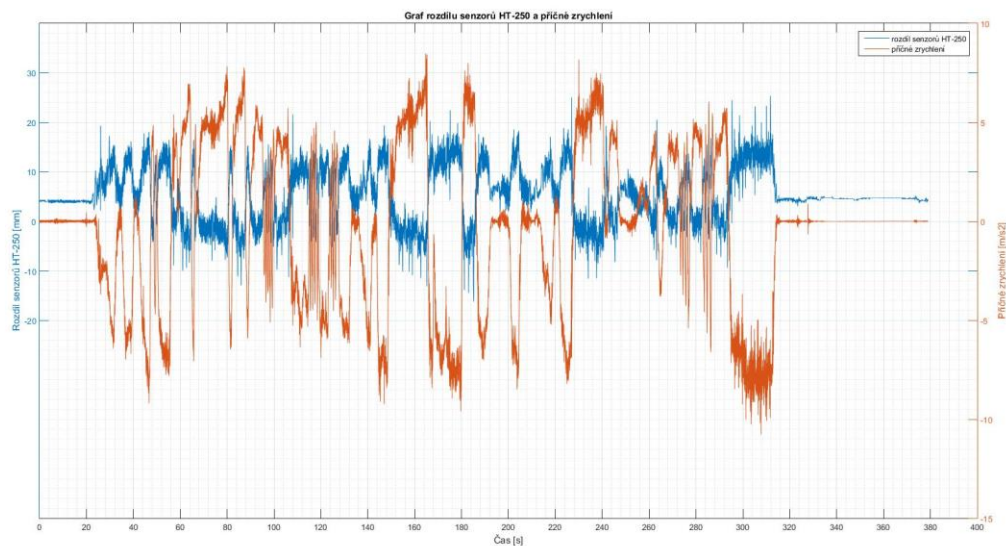


Příloha 7 - Měření č. 5 – Detail č. 1 pro porovnání senzorů HT250-2 a RHS72 (upraveno)
Měření č. 5 – Detail č. 2 pro porovnání senzorů HT250-2 a RHS72 (upraveno)



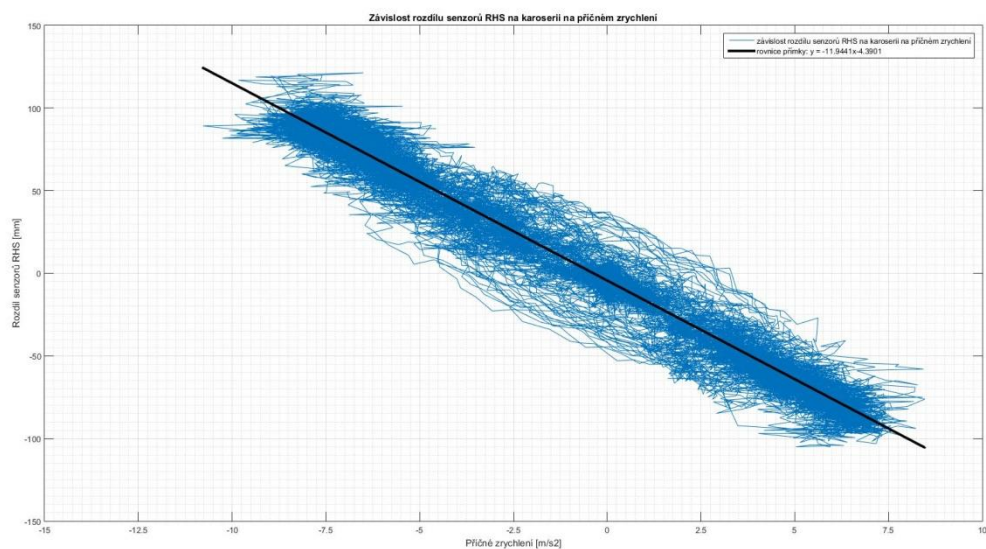
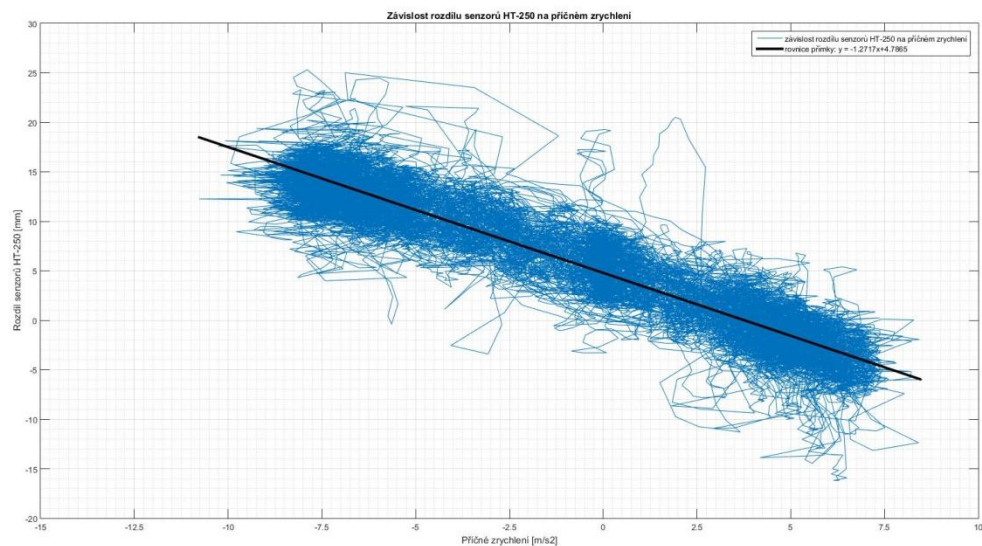


Příloha 8 - Měření č. 5 - Graf rozdílu senzorů HT-250 s vykreslením příčného zrychlení
Měření č. 5 – Graf rozdílu senzorů RHS na karoserii s vykreslením příčného zrychlení



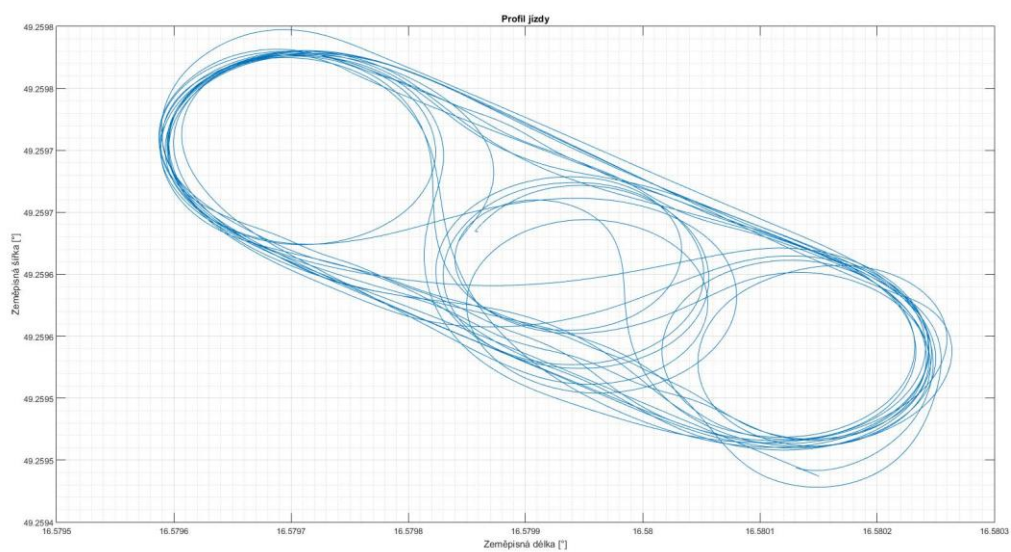
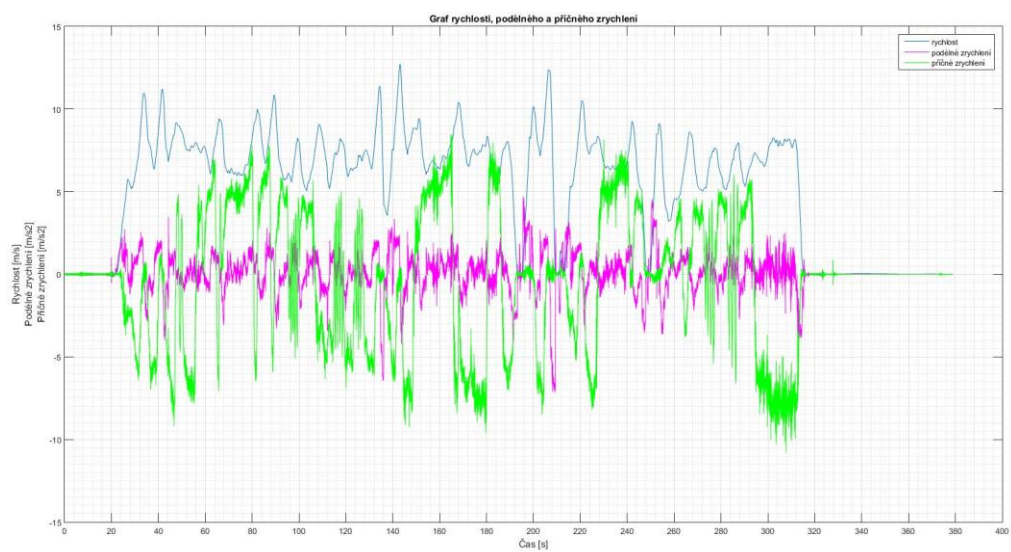


Příloha 9 - Měření č. 5 – Graf závislosti rozdílu senzorů HT-250 na příčném zrychlení
Měření č. 5 – Graf závislosti rozdílu senzorů RHS na karoserii na příčném zrychlení





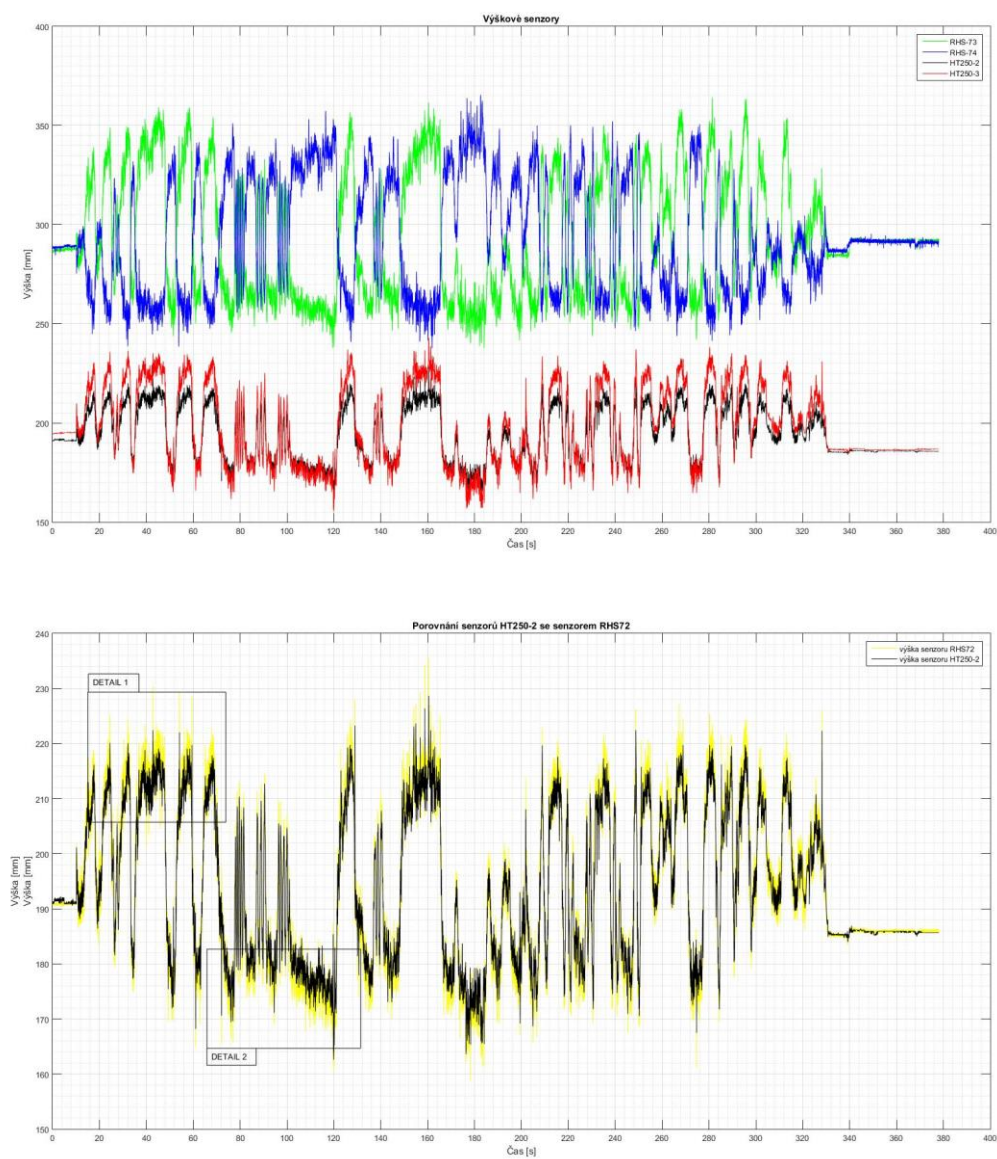
Příloha 10 - Měření č. 5 – Graf rychlosti, podélného zrychlení a příčného zrychlení
Měření č. 5 – Graf profilu jízdy





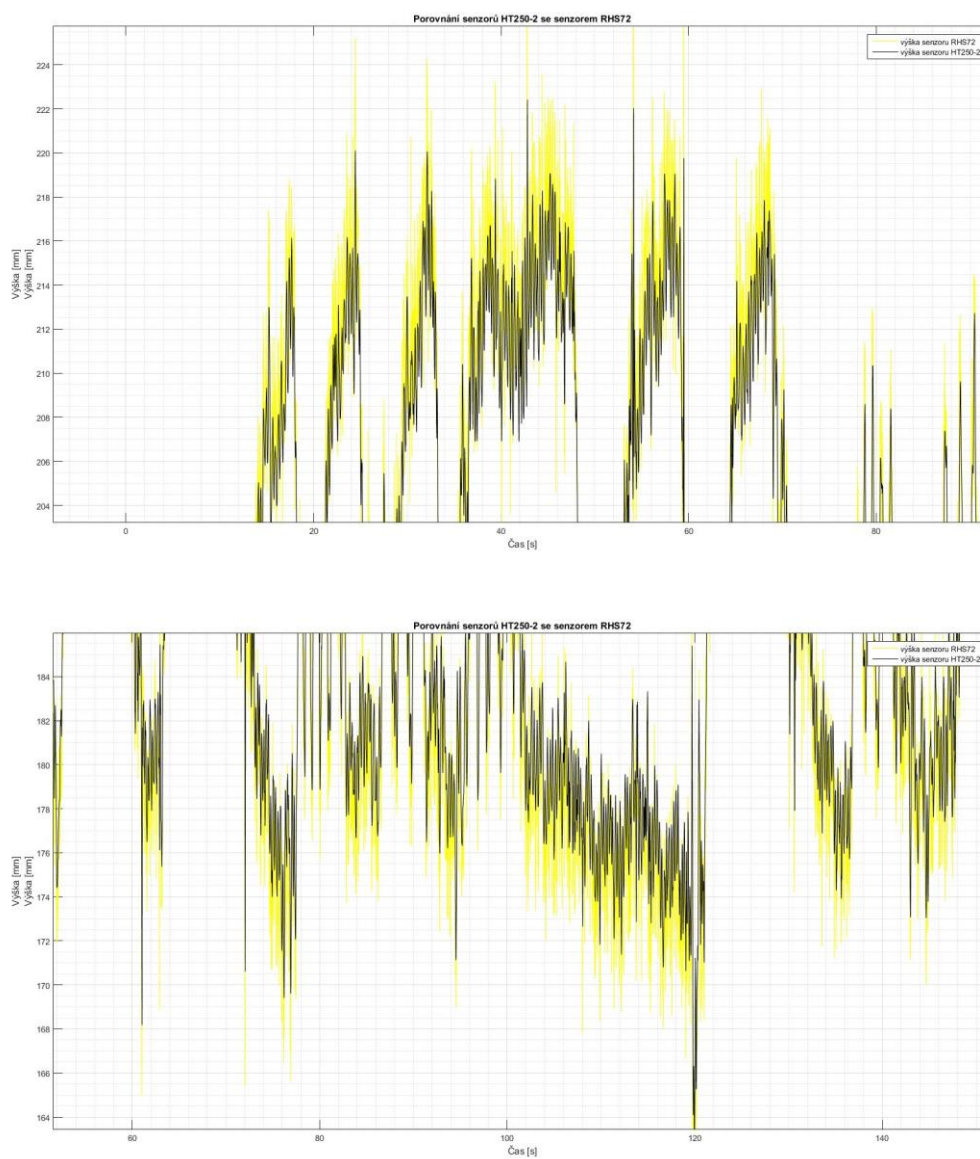
Příloha 11 - Měření č. 6 - Graf výškových senzorů bez RHS72

Měření č. 6 - Porovnání senzoru HT250-2 se senzorem RHS72 (upraveno)



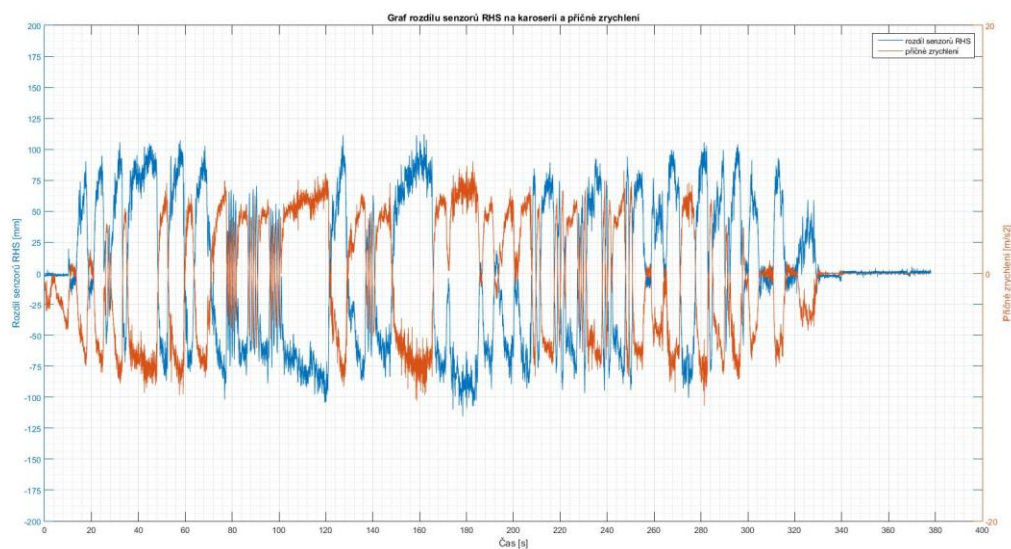
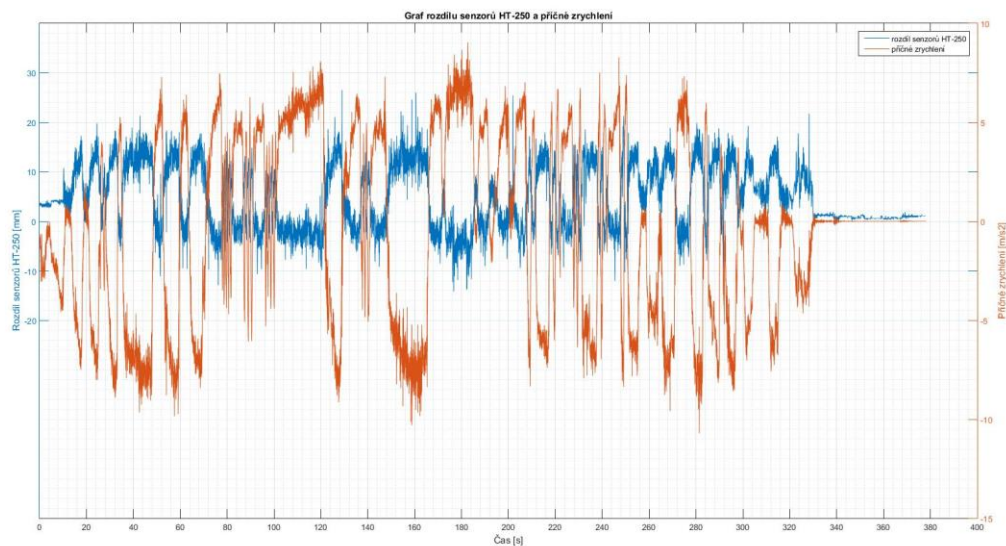


Příloha 12 - Měření č. 6 – Detail č. 1 pro porovnání senzorů HT250-2 a RHS72 (upraveno)
Měření č. 6 – Detail č. 2 pro porovnání senzorů HT250-2 a RHS72 (upraveno)



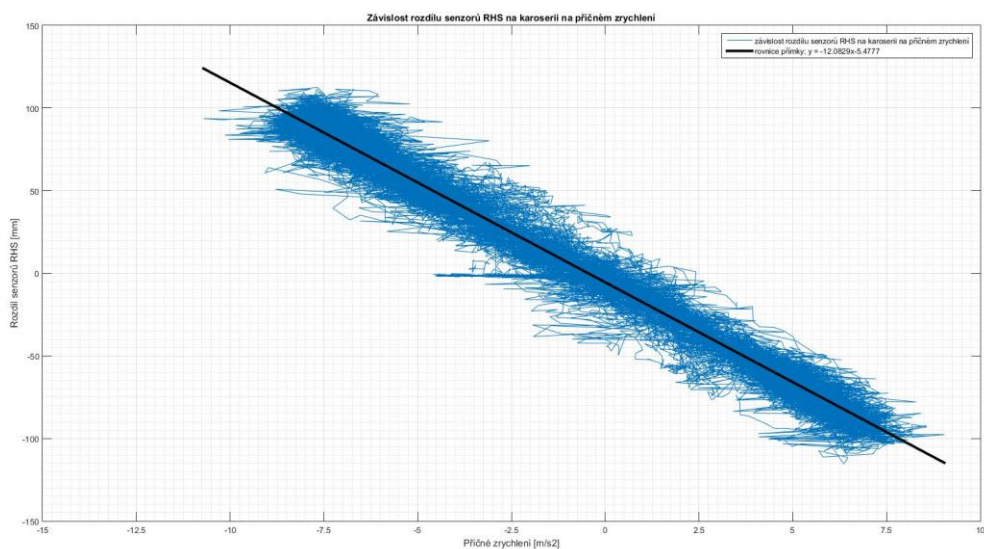
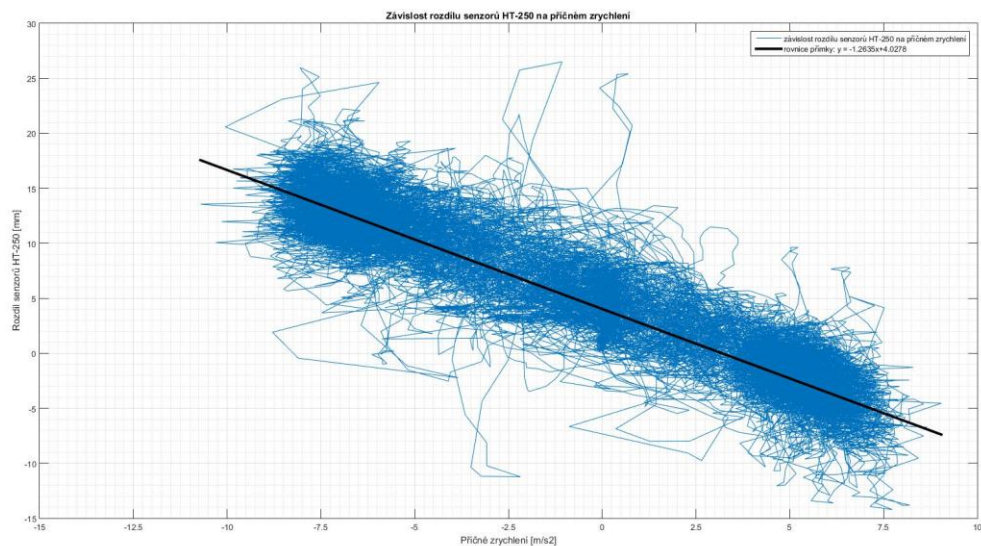


Příloha 13 - Měření č. 6 - Graf rozdílu senzorů HT-250 s vykreslením příčného zrychlení
Měření č. 6 – Graf rozdílu senzorů RHS na karoserii s vykreslením příčného zrychlení



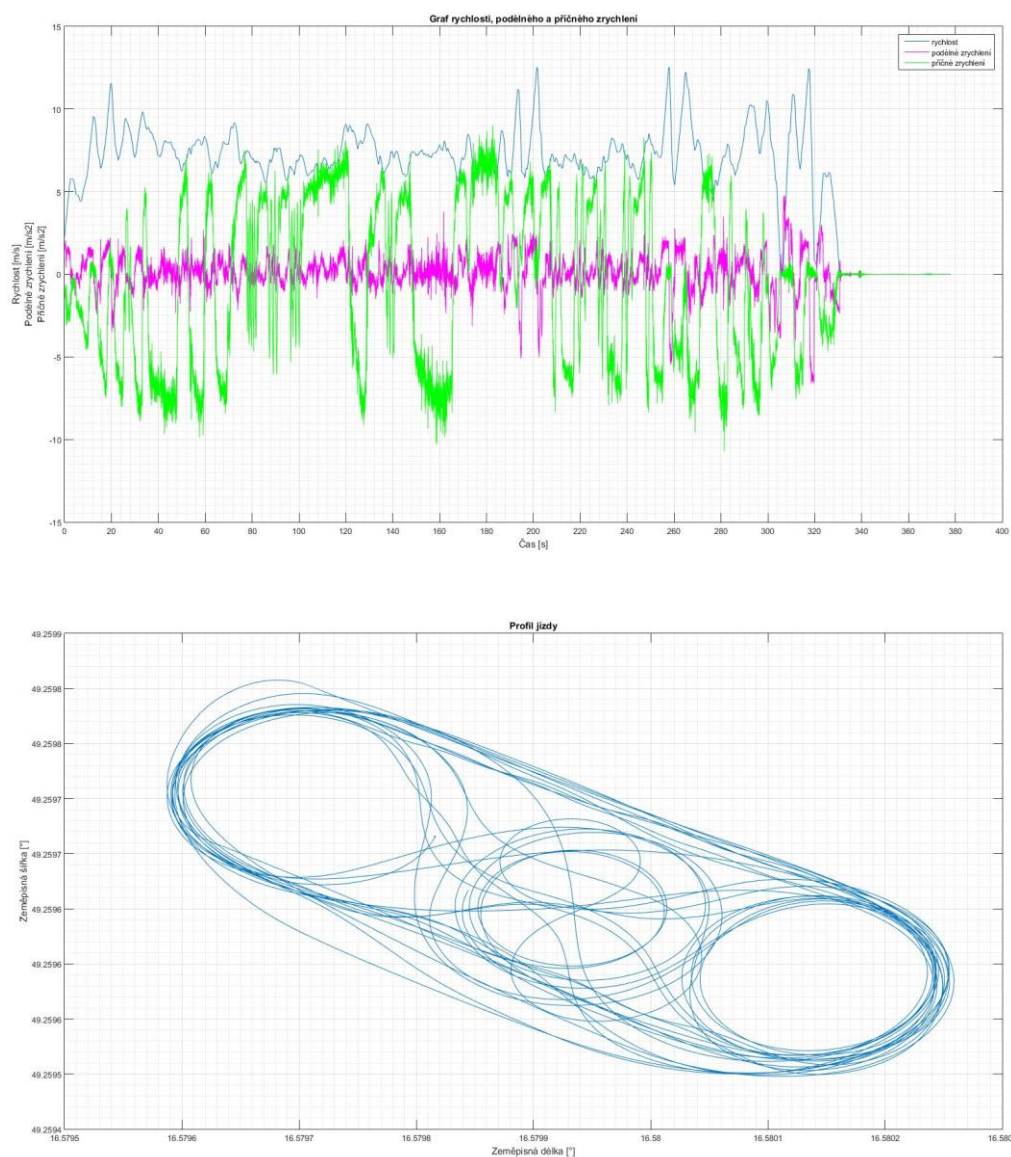


Příloha 14 - Měření č. 6 – Graf závislosti rozdílu senzorů HT-250 na příčném zrychlení
Měření č. 6 – Graf závislosti rozdílu senzorů RHS na karoserii na příčném zrychlení





Příloha 15 - Měření č. 6 – Graf rychlosti, podélného zrychlení a příčného zrychlení
Měření č. 6 – Graf profilu jízdy





- Příloha 16 Detail 1 pro porovnání výsledných hodnot ze dvou vzorců pro výpočet úhlu naklopení kola (měření č. 5)
- Detail 2 pro porovnání výsledných hodnot ze dvou vzorců pro výpočet úhlu naklopení kola (měření č. 5)

