



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 PODDAJNOSTÍ ZAVĚŠENÍ KOL

MEASUREMENT OF THE SUSPENSION FLEXIBILITY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAN SUCHÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR PORTEŠ, Dr.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jan Suchý

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 poddajnosti zavěšení kol

v anglickém jazyce:

Measurement of the suspension flexibility

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Měření poddajnosti zavěšení kol se zaměřením na algoritmus vyhodnocení polohy kola během měření.

Cíle diplomové práce:

Cílem je s určit polohu kola s využitím 3D scanneru TRITOP. Za tímto účelem vypracujte metodu měření polohy kola a sestavte algoritmus zpracování měřených dat v software Matlab. Dle možností metodu verifikujte pomocí měření.

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 Chassis. 2nd edition. Oxford: Butterworth - Heinemann, 2001. 444 s. ISBN 0-7506-5054-0.

ZAPLATÍLEK, K., DOŇAR, B., MATLAB tvorba uživatelských aplikací, BEN Praha 2004, ISBN 80-7300-133-0.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Porteš, Dr.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 19.11.2013

L.S.

prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty



ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na metodu určení polohy kola pomocí fotogrammetrického zařízení Tritop. Verifikace metody je provedena měřením na vozidle Formule Student Dragon II. Měřená data zpracovává algoritmus výpočtu sestavený v softwaru Matlab. Závěrečná část popisuje návrh postupu měření poddajností zavěšení na zařízení ÚADI.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elastokinematika, poloha kola, zařízení ÚADI, Tritop, Formule Student, Matlab

ABSTRACT

The thesis is focused on the method of determining the position of the wheel using photogrammetric equipment Tritop. Verification of the method is performed by measuring of the Formula Student Dragon II. Measured data are processed by algorithm for calculating compiled in Matlab software. The final section describes a concept the measurement of the suspension flexibility on the UADI device.

KEYWORDS

Kinematics and compliance, position of the wheel, UADI device, Tritop, Formula Student, Matlab



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SUCHÝ, J. *Měření poddajností zavěšení kol*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 111 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Porteš, Dr..



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne

.....

30.5. 2014

Bc. Jan Suchý



PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Portešovi, Dr. za účinnou pedagogickou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce a Ing. Petru Hejtmánkovi, PhD. za cenné rady při měření v laboratořích ÚADI.

V Brně dne

30.5. 2014

.....
Bc. Jan Suchý



OBSAH

Úvod	7
1 Zavěšení kol	9
1.1 Závislé zavěšení	9
1.2 Nezávislé zavěšení	11
1.3 Geometrie řízení	14
1.3.1 Odklon kola	14
1.3.2 Příklon rejdové osy	15
1.3.3 Poloměr rejdu	16
1.3.4 Záklon rejdové osy	17
1.3.5 Sbíhavost kol	18
1.4 Elastokinematické zavěšení kol	19
1.4.1 Princip samořízení	20
1.4.2 Samořízení zadních náprav	22
1.4.3 Samořízení předních náprav	23
1.4.4 Model soustavy řízení	24
2 Měření elastokinematiky zavěšení kol	25
2.1 Základní jízdní stavy simulované zařízeními	25
2.1.1 Metodika průběhu měření	28
2.2 Specializovaná zařízení pro měření elastokinematiky	29
2.2.1 Suspension parameter measuring machine – SPMM 4000 HS	29
2.2.2 MTS K&C System	32
2.3 Měřicí zařízení ČVUT	35
2.3.1 Upínací mechanismus rámu vozidla	36
2.3.2 Zatěžovací mechanismy	36
2.3.3 Měřicí snímače	37
3 Měřicí zařízení ÚADI	39
3.1 Návrh konstrukce nového zařízení ÚADI	39
3.1.1 Pracovní stůl	40
3.1.2 Mechanismus zatěžování	41
3.2 Snímače zatížení a polohy kola	42
3.3 Fotogrammetrické zařízení Tritop	43
3.3.1 Hardware zařízení Tritop	43
3.3.2 Postup při snímání objektů	46
3.3.3 Software zařízení Tritop	47
4 Tvorba výpočtového algoritmu	49
4.1 Určení polohy kola	49
4.1.1 Normálový vektor kola	49
4.1.2 Střed kola	51
4.2 Optimalizace souřadnic polohy kol	52
4.2.1 Normálový vektor	52
4.2.2 Střed kola	53
4.2.3 Transformace souřadnic	54
4.3 Výpočet geometrie vozidla	55
4.3.1 Rozvor kol a míra přes kola	55



4.3.2	Sbíhavost	56
4.3.3	Odklon.....	59
4.3.4	Příklon a záklon rejdrového čepu	60
4.3.5	Rozdíl rejdrů.....	63
4.3.6	Přesazení kol	64
4.4	Popis výpočtového programu v Matlabu.....	65
4.4.1	Datové soubory a značení kódovaných bodů	65
4.4.2	Určení polohy kol a tranformace souřadnic.....	67
4.4.3	Výpočet geometrie vozidla	68
4.4.4	Výpis hodnot	68
5	Měření	69
5.1	Příprava vozidla pro měření.....	70
5.1.1	Umístění kalibračních tyčí	70
5.1.2	Umístění kódovaných bodů.....	71
5.1.3	Postup při snímání vozidla	73
5.2	Určení přesnosti měření a konfigurace podmínek pro výpočet.....	73
5.2.1	Popis metody	74
5.2.2	Vyhodnocení měření	75
5.3	Měření geometrie vozidla	83
5.3.1	Geometrie určená metodou zvedání vozidla	83
5.3.2	Geometrie určená metodou posunování vozidla	85
5.3.3	Ověření parametrů geometrie zařízením Hunter VAS 6292.....	87
5.3.4	Shrnutí výsledků měření geometrie vozidla různými metodami	89
6	Rozbor současného stavu měřícího zařízení ÚADI	90
6.1	Realizace zařízení ÚADI	90
6.1.1	Zhotovení pracovního stolu a zatěžovacího mechanismu.....	91
6.1.2	Přípravky pro fixaci vybraných prvků vozidla	91
6.2	Měření poddajností zavěšení zařízením ÚADI	93
6.2.1	Metoda měření geometrie vozidla	93
6.2.2	Přesnost metody určení polohy kola	93
6.2.3	Faktory vzniku chyb měření	94
6.2.4	Korekce sklonu rámu a deformace náprav v algoritmu výpočtu	94
6.3	Srovnání měřícího zařízení ÚADI s měřícím zařízením ČVUT	95
	Závěr.....	97
	Seznam použitých zkratk, symbolů a veličin.....	101
	Seznam obrázků	105
	Seznam tabulek	107
	Seznam grafů	109
	Seznam příloh.....	111



ÚVOD

Automobily tvoří v současné době dominantní část způsobu dopravy. Trendem vývoje nových modelů je stále zvyšování nároků na bezpečnost jízdy a jízdní komfort. Oba požadavky do značné míry ovlivňuje konstrukce zavěšení kol. Jejím úkolem je pohlcovat rázy od nerovností a zajišťovat stálý kontakt kola s vozovkou. Koncepce moderních vozidel využívají ve stále větší míře pružné prvky uložení komponentů zavěšení, čímž zvyšují podíl elastokinematických vlastností zavěšení kol.

Pružným uložením prvků zavěšení kol, které jsou samozřejmou součástí zavěšení u většiny osobních automobilů, je věnována značná pozornost kvůli dokonalému odladění jejich vlastností. Pro zjišťování elastokinematických vlastností se používají specializované měřicí zařízení s možností simulování jízdních stavů, kterými získáváme data o postavení kola vůči vozovce. Tato specializovaná zařízení jsou velmi nákladná a rozměrná. Často se tedy přistupuje k vývoji zjednodušených měřicích zařízení, kterými by bylo možné získávat důležitá data pro vývojové práce na vozidlech. Takto zjednodušená zařízení nejsou schopna provádět rozsáhlé simulace, ovšem vzhledem k finančním nárokům a četnosti provádění měření se jedná o vhodnou možnost určení podílu elastokinematických vlastností.

Záměrem Ústavu automobilního a dopravního inženýrství FSI VUT v Brně (ÚADI) je vyvinout zjednodušené měřicí zařízení především pro vývojové práce na vozidle Formule Student. Diplomová práce navazuje svým zadáním na bakalářskou práci Jana Poláška [10] zabývající se konstrukčním návrhem nového měřicího zařízení ÚADI. Vývoj měřicího zařízení je veden požadavkem minimálních nákladů s využitím měřicích zařízení, které Ústav automobilního a dopravního inženýrství vlastní.

Pro snímání polohy kola je zvolen fotogrammetrický systém Tritop, umožňující snímat geometrické parametry těles v prostoru. Zpracování získaných dat je provedeno v matematickém výpočetním softwaru Matlab. Výpočtový algoritmus vychází z diplomové práce Davida Mateji [22] pro určování kinematických charakteristik zavěšení kol.

Diplomová práce je zaměřena na návrh metody měření poddajností zavěšení, vytvoření výpočtového algoritmu a určení přesnosti měření. Výběr metody a ověření přesnosti metody je realizováno provedením měření geometrie na vozidle Formule Student.

Po kompletaci odděleně řešených částí zařízení se předpokládá s využitím na široké škále vozidel.





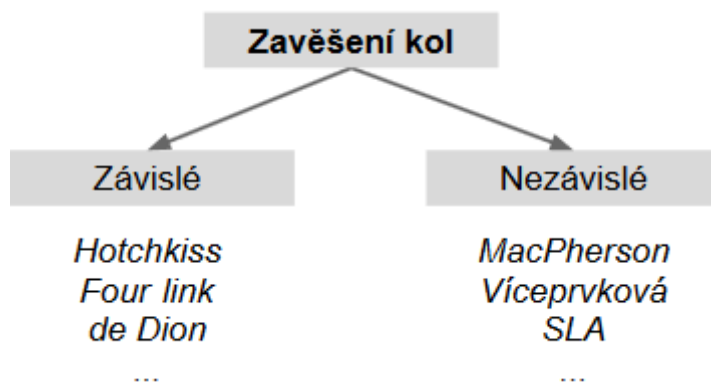
1 ZAVĚŠENÍ KOL

Základní funkce zavěšení kol motorových vozidel mají charakter, který se odvíjí nejen z pohledu bezpečnosti jízdy a optimálního fungování dalších zařízení (brzdy, řízení, apod.), ale také pohodlí posádky.

Konstrukce zavěšení poskytuje kolům vertikální oporu, takže kola mohou absorbovat nerovnosti vozovky a izolují karoserii před nerovnostmi. Zavěšení udržuje kola ve směru řízení a odklon vůči vozovce. Vyrovnává klopení karoserie a udržuje stálý kontakt kol s vozovkou. [1]

Souhrn těchto vlastností je důležitý pro celkovou dynamiku jízdy vozidla. To se projevuje především v kinematickém chování a reakcemi sil a momentů, které se převádí od kol na rám vozu. [1]

Podle jednoho z mnoha možných dělení zavěšení kol rozlišujeme závislé zavěšení a nezávislé zavěšení (Obr. 1.1). U obou druhů zavěšení byly vybrány v současné době nejpoužívanější konstrukce zavěšení kol pro srovnání jejich vlastností.



Obr. 1.1. Dělení náprav

Všechny typy náprav je nutné seřadit z hlediska geometrické polohy kol neboli postavení kola vůči vozovce pro dosažení bezpečných jízdních vlastností. Parametry geometrie jsou popsány v Kapitole 1.3.

1.1 ZÁVISLÉ ZAVĚŠENÍ

Užití tuhých náprav (závislé zavěšení) můžeme pozorovat zejména u nákladních vozidel jako zadní hnanou nápravu. U nákladních vozidel s vysokou nosnou kapacitou se tento typ zavěšení objevuje i jako přední náprava. [1]

Kola jsou spojena společnou pevnou osou. Toto řešení má výhodu v minimálním ovlivnění odklonu kola klopením karoserie. Náprava je vzhledem ke karoserii odpružena jako celek. Nevýhodou je výrazně větší hmotnost neodpružené hmoty, což má za následek zhoršení jízdní dynamiky vozidla. [1] [19]

NÁPRAVA HOTCHKISS

Zavěšení využívá podélně umístěných listových pružin a podélně umístěné hnací hřídele (Obr. 1.2). Listové pružiny představují nejjednodušší a zároveň nejlevnější část nápravy. V příčném a podélném směru pružiny poskytují dostatečnou tuhost. Pro lepší jízdní vlastnosti bylo přidáváno vlečné rameno, aby se zlepšilo reagování vůči brzdnému a hnacímu momentu. [1]



Obr. 1.2. Tuhá náprava „Hotchkiss“ [4]

Výhodou je jednoduchost a cena nápravy, která se využívá zejména u nákladních automobilů.

NÁPRAVA FOUR LINK

Spodní příčná ramena poskytují kontrolu v podélném směru, zatímco horní ramena absorbují brzdné momenty, hnací moment a postranní síly (Obr. 1.3). Příležitostně jsou dvě horní ramena nahrazena jedním trojúhelníkovým ramenem, které je ekvivalentní původnímu provedení. [1]



Obr. 1.3. Tuhá náprava „Four Link“ [3]

Výhodou konstrukce zavěšení je snadná změna kinematických vlastností změnou sklonu jednotlivých ramen. Náprava se velmi často využívá u terénních vozidel.



NÁPRAVA DE DION

Skládá se z příčného tuhého ramena s diferenciálem mezi dvěma hnanými koly (Obr. 1.4). Pevná náprava udržuje kola ve svislé poloze, zatím co působení neodpružené hmoty mezi vlečným ramenem a pružinou je snižováno některou z vazeb. [1]

Náprava v sobě částečně kombinuje vlastnosti závislého a nezávislého zavěšení.



Obr. 1.4. Tuhá náprava „de Dion“ [5]

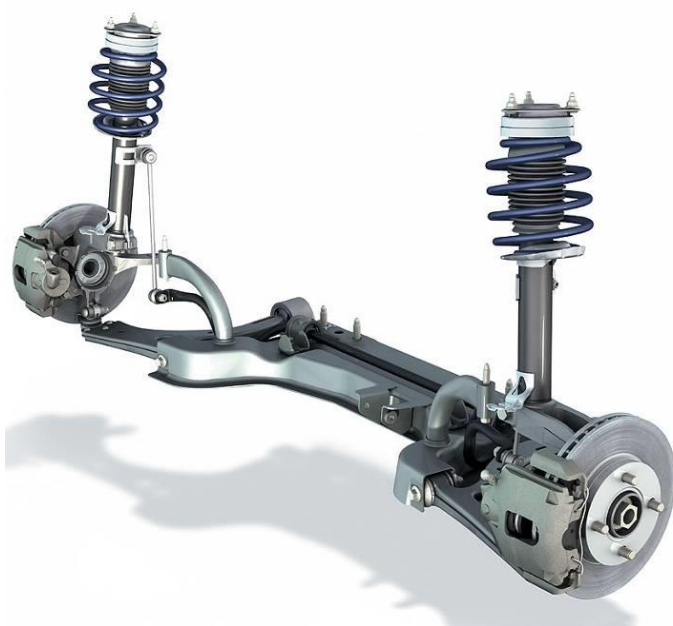
Nevýhodou toho systému je nutnost použití dvoudílného příčného ramene s posuvnou vazbou. Vzniká zde nárůst hmotnosti a tření. [1]

1.2 NEZÁVISLÉ ZAVĚŠENÍ

Každé kolo je ke karoserii přichyceno samostatným závěsným mechanismem. Díky tomu nejsou dvě protilehlá kola nijak navzájem ovlivněna. Nezávislé zavěšení kol se skládá z jednoho nebo několika závěsných ramen a výrazně snižuje podíl neodpružených hmot. [1] [19]

NÁPRAVA MACPHERSON

Jedná se o kompaktní řešení vhodné pro širokou škálu vozidel. Skládá se ze vzpěrného teleskopického členu obsahujícího tlumič a ramene, které zachycuje podélné a příčné síly (Obr. 1.5). V případě použití tohoto typu zavěšení na přední nápravě se při řídicích pohybech kolo otáčí kolem obou ložisek teleskopického členu. [1] [19]



Obr. 1.5. Náprava MacPherson" [6]

Přes výhodné vlastnosti, jako jsou například malé rozměry a dostatek místa pro prvky pro přenos hnacího momentu, má systém nevýhodu v podobě neschopnosti přenesení svislého pohybu kola bez toho, aniž by došlo ke změně odklonu nebo rozchodu kol. [1]

NÁPRAVA VÍCEPRVKOVÁ

Charakteristickým znakem toho typu zavěšení je umístění kulových kloubů na koncích ramen, a proto ramena nepodléhají ohybovým momentům (Obr. 1.6). Ramena náprav bývají realizována pomocí tyčí nebo trojúhelníkových elementů. [1, 19]



Obr. 1.6. Víceprvková náprava [7]

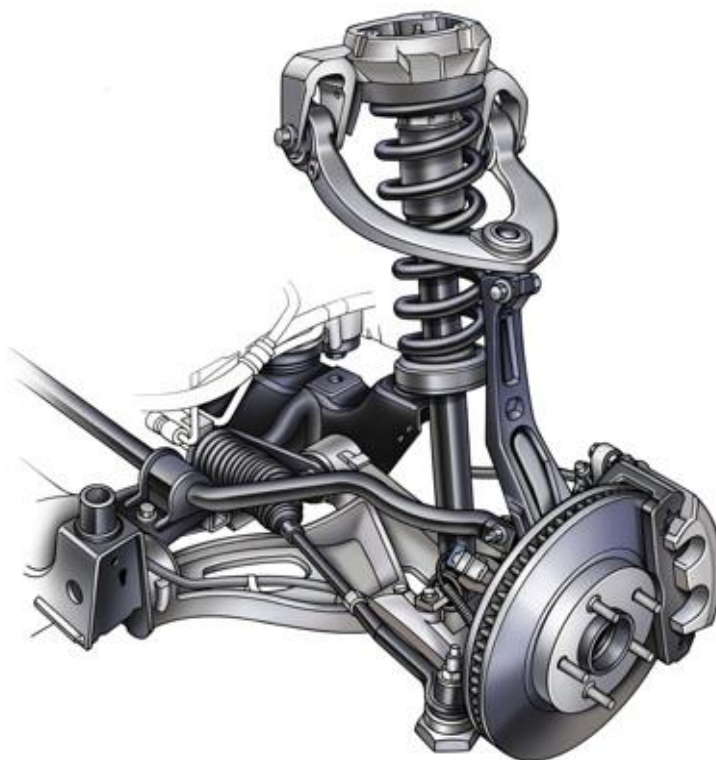


I přes vyšší konstrukční náročnost a zástavbové nároky je tato náprava využívána pro výborné dynamické vlastnosti přesného vedení kol. Náprava vyniká také nízkou hmotností, schopností absorpce vibrací a tlumením hluku. [1, 19]

NÁPRAVA SLA

Předností nápravy je vhodnost použití u vozidel s motorem uloženým podélně vpředu a pohonem na zadní kola (Obr. 1.7). Konstrukce nápravy nevyžaduje velký zástavbový prostor ve vozidle, avšak je zde málo prostoru pro prvky určené k pohonu kola. [1]

Vyžaduje pečlivé propracování pro dosažení dobrých jízdních vlastností. Nestejná ramena zlepšují odklon vnějšího kola protipůsobícím odklonem zapříčiněným klopením karoserie. [1]



Obr. 1.7. Přední náprava SLA [8]

1.3 GEOMETRIE ŘÍZENÍ

Geometrie řízení popisuje velikosti a směry úhlů jednotlivých konstrukčních prvků zavěšení kol vůči vozovce.

Jedním z hlavních požadavků na geometrii řízení je udržet vozidlo při jízdě v přímém směru. Důraz je kladen také na to, aby u kol při jízdě v zatáčce nedocházelo ke smýkání, ale k odvalování. Geometrické parametry náprav ovlivňují nejen bezpečnost, ale i jízdní stabilitu. S jejich pomocí lze snižovat namáhání pneumatik a prvků zavěšení kol a mohou usnadňovat řízení vozidla. [19]

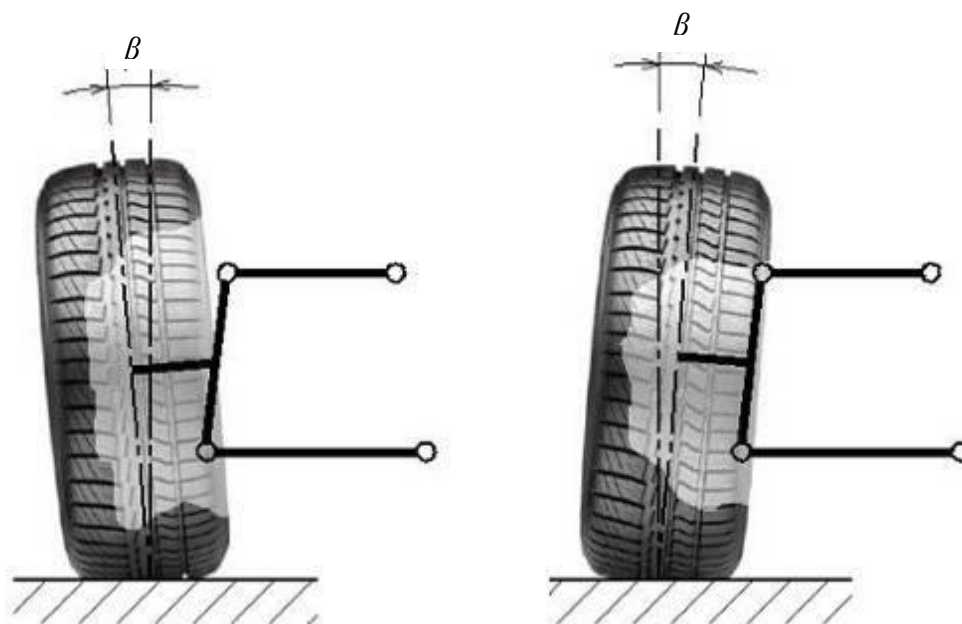
1.3.1 ODKLON KOLA

Odklon kola β se určuje ve vertikálním směru osy vozidla (Obr. 1.8). Určuje se jako velikost odklonu střední roviny kola od roviny kolmé k vozovce. Velikost úhlu udáváme v úhlových stupních a minutách. [19]

Vlivem odvalování kol vzniká při jízdě vozidla efekt odvalování kuželové plochy vůči rovině (vozovce). Projevem je změna sbíhavosti kol, kdy může tento efekt eliminovat kmitání kol. Nepříznivým projevem je zvýšení opotřebení pneumatik smýkáním. [19]

Při jízdě dochází k propružení zavěšení, což u nezávislého zavěšení vede ke změně úhlu odklonu a současně k naklápění kola. Vzniká tak moment, který naklápí karoserii. Odklon kola zapříčiňuje vznik boční síly ve stopě pneumatiky, která má za následek namáhání prvků zavěšení kola a rámu vozidla. [19]

Z pohledu jízdních vlastností je pro jízdu v přímém směru ideální nulová odchylka střední roviny kola od roviny kolmé k vozovce. Průjezd zatáčkou způsobuje naklápění karoserie na vnější stranu. Z požadavků na jízdní stabilitu při zatáčení vysokou rychlostí pak vyplývá, že odklon kola by měl vyrovnávat klopení karoserie. Cílem je dosáhnout maximální kolmosti kola vůči vozovce pro zachycení bočních sil působících na kola vozidla. [19]



Obr. 1.8. Znáznornění odklonu (vlevo) a příklonu kola (vpravo) [9]



ODKLON KOLA (KLADNÝ)

Toto nastavení geometrie kola zaručuje u mírně klenutých vozovek kolmost střední roviny kola k vozovce. Opotřebení běhounu je rovnoměrné. Zlepšuje směrovou stabilitu v přímém směru jízdy a zmenšuje poloměr rejdu vozidla. Pozitivní odklon kola se u osobních automobilů pohybuje v rozmezí od 5' do 10'. U zemědělské techniky se používá odklon 2° až 3°. [19]

PŘÍKLON KOLA (ZÁPORNÝ)

Nastavení negativního odklonu (příklonu) kola má za následek lepší boční vedení při průjezdu zatáčkou, protože střední rovina vnějšího kola má tendenci směřovat kolmo k vozovce. Nevýhodou je větší opotřebení vnitřní plochy běhounu pneumatiky. Velikost příklonu se pohybuje v rozmezí -1° až -2°. [19]

1.3.2 PŘÍKLON REJDOVÉ OSY

Jedná se o úhel, který svírá rejdová osa a svislice kolmá k vozovce (Obr. 1.9). Úhel se promítá do roviny rovnoběžné s příčnou rovinou vozidla. Příklon rejdové osy zavěšení kola γ udáváme v úhlových stupních a minutách. [19]

Náprava MacPherson určuje rejdovou osu jako spojnicí středu horního závěsného ložiska a kulového čepu v příčném rameni. Teoreticky tedy může platit, že u nápravy MacPherson je rejdová osa totožná s osou vzpěry. V reálné praxi se ovšem využívá konstrukce, kde je spodní kulový čep umístěn dovnitř kola za účelem zmenšení poloměru rejdu nebo získání záporného poloměru rejdu. Pro lichoběžníkovou nápravu pak platí, že rejdová osa je dána spojnici horního a dolního kulového čepu. [19]



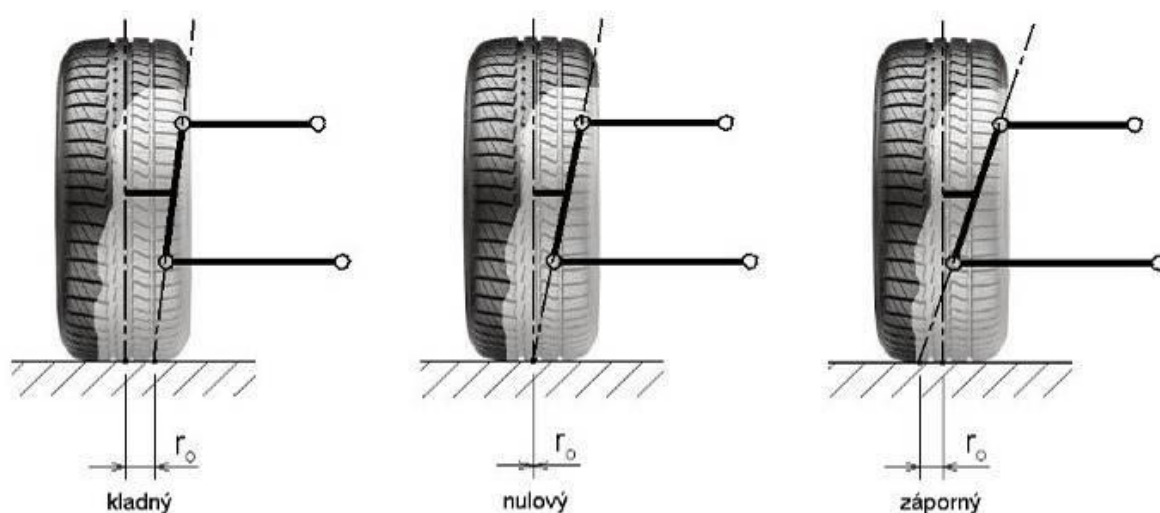
Obr. 1.9. Příklon rejdové osy [9]

Vlivem příklonu rejdového čepu při zatáčení dochází ke zvedání řízených kol a je nutné vyvinout potřebnou sílu na volantu pro překonání tohoto efektu. Po projetí zatáčkou následně využíváme tento efekt, který vrací kola do přímého směru. Můžeme tedy říci, že primární funkcí příklonu rejdové osy je samočinné vracení kol do polohy pro přímou jízdu. [19]

U osobních automobilů se používají dvě varianty konfigurace geometrie. První variantou je nastavení velkého poloměru rejdu r_0 (cca 60 mm) a malého úhlu rejdové osy γ (cca 5°). Druhou variantou pak může být nastavení záporného poloměru rejdu r_0 (-10 až -18) mm a velkého příklonu rejdové osy σ (14° až 18°). [19]

1.3.3 POLOMĚR REJDU

Poloměr rejdu r_0 označuje vzdálenost mezi průsečíkem rejdové osy s rovinou vozovky a průsečíkem středu styku kola s vozovkou (Obr. 1.10). Podobně jako u příklonu rejdové osy je tato vzdálenost promítnuta do roviny rovnoběžné s příčnou rovinou vozidla. [19]



Obr. 1.10. Poloměr rejdu [9]

KLADNÝ POLOMĚR REJDU

Průsečík rejdové osy s vozovkou je od průsečíku svislé osy kola s vozovkou vychýlen směrem k podélné ose vozidla.

Brzdění způsobuje vychylování kol do rozbíhavosti (směrem ven), což při rozdílné přilnavosti kol způsobuje vytáčení kola s větší přilnavostí na jedné nápravě. V tomto případě vozidlo nedrží přímý směr a tzv. „táhne“ do strany. Musí být proto kladen důraz na zachování přiměřené ovládací síly, zabránění kmitání kol a co nejmenšího poloměru rejdu. Maximální hodnota poloměru rejdu se u osobních vozidel udává 40 mm a u nákladních vozidel 60 mm. [19]

ZÁPORNÝ POLOMĚR REJDU

Průsečík rejdové osy s vozovkou je od průsečíku svislé osy kola s vozovkou vychýlen směrem od podélné osy vozidla.

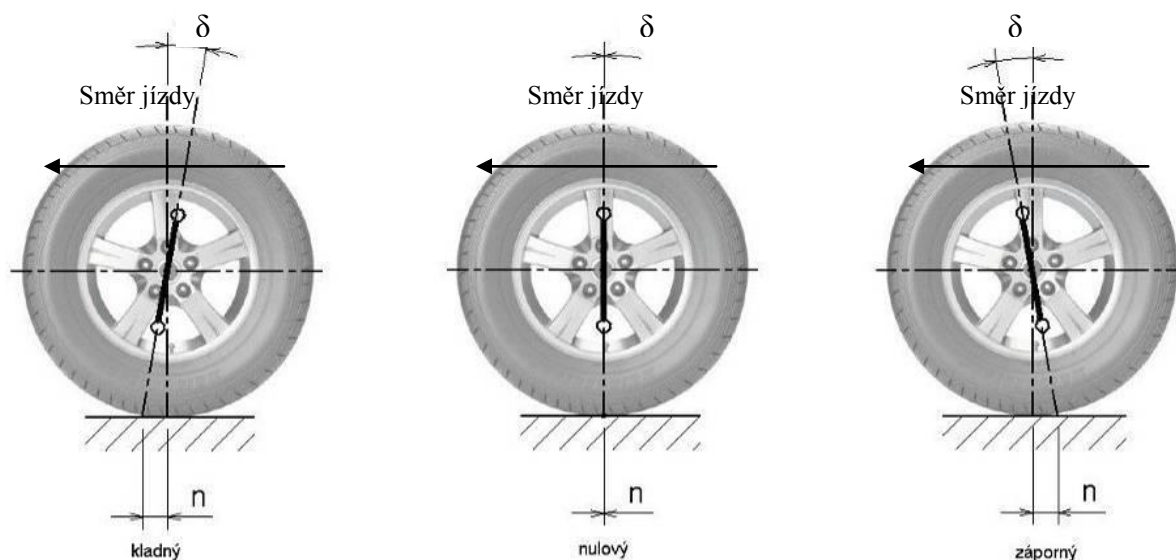
Nastavení záporného poloměru rejdu se v současnosti objevuje u většiny osobních a lehkých užitkových vozidel s přední poháněnou nápravou. Brzdná síla způsobuje vznik otáčivého momentu, který vychyluje kola do sbíhavosti (směrem dovnitř). Výhodou záporného poloměru rejdu je stabilizující účinek na řízení. Proto řidič nemusí měnit směr jízdy při brzdění ani při nesouměrné přilnavosti. Stejného efektu se využívá i při přejezdu nerovností, kdy díky stabilizačnímu účinku nemusí řidič vyrovnávat směr jízdy. [19]

NULOVÝ POLOMĚR REJDU

Průsečíky dvou výše zmíněných os s vozovkou jsou v totožném místě (střed kola). Při natáčení do rejdu u stojícího vozidla je nutné vyvinout velkou sílu pro překonání odporových sil. Vychylování kol brzděním je podstatně menší, protože rameno působení brzděné síly je nulové (Obr. 1.10). [19]

1.3.4 ZÁKLON REJDOVÉ OSY

Jedná se o úhel, který svírá rejdová osa se svislou osou kola (Obr. 1.11). Tento úhel se promítá do roviny rovnoběžné s podélnou rovinou vozidla. Záklon δ se udává v úhlových stupních a minutách. Je uvažován kladný tehdy, když je rejdová osa skloněna vzad vzhledem ke směru jízdy. [19]



Obr. 1.11. Záklon rejdové osy [9]

V některých případech se určuje jako vzdálenost (v milimetrech) průsečíku rejdové osy s vozovkou a středem styku kola s vozovkou ležící v podélné rovině. Tato vzdálenost bývá označována jako závlek n .

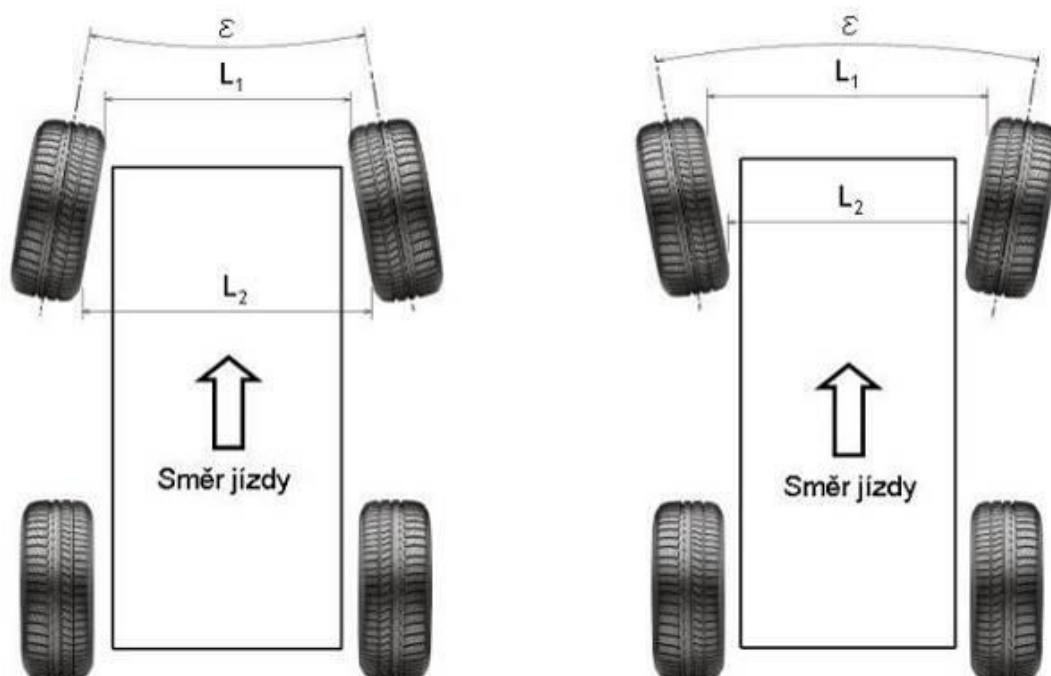
KLADNÝ ZÁKLON

Kola jsou vlečena a stabilizována při jízdě v přímém směru. Odvalováním kola při průjezdu zatáčkou se zvětšuje moment boční síly (odstředivá síla) působící na kolo vozidla díky závleku. Při přímé jízdě nebo malém natočení kol působením podélných sil (valivý odpor, brzdná síla) na rameni n , vzniká vratný moment, který vrací kola do přímého směru. Hnací síla vlivem záklonu vytváří moment, díky kterému se zvětšuje úhel rejdu. Z tohoto důvodu se u vozidel s přední říditelnou hnanou nápravou volí nulový záklon rejdové osy. [19]

Koncepce osobních vozidel s motorem vzadu, u nichž je přední náprava méně zatížena, mají úhel záklonu větší než vozidla s motorem vepředu. Úhel záklonu u vozidel s motorem vzadu je maximálně 10° . [19]

1.3.5 SBÍHAVOST KOL

Měření sbíhavosti kol se provádí v rovině středů kol pro obě kola společně (Obr. 1.12). Udává se jako úhel sbíhavosti ε , který svírají podélné osy kol v úhlových stupních a minutách. Lze také udávat rozdíl vzdáleností L_1 a L_2 mezi koly před osou, která prochází středy kol a vzdáleností mezi koly za touto osou. [19]



Obr. 1.12. Znázornění sbíhavosti (vlevo) a rozbíhavosti kol (vpravo) [9]



Při mechanickém zjišťování sbíhavosti platí vztah

$$\varepsilon = \arcsin \frac{L_2 - L_1}{d_r} \cdot [19]$$

kde:

(1. 1)

d_r – průměr okraje ráfku

ε – úhel sbíhavosti

L_1, L_2 - vzdálenost mezi okraji ráfků kol jedné nápravy

Cílem, při nastavování sbíhavosti případně rozbíhavosti nápravy, je dosažení paralelního odvalování kol jedné nápravy. Nastavením kol do úhlu vznikají malé boční síly, které ovlivňují směrovou stabilitu. Boční síly vyvolávají momenty vůči rejdovým osám. [19]

Jak bylo řečeno dříve, sbíhavost ovlivňuje tři hlavní parametry podvozku: směrovou stabilitu, ovládání vozu a opotřebení pneumatik. Příliš velká sbíhavost vede k opotřebení běhounu na vnější straně, rozbíhavost potom opačně. Osobní vozidla s pohonem na přední nápravu, využívají malé sbíhavosti z důvodu výhodnější směrové stability při brzdění motorem. U osobních vozidel je hodnota sbíhavosti 0 mm až 3 mm a u nákladních vozidel 3 mm až 8 mm. [19] [9]

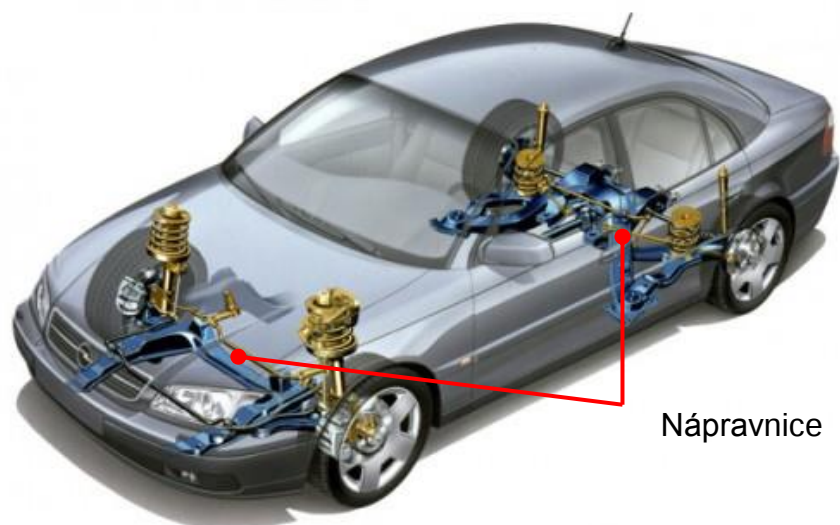
V případě použití nezávislého zavěšení i na zadní nápravě, musí být nastavena sbíhavost i na zadní nápravě. U vozidel s předním pohonem je na zadní nápravě s nezávislým zavěšením možné nastavit lehkou rozbíhavost, která eliminuje nedotáčivost této koncepce. [19]

Parametry geometrie se při jízdě vozidla mění na základě vlastností zavěšení kol. Tento jev označujeme jako elastokinematické vlastnosti zavěšení kol (Kapitola 1.4), které mohou příznivě i nepříznivě ovlivňovat jízdní stabilitu vozidla.

1.4 ELASTOKINEMATICKÉ ZAVĚŠENÍ KOL

V současných koncepcích moderních automobilů se samonosnými karoseriemi se stále více zvyšuje podíl elastokinematických prvků s anizotropními vlastnostmi (schopnost změny polohy při silovém působení), tzv. silentbloků. Pružné uložení ramen nápravy je nutné pro izolaci hluku a chvění směrem ven od podélné osy vozidla. Prvky náprav jsou ke karoserii uchyceny pomocí nápravnic (Obr. 1.13), což jsou pomocné rámy pro uchycení nejen náprav, ale v některých případech i hnací jednotky. [15] [19]

Projevem elastokinematického zavěšení kol je efekt samořízení. Vzhledem k jeho pozitivním ale také možným negativním vlastnostem je nutné projevy samořízení dokonale zmapovat. K tomu slouží specializované zařízení (Kapitola 2).



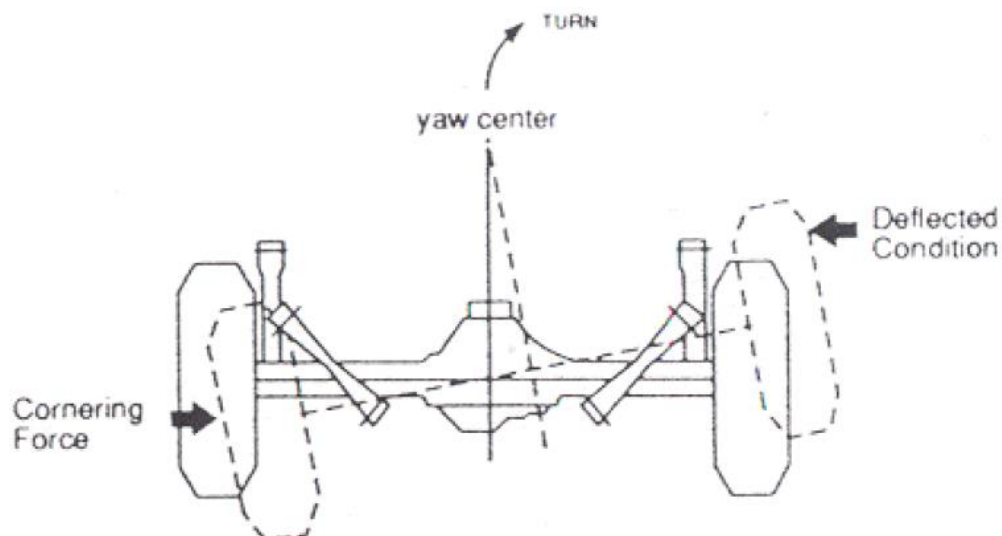
Obr. 1.13. Přední a zadní nápravnice - OPEL Omega [20]

Elastokinematické zavěšení kol zlepšuje jízdní vlastnosti z hlediska směrové dynamiky tím, že je schopné ovlivňovat přetáčivost nebo nedotáčivost automobilu v různých jízdních režimech. [19]

1.4.1 PRINCIP SAMOŘÍZENÍ

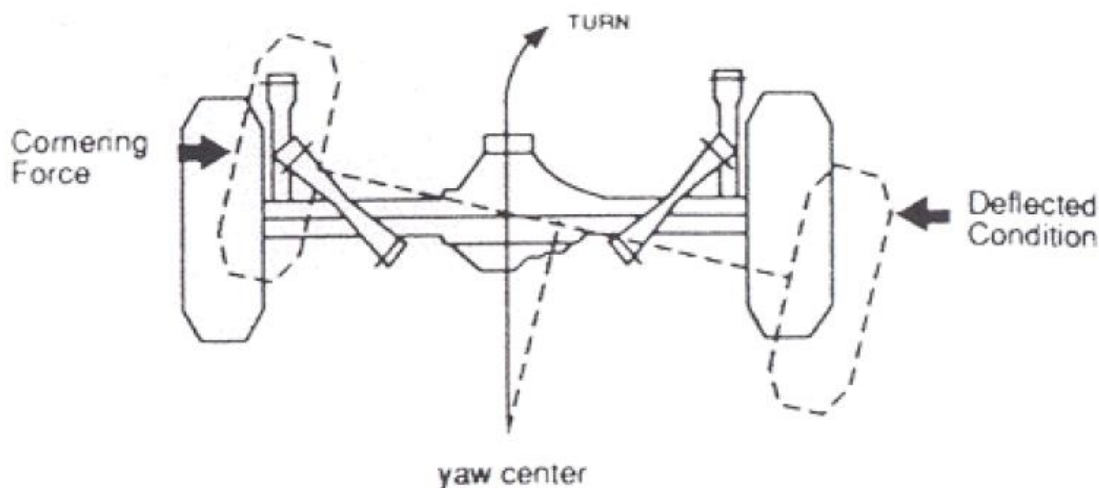
Vlivem bočních sil a vratných momentů dochází, díky použití pružných prvků v konstrukci zavěšení a řízení, k samovolnému natáčení kol kolem svislých os, tzv. samořízení. Samořízení vzniká také při naklápění vozidla. Příčina samořízení kol přední a zadní nápravy je stejná, ovšem důsledky na směrovou stabilitu vozidla jsou rozdílné. [21]

Princip samořízení může být znázorněn na příkladu tuhé nápravy a její rotace kolem svislé osy procházející středem rotace (yaw center). [1]



Obr. 1.14. Znázornění samořízení - přetáčivost [1]

V případě, že se střed rotace (yaw center) zadní nápravy nachází před osou kol na nápravě, dochází přetáčivému chování (Obr. 1.14). Boční síla, která vzniká při průjezdu zatáčkou, pak způsobuje rotaci (posun) nápravy v opačném směru jako kola řízená. [1]



Obr. 1.15. Znázornění samořízení - nedotáčivost [1]

Pokud se střed rotace (yaw center) zadní nápravy nachází za osou kol na nápravě, dochází k nedotáčivosti (Obr. 1.15). Boční síla, která vzniká při průjezdu zatáčkou, pak způsobuje rotaci (posun) nápravy ve stejném směru jako kola řízená [1]

Boční sílu působící na nápravu lze brát jako prosté zatížení nápravy σ_{cf} po dobu působení příčného zrychlení a_y . Nedotáčivý účinek nápravy K_{lcs} přímo vyplývá z úhlu řízení, který určuje přední a zadní náprava. [1]

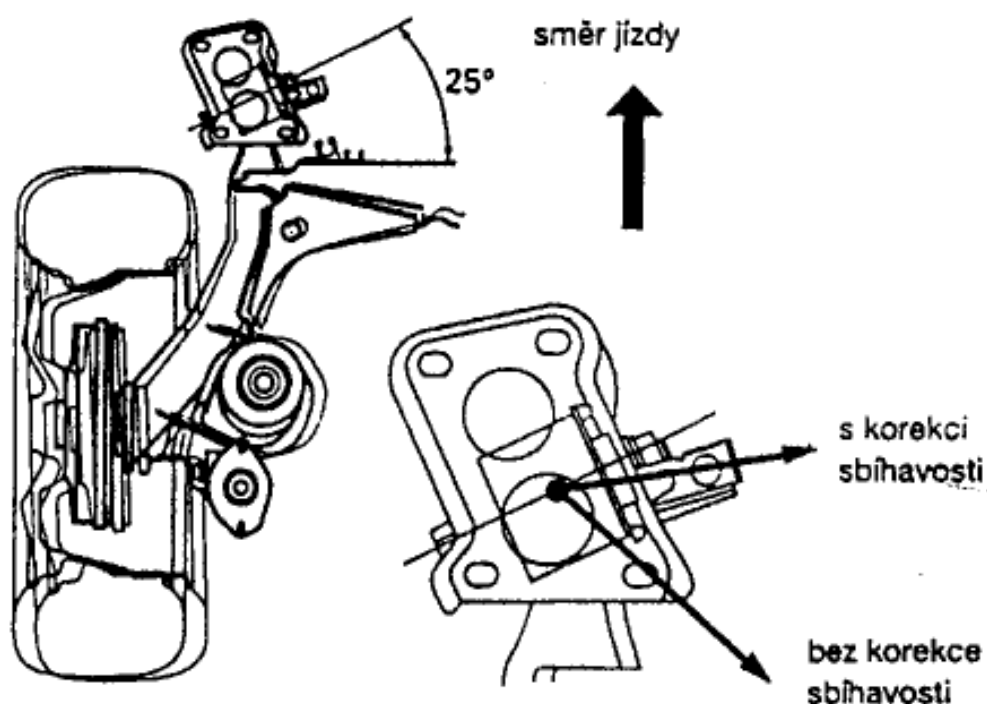
Pokud dochází ke vzniku samořízení na přední nápravě, musí řidič při průjezdu zatáčkou se stálým poloměrem korigovat směr přidavným natočením volantu. Samořízením se tedy v tomto případě nemění úhel rejdu, nýbrž úhel natočení volantu. Při samořízení kol na zadní nápravě dochází nejen k ovlivnění natočení volantu, ale také k natočení předních kol. K natáčení kol dochází také při klopení karoserie vozidla, jehož míru vyjadřuje součinitel klopení $\beta_{f,r}$. Součinitel nabývá kladných hodnot za předpokladu, že kladný úhel ψ vyvolá natočení kol v kladném úhlu $\beta_{f,r}$. [21]

Nastavení a vlastnosti samořízení se odlišují pro přední a zadní nápravy, jak z konstrukce zavěšení, tak i z požadavků na dosažení jízdní stability pro bezpečné řízení vozidla (Kapitola 1.4.2 a Kapitola 1.4.3).

1.4.2 SAMOŘÍZENÍ ZADNÍCH NÁPRAV

Změnu sbíhavosti kol u zadní nápravy s nezávislým zavěšením způsobuje silové působení v podélném směru (brzdění) a příčném směru (boční síla při ubrání plynu v zatáčce). Rozbíhavost zadních kol způsobuje přetáčivost vozidla, což je z hlediska jízdních vlastností nevýhodné. Proto tedy u zadních nezávislých náprav bývá nastavena sbíhavost, která má stabilizující účinek při jízdě vozidla. [19]

Vliv boční síly na sbíhavost kol při průjezdu zatáčkou je u vozů Volkswagen Golf IV a Škoda Octavia (do modelového roku 2005) částečně zmírněn speciální konstrukcí pružného lůžka (Obr. 1.16). [19]

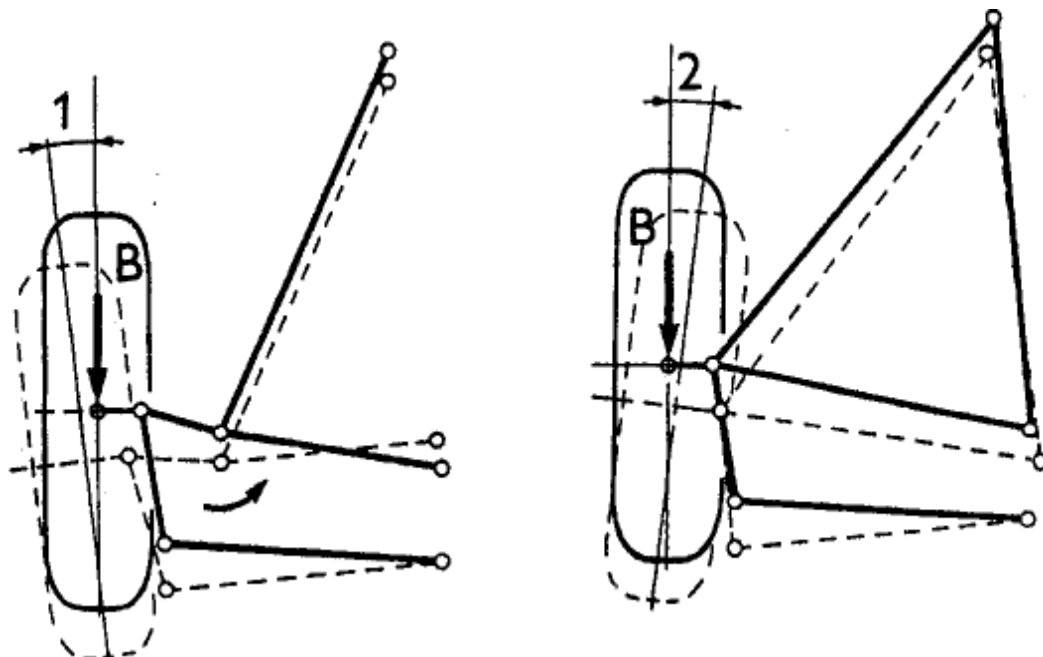


Obr. 1.16. Zadní nápravy VW Golf IV a Škoda Octavia – pohled shora [19]

Ve chvíli působení boční síly a při snaze nápravy posunovat se, kdy nedochází ke změně sbíhavosti kol, se pryžový nákrůžek opře o držák vychýlený o 25° od roviny rovnoběžné s příčnou rovinou vozu. Celá náprava se pak natáčí kolem středu rotace (Obr. 1.15) a dochází ke zlepšení směrové stability při průjezdu zatáčkou. [19]

1.4.3 SAMOŘÍZENÍ PŘEDNÍCH NÁPRAV

Elastokinematické zavěšení u přední nápravy umožňuje stabilizaci směru jízdy vozidla při brzdění. Vlivem působení brzdné síly B u tohoto typu náprav mají kola tendenci ke sbíhavosti, čímž se kompenzuje účinek brzdné síly (Obr. 1.17., vpravo (2)). Koncepce bez elastokinematického uložení mají naopak tendenci k rozbíhavosti. Vozidlo se pak při brzdění stáčí na stranu intenzivněji brzděného kola (Obr. 1.17., vlevo (1)). [19]

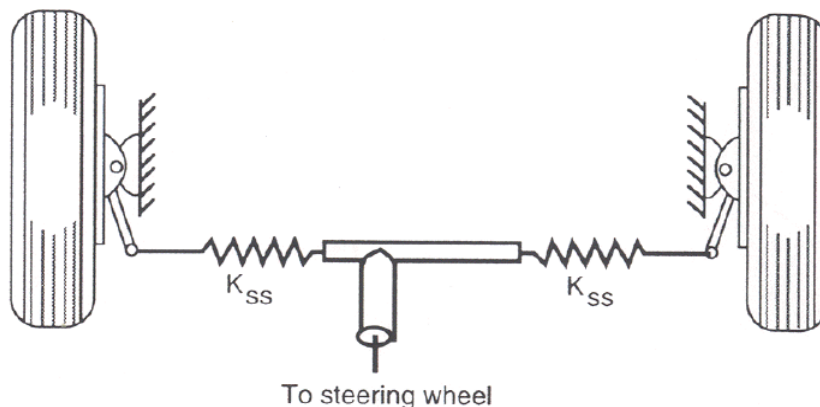


Obr. 1.17. Elastokinematické uložení přední nápravy - Opel AG [19]

Elastokinematické vlastnosti předních náprav ovlivňují do jisté míry také prvky soustavy řízení (Kapitola 1.4.4). Tuhost a vůle jednotlivých prvků soustavy řízení určuje samovolné ovlivnění řízení vozidla.

1.4.4 MODEL SOUSTAVY ŘÍZENÍ

S ohledem na konstrukci zavěšení řízených náprav automobilů je pro určování poddajnosti nápravy nutné započítat tuhost soustavy řízení. Na přední nápravu během jízdy působí z různých důvodů příčné síly, které účinně ovlivňují, spolu s vůlemi v soustavě řízení, geometrií kol. Model soustavy řízení (Obr. 1.18) pak lze transformovat tak, že kinematické a pružné prvky soustavy mezi koly a převodovkou řízení nahradíme pružinami s konstantní tuhostí. [1]



Obr. 1.18. Model soustavy řízení [1]

Schopnost ovlivňovat řízení vozu samovolným účinkem lze vyjádřit stanovením příslušného koeficientu. V tomto případě koeficient poddajnosti prvků řízení A . Koeficient určuje příčná síla a úhel řízení. [1]

- Kladný koeficient přední nápravy vytočené do strany způsobuje nedotáčivost.
- Kladný koeficient zadní nápravy vytočené do strany způsobuje přetáčivost.

Za podmínky, že příčné síly a vratné momenty působící na kolo jsou dominantní, pak se svislé silové účinky neuvažují. Za těchto podmínek je určen gradient nedotáčivosti K_{strg} , který vyplývá ze zatížení předního kola W_f , tuhosti pružin nahrazujících kinematické a pružné prvky K_{SS} , poloměru kola r a natočení volantu v . [1]

V závislosti na druhu analýzy lze model rozšiřovat například o Ackermannův úhel, případně nahrazovat komponenty modelu účinnostmi řízení a momentů. Model lze také doplnit o charakteristiky integrovaných posilovačů řízení. Deformační vztahy zde nejsou zahrnuty, ovšem jejich formulace je možná díky tvarovým vztahům jednotlivých komponentů a aplikací Hookova zákona pro příslušné síly a posuvy v rámci všech poddajností. [1]



2 MĚŘENÍ ELASTOKINEMATIKY ZAVĚŠENÍ KOL

Elastokinematika (tuhost) zavěšení kol je schopnost soustavy více těles spojených kinematickými vazbami zachovávat geometrickou konfiguraci kol a prvků nápravy při působení vnějších sil, které ovlivňují stabilitu jízdních vlastností vozidla.

Měření elastokinematiky spadá do kategorie laboratorních zkoušek, při kterých simulováním jízdních režimů zjišťujeme výsledné parametry chování všech prvků zavěšení kol, včetně vybraných prvků soustavy řízení a tlumení. Významným aspektem je také způsob uložení celé soustavy zavěšení kol k rámu vozidla, což bývá u moderních vozidel realizováno za pomoci pružných elementů tzv. silentbloků. Z dosavadních měření vyplývá, že tento prvek nejvíce ovlivňuje změnu polohy kola. [10]

Pomocí zařízení určených pro měření elastokinematiky se simulují jízdní stavy, které mají charakteristické požadavky na parametry geometrie (Kapitola 2.1). Složitější jízdní stavy se vytvářejí skládáním základních jízdních manévru (např. akcelerace, brzdění, ...).

Specializovaná zařízení (Kapitola 2.2) používaná pro vývojové práce v průmyslu jsou velmi nákladná a rozměrná. Proto se objevují zjednodušená zařízení (např. zařízení ČVUT – Kapitola 2.3), která jsou méně nákladná a potřebují méně prostoru. Možnosti měření nejsou tak rozsáhlé. Ústav automobilního a dopravního inženýrství vyvíjí obdobně zjednodušené měřicí zařízení, která je podrobně popsane v Kapitole 3.

2.1 ZÁKLADNÍ JÍZDNÍ STAVY SIMULOVANÉ ZAŘÍZENÍMI

Měření stálosti geometrické konfigurace zavěšení probíhá jako odezva zavěšení na silové působení vyvolané budícím mechanismem. Simulace reálné jízdy by byla velmi složitá a nákladná. Většina zařízení neumožňuje zkoušet vozidla v dynamickém režimu (absence válců pod koly, pouze statické základny kol). V praxi se často zjednodušují průběhy simulací. Zatíží se pouze jedno kolo nápravy nebo každého kola na nápravě rozdílným silovým působením. Skládáním různých silových působení lze dosáhnout napodobení jízdních režimů, které jsou ovšem prováděny jako statické zkoušky.

Testování vozidel probíhá v několika jednotlivých charakteristických jízdních režimech. Snahou je co nejreálnější napodobení jízdních režimů, jako jsou například jízda konstantní rychlostí, průjezd zatáčkou, brzdění a akcelerace. V současné době jsou už zařízení schopna provádět simulace i za kombinace těchto jízdních stavů. Důraz se klade také na styk pneumatik a základen kol, aby odpovídal reálnému kontaktu.

PŘÍMÁ JÍZDA KONSTANTNÍ RYCHLOSTÍ

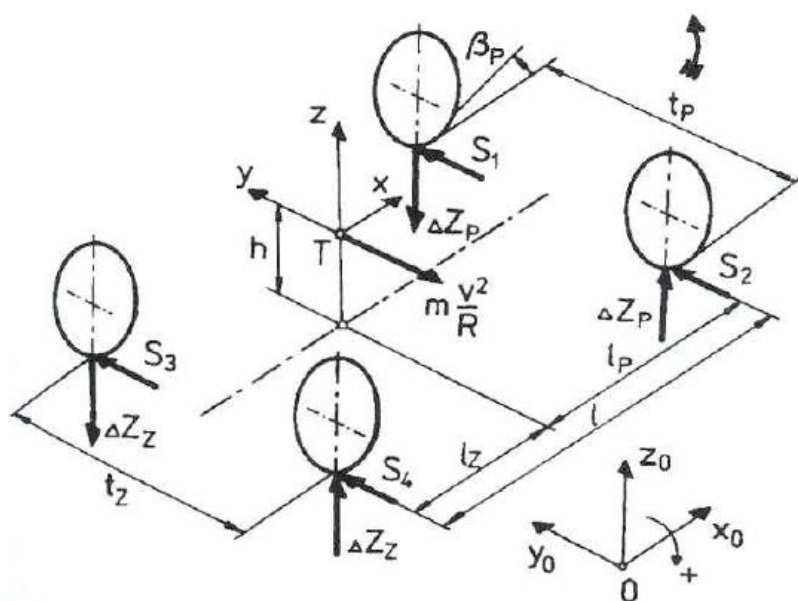
Na kola v přímém směru působí pouze síla F_z ve svislém směru, jako reakční síla od zatížení vozidla (Obr. 2.1). Rozložení sil v jednotlivých kolech je stejné jako u klidové polohy vozidla. Ostatní síly jsou nulové nebo pro výsledek zkoušky zanedbatelné. Jedná se o nejjednodušší simulovaný jízdní stav. [10]



Obr. 2.1. Síly působící na kolo při přímé jízdě konstantní rychlostí [11]

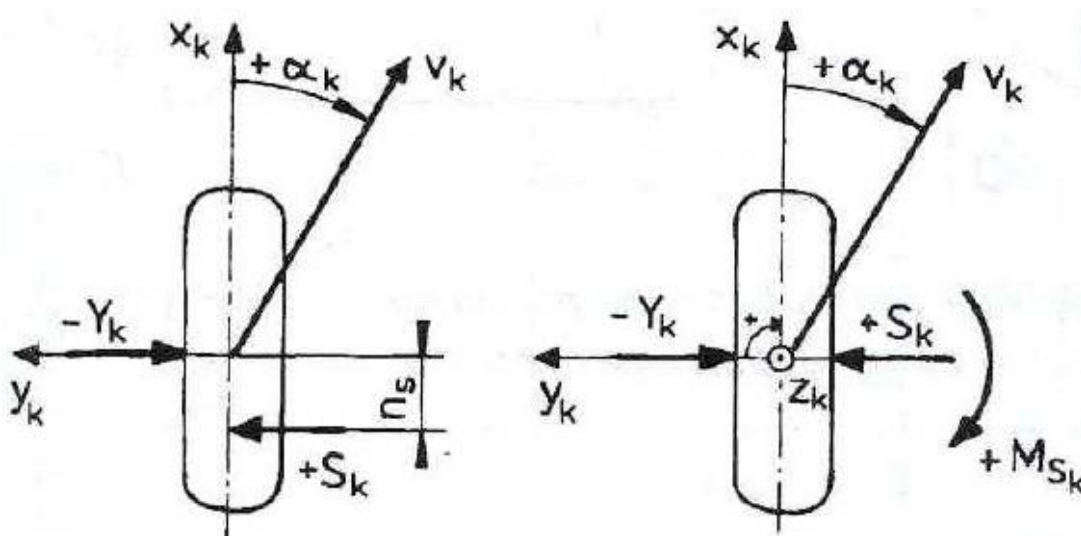
PRŮJEZD ZATÁČKOU KONSTANTNÍ RYCHLOSTÍ

Dostředivé zrychlení působící na vozidlo při průjezdu zatáčkou, vyvolává reakční setrvačnou sílu, která působí na vozidlo v opačném směru (Obr. 2.2). Pro projetí zatáčkou musí vozidlo setrvačnou sílu vyrovnat příčnými silami S_1 , S_2 , S_3 a S_4 (viz. obr. 12.). Vlivem náklonu karoserie vozidla o úhel ψ dochází také ke změně vertikálního zatížení jednotlivých kol. Zatížení vnějších kol vzroste o ΔZ_P (resp. ΔZ_Z) a naopak zatížení kol na vnitřní straně o hodnotu ΔZ_P (resp. ΔZ_Z) klesne. [10]



Obr. 2.2. Působení sil na kola při průjezdu zatáčkou konstantní rychlostí [10]

Pro přesnou simulaci je nutné zajistit dokonalé odvalování kola bez smýkání. Při odvalování kola v zatáčce dochází k posuvu příčné síly S_K směrem od středu kola (Obr. 2.3). Posunutím síly S_K o rameno n_S vzniká vratný moment pneumatiky M_{SK} . [10]



Obr. 2.3. Vratný moment působící na kolo v zatáčce [10]

AKCELERACE V PŘÍMÉM SMĚRU

Při tomto jízdním režimu na vozidlo působí síly v podélné ose vozu. Na kolo působí síla F_X (Obr. 2.1) jako reakční síla od hnacího momentu přenášeného kolem na vozovku. Příčné síly jsou nulové, jelikož se jedná o přímou jízdu. [10]

Vlivem akcelerace ovšem dochází k přesunutí zatížení kol, podobně jako u jízdy v zatáčce. Zatížení se ovšem přenáší především na zadní nápravu. Tento jev doprovázen viditelným náklonem karoserie (zvedání příďe). [10]

ZPOMALOVÁNÍ V PŘÍMÉM SMĚRU

Podobně jako u akcelerace působí síly v podélné ose vozu. Přerozdělení zatížení na kola se realizuje v opačném směru, ze zadní nápravy na přední. Brzdění je opět doprovázeno viditelným náklonem karoserie, kdy příď klesá dolů. [10]

Z charakteristických základních jízdních stavů lze dostat představu chování elastokinematického zavěšení kol. Simulace prováděné zařízeními k tomu určenými musejí odpovídat reálným podmínkám. Toto předurčuje metodiku zkoušek pro laboratorní měření. Princip metodiky měření je totožný u všech typů zařízení, která se odlišují především koncepcemi zatěžovacích mechanismů.

2.1.1 METODIKA PRŮBĚHU MĚŘENÍ

Předpoklad chování zavěšení reálných vozidel v různých jízdních situacích je velmi důležitý pro návrh a konstrukci automobilů. I přes velké množství programů a počítačových simulací, kterými lze získat povědomí o charakteru chování v jízdních situacích, je nutné tyto předpoklady ověřovat experimentálně. Cílem zařízení je získat co nejpodobnější podmínky odpovídající reálným stavům. Zařízení vyvíjejí nejen silové účinky, ale také musí být schopna simulovat reálný kontakt kola s vozovkou. V průběhu zkoušky je nutné zajistit pevné ukotvení rámu vozidla nebo kola. [10, 15]

PRŮBĚH MĚŘENÍ ELASTOKINEMATIKY:

- upnutí vozidla do základní polohy
- osazení kol a zatěžovacího mechanismu snímači zvolených veličin
- charakterizování jízdního stavu
- zatížení vozidla dle koncepce zařízení
- export datových souborů ze snímačů (softwaru)
- vyhodnocení měřených dat

U výsledků zkoušek sledujeme především změny parametrů geometrie zavěšení vznikajících zatížením kol, protože samorízení náprav vzhledem k působení vnějších vlivů má zásadní vliv na ovladatelnost vozidla, jízdní stabilitu, opotřebení pneumatik a životnost komponentů podvozku. Získané výsledky se používají pro optimalizaci konstrukce stávajících i nových komponentů. [10, 15]

Možnosti vyhodnocování výsledků se rovněž odvíjejí od měřicího zařízení. Ta mohou například v rámci softwaru zařízení porovnávat více provedených měření. Možnosti měření elastokinematiky jsou popsány v následující kapitole, zabývající se moderními specializovanými zařízeními.

2.2 SPECIALIZOVANÁ ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ ELASTOKINEMATIKY

Zařízení pro měření tuhosti zavěšení vycházejí z požadavku pevného uchycení rámu vozidla (případně kola vozidla) a zařízení, které jsou schopny vyvinout přesně definované silové působení.

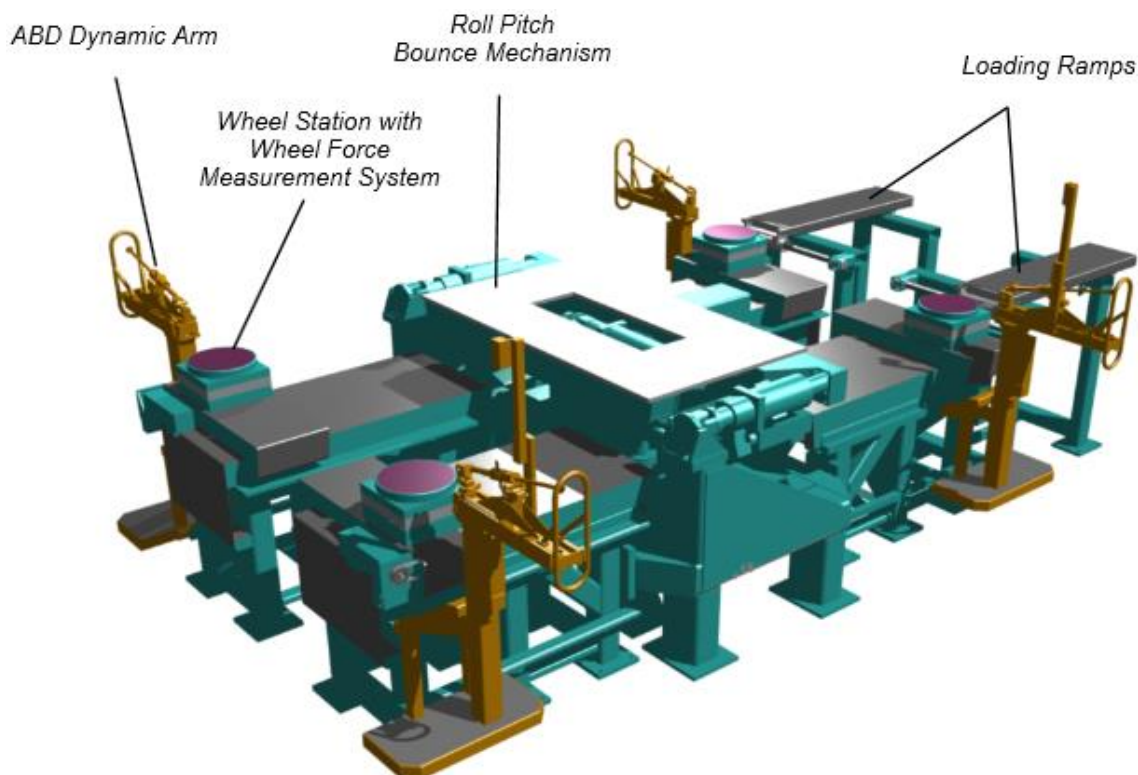
2.2.1 SUSPENSION PARAMETER MEASURING MACHINE – SPMM 4000 HS

Zařízení britské společnosti Anthony Best Dynamics (zkrácené označení zařízení SPMM 4000 – High Speed) určené pro kvazi-statické měření parametrů zavěšení kol (Obr. 2.4). [12]

Umožňuje testování širokého spektra vozidel, od formulových monopostů až po lehká užitková vozidla nebo mikrobusey. Zařízení je dostupné ve dvou variantách. V provedení se čtyřmi základnami kol, které umožňuje současné měření charakteristik obou náprav. Dostupná je také ve verzi pouze se dvěma základnami, kdy lze měřit charakteristiky pouze u jedné nápravy. Zařízení se skládá z mechanismu pro vyvíjení silových účinků s upínací plochou, měřících základen a zařízení pro určování přesné polohy kol. [12]

HLAVNÍ ČÁSTI ZAŘÍZENÍ SPMM 4000-HS:

- upínací mechanismus rámu – zatěžovací mechanismus
- základny kol - nehybné
- snímače polohy kol



Obr. 2.4. SPMM 4000-HS - popis částí [12]

BUDÍCÍ MECHANISMUS (ROLL PITCH BOUNCE MECHANISM)

Mechanismus pro simulaci klopení, klonění a pružení. Uvedené druhy namáhání obstarává pohyblivý upínací stůl, ke kterému je karoserie pevně nepružně přichycena. Pohyb stolu je realizován pomocí šesti lineárních elektromechanických pohonů, které svým působením simulují jízdní režimy. [12]

ZÁKLADNY KOL (WHEEL STATIONS)

Základny kol jsou schopné se přizpůsobit na jakýkoli typ vozidla, díky posuvům v příčném a podélném směru. Daných posuvů se využívá také pro simulaci při brzdění, akceleraci a jízdě v zatáčkách. Vratný moment lze simulovat pomocí horní otočné části jednotlivých základen, přičemž se o pohon starají servomotory. [10]

Míra zatížení se zjišťuje pomocí víceprvkových piezoelektrických tenzometrů. Lze s nimi měřit hodnoty zatížení ve všech třech osách, přičemž lze přesně určit polohu středu kontaktní plochy v podélném i příčném směru. [12]

DYNAMICKÁ RAMENA (ABD DYNAMIC ARM)

Slouží k uchycení pěti rotačních potenciometrů a jednoho lineárního potenciometru na stojany se šesti stupni volnosti (Obr. 2.5). [12]

Zařízení funguje na podobném principu jako typ SPMM 4000, který využívá pět digitálních lankových potenciometrů. Ty jsou uchyceny k vyvážené desce, pevně spojené s kolem maticemi kol. Díky rotačnímu uložení desky se s kolem neotáčí, ale pouze kopíruje naklápění kola. [12]



Obr. 2.5. ABD Dynamic Arm [12]

**NÁJEZDOVÉ RAMPY (LOADING RAMPS)**

Nájezdové rampy slouží k umisťování testovaných vozidel na definovanou pozici.

MOŽNOSTI MĚŘENÍ SE ZAŘÍZENÍ SPM 4000 - HS

Zařízení je určeno pro zjišťování širokého spektra posunu, zatěžujících sil a momentů. Každá z os pohyblivé plošiny může být posunuta v kombinaci s jinou osou ve fázi nebo proti fázi. [12]

Vstupní veličiny: [12]

- svislý pohyb karoserie
- klopení karoserie
- podélné zatížení kola
- příčné zatížení kola
- vratný moment kola
- silové působení na volant vozidla

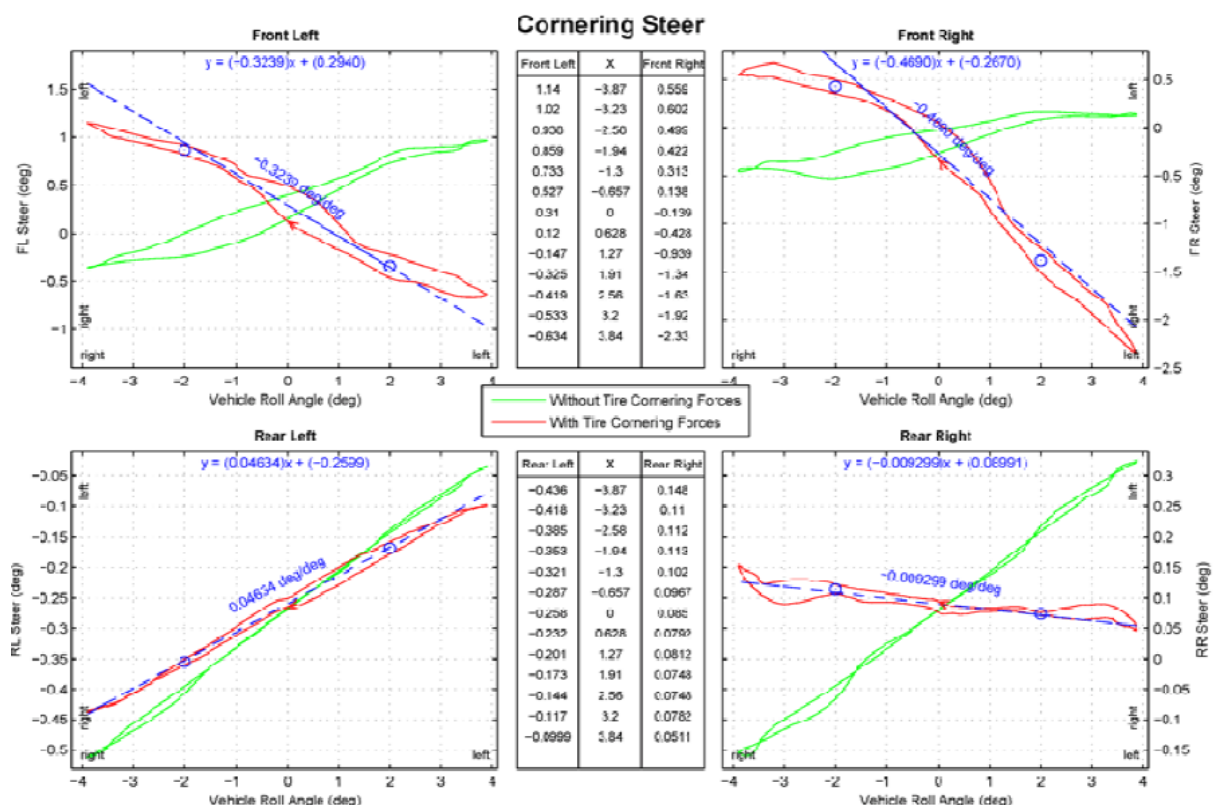
Měřené veličiny: [12]

- úhel řízení (sbíhavost kol)
- odklon kola
- vertikální posuv kola
- podélný posuv kola
- příčný posuv kola
- hodnoty sil a momentů působících na jednotlivá kola

VYHODNOCENÍ PRŮBĚHU ZKOUŠKY

Grafické vyhodnocení průběhu zkoušky zajišťuje interaktivní software dodávaný společností Anthony Best Dynamics (Obr. 2.6). [12]

Program umožňuje vykreslení průběhů jednotlivých měřených veličin i více veličin naráz. Umožňuje také vzájemné propojení výsledků různých průběhů zkoušek z paměti programu. Automaticky je počítána hystereze (závislost na předchozím stavu systému) křivek. [12]



Obr. 2.6. Grafické vyhodnocení průběhu zkoušky SPMM 4000 [12]

2.2.2 MTS K&C SYSTEM

Americká společnost MTS používá konstrukčně podobné zařízení pro zjišťování tuhosti náprav vozidel (Obr. 2.7). Zařízení je také dostupné ve dvou verzích, a to pro měření charakteristik na jedné nápravě vozidla nebo obou náprav vozidla současně. Zásadním rozdílem je uchycení vozu v definované pozici. Rám vozidla je fixován nehybně k základně pomocí hydraulicky a elektromagneticky ovládaného upínacího zařízení. Silové účinky na zavěšení kol jsou pak obstarávány pomocí platform se základnami. [13]

Zařízení SPMM 4000 i MTS K&C jsou konstrukčně velmi podobná. Odlišnosti můžeme hledat v druhu použitých pohonů pro vytváření silových účinků a také v použití měřicí techniky. Jedná se o velmi sofistikovaná zařízení, která umožňují získávání velmi přesných charakteristik zavěšení vozů. Simulované jízdní stavy jsou velmi podobné reálným jízdním stavům. Vysoká úroveň automatizace a snadné



provádění testů napomáhá ke zpřesnění výsledků a lze snadno opakovaně spouštět simulace jízdních režimů. Nevýhodou těchto zařízení jsou vysoké pořizovací náklady a poměrně velké zástavbové rozměry. [13]

HLAVNÍ ČÁSTI ZAŘÍZENÍ SPMM 4000-HS:

- upínací mechanismus rámu - nehybný
- základny kol – zatěžovací mechanismus
- snímače polohy kol



Obr. 2.7. MTS K&C System [13]

ZATĚŽOVACÍ MECHANISMUS

Zařízení využívá šestiosý tenzometrický člen, který zaznamenává silové působení a momenty zatěžovacích základen pod koly ve všech třech osách souřadného systému. [13]

MĚŘENÍ POLOHY KOL

Míra posunutí kol vozidla je zjišťována pomocí bezkontaktního šestiosého optického měřicího systému (Obr. 2.8), který je uchycen na pohyblivém rámu pro snadné vizuální nastavení. [13]



Obr. 2.8. Šestiosé měřicí zařízení polohy kol [14]

MOŽNOSTI MĚŘENÍ SE ZAŘÍZENÍM MTS K&C

Možnosti jsou shodné jako u zařízení SPMM 4000.

Vstupní veličiny: [13]

- svislý pohyb karoserie
- klopení karoserie
- podélné zatížení kola
- příčné zatížení kola
- vratný moment kola
- silové působení na volant vozidla

Měřené veličiny: [13]

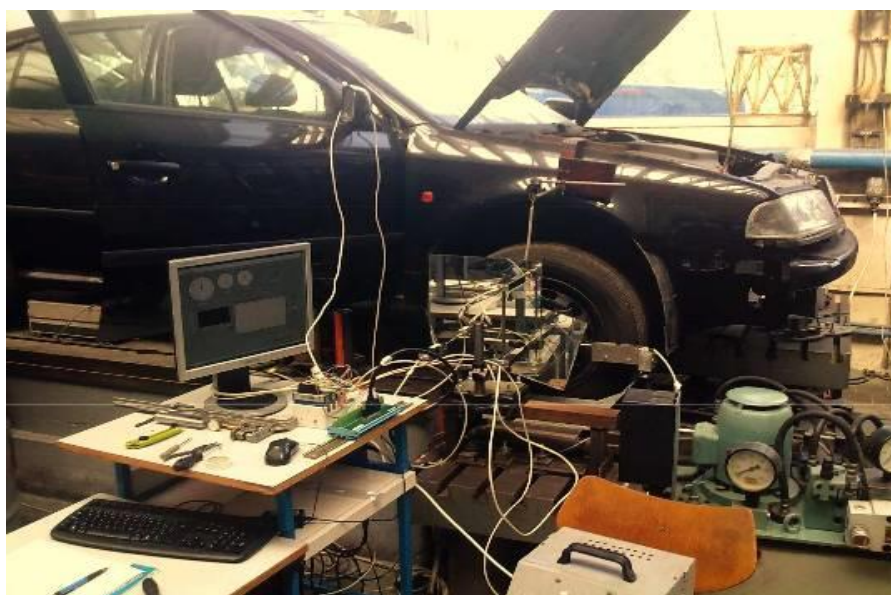
- úhel řízení (sbíhavost kol)
- odklon kola
- vertikální posuv kola
- podélný posuv kola
- příčný posuv kola
- hodnoty sil a momentů působících na jednotlivá kola

ŘÍDÍCI SYSTÉM

Při konfiguraci měření obou náprav současně zpracovává systém 79 kanálů měřených dat a 25 kanálů pro řízení servomotorů obstarávajících silové působení na kola vozidla. Průběh sledovaných charakteristik lze sledovat na zobrazovacím zařízení, přičemž se sledovaná data ukládají na pevný disk pro pozdější zpracování a analýzu. [13]

2.3 MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ ČVUT

Jedná se o zařízení vyvinuté na základě objednávky automobilové společnosti Škoda, a.s. kolektivem pod vedením doc. Ing. Jiřího Svobody (Obr. 2.9). V devadesátých letech zařízení prošlo modernizací, zejména pak zatěžovací část. [15]



Obr. 2.9. Měřící zařízení tuhosti zavěšení, FS ČVUT [15]

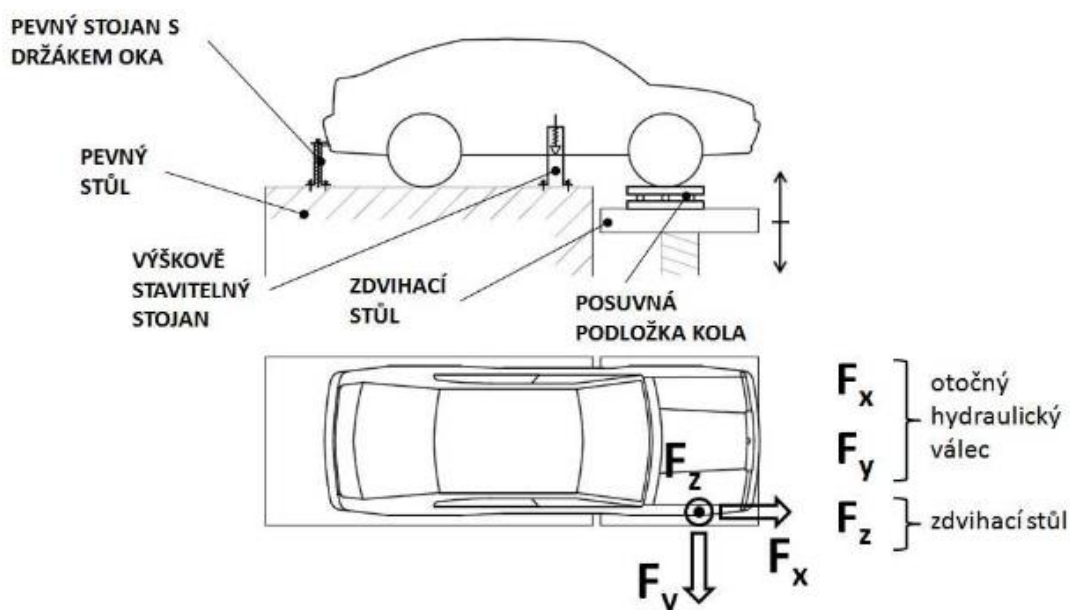
Zařízení je schopno měřit pouze jednu nápravu vozidla. Karoserie vozidla se pevně uchycuje k měřicí stoličce pomocí stojanů a podpěr. Měřená náprava je umístěna na elektricky poháněný zvedací stůl ZS 2400 (TES Vsetín, a.s.), kterým lze v průběhu měření měnit zdvih kola zkoušeného vozidla. Posuvy v příčném a podélném směru obstarává hydraulický válec, který lze otáčet o 90°. Pro měření zatěžujících sil se využívají tenzometrické snímače HBM U2A. [15]

HLAVNÍ ČÁSTI ZAŘÍZENÍ ČVUT:

- upínací mechanismus rámu - nehybný
- základna kol – zatěžovací mechanismus, pouze jedna náprava
- snímače polohy kol

2.3.1 UPÍNACÍ MECHANISMUS RÁMU VOZIDLA

Vozidlo je pevně ukotveno k základní desce pomocí stavitelných stojanů a pevného uchycení pro tažné oko vozidla. Výškově stavitelné stojany umožňují změnu zatížení vozidla (Obr. 2.10).



Zatěžovací mechanismy Obr. 2.10. Schéma měřicího stavu [15]

2.3.2 ZATĚŽOVACÍ MECHANISMY

Principem zatěžujících mechanismů je vyvolávat posuvy a rotace kolem os, které se odvíjejí od konstrukce měřicího zařízení.

MECHANICKÉ SYSTÉMY

Mechanicky vyvozeného zatížení lze dosáhnout za použití pohybových šroubů. Ty představují snadnou a nákladově nízkou variantu, vyvozující silové účinky v jedné ose. Pro méně přesné měření se používají trapézové závity. Pro přesnější zkoušky lze využít kuličkových šroubů. Nevýhodou šroubů je plynulost chodu, a že zatěžování nelze zautomatizovat. [10]



ELEKTROMECHANICKÉ SYSTÉMY

Základem jsou pohybové šrouby doplněné o elektrický pohon, tzv. lineární aktuátory. Zdrojem může být stejnosměrný i střídavý proud. Hlavním kritériem pohonu je velikost tažné/tlačné síly. Systém je vhodný pro automatizaci. [10]

HYDRAULICKÉ SYSTÉMY

Systém vyvozuje sílu zvyšováním a snižováním tlaku v pracovní komoře, kde kapalina působí na píst. Je zde nutné vytvořit hydraulický okruh, který znesnadňuje manipulaci a je prostorově náročný. Kromě možnosti automatizace, vyniká systém možností vytvářet velké pracovní síly. Měřicí zařízení ČVUT je osazeno hydraulickým mechanismem pro zatěžování. [15]

2.3.3 MĚŘÍCÍ SNÍMAČE

Cílem je zjištění okamžité polohy referenčního prvku v časovém sledu nebo pouze v jednom okamžiku.

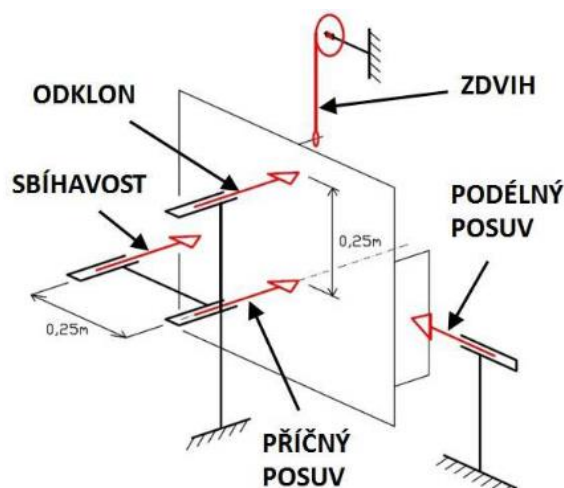
KONTAKTNÍ SNÍMAČE

Využití lankových potenciometrů představuje snadný a přesný způsob určování polohy. Potenciometry vyžadují použití přídavných konstrukcí pro uchycení a musí být obsaženy v dostatečném počtu (pět snímačů pro každé kolo). Jejich umístění ve velké vzdálenosti od měřeného vozidla vychází z požadavku, aby při zatížení vozidla, kdy může dojít k posuvu vozidla, bylo prodloužení lanka v podélném směru zanedbatelné. Výhodou snímačů je možnost kontinuálního měření. [10]

BEZKONTAKTNÍ SNÍMAČE

Pro bezkontaktní určování polohy se využívají laserové optické měřicí přístroje nebo 3D scannery, např. fotogrammetrické zařízení TRITOP. Jejich výhodou je snadná manipulace a samotný průběh měření, který je velmi přesný při dodržení všech postupů. Jednoznačnou nevýhodou těchto systémů jsou vysoké pořizovací náklady.

Změny geometrie zavěšení byly u zařízení ČVUT zjišťovány speciálně vyvinutou měřicí hlavou (Obr. 2.11). Hlava byla pevně spojena se zvedacím stolem a opatřena odpruženým suportem s pevným hrotem a dvěma indukčními snímači. Skleněná deska je vyrovnána do roviny kola pomocí posuvných přípravků na zvedací podložce. Hroty byly schopny dotekem s deskou určit změny odklonu a sbíhavosti. Podélné posuvy se měřily snímačem připevněným k posuvnému stolu. [15]



Obr. 2.11. Schéma modernizované měřící hlavy [15]

Od roku 2010 je uvedena do provozu nově navržená měřící hlava, která už je opatřena moderními snímači posunutí. Měření se výrazně zpřesnilo díky absenci zesilovače signálu. [15]

Měřící stav je poměrně jednoduché konstrukce. Nevýhodou tohoto stavu je nerealistické simulování jízdních stavů, což vede ke zkreslování výsledků. Další nevýhodou je možnost měření charakteristik pouze na jednom kole jedné nápravy. Nelze pak získat přesné údaje o změnách geometrie celé nápravy (sbíhavosti). Zařízení také není schopno simulovat vratný moment, který působí na kolo při reálné jízdě. [10]

Po vzoru popisovaného zařízení ČVUT vyvíjí Ústav automobilního a dopravního inženýrství zjednodušené měřící zařízení elastokinematiky zavěšení vozidel s primárním využitím na vývojové práce pro vozidlo Formule Student. Koncepce zařízení s pevným uchycením rámu vozidla a zatěžováním jedné nápravy splňuje kompromis mezi objektivností získaných dat, konstrukčními a ekonomickými nároky.

3 MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ ÚADI

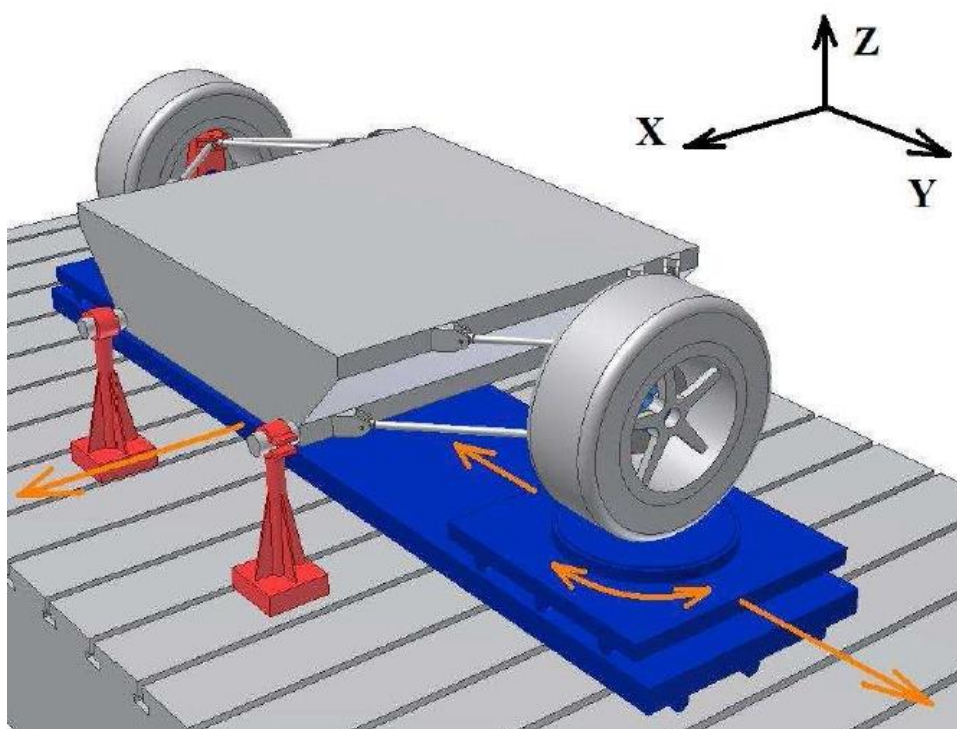
Měřicí zařízení pro určování elastokinematických vlastností zavěšení kol osobních automobilů vychází z konstrukčního návrhu nového měřicího zařízení vyhotoveného v bakalářské práci Jana Poláška. [10] Požadavkem Ústavu automobilního a dopravního inženýrství bylo navržení dostupného způsobu zkoušení tuhostí v zavěšení. Konstrukce zařízení proto využívá většinu běžně dostupných součástí, protože zakázková výroba prototypových komponentů by příliš navýšovala náklady na vývoj zařízení. Z požadavku cenově dostupného zařízení vychází také použití fotogrammetrického zařízení Tritop pro měření poddajností zavěšení, které ÚADI vlastní.

NÁVRH ZAŘÍZENÍ OBSAHUJE: [10]

- konstrukční řešení základen kol
- mechanismus zatěžování
- výběr snímače zatížení
- výběr zařízení snímání polohy kol

3.1 NÁVRH KONSTRUKCE NOVÉHO ZAŘÍZENÍ ÚADI

Jako koncepce zařízení byla vybrána varianta pevného ukotvení karoserie vozu a zatěžování kola v místě kontaktu s vozovkou (Obr. 3.1). Vhodnost koncepce je předurčená tím, že odpovídá reálnému stavu vozidla. Základny kol umožňují pohyby kol v ve směru os X a Y a rotaci kolem osy Z. [10]

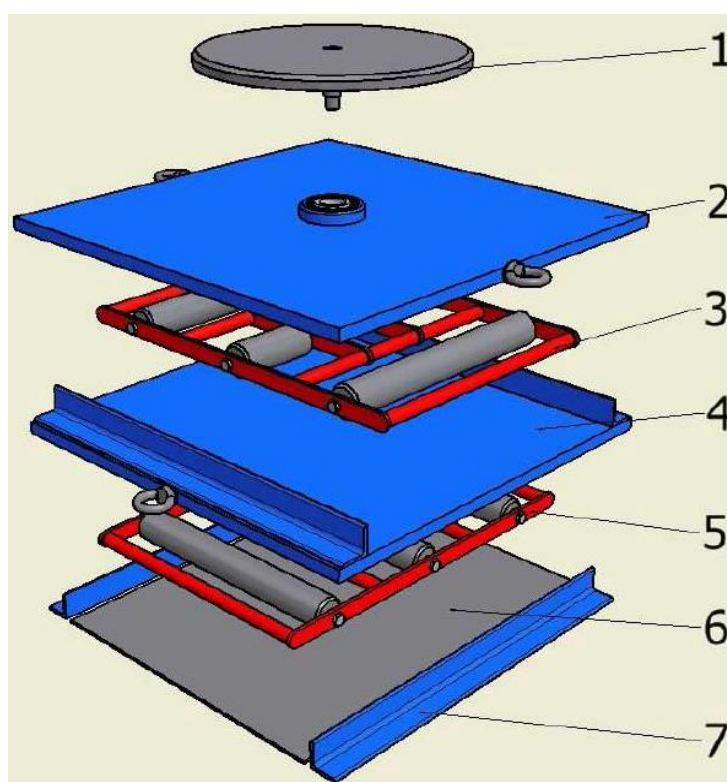


Obr. 3.1. Koncepce měřicího zařízení [10]

Výhodou zařízení je vysoká variabilita měření, která umožňuje měření různých velikostí rozvorů náprav a rozchodů kol. Jednoduchost konstrukce zařízení této koncepce snižuje náklady na výrobu zařízení. [10]

3.1.1 PRACOVNÍ STŮL

Celá konstrukce pracovního stolu (Obr. 3.2) je umístěna pod každým kolem zkoušeného vozidla, které je zatěžováno přesně definovaným silovým působením. Oproti vybrané koncepci, bylo využito samostatných pracovních stolů pro každé kolo, což rozšiřuje spektrum využití pro více vozidel a snižuje náklady na výrobu. Oddělené pracovní stoly umožňují zatěžování jednotlivých kol vozidla různým silovým působením. [10]



Obr. 3.2. Konstrukce pracovního stolu [10]

ZÁKLADNA KOL (OBR. 3.2 – POZICE 1)

Na otočnou desku základny je navařen čep, celý svařenec je pak uložen do dvou ložisek (kuželíkové a válečkové) ve stole umožňující pohyb v ose Y.

STOLY OSOVÝCH POSUVŮ (OBR. 3.2 – POZICE 2, 4 A 7)

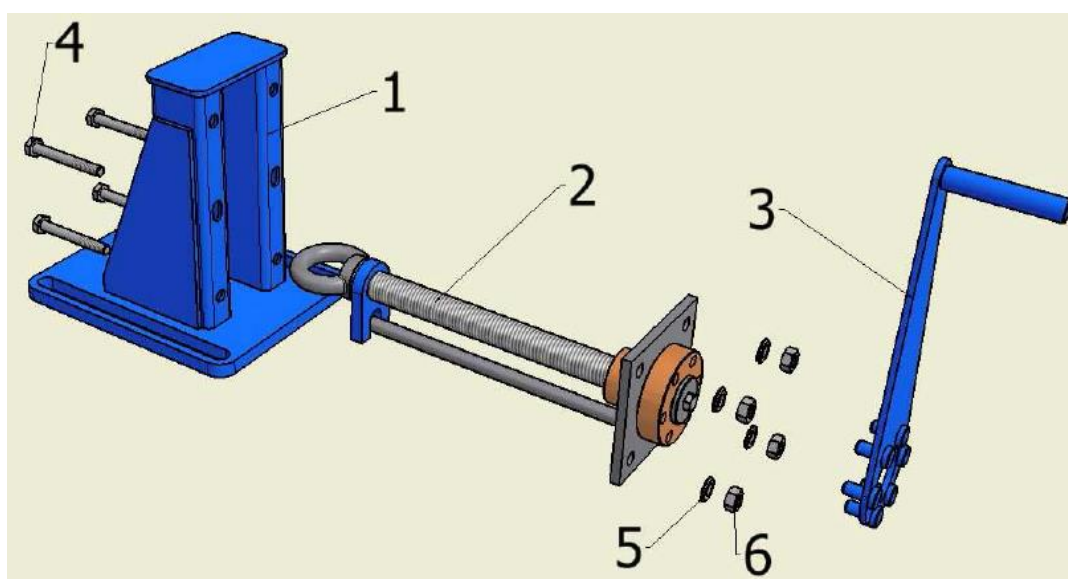
Stoly jsou svařeny z ocelových dílů, které zajišťují vedení valivých pojezdů pro potřebné osově posuny. Jsou opatřeny tažnými oky, pro uchycení snímačů a pohonu zatížení. [10]

POJEZDY STOLŮ (OBR. 3.2 – POZICE 3 A 5)

Svařený rám slouží pro uložení ocelových válců. Ty jsou ukotveny pomocí šroubů s kontra maticí. Valivý způsob pojezdu, oproti kluznému uložení, nevnáší do měření velké chyby a odporové třecí ztráty jsou menší. [10]

3.1.2 MECHANISMUS ZATĚŽOVÁNÍ

Zatěžovací mechanismus (Obr. 3.3) se umísťuje v příčném nebo podélném směru vzhledem k poloze vozidla. S jeho pomocí se vytvářejí silové účinky působící na stoly osových posuvů. Kombinace silových účinků lze dosáhnout použitím více pohonných mechanismů, což se odvíjí od charakteru měření.



Obr. 3.3. Mechanismus pohonu [10]

RÁM POHONU (OBR. 3.3 – POZICE 1)

Rám je svařen z ocelových dílů, přičemž umožňuje nastavení šroubového mechanismu do dvou výškových poloh. Ty odpovídají výškovým polohám úchytů ok na posunových deskách pracovního stolu. [10]

ŠROUBOVÝ MECHANISMUS (OBR. 3.3 – POZICE 2)

Mechanismus využívá trapézového šroubu s trapézovou přírubovou maticí. Součásti jsou běžně dostupné strojní součásti s možností upravení konců šroubů již výrobcem. Protáčení tažného oka je zamezeno vodícím kamenem našroubovaným na oku. Rozsah je vymezen patřičnými dorazy. [10]

KLIKA (OBR. 3.3 – POZICE 3)

Klika obstarává ruční pohon šroubového mechanismu. Tato varianta představuje nízko nákladové řešení, které ovšem nemá takovou přesnost jako automatické pohony.

3.2 SNÍMAČE ZATÍŽENÍ A POLOHY KOLA

Výběr měřicí techniky je opět veden požadavkem nízkých pořizovacích nákladů a vysoké dostupnosti na trhu.

MĚŘENÍ ZATÍŽENÍ

Vhodnou variantou měřicího zařízení byl zvolen tenzometrický snímač, který je umístěn mezi pracovní stůl a zatěžovací mechanismus (Obr. 3.4). Vzhledem ke konstrukci mechanismů je zařízení konkretizováno na měření tahové síly. Podstatou polovodičového snímání je změna odporu důsledkem mechanické deformace. [10]

Konkrétní typ tenzometrického snímače nebyl doposud určen, protože bude vybrán až dle aktuální nabídky při realizaci zařízení. Výstupní signál je ovšem u všech typů v podobě napětí měřicího obvodu (výstupní jednotkou jsou milivolty) zaznamenávaného v čase. [10]



Obr. 3.4. Snímač tahové síly S9, výrobce HBM [10]

MĚŘENÍ POLOHY KOLA

Pro snímání polohy kol bylo zvoleno optické zařízení Tritop, které již Ústav automobilního a dopravního inženýrství vlastní. Výhodou zařízení je vysoká variabilita měření a přesnost získaných dat. Zařízení Tritop je popsáno v následující kapitole.

Data získaná snímáním vozidla zařízením Tritop jsou zpracovávána algoritmem vytvořeným v programu Matlab (Kapitola 4).

3.3 FOTOGRAMMETRICKÉ ZAŘÍZENÍ TRITOP

Optické měřicí systémy vynikají svojí univerzálností pro měření charakteristik různorodých objektů. V automobilovém průmyslu slouží především k přesné transformaci reálných těles na počítačové modely, které jsou použity pro výpočtové simulace.

Zařízení Tritop pracuje na principu přesného bezkontaktního určování polohy kontrastních bodů rozmístěných libovolně po ploše měřeného objektu (Obr. 3.5). Pro vytvoření sítě bodů ze dvou a více fotografií, využívá systém tzv. fotogrammetrie. Snímky focené z různých pozic a úhlů jsou k sobě skládány a systém je schopen určit prostorové souřadnice všech rozpoznávaných snímaných bodů. Díky vysoké přesnosti, snadné manipulaci, mobilitě, jednoduché přípravě pro vytvoření prostorových souřadnic a rychlému zpracování dat je systém často využívaným při kontrolách kvality výroby, v oblasti reverzního inženýrství a při deformačních analýzách. [17]

Zařízením lze snímat objekty od $(1,0 \times 0,5 \times 5,0) \text{ m}^3$ s přesností 0,015 mm až do velikosti $(10,0 \times 5,0 \times 5,0) \text{ m}^3$ s přesností 0,2 mm. [18]



Obr. 3.5. Snímání velkých těles zařízením TRITOP [16]

3.3.1 HARDWARE ZAŘÍZENÍ TRITOP

Vychází z běžně dostupných komponentů, které ovšem ve výsledku i se specializovaným softwarem tvoří sofistikovaný měřicí systém.

FOTOAPARÁT A JEHO PŘÍSLUŠENSTVÍ

Digitální fotoaparát Fujifilm FinePix S2 s vysokým rozlišením a vyměnitelným objektivem se stálou ohniskovou vzdáleností (Obr. 3.6). Absence automatického ostřicího mechanismu je důležitá pro vytvoření jasně definované série snímků. [17]



Obr. 3.6. Fotoaparát systému Tritop [2]

Pro ukládání a přenos snímků slouží paměťová karta, pro extrakci dat do počítače je nutné použití adaptéru paměťové karty (Obr. 3.7). [17]



Obr. 3.7. Paměťová karta s adaptérem [2]

Makroblesk EM-140DG optimalizuje nasvícení měřeného objektu a zvyšuje schopnost systému rozpoznat kontrastní body (Obr. 3.8). [17]



Obr. 3.8. Makroblesk fotoaparátu [2]

REFERENČNÍ BODY A KALIBRACE

Pro kalibraci se využívají certifikované kalibrační tyče. Na obou koncích mají kódované referenční body. Vzdálenost těchto bodů je velmi přesně změřena a systém tuto vzdálenost využívá k měření vzdálenosti ostatních snímaných bodů (Obr. 3.9). [17]



Obr. 3.9. Kalibrační tyče [2]

Na měřené těleso musí být vhodně rozmístěny kódované referenční body. Ty mají podobu kontrastních značek s různými kruhovými výsečemi a každý bod má své jedinečné identifikační číslo. Slouží ke skládání snímků a vytváření sítě bodů v prostoru (Obr. 3.10). [17]



Obr. 3.10. Kódované referenční body [2]

Nekódované referenční body mohou být rozmístěny libovolně po snímaném tělese. Slouží pouze k vytvoření podrobnější 3D sítě (Obr. 3.11). [17]



Obr. 3.11. Nekódované referenční body [2]

POČÍTAČ

Počítač (značky DELL) se softwarem Tritop pro analyzování a vyhodnocování sad snímků (Obr. 3.12). [17]



Obr. 3.12. Počítač pro zpracování dat [2]

3.3.2 POSTUP PŘI SNÍMÁNÍ OBJEKTŮ

Dodržení všech kroků před i v průběhu snímání je nezbytné pro správné vyhodnocení.

ROZMÍSTĚNÍ KONTRASTNÍCH BODŮ

Do blízkosti tělesa se vhodně umístí kalibrační tyče tak, aby byly zobrazeny na co nejvíce snímcích. [17]

V dalším kroku rozmisťujeme kódované referenční body. Jejich počet by měl být co nejvyšší, protože slouží ke zpřesnění měření. Jejich poloha by měla co nejlépe reprezentovat všechny rozměry tělesa. Je nutné zajistit stálost pozice všech kódovaných bodů. Kódované referenční body nesmějí vytvářet na snímcích přímky. Pro měření je výhodnější jejich náhodné rozmístění, oproti vytváření sítí se stejnými rozestupy mezi body. [17]

Rozmísťování nekódovaných bodů probíhá opět v co největším počtu tak, aby byly vhodně reprezentovány rozměry měřeného tělesa. Pro kódované i nekódované body je vhodné zajištění co největšího kontrastu tím, že se zejména u jednorázových nekódovaných bodů používá zcela nová sada nálepek. [17]

PŘÍPRAVA FOTOAPARÁTU

Je vhodné používat základní nastavení. Důležitý je požadavek dobrého osvětlení, vytváření co nejméně odlesků a vhodně nastavit blesk fotoaparátu. [17]

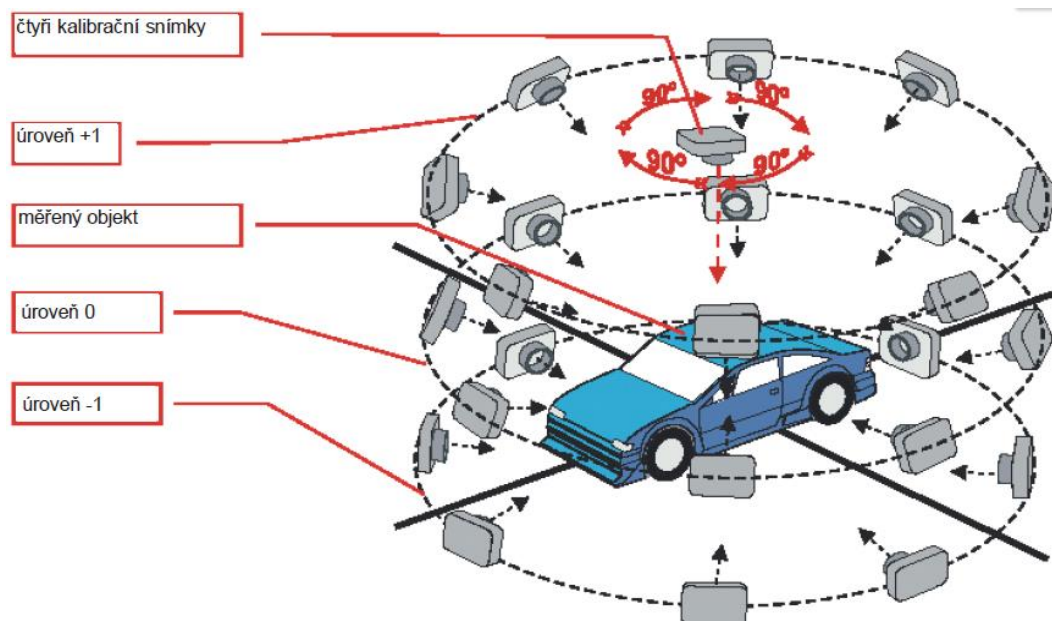
KALIBRAČNÍ SNÍMKY

Série čtyř snímků otočených o 90° kolem eliptické osy a musí obsahovat kalibrační tyč. Snímky se zhotovují jako první. Slouží k výpočtu počáteční polohy fotoaparátu a určení optického zkreslení objektivu. [17]

POHYB FOTOAPARÁTU PŘI SNÍMÁNÍ

Snímky se pořizují z několika úrovní. Musí se dbát na to, aby snímky obsahovaly vždy minimálně pět kódovaných referenčních bodů a nekódovaný bod pro rozpoznání alespoň na třech různých snímcích. [17]

První úroveň se snímá pod úhlem 45° od optické osy a postupuje se proti směru hodinových ručiček. Další úrovně jsou zhotoveny obdobně s tím rozdílem, že se vhodně změní úhel pořizování snímků (Obr. 3.13). [17]



Obr. 3.13. Pohyb fotoaparátu při měření [17]

Úhly jednotlivých úrovní je nutno volit s rozvahou, aby nedocházelo ke zkreslování referenčních bodů. Příliš ploché úhly snímání zapříčiní zkreslení kruhových bodů do elips, které nemusí být rozpoznány. [17]

3.3.3 SOFTWARE ZAŘÍZENÍ TRITOP

Pro zpracování snímků s vysokým rozlišením využívá systém Tritop vlastní software. Ovládání je realizováno myší obdobně jako v systému Windows. Funkce softwaru umožňují rychlé a přesné zobrazení referenčních bodů, kontrastních linek a vypočítaných 3D souřadnic pro jejich pozdější vyhodnocování. [17] [18]

POSTUP PŘI VYHODNOCOVÁNÍ SADY SNÍMKŮ:

- vytvoření nového projektu
- určení fotoaparátu, měřítkové tyče a kódovaných referenčních bodů
- výpočet referenčních bodů
- kontrola výsledků a přidání referenčních bodů, které nebyly automaticky určeny
- zadání souřadnicového systému

Systém Tritop pracuje ve dvou módech, jedná se o vázací mód (Bundle mode) a výpočtový mód (Evaluation mode). Každý má vlastní ovládací prostředí, mezi kterými lze libovolně přepínat. V případě, že pro výpočet (Evaluation mode) chybí snímky referenčních bodů, což má negativní vliv na přesnost výpočtu, lze tyto body zpětně ve vázacím módu doplnit. [17]

BUNDLE MODE

Vázací mód slouží k zobrazení a kontrole rozpoznaných bodů v podobě elips (tzv. zobrazení referenčních bodů). Cílové body jsou vypočteny z prostorového umístění referenčních bodů. Zvláštní body jsou do projektu zadávány ručně. [17]

EVALUATION MODE

Výpočtový mód slouží k zobrazování výsledků měření. Před výpočtem se musí zkontrolovat, zda byly identifikovány všechny snímky. Případné chybějící snímky je nutno doplnit pro zajištění přesnosti měření. Mód také umožňuje vytváření tzv. primitiv, což jsou geometrické prvky vytvořené z prvků (body a čáry) nalezených při měření: [17]

- body (střed mezi body, průsečík, promítnutí do jiné roviny)
- přímky (dva body, počáteční bod a směr, kolmá na jinou přímku v počátečním bodě, průsečnice dvou ploch)
- roviny (tři body, bod a směr normály, pomocí souřadného systému, rovnoběžná s jinou rovinou, pomocí dvou bodů a je kolmá na okamžitý pohled, statistické metody)
- kružnice (tři body, určení středu a směru osy, statistické metody)
- koule (střed a poloměr, statistické metody)
- válec (dva body a poloměr, směr osy z počátečního bodu a průměr, statistické metody)
- kužel (statistické metody)
- pomocí primitiv lze přesněji definovat tvar součástí a rozpoznání prostorových bodů. [17]
- software umožňuje měřit vzdálenosti dvou bodů, bodu od roviny nebo měření úhlu mezi dvěma rovinami, případně přímkou a rovinou. [17]



4 TVORBA VÝPOČTOVÉHO ALGORITMU

Algoritmus zpracování dat a výpočtu geometrie řízení byl vytvořen úpravou programu Geometrie, použitým v diplomové práci Davida Mateji, zabývajícím se kinematickými charakteristikami zavěšení kol. [22]

Algoritmus je sestavený v matematickém programu Matlab a slouží ke zpracování datových souborů získaných ze softwaru zařízení Tritop. Výpočetní software Matlab umožňuje přesný výpočet parametrů geometrie a možnost libovolného programování algoritmu výpočtu. Zpracování dat využívá výpočtů analytické geometrie pro určování parametrů polohy kola v prostoru (Kapitola 4.1). Algoritmus je nově doplněn o optimalizaci souřadnic polohy kol a sjednocení roviny disku kola vytvořené z více bodů rotujících kolem osy otáčení kola (Kapitola 4.2).

Z datových souborů zpracovaných algoritmem výpočtu získáme stav jednotlivých parametrů geometrie. Ty následně můžeme srovnávat s hodnotami získanými při zvolených jízdních stavech (zatěžování). Parametry geometrie jsou určeny výpočty analytické geometrie popsány v Kapitole 4.3.

KROKY VÝPOČTU GEOMETRIE VOZIDLA:

- vytvoření datových souborů zachycujících polohu vozidla
- určení polohy kol
- optimalizace souřadnic polohy kol
- vytvoření souřadného systému vozidla
- výpočet parametrů geometrie vozidla
- vyhodnocení parametrů geometrie vozidla

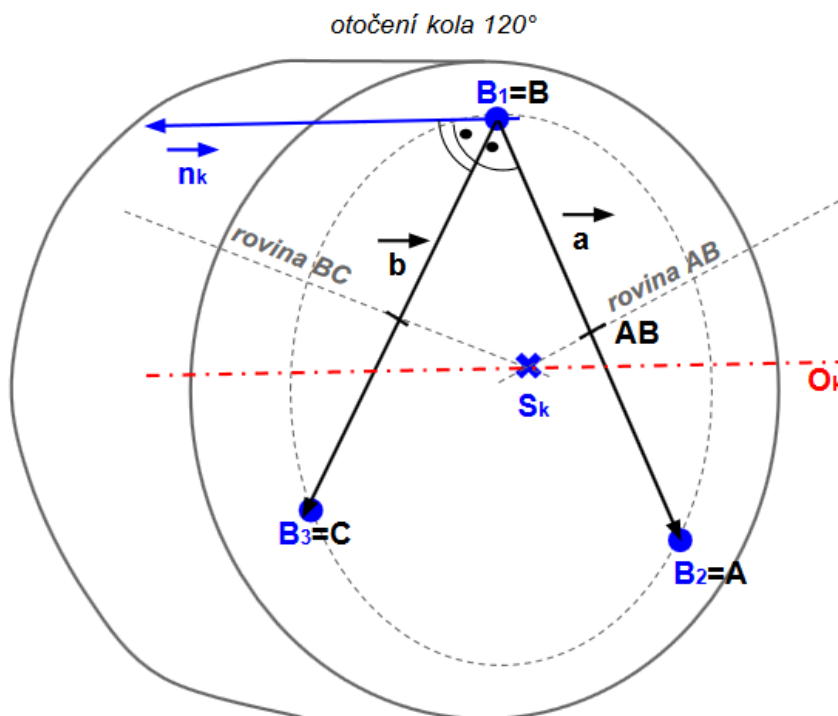
V současné době není možné provést měření poddajností zavěšení kol vozidla, proto bylo provedeno ověření funkce algoritmu výpočtu určením stavu geometrie vozidla Formule Student se zaměřením na volbu nejvýhodnější metody měření (Kapitola 5).

4.1 URČENÍ POLOHY KOLA

Polohu kola charakterizuje v prostoru střed kola a normálový vektor kola. Pro získání těchto parametrů bylo využito metody otáčení kola o zvolený úhel. Princip metody vychází z určení středu kružnice vytvořené třemi body a normálového vektoru roviny vytvořené těmito třemi body.

4.1.1 NORMÁLOVÝ VEKTOR KOLA

Snímáním kol vozidla při pootočení dvakrát o 120° se získají tři datové soubory, které zachycují polohu jednoho kódovaného bodu ve třech pozicích (Obr. 4.1). Tyto tři vzniklé body určují v prostoru dva směrové vektory roviny, která představuje rovinu disku kola.



Obr. 4.1. Analytické určení normálového vektoru a středu kola

Směrové vektory a, b a normálový vektor kola n_k (Obr. 4.1) pak lze matematicky vyjádřit pomocí vztahů:

$$\begin{aligned}\vec{a} &= B_1 - B_2 \\ \vec{b} &= B_1 - B_3 \\ \vec{n}_k &= \vec{a} \times \vec{b}\end{aligned}\tag{4. 1.}$$

Pro umožnění transformace a průměrování souřadnic v následujících krocích je nutné počítat s jednotkovými vektory.

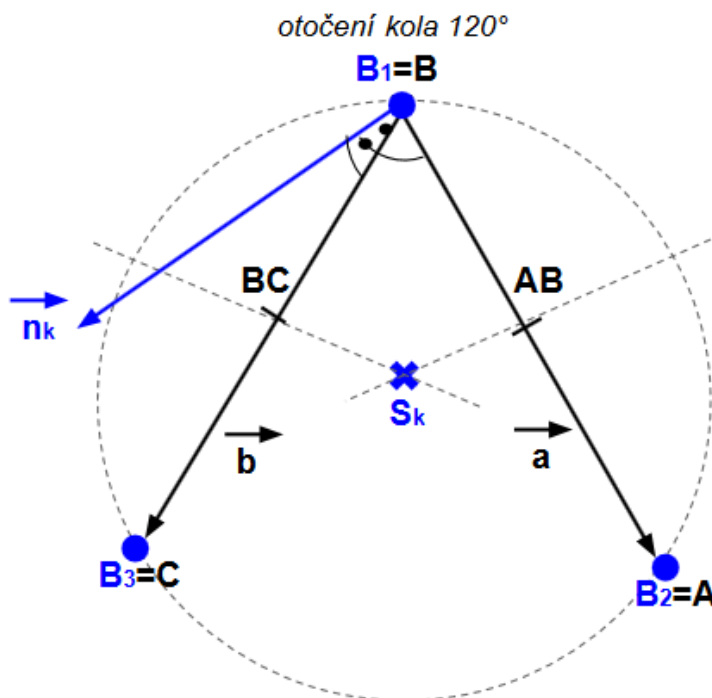
Vztahy jednotkových normálových vektorů použité ve výpočetním programu mají poté podobu:

$$\begin{aligned}\vec{n}_{AB} &= \frac{B - A}{|B - A|} \\ \vec{n}_{BC} &= \frac{C - B}{|C - B|} \\ \vec{n}_{ABC} &= \frac{\vec{n}_{AB} \times \vec{n}_{BC}}{|\vec{n}_{AB} \times \vec{n}_{BC}|}\end{aligned}\tag{4. 2.}$$



4.1.2 STŘED KOLA

Získání souřadnic středu kola vychází z principu určení středu kružnice vytvořené třemi body v rovině (Obr. 4.2). Středů dvou vzniklých úseček AB a BC jsou vedeny kolmice, jejichž průsečíkem je hledaný střed.



Obr. 4.2. Střed kružnice v rovině

V prostoru se tento princip výpočtu realizuje zjištěním průsečíku tří rovin. Průsečnice rovin proložených středy AB a BC s příslušnými jednotkovými normálovými vektory $\vec{a}$ a $\vec{b}$ představuje osu otáčení kola ok (Obr. 4.1). Hledaný střed kola vypočítáme jako průsečík přímky ok a roviny disku kola vytvořené body A , B a C .

Matematické řešení je realizováno výpočtem tří rovnic o třech neznámých:

$$nAB_x \cdot x + nAB_y \cdot y + nAB_z \cdot z = pAB$$

$$nBC_x \cdot x + nBC_y \cdot y + nBC_z \cdot z = pBC \quad (4. 3.)$$

$$nABC_x \cdot x + nABC_y \cdot y + nABC_z \cdot z = pABC$$

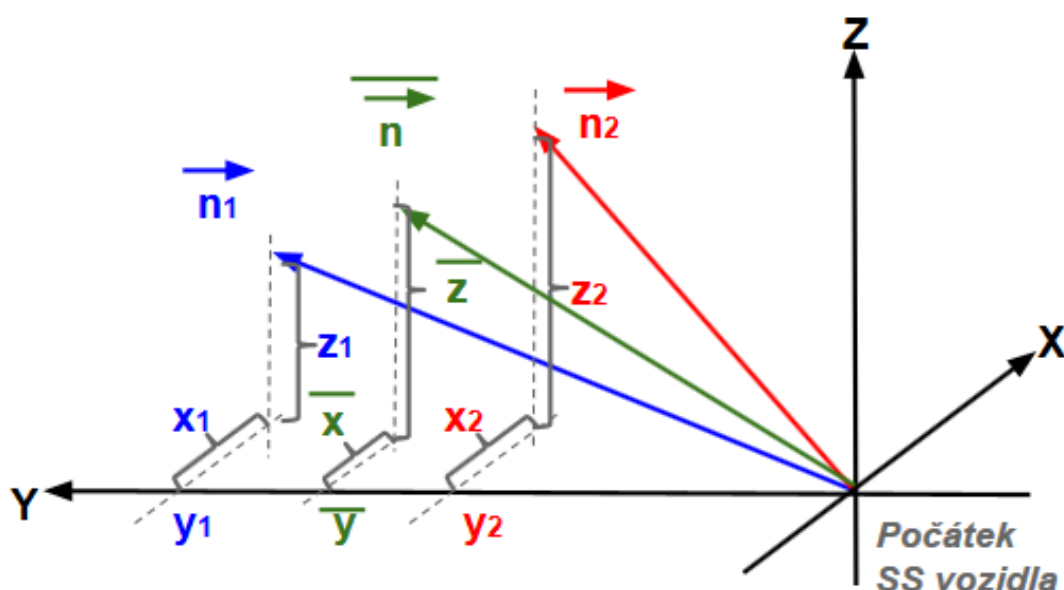
Maticový zápis výpočtu průsečíku tří rovin použitý ve výpočetním programu:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} nAB^T \\ nBC^T \\ nABC^T \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} pAB \\ pBC \\ pABC \end{bmatrix} \quad (4. 4.)$$

4.2 OPTIMALIZACE SOUŘADNIC POLOHY KOL

Vzhledem k možnému vzniku chyby měření při manipulaci a snímání vozidla, bylo nově zvoleno použití více kódovaných bodů umístěných na disk kola. Eliminace vzniku chyby výpočtu souřadnic charakterizujících polohu kol je dosaženo průměrováním souřadnic. Průměrovat lze pouze souřadnice středů kol a jednotkových normálových vektorů kol (Obr. 4.3), vzhledem k jejich neměnné pozici vůči počátku souřadného systému.

4.2.1 NORMÁLOVÝ VEKTOR



Obr. 4.3. Průměrování jednotkových normálových vektorů

Výsledné jednotkové normálové vektory kol obecně určujeme:

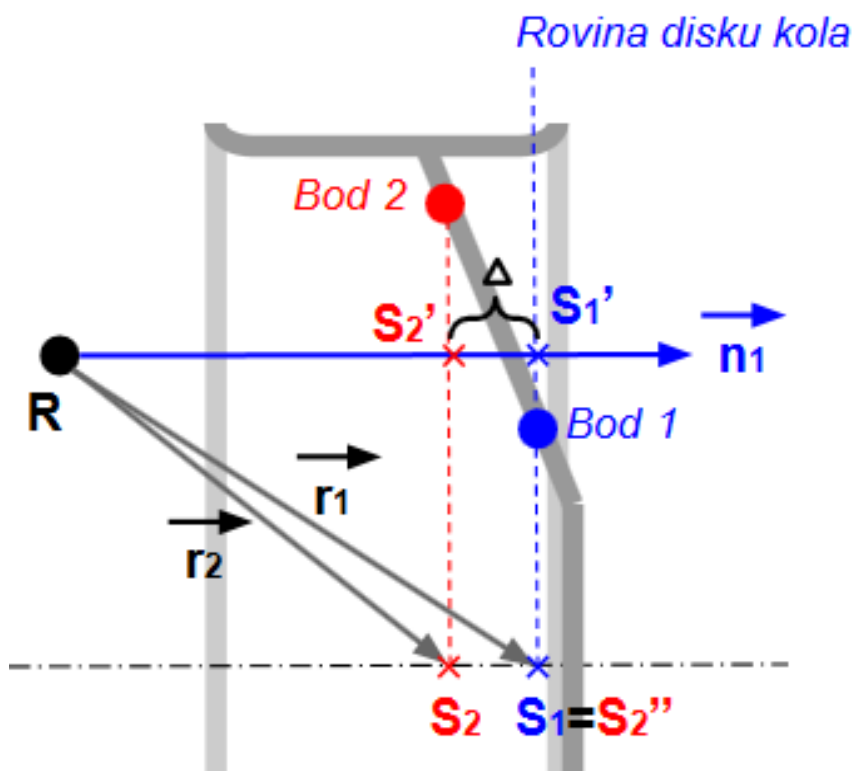
$$\bar{\vec{n}} = \frac{\sum_{i=1}^i \vec{n}_i}{i} \quad (4.5.)$$

Takto upravené vektory jsou následně použity pro výpočet celkové geometrie, jak je popsáno v Kapitole 4.3.



4.2.2 STŘED KOLA

Pro dosažení optimalizovaných souřadnic středu kola je nutné posunout jednotlivé středy kol do stejné roviny (Obr. 4.4). Rovina kola je situována do středu kola určeného pomocí bodu na nejmenším poloměru (nejblíže ke šroubům uchycujícím kolo).



Obr. 4.4. Sjednocení roviny kola

Jako pomocný bod R byl zvolen bod umístěný na rámu, který se rovněž používá pro definování souřadného systému rámu vozidla. Po transformaci bodů ve všech datových souborech (charakteristických polohách) do společného souřadného systému vozidla, bylo provedeno zprůměrování souřadnic tohoto bodu datových souborů pro určení středu kola.

Vzdálenost mezi rovinami vytvořenými bodem 1 a bodem 2 (Obr. 4.4) určíme pomocí geometrického významu skalárního součinu, kterým určíme délky úseček RS_1' a RS_1' .

$$\begin{aligned} |RS'_1| &= \vec{r}_1 \cdot \vec{n}_1 \\ |RS'_2| &= \vec{r}_2 \cdot \vec{n}_1 \end{aligned} \quad (4.6.)$$

Rozdíl délek určuje konstantu Δ , která určuje vzdálenost posunutí bodu S_2 do roviny disku kola (bod S_2'').

$$\begin{aligned} |RS'_1| - |RS'_2| &= \Delta \\ \vec{r}_2 + \Delta \cdot \vec{n}_1 &= \vec{r}_2'' \\ S_2'' &= \vec{r}_2'' + R \end{aligned} \quad (4.7.)$$

Po sjednocení zjištěných středů kol do roviny kola následuje postup zprůměrování souřadnic středu kola obdobně jako v Kapitole 4.2.1.

4.2.3 TRANSFORMACE SOUŘADNIC

Pro výpočet parametrů geometrie je nutné transformovat zjištěné souřadnice vektorů a bodů do společného souřadného systému. Obecně se transformace provádí posunem a rotací souřadnic z původního do nového souřadného systému [23,24].

Ve výpočtovém programu v prostředí Matlab se transformace realizuje posunem souřadnic do společného bodu odečtením souřadnic všech bodů od souřadnic prvního bodu v souboru dat (kódovaný bod na rámu vozidla) a rotací realizovanou maticovým výpočtem:

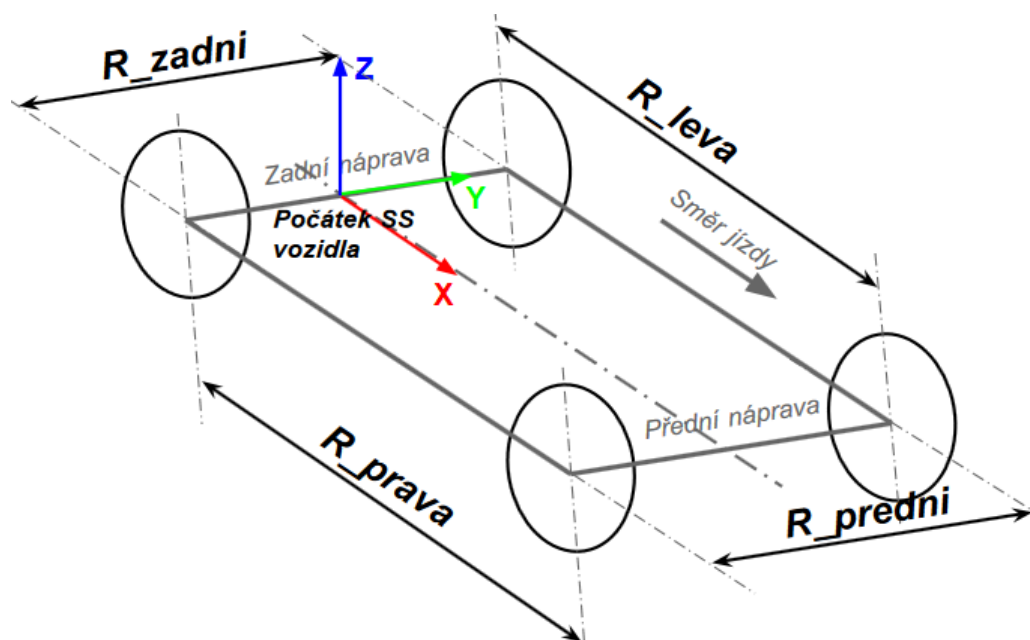
$$\begin{aligned} X &= X' \cdot T \\ X' &= X \cdot T^{-1} = X \cdot T^T \end{aligned} \quad (4.8.)$$

kde bod X v původním souřadném systému ve tvaru matice $(1,3)$ je orotován transponovanou transformační maticí ve tvaru $(3,3)$. Matice T je vytvořena ze vzájemně ortogonálních (kolmých) jednotkových vektorů e_i , e_j a e_k určených z kódovaných bodů na rámu vozidla.



4.3 VÝPOČET GEOMETRIE VOZIDLA

Parametry geometrie vozidla jsou počítány z optimalizovaných souřadnic polohy jednotlivých kol v souřadném systému vozidla. Počátek souřadného systému vozidla je umístěn na střed zadní nápravy.



Obr. 4.5. Souřadný systém vozidla

4.3.1 ROZVOR KOL A MÍRA PŘES KOLA

ROZVOR KOL

Délkový údaj, který je určen rozdílem x-ových souřadnic středů kol na jedné straně vozidla (Obr. 4.5, označen jako R_{prava} a R_{leva}). Obecné vyjádření výpočtu rozvoru kol:

$$R = S_{x_prednikolo} - S_{x_zadnikolo} \quad (4.9.)$$

V tabulce 2 jsou uvedena označení příslušných souřadnic ve výpočtovém programu.

Tab. 1. Rozvor kol

Proměnná	Pravá strana	Levá strana
R	R_{prava}	R_{leva}
$S_{x_predni\ kolo}$	$WC_d_pp(1)$	$WC_d_lp(1)$
$S_{x_zadni\ kolo}$	$WC_d_pz(1)$	$WC_d_lz(1)$



MÍRA PŘES KOLA

Délkový údaj popisující vzdálenost středů kol na jedné nápravě, který je určen rozdílem y-ových souřadnic středů kol na nápravě (Obr. 4.5, označen jako R_{predni} a R_{zadni}). Obecné vyjádření výpočtu míry přes kola:

$$R = S_{y_leva\ strana} - S_{y_pravastrana} \quad (4.10.)$$

kde:

Tab. 2. Míra přes kola

Proměnná	Přední náprava	Zadní náprava
R	R_{predni}	R_{zadni}
$S_{y_leva\ strana}$	$WC_d_lp(2)$	$WC_d_lz(2)$
$S_{y_prava\ strana}$	$WC_d_pl(2)$	$WC_d_pz(2)$

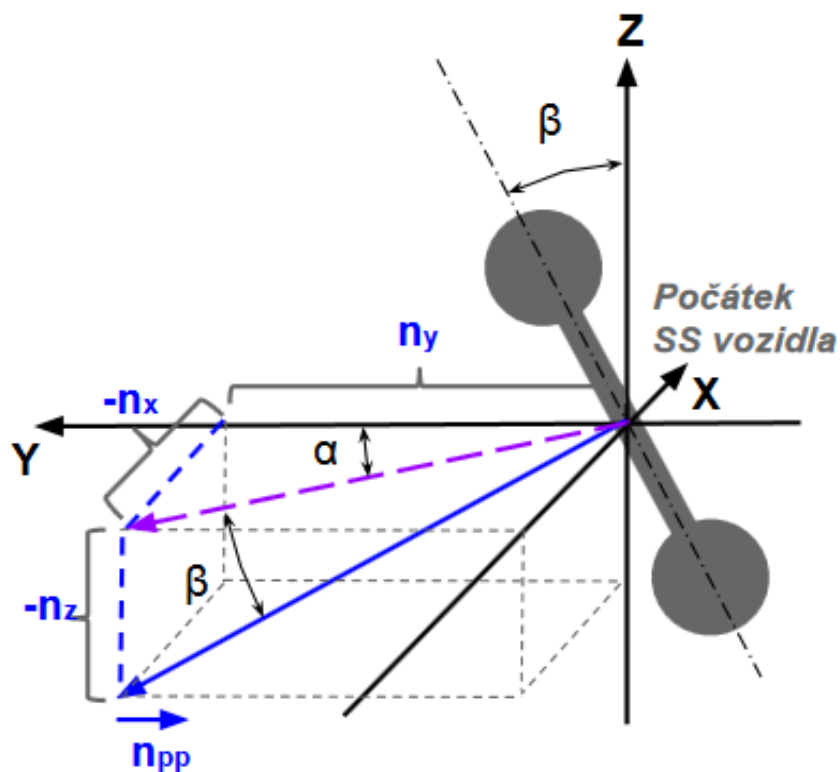
Míra přes kola je uváděna pouze jako orientační údaj, protože poloha středů kol v ose y je závislá na použitém disku kola, tudíž ji nelze brát jako směrodatný údaj.

4.3.2 SBÍHAVOST

Celkovou sbíhavost kol na nápravě určuje součet dělených sbíhavostí jednotlivých kol příslušné nápravy. Dělené sbíhavosti kol jsou určeny jako úhel, který svírá průmět normálového vektoru kola do roviny x-y s osou Y (úhel α na Obr. 4.6 a Obr. 4.7).



PRAVÁ STRANA



Obr. 4.6. Kola na pravé straně vozidla

Obecné vyjádření dělené sbíhavosti kol na pravé straně vozidla (Obr. 4.6):

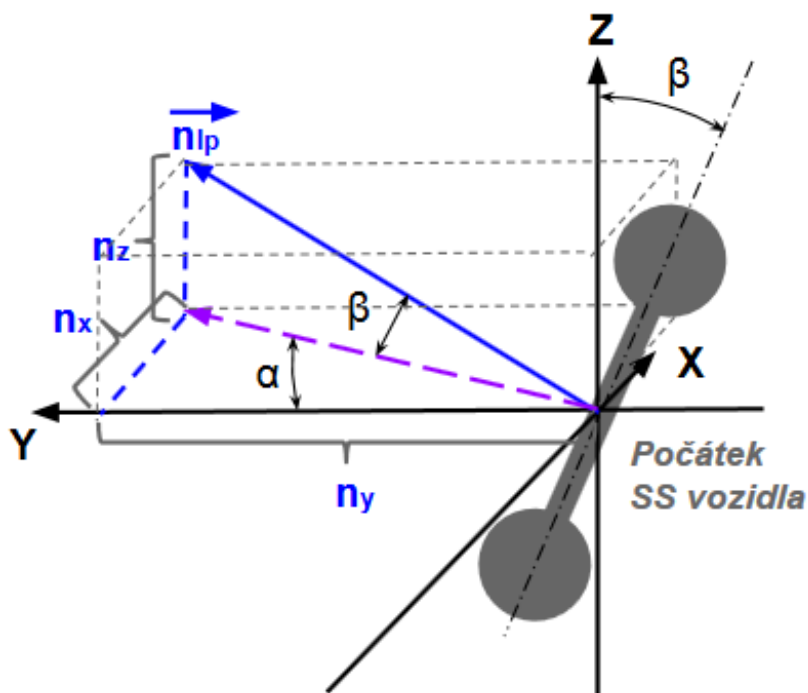
$$\alpha = \arctan\left(\frac{-n_x}{n_y}\right) \quad (4. 11.)$$

kde:

Tab. 3. Sbíhavost kol na pravé straně

Proměnná	PP kolo	PZ kolo
α	S_pp	S_pz
$-n_x$	-NV_d_pp(1)	-NV_d_pz(1)
n_y	NV_d_pp(2)	NV_d_pz(2)

LEVÁ STRANA



Obr. 4.7. Kola na levé straně vozidla

Obecné vyjádření dělené sbíhavosti kol na levé straně vozidla (Obr. 4.7):

$$\alpha = \arctan\left(\frac{n_x}{n_y}\right) \quad (4.12.)$$

kde:

Tab. 4. Sbíhavost kol na levé straně

Proměnná	LP kolo	LZ kolo
α	S_{lp}	S_{lz}
n_x	$NV_d_lp(1)$	$NV_d_lz(1)$
n_y	$NV_d_lp(2)$	$NV_d_lz(2)$

Celkovou sbíhavost kol na jedné nápravě lze obecně vyjádřit vztahem:

$$S_{celkova} = S_{prave} + S_{leve} \quad (4.13.)$$

kde:

Tab. 5. Celková sbíhavost

Proměnná	Přední náprava	Zadní náprava
$S_{celkova}$	S_{all_P}	S_{all_Z}
S_{prave}	S_{pp}	S_{pz}
S_{leve}	S_{lp}	S_{lz}



4.3.3 ODKLON

Odklon kol je určen jako úhel, který svírá průmět normálového vektoru příslušného kola do roviny x - y a normálový vektor (úhel β na Obr. 4.6 a Obr. 4.7).

PRAVÁ STRANA

Obecné vyjádření odklonu kol na pravé straně vozidla (Obr. 4.6):

$$\beta = \arcsin(-n_z) \quad (4.14.)$$

kde:

Tab. 6. Odklon kol na pravé straně

Proměnná	PP kolo	PZ kolo
β	O_pp	O_pz
$-n_z$	-NV_d_pp(3)	-NV_d_pz(3)

LEVÁ STRANA

Obecné vyjádření odklonu kol na levé straně vozidla (Obr. 4.7):

$$\beta = \arcsin(n_z) \quad (4.15.)$$

kde:

Tab. 7. Odklon kol na levé straně

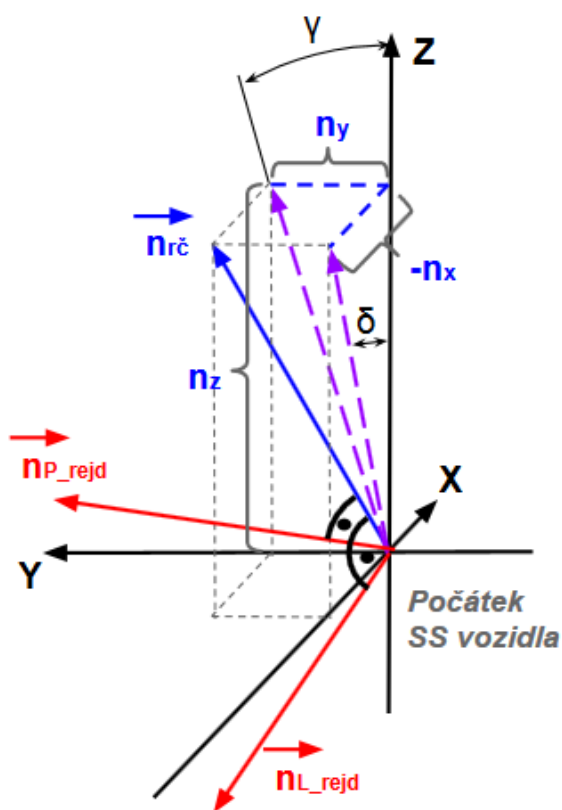
Proměnná	LP kolo	LZ kolo
β	O_lp	O_lz
n_z	NV_d_lp(3)	NV_d_lz(3)

4.3.4 PŘÍKLON A ZÁKLON REJDOVÉHO ČEPU

Určení příklonu rejdivého čepu předchází určení osy rejdivého čepu, kterou získáme vektorovým součinem normálových vektorů kol přední nápravy natočených do maximálních rejdu. Z jednotkového vektoru představujícího osu rejdivého čepu určíme příklon čepu jako úhel, který svírá průmět osy rejdivého čepu do roviny y-z s osou Z (úhel γ na Obr. 4.8 a Obr. 4.9).

Záklon rejdivého čepu je určen jako úhel, který svírá průmět osy rejdivého čepu do roviny z-x s osou Z (úhel δ na Obr. 4.8 a Obr. 4.9).

PRAVÉ KOLO



Obr. 4.8. Osa rejdivého čepu pravého kola

Výpočet jednotkového vektoru osy rejdivého čepu pravého kola:

$$PR_{pp} = \frac{NV_{v_{pp}P} \times NV_{v_{pp}L}}{|NV_{v_{pp}P} \times NV_{v_{pp}L}|} \quad (4.16.)$$

Obecné vyjádření příklonu rejdivého čepu pravého kola:

$$\gamma = \arctan\left(\frac{n_y}{n_z}\right) \quad (4.17.)$$



kde:

Tab. 8. Příklon rejdivého čepu pravého kola

Proměnná	PP kolo
γ	P_pp
n_y	PR_pp(2)
n_z	PR_pp(3)

Obecné vyjádření záklonu rejdivého čepu pravého kola:

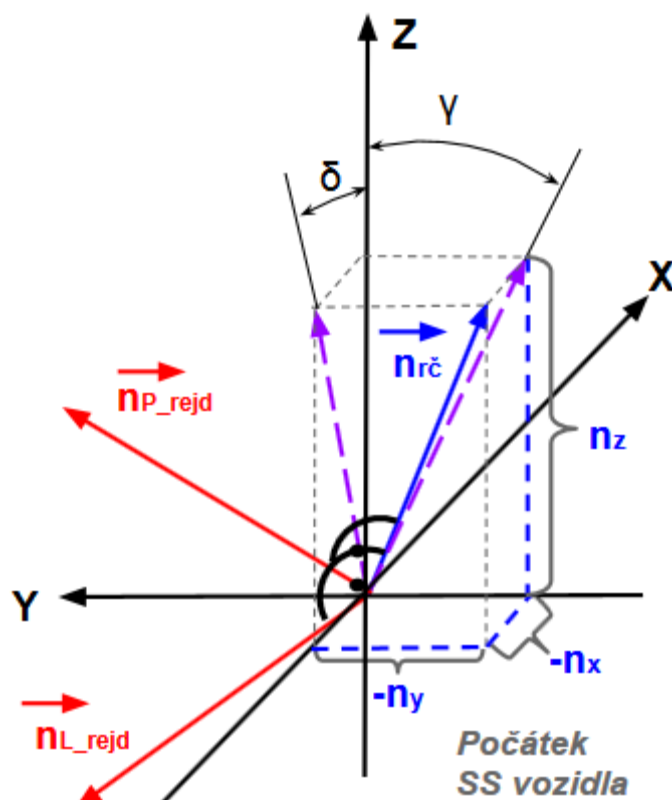
$$\delta = \arctan\left(\frac{-n_x}{n_z}\right) \quad (4.18.)$$

kde:

Tab. 9. Záklon rejdivého čepu pravého kola

Proměnná	PP kolo
δ	Z_pp
$-n_x$	-PR_pp(1)
n_z	PR_pp(3)

LEVÉ KOLO



Obr. 4.9. Osa rejdivého čepu levého kola



Výpočet jednotkového vektoru osy rejdového čepu levého kola:

$$PR_{lp} = \frac{NV_{vlp}P \times NV_{vlp}L}{|NV_{vlp}P \times NV_{vlp}L|} \quad (4.19.)$$

Obecné vyjádření příklonu rejdového čepu levého kola:

$$\gamma = \arctan\left(\frac{-n_y}{n_z}\right) \quad (4.20.)$$

kde:

Tab. 10. Příklon rejdového čepu pravého kola

Proměnná	LP kolo
γ	P_lp
$-n_y$	-PR_lp(2)
n_z	PR_lp(3)

Obecné vyjádření záklonu rejdového čepu levého kola:

$$\delta = \arctan\left(\frac{-n_x}{n_z}\right) \quad (4.21.)$$

kde:

Tab. 11. Záklon rejdového čepu pravého kola

Proměnná	LP kolo
δ	Z_lp
$-n_x$	-PR_lp(1)
n_z	PR_lp(3)



4.3.5 ROZDÍL REJDŮ

Úhel maximálního natočení kola do rejdu určujeme jako úhel, který svírá průmět normálového vektoru kola do roviny x-y s osou Y.

PRAVÝ REJD

Obecný zápis úhlu kol natočených do pravého rejdu:

$$N_{kola_P} = \arctan\left(\frac{n_x}{n_y}\right) \quad (4. 22.)$$

kde:

Tab. 12. Kola v pravém rejdu

Proměnná	PP kolo	LP kolo
N_{kola_P}	N_{pp_P}	N_{lp_P}
n_x	$NV_v_ppP(1)$	$NV_v_lpP(1)$
n_y	$NV_v_ppP(2)$	$NV_v_lpP(2)$

LEVÝ REJD

Obecný zápis úhlu kol natočených do levého rejdu:

$$N_{kola_L} = -\arctan\left(\frac{n_x}{n_y}\right) \quad (4. 23.)$$

kde:

Tab. 13. Kola v levém rejdu

Proměnná	PP kolo	LP kolo
N_{kola_L}	N_{pp_L}	N_{lp_L}
n_x	$NV_v_ppL(1)$	$NV_v_lpL(1)$
n_y	$NV_v_ppL(2)$	$NV_v_lpL(2)$



ROZDÍL REJDŮ

Obecný zápis určení rozdílu rejdů:

$$R_{rejd} = N_{pravé} - N_{levé} \quad (4. 24.)$$

kde:

Tab. 14. Rozdíl rejdů

Proměnná	Pravý rejd	Levý rejd
R_{rejd}	Rejd_P	Rejd_L
$N_{pravé}$	N_{pp_P}	N_{pp_L}
$N_{levé}$	N_{lp_P}	N_{lp_L}

4.3.6 PŘESAZENÍ KOL

Přesazení kol nápravy je parametr geometrie, který je určen jako úhel, který svírá osa příslušné nápravy s příčnou rovinou vozidla. Ve výpočtovém programu zjišťujeme úhel, který svírá průmět normálového vektoru nápravy do roviny x-y s osou Y. Obecný zápis vztahu pro výpočet přesazení kol:

$$P_{napravy} = \arctan\left(\frac{-n_x}{n_y}\right) \quad (4. 25.)$$

kde:

Tab. 15. Přesazení kol

Proměnná	Přední náprava	Zadní náprava
$P_{napravy}$	P_{Pnap}	P_{Znap}
$-n_x$	$-NV_d_Pnap(1)$	$-NV_d_Znap(1)$
n_y	$NV_d_Pnap(2)$	$NV_d_Znap(2)$



4.4 POPIS VÝPOČTOVÉHO PROGRAMU V MATLABU

Výpočtový program je vytvořen formou skriptů (M–File), které jsou spolu s datovými soubory uloženy v příslušných adresářích (Příloha I, II, III a IV). Hlavní skript obsahuje algoritmus sestavený z dílčích funkcí, matematických operací a příkazů pro interpretaci dat.

4.4.1 DATOVÉ SOUBORY A ZNAČENÍ KÓDOVANÝCH BODŮ

Hlavičku hlavního skriptu tvoří příkazy pro načtení datových souborů ve formátu *.xls* a nadefinování charakteristických výpočetních bodů.

Datové soubory byly exportovány ze softwaru Tritop ve formátu ASCII do souborů ve formátu *.txt*. Posléze byly tyto datové soubory převedeny do formátu Excel (*.xls*), z důvodu lepší kompatibility s programem Matlab a větší přehlednosti v získaných datech.

Pojmenování datových souborů vychází z údajů charakterizujících stav vozidla. Údaje zachycují polohu vozidla, polohu kola a polohu řízení.

Tab. 16. Popis datových souborů.

Název souboru <i>.xls</i>	Proměnná v Matlabu	Popis
<i>up_0.xls</i>	UP_0	Vozidlo zvednuté, poloha kola 0°, rovně
<i>up_30.xls</i>	UP_30	Vozidlo zvednuté, poloha kola 30°, rovně
<i>up_60.xls</i>	UP_60	Vozidlo zvednuté, poloha kola 60°, rovně
<i>up_90.xls</i>	UP_90	Vozidlo zvednuté, poloha kola 90°, rovně
<i>up_120.xls</i>	UP_120	Vozidlo zvednuté, poloha kola 120°, rovně
<i>up_150.xls</i>	UP_150	Vozidlo zvednuté, poloha kola 150°, rovně
<i>up_180.xls</i>	UP_180	Vozidlo zvednuté, poloha kola 180°, rovně
<i>up_210.xls</i>	UP_210	Vozidlo zvednuté, poloha kola 210°, rovně
<i>up_240.xls</i>	UP_240	Vozidlo zvednuté, poloha kola 240°, rovně
<i>up_270.xls</i>	UP_270	Vozidlo zvednuté, poloha kola 270°, rovně
<i>up_300.xls</i>	UP_300	Vozidlo zvednuté, poloha kola 300°, rovně
<i>up_330.xls</i>	UP_330	Vozidlo zvednuté, poloha kola 330°, rovně

Konfigurace podmínek výpočtu polohy kola



Název souboru .xls	Proměnná v Matlabu		Popis
<i>base_0_str.xls</i>	n	Met. posunování	Vozidlo na zemi, poloha kola 0°, rovně
<i>base_120_str.xls</i>	nk		Vozidlo na zemi, poloha kola 120°, rovně
<i>base_240_str.xls</i>	nk2		Vozidlo na zemi, poloha kola 240°, rovně
<i>base_0_left.xls</i>	dl		Vozidlo na zemi, poloha kola 0°, levý rejď
<i>base_0_right.xls</i>	dp		Vozidlo na zemi, poloha kola 0°, pravý rejď
<i>M_up_0_str.xls</i>	n	Met. zvedání	Vozidlo zvednuté, poloha kola 0°, rovně
<i>M_up_120_str.xls</i>	nk		Vozidlo zvednuté, poloha kola 120°, rovně
<i>M_up_240_str.xls</i>	nk2		Vozidlo zvednuté, poloha kola 240°, rovně
<i>M_base_0_str.xls</i>	d		Vozidlo na zemi, poloha kola 0°, rovně
<i>M_base_0_left.xls</i>	dl		Vozidlo na zemi, poloha kola 0°, levý rejď
<i>M_base_0_right.xls</i>	dp		Vozidlo na zemi, poloha kola 0°, pravý rejď

Seřazení datových souborů je nutné provést dle Tabulky 17, kde příslušným prvkům vozidla odpovídají čísla kódovaných bodů použitých pro výpočet.

Tab. 17. Kódované body v pro výpočet geometrie

Prvek vozidla	Zvedání		Posunování	
	Číslo k. bodu	Index v Matlabu	Číslo k. bodu	Index v Matlabu
Rám vozidla (karoserie)	11	1	11	1
	12	2	12	2
	13	3	2	3
PP kolo	19	4	19	4
	21	5	21	5
	31	6	31	6
PZ kolo	18	7	15	7
	20	8	17	8
	15	9	18	9
LP kolo	22	10	22	10
	23	11	23	11
	24	12	24	12
LZ kolo	26	13	25	13
	28	14	26	14
	29	15	28	15



Algoritmus pro kalibraci metody vycházel z algoritmu pro výpočet celkové geometrie, tudíž řazení a značení bodů je obdobné:

Tab. 18. Kódované body pro kalibraci

Prvek vozidla	Kalibrace	
	Číslo k. bodu	Index v Matlabu
Rám vozidla (karoserie)	21	1
	22	2
	23	3
Kolo vozidla	8	4
	9	5
	10	6
	11	7
	12	8
	13	9
	15	10
	17	11
	18	12

4.4.2 URČENÍ POLOHY KOL A TRANSFORMACE SOUŘADNIC

Střední část hlavního výpočtového algoritmu je tvořena dílčími funkcemi pro určení parametrů charakterizujících polohu jednotlivých kol.

SOUŘADNÝ SYSTÉM KAROSERIE

Souřadnice z datových souborů jsou převedeny do dočasného souřadného systému karoserie metodou popsanou v Kapitole 4.2.3. V tomto dočasném souřadném systému karoserie jsou určeny normálové vektory a středy jednotlivých kol.

SOUŘADNÝ SYSTÉM KOLA

Vypočítané středy kol a normálové vektory kol jsou převedeny do souřadných systémů jednotlivých kol vozidla. V těchto souřadných systémech je určena poloha středů kol vůči kódovaným bodům (dočasný souřadný systém) umístěným na kolech vozidla.



SOUŘADNÝ SYSTÉM TRITOP

Po sjednocení souřadných systémů jednotlivých kol do společného dočasného souřadného systému, lze vypočítat z polohy středů kol středy přední a zadní nápravy.

SOUŘADNÝ SYSTÉM VOZIDLA

Dočasný souřadný systém je transformován do středu zadní nápravy, jak je patrné z Obr. 47. Takto upravené souřadnice normálových vektorů a středů kol jsou připraveny pro výpočet celkové geometrie vozidla.

4.4.3 VÝPOČET GEOMETRIE VOZIDLA

Poslední výpočetní část algoritmu obsahuje vztahy pro určení parametrů geometrie vozidla dle postupu uvedeného v kapitole 4.3.

4.4.4 VÝPIS HODNOT

Interpretace výsledků je provedena formou exportování vypočítaných dat do souboru ve formátu .xls (Excel). Datový soubor obsahující parametry geometrie je vytvořen ve stejném adresáři jako hlavní výpočetní algoritmus (Příloha I, II, III a IV).



5 MĚŘENÍ

Měření s fotogrammetrickým zařízením Tritop a optickým zařízením Hunter VAS 6292 probíhalo v laboratořích ÚADI v budově C1/107. Měřené vozidlo Formule Student Dragon II (Obr. 5.1) bylo přizpůsobeno pro provedení měření.



Obr. 5.1. Formule Student Dragon II [25]

Stav plánovaného zařízení ÚADI pro zjišťování poddajností zavěšení doposud neumožňuje provádět požadované měření. Záměrem diplomové práce bylo provést ověření vhodnosti metod určování celkové geometrie vozidla a určení přesnosti měření. Všechna měření a manipulace s vozidlem v laboratořích byla provedena samostatně bez pomoci druhé osoby.

Vyhodnocování a výběr metod byl prováděn s ohledem na plánované zařízení a co největší kompatibilitu s ním.

PRŮBĚH MĚŘENÍ GEOMETRIE VOZIDLA DRAGON II:

- příprava vozidla
- snímání části vozidla pro konfiguraci úhlu otáčení kola a počtu bodů na kole
- vyhodnocení a výběr vhodné konfigurace
- snímání vozidla pro měření celkové geometrie
- snímání zařízením Hunter VAS 6292 pro ověření hodnot
- vyhodnocení a výběr vhodné metody měření geometrie

5.1 PŘÍPRAVA VOZIDLA PRO MĚŘENÍ

Před použitím fotogrammetrického zařízení Tritop bylo nutné vozidlo řádně připravit pro bezproblémové snímání kódovaných bodů.

Pohonná jednotka a kapotáž vozu byla zcela demontována a tlumiče s pružinami byly nahrazeny přípravky pro pevné zafixování zdvihu kol (Obr. 5.2). Geometrie vozu nebyla seřízena na provozní hodnoty. To ale vzhledem k charakteru měření nebylo nutné upravovat, protože měření celkové geometrie vozidla bylo provedeno pro ověření vhodnosti metody a algoritmu výpočtu, nikoli pro zjištění aktuálního nastavení geometrie vozidla.



Obr. 5.2. Příprava vozidla pro měření

5.1.1 UMÍSTĚNÍ KALIBRAČNÍCH TYČÍ

Pozice kalibračních tyčí byla zvolena s ohledem na snadné pořízení kalibračních snímků z přiměřené výšky maximálně 2 metrů a vzdálenosti od vozidla 1,5 m až 2 m.



Obr. 5.3. Umístění kalibračních tyčí

Tyče byly položeny křížem přes sebe na rámu přes pozici řidiče a fixovány (Obr. 5.3), aby při manipulaci s vozidlem nedošlo k posunutí. Díky tomu lze případně použít také referenční body z kalibračních tyčí ve výpočtovém algoritmu pro určení souřadného systému karoserie (Kapitola 4.4.2).

5.1.2 UMÍSTĚNÍ KÓDOVANÝCH BODŮ

Kódované body byly na rám vozidla umísťovány symetricky po obou stranách vozidla. Při umísťování bodů na jednotlivé prvky rámu byl kladen důraz na vhodné natočení, které umožnilo zachytit bod na snímcích ze všech výškových úrovní snímání vozidla (Obr. 5.4, oblast B). V zadní části vozidla, kde je obtížné zajistit návaznost snímků, byly body umístěny i na základnu pro snadnější přechod z kola na rám vozidla (Obr. 5.4, oblast A).



Obr. 5.4. Vhodné umístění kódovaných bodů

Minimálně tři kódované body musejí být umístěny na rám vozidla, aby se předešlo vzniku chyby měření deformováním kapotáže (Obr. 5.5, oblast A). Body pro vytvoření souřadného systému je vhodné umísťovat tak, aby zachycovaly co největší část rámu vozidla (délku i šířku), čímž dochází k eliminaci vzniku chyby měření způsobené chybou výpočtu souřadného systému vozidla (Kapitola 4.4.3).



Obr. 5.5. Umístění bodů pro souřadný systém

Dalším nutným krokem bylo zamezení vytváření odlesků od jemně broušených disků kol. Největší lesklé plochy proto byly oblepeny matnou papírovou páskou (Obr. 5.6). Použití pásky také usnadnilo uvedení vozidla do původního stavu po provedení měření.



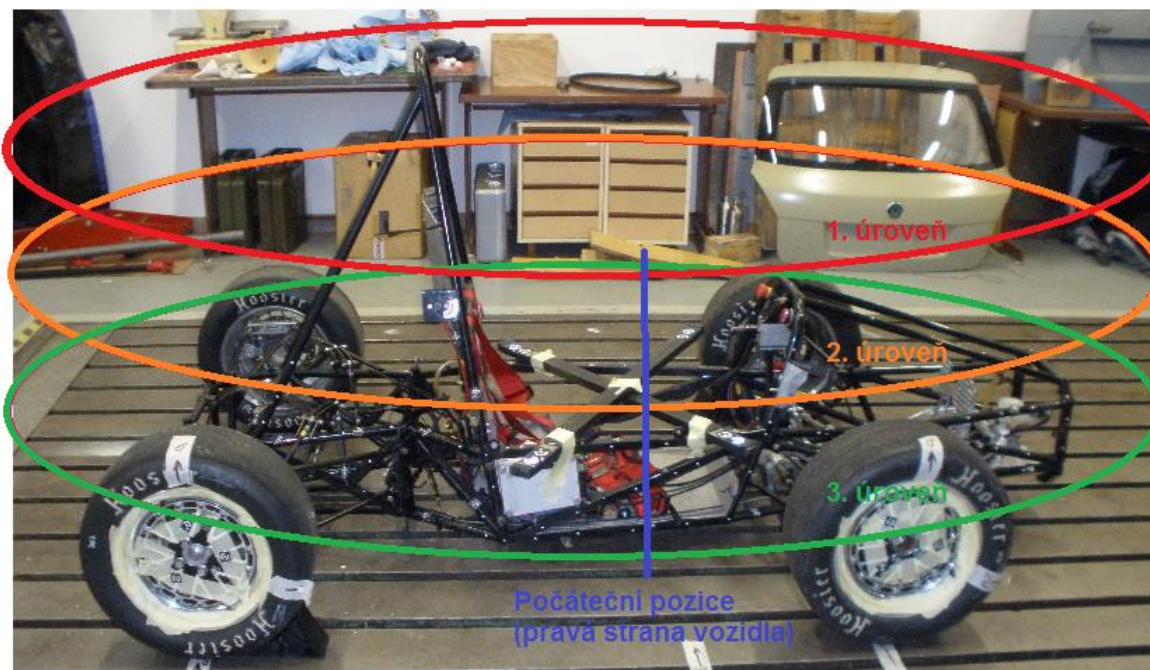
Obr. 5.6. Disk kola

Umístění bodů na kole vozidla musí být provedeno tak, aby bod vždy doléhal na paprsek disku (Obr. 5.6, oblast A). Předpoklad pro správný výpočet geometrie vozidla je dokonalé uchycení kódovaných bodů na kolech a vybraných bodech na rámu vozidla. Během měření nesmí dojít k jejich posunu.



5.1.3 POSTUP PŘI SNÍMÁNÍ VOZIDLA

Snímání vozidla probíhalo v laboratoři ÚADI za ustálených podmínek vhodných pro dobré rozpoznání kódovaných bodů. Rozsvícené osvětlení v oblasti měření umožnilo konstantní nastavení fotoaparátu po celou dobu měření. Clona fotoaparátu byla nastavena na hodnotu 8 při ohniskové vzdálenosti 2 metry. Pro dosažení výborného kontrastu bylo nutné udržovat baterie makroblesku stále nabitě.



Obr. 5.7. Snímání vozidla zařízením Tritop

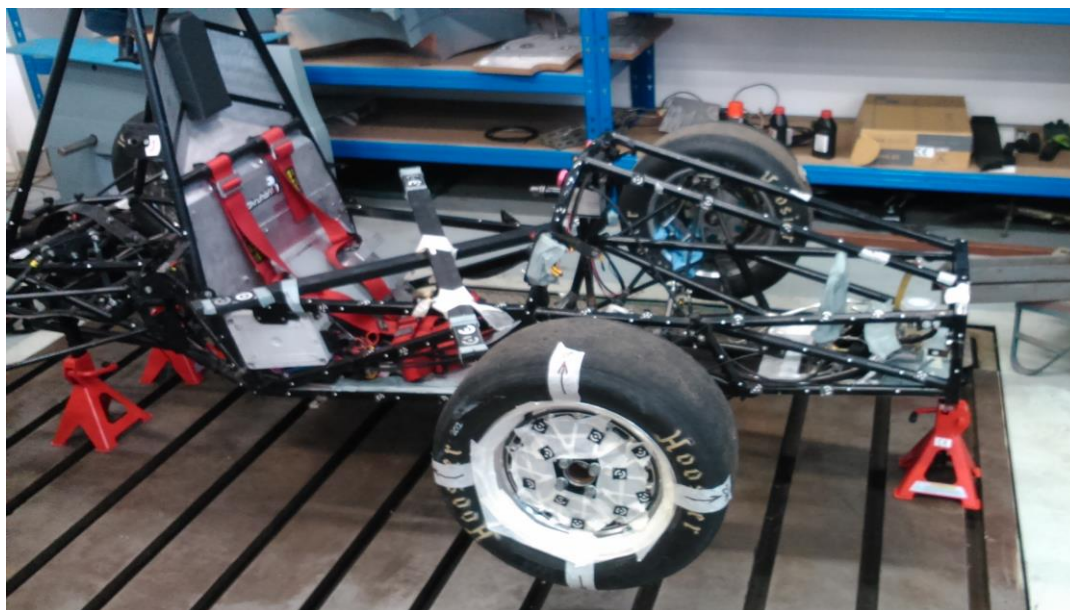
Snímky jsou pořizovány ze tří výškových úrovní okolo celého vozidla. Úvodní snímky každé sady tvoří čtyři snímky kalibračních tyčí (Kapitola 3.3.2), které jsou pořizeny z počáteční pozice 1. úrovně (Obr. 5.7). Následují snímky vozidla ze všech úrovní v dostatečném počtu pro detekci bodů v prostoru. I přesto, že na poloze kalibračních tyčí nezáleží, je vhodné, aby byly zachyceny na co nejvíce snímcích. U vozidel s přibližnou velikostí formule Student je dostačující počet zhruba 170 snímků.

5.2 URČENÍ PŘESNOSTI MĚŘENÍ A KONFIGURACE PODMÍNEK PRO VÝPOČET

Úkolem prvního měření bylo zjistit vhodný počet kódovaných bodů umístěných na kole vozidla a úhel otočení kola pro dosažení co nejpřesnějšího určení středu a normálového vektoru kola. Zvýšením počtu použitých bodů lze dosáhnout zpřesnění souřadnic středu kola. Zmenšení úhlu otáčení kola (více poloh kola) je provedeno za účelem zpřesnění polohy jednotkových normálových vektorů kola.

5.2.1 POPIS METODY

Měření bylo provedeno snímáním pouze pravého předního kola vozidla s částí rámu v okolí kola. Pro snadnější manipulaci bylo vozidlo umístěno na stojany a kola byla volně svěšena dolů (Obr. 5.8). Na kolo bylo umístěno 9 kódovaných bodů a zvolen úhel otočení kol 30° pro každou další polohu (celkem 12 poloh zaznamenaných v jednotlivých datových souborech, Příloha I).

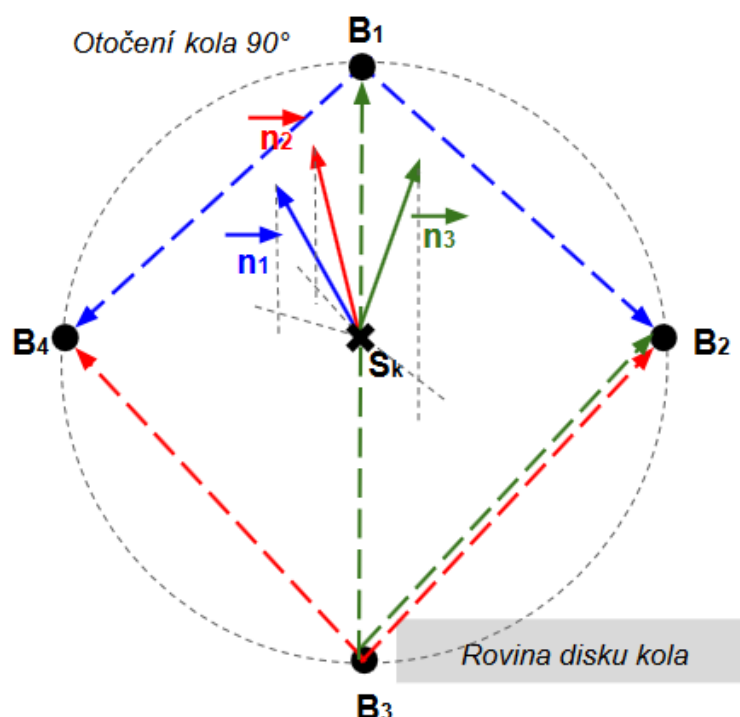


Obr. 5.8. Určování přesnosti metody

MODIFIKACE VÝPOČTU NORMÁLOVÉHO VEKTORU KOLA

Pro výpočet středu a normálového vektoru kola z více snímaných poloh je nutné upravit výpočet normálového vektoru. Modifikace výpočtu je demonstrována na příkladu otáčení kola o 90° a využitím pouze tří z více možných kombinací pro získání směrových vektorů.

Použitím více poloh (datových souborů), které určují směrové vektory roviny disku kola (Obr. 5.9), lze vytvořit normálové vektory kombinováním poloh B_1 , B_2 , B_3 a B_4 jednoho kódovaného bodu.



Obr. 5.9. Modifikace výpočtu normálového vektoru z více poloh

Získané jednotkové normálové vektory n_1 , n_2 a n_3 se následně zprůměrovány a výsledný jednotkový normálový vektor kola se použije v dalších krocích algoritmu výpočtu, které jsou shodné s postupem uvedeným v Kapitole 4.1.2.

5.2.2 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

Prvním krokem stanovení přesnosti měření bylo stanovení konfigurace počtu bodů umístěných na kolo a úhel otáčení kola. S ohledem na praktičnost měření byly zvoleny úhly otáčení kol 60° (6 datových souborů), 90° (4 datové soubory) a 120° (3 datové soubory).

U všech úhlů otočení kol se určovala poloha středu ze 3 až 9 kódovaných bodů v různých kombinacích. Vzhledem k velkému množství dat (Příloha IV) bude uvedeno pouze statistické vyhodnocení, ze kterého vyplývá nejvhodnější konfigurace pro provedení opakovaného měření.

Jako faktory pro určení přesnosti metody uvažujeme rozptyl (disperzi):

$$s^2 = \frac{\sum (X^2 - \bar{X}^2)}{n-1} \quad [mm^2] \quad (5.1.)$$

dále pak směrodatnou odchylku:

$$s = \sqrt{s^2} \quad [mm] \quad (5.2.)$$

a míru relativního rozptýlení dat z variačního koeficientu.

$$v = \frac{2s}{\bar{X}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (5.3.)$$

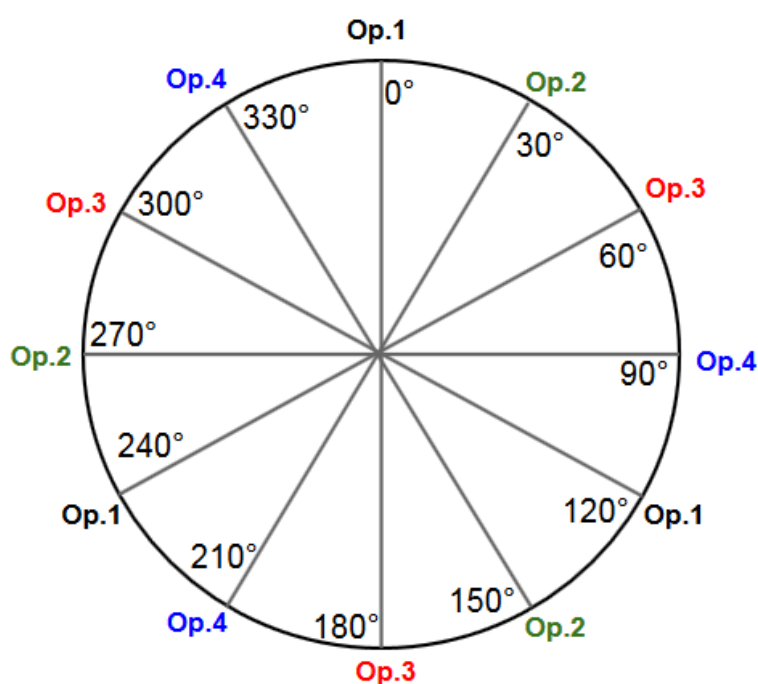
Uvedeným způsobem byly získány statistické hodnoty uvedené v Tabulce 19.

Tab. 19. Statistické vyhodnocení pro určení úhlu otáčení kola

120°		STŘED KOLA			NORMÁLOVÝ VEKTOR KOLA		
		x	y	z	x	y	z
PRŮMĚR	[MM]	258,906	380,558	506,441	-0,146	-0,924	-0,353
ROZPTYL	[MM ²]	0,055	2,268	0,325	0,000	0,000	0,000
SMĚRODATNÁ ODCHYL.	[MM]	0,234	1,506	0,570	0,001	0,000	0,000
VARIAČNÍ KOEF.	[%]	0,181	0,792	0,225	0,955	0,052	0,279
90°		STŘED KOLA			NORMÁLOVÝ VEKTOR KOLA		
		x	y	z	x	y	z
PRŮMĚR	[MM]	258,822	380,525	506,322	-0,146	-0,924	-0,352
ROZPTYL	[MM ²]	1,448	56,304	8,078	0,000	0,000	0,000
SMĚRODATNÁ ODCHYL.	[MM]	1,203	7,504	2,842	0,001	0,001	0,002
VARIAČNÍ KOEF.	[%]	0,930	3,944	1,123	1,417	0,133	0,899
60°		STŘED KOLA			NORMÁLOVÝ VEKTOR KOLA		
		x	y	z	x	y	z
PRŮMĚR	[MM]	258,752	380,379	507,175	-0,146	-0,924	-0,353
ROZPTYL	[MM ²]	238,493	136,038	323,433	0,000	0,000	0,000
SMĚRODATNÁ ODCHYL.	[MM]	15,443	11,664	17,984	0,002	0,001	0,001
VARIAČNÍ KOEF.	[%]	11,937	6,133	7,092	3,288	0,143	0,810

Hodnoty vykazují, že nejpříznivější úhel otáčení kola je 120° . U ostatních úhlů se chyba zvětšuje především díky modifikaci výpočtu normálového vektoru kola, který je průměrem více normálových vektorů, určených směrovými vektory roviny disku kola z více datových souborů (více poloh kola). Úhel otáčení 120° je výhodný také především z důvodu časové úspornosti měření.

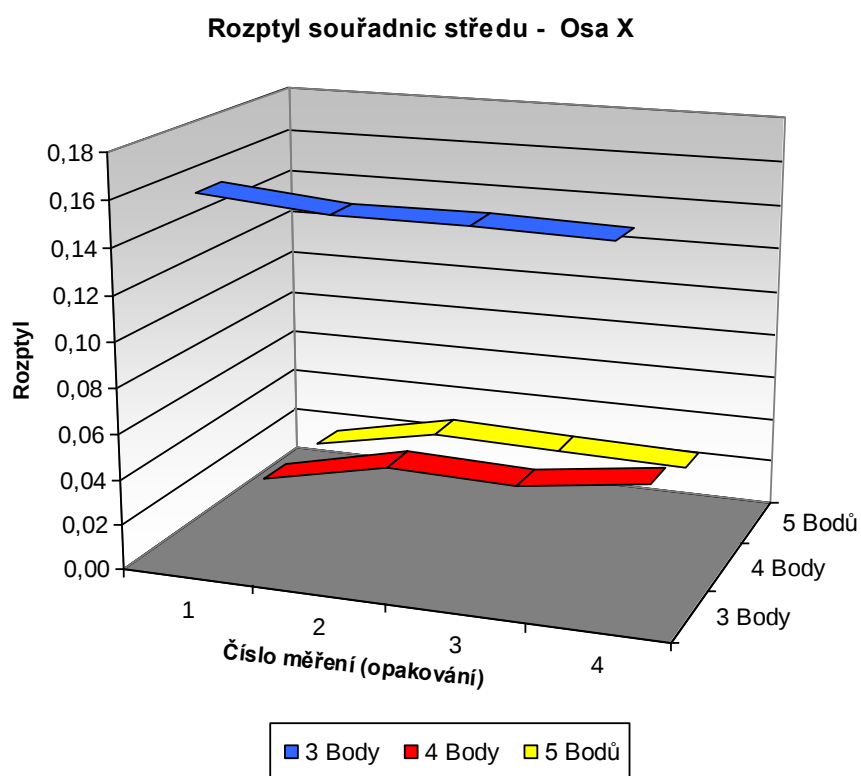
V dalším kroku bylo nutné stanovit vhodný počet kódovaných bodů umístěných na kolo vozidla. Opakovaným měřením bylo dosaženo dostatečného počtu hodnot pro statistické vyhodnocení a určení optimální konfigurace počtu bodů a úhlu otáčení. Opakované měření používá pro určení středů a normálových vektorů datové soubory, které byly pořízeny otáčením kola o 30° . Jejich kombinacemi (Obr. 5.10) je splněna podmínka různých podmínek měření, jako je například jiná světelná kompozice nebo rozdílné úhlové odchylky při otáčení o 120° .



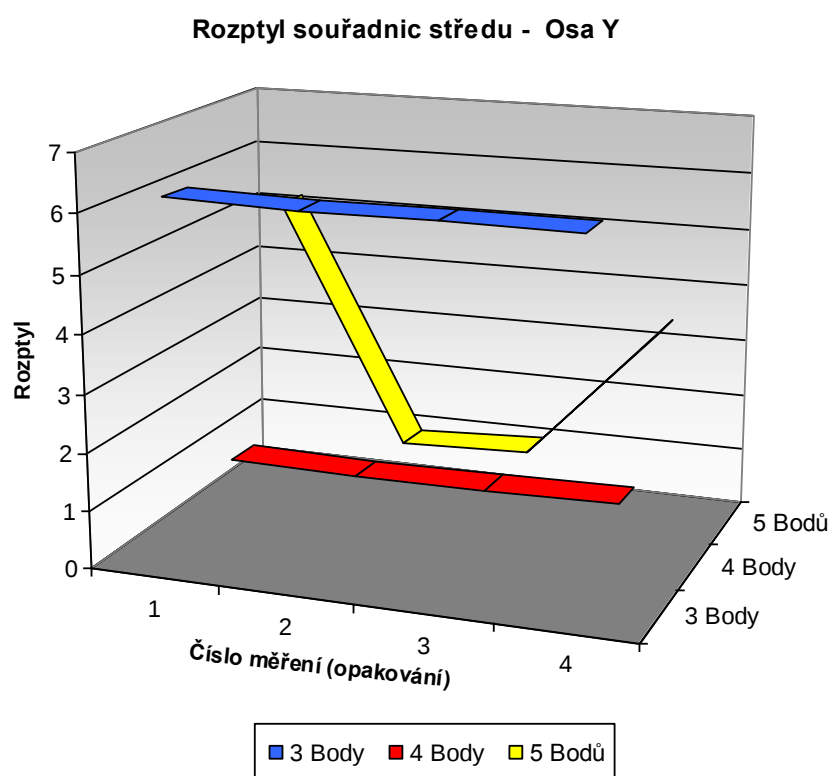
Obr. 5.10. Schéma poloh opakovaného měření

Opakované měření využívají k výpočtu parametrů polohy kola 3, 4 a 5 kódovaných bodů na kole. Z důvodu velkého množství hodnot budou uvedeny pouze grafy zachycující vybrané veličiny charakterizující přesnost metody a průměrné statistické hodnoty opakovaného měření.

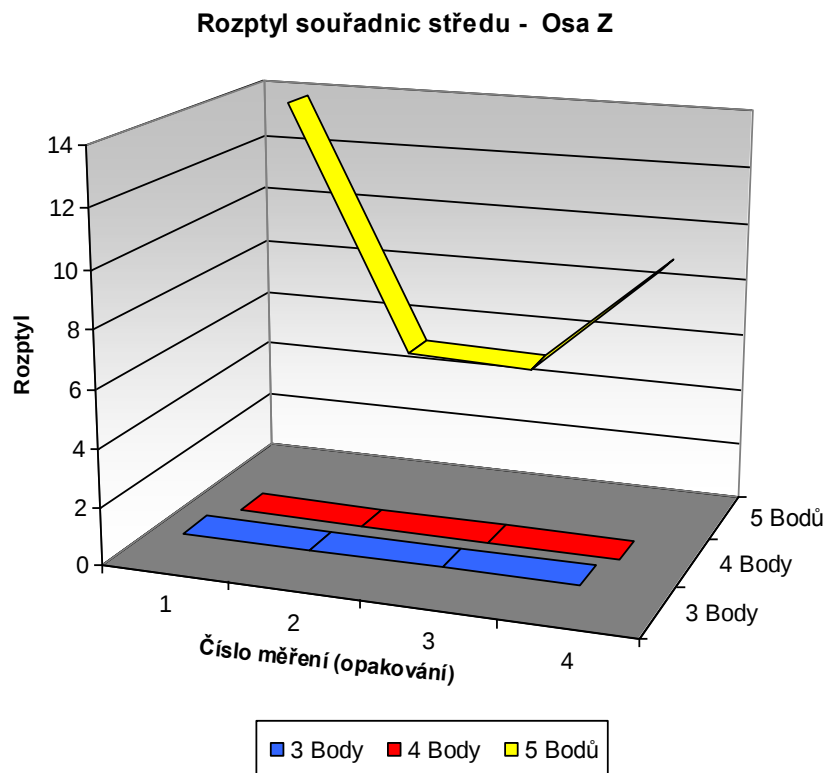
Graf 1. Souřadnice středu v ose X



Graf 2. Souřadnice středu v ose Y



Graf 3. Souřadnice středu v ose Z



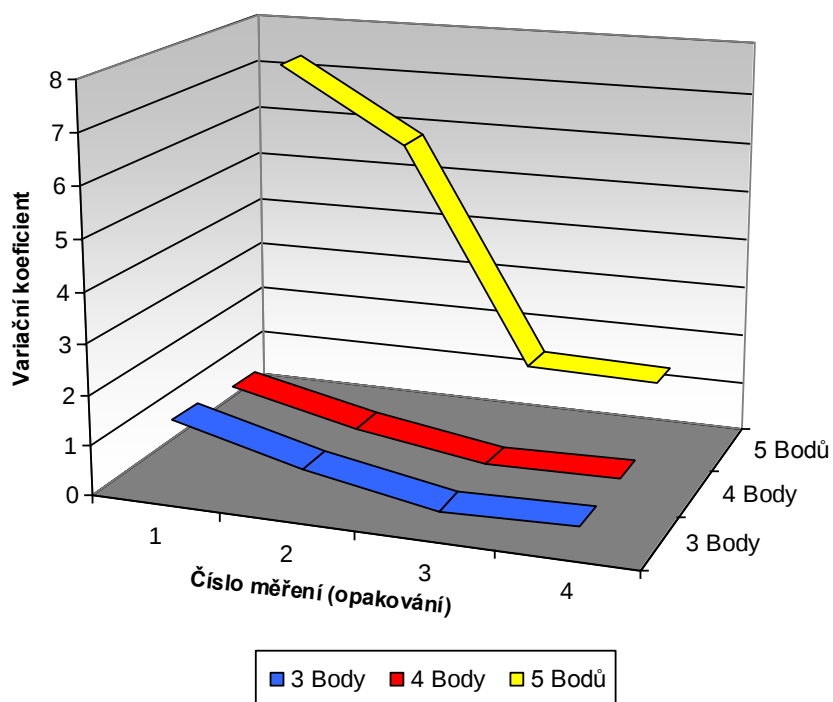
Z rozptylu souřadnic středů kola (Graf 1, Graf 2 a Graf 3) je patrné, že použití 4 kódovaných bodů na kole vozidla vykazuje konstantní a nízké hodnoty rozptylu. Z hlediska opakovaného měření je použití 4 bodů nejvhodnější.

V případě použití pouze tří bodů lze dosáhnout obdobně konstantních hodnot rozptylu, proto pro výpočet geometrie může tato varianta být použita také i za předpokladu mírně vyšší relativní chyby měření. Naopak použití více bodů vnáší do měření nepřesnosti, které se projevují především výrazným kolísáním hodnot z jednotlivých měření.

Velmi malé hodnoty rozptylu u souřadnic normálových vektorů neumožňují reálné srovnání, proto bylo provedeno srovnání (Graf 4, Graf 5 a Graf 6) na základě variačního koeficientu.

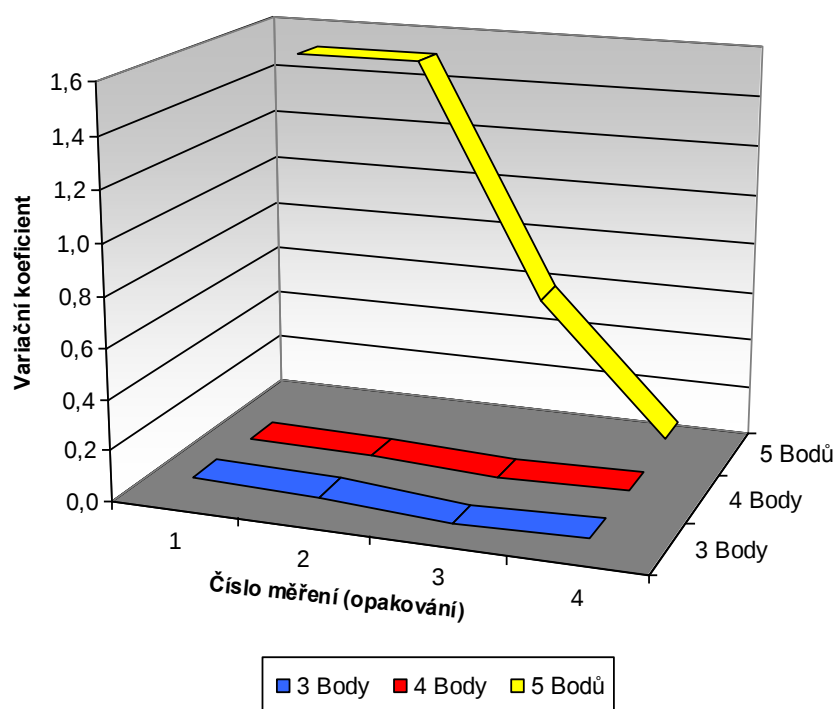
Graf 4. Souřadnice normálového vektoru v ose X

Variační koeficient souřadnic normálového vektoru - Osa X



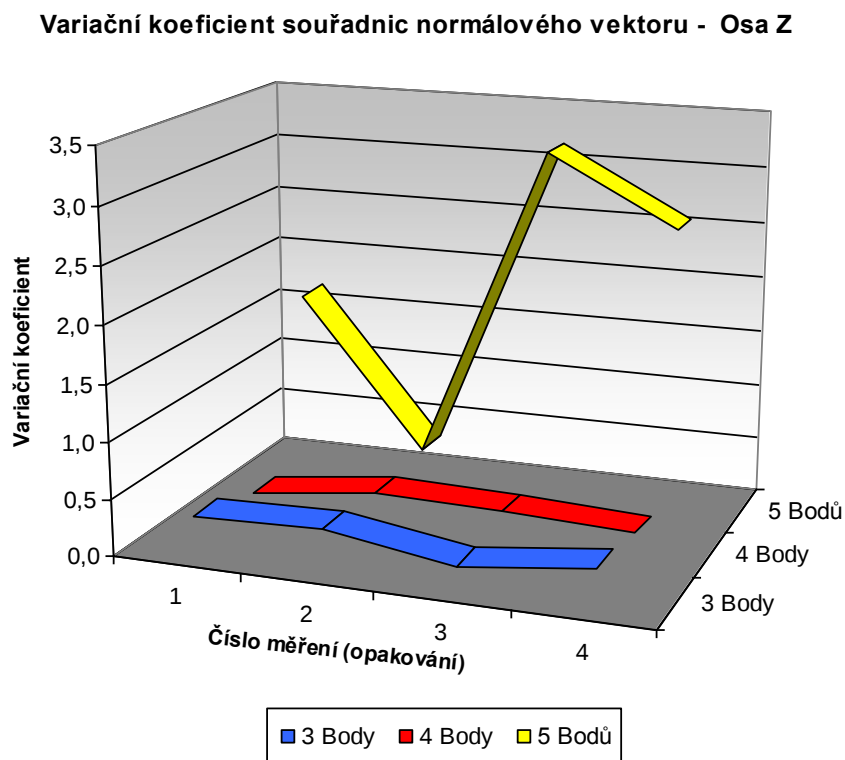
Graf 5. Souřadnice normálového vektoru v ose Y

Variační koeficient souřadnic normálového vektoru - Osa Y





Graf 6. Souřadnice normálového vektoru v ose Z



Obdobně jako u souřadnic středů kol se jeví jako nejvhodnější volba použití čtyř kódovaných bodů umístěných na kole vozidla. Vykazuje nejmenší kolísání a hodnoty variačního koeficientu v jednotlivých měřeních.

Varianta použití tří bodů může být použita také, vykazuje ovšem vyšší hodnoty variačního koeficientu (Tabulka 20) než varianta použití 4 bodů. Použití 5 bodů opět vykazuje velké kolísání a hodnoty variačního koeficientu jsou vysoké, tudíž tato metoda není vhodná.

Tab. 20. Statistické vyhodnocení pro určení počtu bodů na kole vozidla

3 BODY		STŘED KOLA			NORMÁLOVÝ VEKTOR KOLA		
		x	y	z	x	y	z
PRŮMĚR	[MM]	258,963	381,090	506,586	-0,146	-0,924	-0,353
ROZPTYL	[MM ²]	0,158	6,177	0,906	0,000	0,000	0,000
SMĚRODATNÁ ODCHYL.	[MM]	0,397	2,485	0,952	0,001	0,000	0,000
VARIAČNÍ KOEF.	[%]	0,307	1,304	0,376	0,694	0,050	0,280
4 BODY		STŘED KOLA			NORMÁLOVÝ VEKTOR KOLA		
		x	y	z	x	y	z
PRŮMĚR	[MM]	258,806	380,110	506,210	-0,146	-0,924	-0,353
ROZPTYL	[MM ²]	0,029	1,081	0,145	0,000	0,000	0,000
SMĚRODATNÁ ODCHYL.	[MM]	0,170	1,039	0,381	0,000	0,000	0,000
VARIAČNÍ KOEF.	[%]	0,182	0,737	0,204	0,634	0,041	0,213
5 BODŮ		STŘED KOLA			NORMÁLOVÝ VEKTOR KOLA		
		x	y	z	x	y	z
PRŮMĚR	[MM]	258,844	380,351	506,299	-0,146	-0,924	-0,353
ROZPTYL	[MM ²]	0,025	2,661	8,195	0,000	0,000	0,000
SMĚRODATNÁ ODCHYL.	[MM]	0,158	1,533	2,797	0,003	0,006	0,005
VARIAČNÍ KOEF.	[%]	0,168	0,889	0,904	4,013	0,926	1,927

Doporučení pro další měření je tedy použití 4 kódovaných bodů umístěných na kolo vozidla a úhel otáčení kola 120° pro získání tří datových souborů zachycujících polohu kol vozidla.

Přesnost metody je vyjádřena variačním koeficientem, který vyjadřuje obecně možnost vzniku chyby (relativní chyba).

Tab. 21. Relativní chyba měření

Počet bodů	Relativní chyba
3 body	0,50 %
4 body	0,35 %
5 bodů	1,50 %

Dosavadní výsledky měření vykazují konstantní směrodatnou odchylku u jednotlivých veličin způsobenou samotným zařízením Tritop. Dá se avšak předpokládat, že při snímání velmi malých úhlů nebo délek (hodnoty blízké se k nule) se za stálých hodnot směrodatné odchylky výrazně zhorší relativní chyba měření (Rovnice 5.3).

5.3 MĚŘENÍ GEOMETRIE VOZIDLA

Cílem výběru metody výpočtu parametrů geometrie pro zařízení ÚADI je malá prostorová náročnost měření, snadná manipulace s vozidlem a kompatibilita s měřícím stavem. Metody splňující tyto podmínky byly ověřeny provedením měření a srovnáním s výsledky ze zařízení Hunter VAS 6292.

Kódované body použité pro provedení měření byly součástí 10 bitové sady, která obsahuje 100 kódovaných bodů. Počet bodů byl ovšem omezen aktuálním stavem sady, kdy bylo k dispozici pouze asi 80 kódovaných bodů. Z tohoto důvodu se i přes výsledky opakovaného měření (Kapitola 5.2.2) přikročilo k použití pouze tří kódovaných bodů umístěných na kolo vozidla, jinak by nebylo možné vozidlo snímat kompletně ze všech stran. Relativní chyba měření při použití tří bodů je přijatelná pro výsledky měření celkové geometrie vozidla.

5.3.1 GEOMETRIE URČENÁ METODOU ZVEDÁNÍ VOZIDLA

Výpočet celkové geometrie vozidla vychází z metody použité v diplomové práci Davida Mateji. [22] Metoda zvedání proto slouží k ověření správného fungování algoritmu výpočtu v softwaru Matlab a ověření vhodnosti měření v porovnání s metodou posunování vozidla (Kapitola 5.3.2).

POPIS METODY

Pro určení polohy kola bylo vozidlo umístěno do polohy, kdy je vozidlo zvednuté a kola jsou maximálně prověšena (Obr. 5.11). Pro zjištění polohy kola byl zvolen úhel otáčení kol 120° (všechna kola ve směru jízdy, aby měly normálové vektory stejný směr). Tím byly získány tři datové soubory. Tyto tři polohy slouží pouze pro určení středů kol a jejich normálových vektorů.



Obr. 5.11. Metoda zvedání vozidla



Následně bylo vozidlo umístěno do pozice, kdy bylo položeno na základnu s koly rovně a koly natočenými do obou maximálních rejďů. Datové soubory zaznamenávající uvedené tři polohy vozidla slouží ke zjištění parametrů geometrie vozidla.

VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

Tab. 22. Geometrie Formule Dragon II - metoda zvedání

Rozvor pravá strana:	[mm]	1609,96
Rozvor levá strana:	[mm]	1607,13
Rozchod kol přední náprava: (orientační údaj)	[mm]	1372,49
Rozchod kol zadní náprava: (orientační údaj)	[mm]	1384,78
Odklon kola PP:	[°]	-1,52
Odklon kola LP:	[°]	-0,88
Odklon kola PZ:	[°]	-2,41
Odklon kola LZ:	[°]	-1,26
Celková sbíhavost přední nápravy:	[°]	5,00
Celková sbíhavost zadní nápravy:	[°]	0,59
Přesazení na přední nápravě:	[°]	0,16
Přesazení na zadní nápravě:	[°]	0,04
PRAVÝ REJD - PP kolo:	[°]	19,66
PRAVÝ REJD - LP kolo:	[°]	22,68
PRAVÝ REJD - rozdíl rejdu:	[°]	-3,02
LEVÝ REJD - PP kolo:	[°]	27,92
LEVÝ REJD - LP kolo:	[°]	26,23
LEVÝ REJD - rozdíl rejdu:	[°]	-1,69
Příklon rejdového čepu PP kolo:	[°]	-0,87
Příklon rejdového čepu LP kolo:	[°]	-0,27
Záklon rejdového čepu PP kolo:	[°]	3,29
Záklon rejdového čepu LP kolo:	[°]	4,11

Z výsledků je patrné, že vozidlo není nastaveno na provozní parametry geometrie. Rozvor kol a úhly pravého a levého rejdu odpovídají konstrukčnímu návrhu Formule Dragon II.



VHODNOST METODY

Metoda je vhodná zejména z důvodu snadné manipulace s vozidlem a nároky na prostor kolem vozidla, které lze s ohledem na konstrukční návrh zařízení ÚADI zvedat nad pohyblivé základny kol.

Vzhledem k absenci fixačních přípravků řízení, byl kladen důraz na co nejmenší ovlivnění nepřesnou manipulací, zejména pak v poloze s prověšenými koly. Přesto mohly chybějící přípravky pro fixaci a vůle vozidla způsobit chybu měření.

5.3.2 GEOMETRIE URČENÁ METODOU POSUNOVÁNÍ VOZIDLA

Cílem modifikace Metody zvedání vozidla bylo dosáhnout časového zefektivnění snímání vozidla fotogrammetrickým zařízením Tritop. Algoritmus výpočtu se neliší od použití u metody zvedání vozidla.

POPIS METODY

Datové soubory pro určení polohy kola byly získány posunováním vozidla po základně tak, aby otočení kol odpovídalo 120° (Obr. 5.12). Posunování vozidla po podložce usnadnilo manipulaci s vozidlem, což umožňoval dostatečný prostor v laboratořích. Alternativou metody by bylo zvednutí vozidla, otočení všech kol ve směru jízdy o stejný úhel a opětovné položení na základnu.



Obr. 5.12. Metoda posunování vozidla

Snímání vozidla v poloze s koly rovně a natočenými do obou maximálních rejďů proběhlo dle stejného postupu jako u metody zvedání vozidla.



VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

Tab. 23. Geometrie Formule Dragon II - metoda posunování

Rozvor pravá strana:	[mm]	1606,50
Rozvor levá strana:	[mm]	1610,81
Rozchod kol přední náprava: (orientační údaj)	[mm]	1373,16
Rozchod kol zadní náprava: (orientační údaj)	[mm]	1382,18
Odklon kola PP:	[°]	-1,95
Odklon kola LP:	[°]	-0,85
Odklon kola PZ:	[°]	-2,25
Odklon kola LZ:	[°]	-1,45
Celková sbíhavost přední nápravy:	[°]	4,65
Celková sbíhavost zadní nápravy:	[°]	0,63
Přesazení na přední nápravě:	[°]	-0,10
Přesazení na zadní nápravě:	[°]	0,08
PRAVÝ REJD - PP kolo:	[°]	20,08
PRAVÝ REJD - LP kolo:	[°]	22,40
PRAVÝ REJD - rozdíl rejdu:	[°]	-2,32
LEVÝ REJD - PP kolo:	[°]	28,08
LEVÝ REJD - LP kolo:	[°]	27,44
LEVÝ REJD - rozdíl rejdu:	[°]	-0,64
Příklon rejdivého čepu PP kolo:	[°]	-1,06
Příklon rejdivého čepu LP kolo:	[°]	0,20
Záklon rejdivého čepu PP kolo:	[°]	3,23
Záklon rejdivého čepu LP kolo:	[°]	3,53

Výsledky rovněž vykazují, že vozidlo není nastaveno na provozní parametry geometrie. Rozvor kol a úhly pravého a levého rejdu odpovídají konstrukčnímu návrhu Formule Dragon II.

VHODNOST METODY

Snížením počtu potřebných poloh (datových souborů) pro výpočet geometrie se zkrátila doba měření zhruba o hodinu a půl. Za předpokladu provádění opakovaných měření, je tato časová úspora výraznou výhodou.

Nevýhoda metody spočívá v nárocích na prostory a manipulaci s vozidlem. Velmi výrazným faktorem, ovlivňujícím přesnost měření, je zde absence fixačního přípravku řízení. Zejména při posunování vozidla může dojít k chybě měření, což by ovšem mělo stejný účinek při opakovaném zvedání a pokládání vozidla na základnu.

Za předpokladu použití fixačních přípravků lze tuto metodu doporučit pro opakované měření na měřicím zařízení ÚADI kvůli snížení časové náročnosti měření. Modifikace metody posunování vozidla pro použití na měřicím zařízení by spočívala v nahrazení posunování vozidla opakovaným zvedáním a pokládáním pro dosažení otočení kol o zvolený úhel.

5.3.3 OVĚŘENÍ PARAMETRŮ GEOMETRIE ZAŘÍZENÍM HUNTER VAS 6292

Vzhledem k faktu, že geometrie nebyla seřizena na provozní hodnoty, bylo provedeno měření na optickém zařízení Hunter (Obr. 5.13) pro ověření hodnot zjištěných měřením s Tritopem.



Obr. 5.13. Měření se zařízením HUNTER

POPIS METODY

Měření probíhalo pouze v základním nastavení systému, které určuje pouze několik vybraných parametrů geometrie.

Zařízení Hunter je velmi citlivé a vozidlo vykazovalo poměrně značné vůle v zavěšení, proto bylo zvoleno opakované měření pro dosažení co nejpřesnějších hodnot. Měření proběhlo celkem 8krát. Pro porovnávání se využívají střední hodnoty, stejně jako u měření pro určení konfigurace podmínek (Kapitola 5.2).

Ustavené vozidlo na zvedáku bylo zabezpečeno proti pojezdu a na kola byly umístěny odrazové reflektory, které byly aretovány podle vodováhy. Následuje rolovací kompenzace a měření dle pokynů softwaru systému Hunter.

VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

Tab. 24. Opakované měření zařízením Hunter

	Přední náprava							Zadní náprava				
	Odklon [°]		Záklon [°]		Sbíhavost [°]			Odklon [°]		Sbíhavost [°]		
	L	P	L	P	L	P	Celková	L	P	L	P	Celková
1	-0,89	-1,68	3,67	3,33	2,33	2,37	4,70	-1,53	-2,67	0,42	0,35	0,77
2	-0,98	-1,42	3,60	3,13	2,67	2,72	5,38	-1,38	-2,92	0,33	0,20	0,53
3	-0,67	-1,53	3,15	3,17	2,37	2,33	4,70	-1,37	-2,00	0,37	0,18	0,55
4	-0,67	-1,12	3,50	3,47	2,38	2,40	4,78	-1,57	-2,33	0,38	0,18	0,57
5	-0,92	-1,48	3,50	3,03	2,37	2,33	4,70	-1,28	-2,17	0,45	0,17	0,62
6	-0,72	-1,83	3,53	3,53	2,53	2,63	5,17	-1,32	-1,98	0,43	0,18	0,62
7	-0,78	-1,67	3,70	3,33	2,58	2,52	5,10	-1,43	-2,75	0,35	0,18	0,53
8	-0,92	-1,65	3,48	3,50	2,67	2,77	5,43	-1,53	-2,33	0,43	0,13	0,57
Průměr	-0,82	-1,55	3,52	3,31	2,49	2,51	5,00	-1,43	-2,39	0,40	0,20	0,59
Rozptyl	0,02	0,05	0,03	0,03	0,02	0,03	0,10	0,01	0,12	0,00	0,00	0,01
Směrodatná odchylka	0,12	0,22	0,17	0,19	0,14	0,18	0,31	0,11	0,35	0,04	0,06	0,08

Měření vykazovalo velmi rozdílné hodnoty jednotlivých parametrů, které byly způsobeny především stavem vozidla. Absence přípravku pro fixaci řízení ztěžovala manipulaci při plnění kroků měření a také vnáší do měření chybu.



5.3.4 SHRnutí VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ GEOMETRIE VOZIDLA RŮZNÝMI METODAMI

Tab. 25. Srovnání metod měření geometrie vozidel

	Posunování	Zvedání	Hunter VAS 6292
Rozvor pravá strana: [mm]	1606,501	1609,961	
Rozvor levá strana: [mm]	1610,807	1607,134	
Míra přes přední kola: (orientační údaj) [mm]	1373,163	1372,491	
Míra přes zadní kola: (orientační údaj) [mm]	1382,185	1384,785	
Odklon kola PP: [°]	-1,949	-1,524	-1,549
Odklon kola LP: [°]	-0,850	-0,876	-0,818
Odklon kola PZ: [°]	-2,248	-2,410	-2,394
Odklon kola LZ: [°]	-1,447	-1,258	-1,427
Celková sbíhavost přední nápravy: [°]	4,646	5,005	4,996
Celková sbíhavost zadní nápravy: [°]	0,631	0,595	0,594
Přesazení na přední nápravě: [°]	-0,104	0,161	
Přesazení na zadní nápravě: [°]	0,075	0,043	
PRAVÝ REJD - PP kolo: [°]	20,078	19,658	
PRAVÝ REJD - LP kolo: [°]	22,402	22,676	
PRAVÝ REJD - rozdíl rejdu: [°]	-2,324	-3,018	
LEVÝ REJD - PP kolo: [°]	28,080	27,921	
LEVÝ REJD - LP kolo: [°]	27,445	26,233	
LEVÝ REJD - rozdíl rejdu: [°]	-0,635	-1,688	
Příklon rejdového čepu PP kolo: [°]	-1,060	-0,873	
Příklon rejdového čepu LP kolo: [°]	0,200	-0,269	
Záklon rejdového čepu PP kolo: [°]	3,227	3,292	3,312
Záklon rejdového čepu LP kolo: [°]	3,525	4,110	3,517

Zařízením Hunter bylo dosaženo hodnot podobných jako u měření systémem Tritop. To potvrzuje správné fungování výpočetního algoritmu v Matlabu. Odchyly hodnot vznikly především při manipulaci s vozidlem a stavem vozidla.

Metodou posunování vozidla bylo dosaženo přijatelných výsledků. Výhodou je menší počet poloh vozidla nutných pro výpočet geometrie. Tím je dosaženo časové úspory v průměru hodiny a půl nutné pro zpracování snímků v softwaru Tritop. To se kladně projeví především při opakovaném měření. Nevýhodou ale zůstává nutnost náročnější manipulace s vozidlem. Ideální je provádět měření s pomocí druhé osoby.

Metoda zvedání vozidla vykazuje hodnoty bližší hodnotám ze zařízení Hunter. I přes výraznou odchylku záklonu rejdového čepu LP kola lze tuto metodu doporučit. Eliminaci obdobných odchylek je možné dosáhnout opakovaným měřením. Toto bylo již ověřeno v diplomové práci Davida Mateji [22]. Z hlediska kompatibility se zařízením ÚADI, kdy by vozidlo bylo zvedáno nad měřicí stav, je tato metoda velmi vhodná.

6 ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ ÚADI

Nové zařízení ÚADI pro měření poddajností zavěšení se v současné době nachází ve fázi vývoje, kdy byl doposud odděleně řešen konstrukční návrh pracovního stolu se zatěžovacím mechanismem a metoda snímání polohy kol pro výpočetní algoritmus geometrie vozidla.

Tab. 26. Přehled stavu zařízení ÚADI

PRVEK ZAŘÍZENÍ ÚADI	STAV
Návrh konstrukce pracovního stolu:	vytvořen [10]
Realizace pracovního stolu:	není provedeno
Návrh zatěžovacího mechanismu:	vytvořen [10]
Realizace zatěžovacího mechanismu:	není provedeno
Návrh a realizace fixačních přípravků:	není provedeno
Výběr snímače zatížení:	není určen konkrétní typ [10]
Výběr snímače polohy kola:	vybrán systém Tritop [10]
Konfigurace podmínek snímání polohy kola:	stanovena (cíl diplomové práce)
Metoda určení geometrie vozidla:	stanovena (cíl diplomové práce)
Chyba měření:	stanovena (cíl diplomové práce)
Algoritmus zpracování získaných dat:	vytvořen (cíl diplomové práce)
Návrh možného dalšího vývoje zařízení ÚADI:	vytvořen [10]

Aby bylo možné provádět vývojové práce na novém zařízení ÚADI, je nutné stávající odděleně řešené části zařízení vyrobit a ověřit jejich vzájemnou kompatibilitu. Zařízení je nutné doplnit o fixační přípravky prvků vozidla a korekční faktory výpočetního algoritmu pro zmenšení chyby vzniklé při manipulaci s vozidlem. Díky doplnění chybějících prvků bude zařízení schopno získávat objektivní výsledky měření.

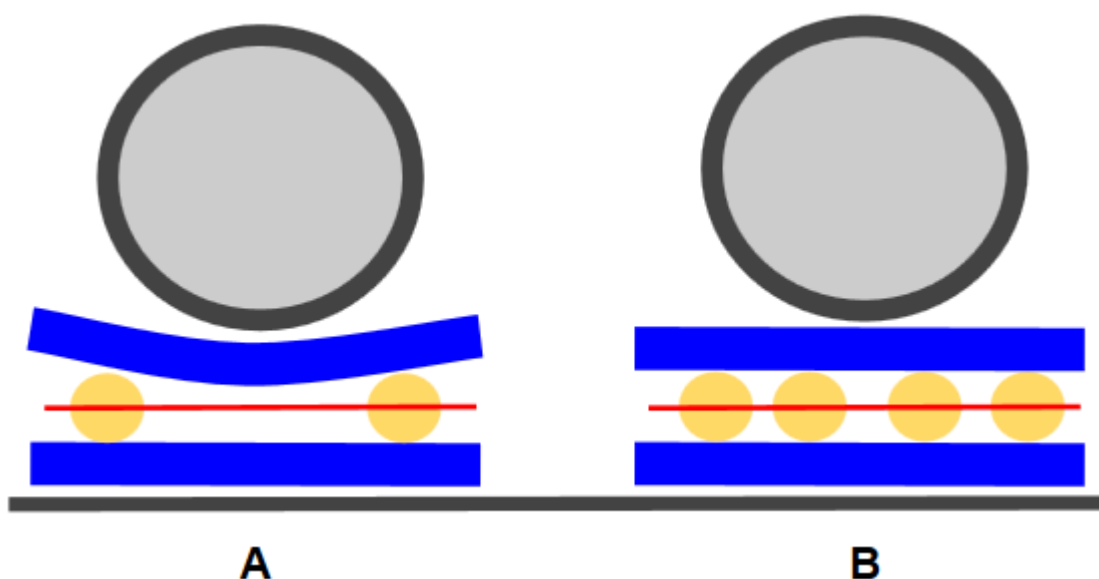
6.1 REALIZACE ZAŘÍZENÍ ÚADI

Konečný termín zhotovení pracovního stolu a zatěžovacího mechanismu zařízení ÚADI nebyl doposud stanoven. Současný stav ovšem vyžaduje zhotovení mechanismů a chybějících fixačních přípravků pro zprovoznění plánovaného zařízení k brzkému využití na vývojové práce na Formuli Student.



6.1.1 ZHOTOVENÍ PRACOVNÍHO STOLU A ZATĚŽOVACÍHO MECHANISMU

Před zhotovením pracovního stolu a zatěžovacího mechanismu dle konstrukčního návrhu je nutné provést pevnostní výpočet pro ověření dostatečné pevnosti mechanismů. Možnou modifikací navrhované konstrukce bude přepracování pojezdů tvořených klecemi s válci. Výpočtem bude nutné ověřit zda nedochází k průhybu pojezdových desek (Obr. 6.1, pozice A). Tím by mohlo docházet ke vzniku chyby měření (ovlivnění posuvů desek) vlivem odporové síly. Nedostatečnou tuhost pojezdových desek by mohlo eliminovat použití více válců pojezdu (Obr. 6.1, pozice B).



Obr. 6.1. Modifikace pracovního stolu

S modifikací zatěžovacího mechanismu se do budoucna uvažuje ve formě nahrazení ručního mechanismu (kliky) mechanizovaným pohonem. Použití elektromotoru jako pohonu umožní částečnou automatizaci měření, která může výrazně zpřesnit především opakované měření zatěžovacích charakteristik. [10]

6.1.2 PŘÍPRAVKY PRO FIXACI VYBRANÝCH PRVKŮ VOZIDLA

Přípravky pro fixaci vozidla nebo jeho částí by měly být zkonstruovány s ohledem na dostatečnou tuhost pro zatěžování vozidla a univerzálnost pro použití na různých typech vozidel.

PŘÍPRAVEK PRO FIXACI VOLANTU

Fixaci volantu lze realizovat pomocí dnes běžně dostupných přípravků určených primárně pro seřizování geometrie vozidel. Vybraný přípravek pro fixaci volantu (Obr. 6.2) lze pořídit za 749,- Kč. [26] Cena obdobných přípravků se pohybuje v rozmezí 600,- Kč až 900,- Kč.

Pro potřeby použití na měření poddajností by případně musel být přípravek modifikován tak, aby vyhovoval požadavku dostatečné tuhosti při zatěžování.

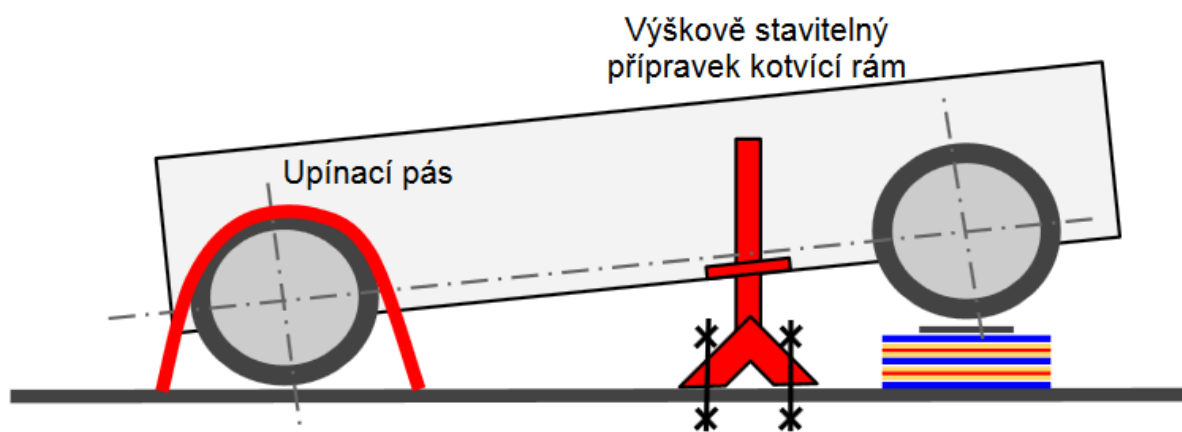


Obr. 6.2. Přípravek pro fixaci volantu [26]

PŘÍPRAVKY PRO FIXACI RÁMU VOZIDLA

Upevnění rámu k pevné podložce bude mít zásadní vliv na výsledky poddajností zavěšení. Nejdůležitějším požadavkem je tuhost uchycení, která nesmí dovolit pohyb vozidla ve všech osách.

Konstrukce přípravků by měla také splňovat univerzálnost, které lze dosáhnout přípravky ve formě samostatných stojanů, obdobně jako u zařízení ČVUT (Kapitola 2.3.1). Ty by byly pevně uchyceny šrouby k základní desce a na rám vozidla (Obr. 6.3). Výškově stavitelné stojany, s možností zvednutí vozidla do dostatečné výšky nad pracovní stůl zařízení, by usnadnily pořizování snímků nutných pro určení středů a normálových vektorů kol. Výškově stavitelný rám také umožní změnu zatížení nápravy, tím se rozšiřují možnosti simulování jízdních stavů.



Obr. 6.3. Návrh kotvení vozidla



Samotné upínání rámu je vhodné přizpůsobit k uchycování příhradových rámu vozidel s možností výměny za uchycovací oko (pro ukotvení pomocí tažných ok automobilů). Ukotvení kol zadní nápravy pomocí upínacích pásů neovlivňuje zatížení rámu vozidla. S kombinací pouze dvou přípravků pro fixaci rámu se jedná o cenově příznivé řešení ukotvení vozidla.

6.2 MĚŘENÍ PODDAJNOSTÍ ZAVĚŠENÍ ZAŘÍZENÍM ÚADI

Měření poddajností zavěšení zařízením ÚADI vyplývá z cílů diplomové práce, kterými bylo určení metod měření geometrie a zjištění přesnosti měření (Kapitola 5). Data získaná měřením zpracovává algoritmus výpočtu v Příloze III.

6.2.1 METODA MĚŘENÍ GEOMETRIE VOZIDLA

Prvním krokem měření poddajností je snímání vozidla pro určení středů a normálových vektorů kol podle zvolené metody (Kapitola 5.3.1). Konfigurace podmínek zvolená pro určení polohy kola vychází z výsledků opakovaného měření (Kapitola 5.2) a využívá otáčení kola o 120° se čtyřmi kódovanými body na kolech vozidla.

Vozidlo je poté umístěno do základní polohy bez zatěžování. Vozidlo je zcela položeno na měřicí stav, rám je pevně uchycen k základní desce a kola jsou natočena rovně. Následují dvě pozice s koly natočenými do rejdů (případně pouze malé natočení kol) pro získání polohy rejdového čepu.

Měření poddajností probíhá snímáním vozidla ve stejných pozicích s tím rozdílem, že pohyblivé desky měřicího zařízení jsou zatěžovány potřebnými silovými účinky pro navození podmínek charakteristických jízdních stavů. Rám vozidla se během snímání v uvedených polohách nesmí pohnout v uchycení k základně. Poddajnosti v zavěšení jsou určeny ze srovnání geometrie v nezatíženém a zatíženém stavu.

Opakované měření potom bude probíhat opětovným kotvením rámu a snímáním v zatížených polohách.

6.2.2 PŘESNOST METODY URČENÍ POLOHY KOLA

Přesnost metody byla určena na základě provedení opakovaného měření polohy kola (Kapitola 5.2). Chyba měření je stanovena pro konfiguraci čtyř kódovaných bodů a otáčení 120° . V případě nutnosti lze použít při stejném úhlu otáčení kola i tři kódovaných bodů.

Tab. 27. Chyba měření

Počet bodů	Relativní chyba určení polohy kola
3 body	0,50 %
4 body	0,35 %

6.2.3 FAKTORY VZNIKU CHYB MĚŘENÍ

Chyby měření ovlivňují faktory, které lze do jisté míry eliminovat, především faktory související s manipulací s vozidlem a ukotvením vozidla. Při měření poddajností je ovšem nutné uvažovat i s přesností samotných snímačů.

PŘESNOST MĚŘICÍCH ZAŘÍZENÍ

Při vyhodnocování měření je nutné brát v úvahu i přesnost zařízení Tritop. Přesnost měření se může zlepšit především ustálením podmínek pro snímání vozidla (osvětlení, nastavení fotoaparátu, atd.). [22]

MANIPULACE S VOZIDLEM PŘI ZMĚNĚ POLOH

Chyba se do měření vnáší také neopatrnou manipulací s vozidlem, což do jisté míry eliminují fixační přípravky.

VŮLE V ZAVĚŠENÍ A ULOŽENÍ KOL

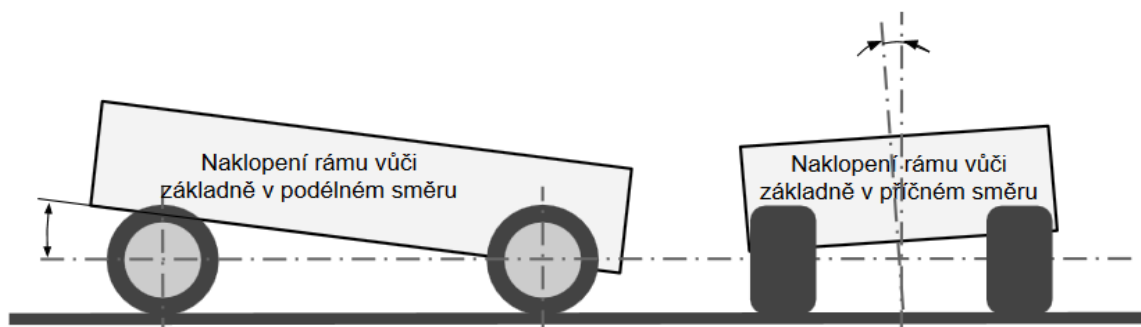
Vůle prvků zavěšení kol mají vliv na přesnost, především pak u opakovaného měření. [22]

TUHOST RÁMU VOZIDLA A UCHYCENÍ K ZÁKLADNĚ

Přesnost měření poddajností se odvíjí od tuhosti rámu a tuhosti ukotvení rámu k základně (fixačního přípravku). Ty nesmí dovolit žádný pohyb rámu působením zatěžovacích sil. Změna polohy kol musí být projevem pouze elastokinematiky zavěšení kol vozidla.

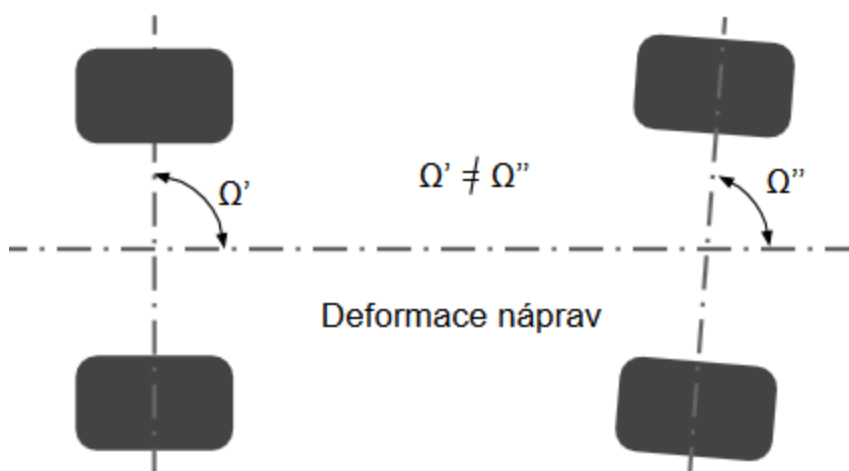
6.2.4 KOREKCE SKLONU RÁMU A DEFORMACE NÁPRAV V ALGORITMU VÝPOČTU

Možností budoucího vývoje výpočtového algoritmu je zahrnutí korekčních faktorů sklonu rámu a deformací náprav vozidla. Sklon rámu (Obr. 6.4) má vliv na vytvoření souřadného systému vozidla, který je určen ze tří kódovaných bodů umístěných na rámu vozidla (Kapitola 5.1.2). Chyba měření může vzniknout také nerovnoměrným rozložením zatížení na kola vlivem naklopení rámu vozidla.



Obr. 6.4. Klopení rámu vozidla

K ovlivnění výpočtu parametrů geometrie může dojít v případě zdeformování os náprav (Obr. 6.5). Deformace os náprav ovlivňují i natočení souřadného systému vozidla (Kapitola 4.3.1).



Obr. 6.5. Deformace os náprav

6.3 SROVNÁNÍ MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ ÚADI S MĚŘICÍM ZAŘÍZENÍM ČVUT

Koncepce měřicího zařízení ÚADI pro určování poddajností zavěšení vozidel vychází z koncepce zařízení ČVUT. Zjednodušené měřicí zařízení je vyvíjeno s ohledem na možnosti Ústavu automobilního a dopravního inženýrství s požadavkem na minimální nákladovost.

Tab. 28. Výhody a nevýhody zařízení ÚADI vůči zařízení ČVUT

Výhody zařízení ÚADI	Nevýhody zařízení ÚADI
Nízké pořizovací náklady konstrukce zařízení	Neumožňuje plnou automatizaci měření
Snímání polohy zařízením Tritop (zařízení již ÚADI vlastní)	Chyby měření způsobené manipulací s vozidlem při měření
Možnost podrobné analýzy deformací v bodech zavěšení (software Tritop)	Časová náročnost opakovaných měření se zařízením Tritop
Schopnost měřit vozidla s rozdílnými rozvory a rozchody kol (variabilita)	
Jednoduchost zatěžovacího mechanismu	
Reálná simulace kontaktu kola s vozovkou	





ZÁVĚR

V diplomové práci byl na základě provedeného měření navržen způsob měření poddajností zavěšení kol na zařízení ÚADI. Získaná data zpracovává algoritmus výpočtu v softwaru Matlab.

Koncepce plánovaného zařízení ÚADI umožní provádění měření u různých typů vozidel. Konstrukční návrh je nezbytné podrobit pevnostním analýzám. Konstrukci zařízení je nutné doplnit o kotvící přípravky rámu vozidla. Dokonale pevné ukotvení vozidla je podmínkou pro určení elastokinematických vlastností zavěšení. Doplnění zařízení o přípravky fixující řízení napomáhá k usnadnění manipulace s vozidlem a přesnějšímu měření.

Výběr metody je proveden z výsledků měření polohy kola a geometrie vozidla Formule Student. Experimentální měření prokazuje, že nejvhodnější konfigurace je použití čtyř kódovaných bodů umístěných na kolo a úhel otáčení kola 120° pro určení polohy. Poloha kola je při této konfiguraci počítána s relativní chybou měření 0,35%. Měření dále vykazuje lepší dosažené výsledky při určení parametrů geometrie vozidla metodou zvedání vozidla. Tato metoda se jeví lépe také s ohledem na kompatibilitu se zařízením a praktičnost provádění měření.

Chybu měření polohy kola a geometrie lze do jisté míry eliminovat. Nejvýraznějšího zvýšení přesnosti měření lze dosáhnout důkladnou přípravou vozidla a ukotvením polohy vozidla. Měření ovšem ovlivňují i faktory, které nelze ovlivnit, ale je nutné s nimi při vyhodnocování počítat. Jedná se především o přesnost fotogrammetrického zařízení Tritop.

Možným dalším vývojem algoritmu zpracování dat je zahrnutí korekčních faktorů, které zahrnují vliv naklopení karoserie a deformace náprav na vytvoření souřadného systému rámu vozidla. Klopení rámu vozidla také ovlivňuje rozložení zatížení kol vozidla. Pro měření poddajností nejvíce ovlivní naklopení karoserie v příčném směru, kdy se liší zatížení kol na jedné nápravě.

Po dokončení vývoje konstrukčních prvků zařízení a doplnění algoritmu výpočtu o korekční faktory bude zařízení ÚADI výborným kompromisem mezi požadavkem na nízké náklady a schopností získávat důležitá data.





SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Gillespie, T.D. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, 1992. ISBN 1-56091-199-9
- [2] DVOŘÁK, M. *Měření geometrie a kinematiky zavěšení s využitím optických scannerů Tritop a Atos*. Brno; Vysoké učení technické brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 80 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Blaťák, PhD.
- [3] Camaro Nova suspension guide: Photo gallery. *Hot Rodding Popular* [online]. 2013 [cit. 2014-01-29]. Dostupné z: http://www.popularhotrodding.com/tech/1005phr_camaro_nova_suspension_guide/photo_06.html
- [4] Basics of rear suspension systems: Photo gallery. *Street rodder* [online]. 2013 [cit. 2014-01-29]. Dostupné z: http://www.streetrodderweb.com/tech/1202sr_the_basics_of_rear_suspension_systems/photo_16.html
- [5] Rear suspension - dependent (linked) systems. LONGHURST, Christopher J. *Car bibles: The suspension bible* [online]. 2013 [cit. 2014-01-29]. Dostupné z: http://www.carbibles.com/suspension_bible_pg2.html
- [6] MacPherson Strut. Front. GRAU, Cesar. *Geo cities* [online]. 2012 [cit. 2014-01-29]. Dostupné z: http://www.geocities.ws/cesargrau/suspensionwebpage_macp_front.html
- [7] Global debut for third-generation Mazda3. *Autoworld blog* [online]. 2013 [cit. 2014-01-29]. Dostupné z: <http://blog.autoworld.com.my/index.php/tag/axela/>
- [8] Ed Whitacre Instructs Cadillac to Build a RWD Flagship. *GM Inside News: Forum* [online]. 2010 [cit. 2014-01-29]. Dostupné z: <http://www.gminsidenews.com/forums/f15/ed-whitacre-instructs-cadillac-build-rwd-flagship-92687/index15.html>
- [9] Geometrie zavěšení kol. *AutoZnalosti* [online]. 2012, 29.3. [cit. 2013-10-20]. Dostupné z: <http://www.autoznalosti.cz/index.php/podvozek-a-kola/40-geometriezavesenikol.html>
- [10] POLÁŠEK, J. *Návrh přípravku pro zkoušení tuhosti zavěšení kol Formule Student*. Brno; Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 47s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Ramík.
- [11] Car Suspension Stock Illustrations. KHI, Inc. *Automotiveillustrations.com* [online]. 2012 [cit. 2014-01-29]. Dostupné z: <http://www.automotiveillustrations.com/stock-images-car-suspensions.html>
- [12] *SPMM 4000 –HS from Antony Best Dynamics: OUTLINE SPECIFICATION SP20014 issue 1* [online dokument]. [cit. 2013-10-20]. Dostupné z: http://www.abd.uk.com/upload/files/2008-07-08_12-03-16_SP20014%20-%20issue%201%20_SPMM%204000%20HS%20Outline_.pdf

- [13] *MTS Kinematic and Compliance Deflection Measurement System Provides Information On Suspension Performance*. [online dokument]. [cit. 2013-10-20]. Dostupné z: http://www.mts.com/ucm/groups/public/documents/library/dev_002253.pdf
- [14] Enhancing Vehicle Performance Through Cornering Simulation. MTS SYSTEMS CORPORATION. *MTS Kinematic & Compliance (K&C)* [online]. 2008 [cit. 2014-01-29]. Dostupné z: http://www.mts.com/en/forceandmotion/groundvehicletesting/MTS_003472?article=1
- [15] *Měření elastokinematiky zavěšení kola vozidla* [online dokument]. [cit. 2013-10-20]. Dostupné z: http://stc.fs.cvut.cz/History/2012/Sbornik/papers/pdf/2533.pdf?_=1331898561
- [16] 3D-Digitizing of the X-38 (Autonom Crew Return Vehicle). *SCAN - EXPRESS* [online]. 2012 [cit. 2014-01-29]. Dostupné z: <http://www.scan-xpress.com.au/products/x38.html>
- [17] DUCHOŇ, František. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, Fakulta strojního inženýrství, Ústav dopravní techniky. *Manuál systému TRITOP*. Brno, 2005.
- [18] TRITOP Professional. *GOM Optical measuring techniques* [online]. 2009 [cit. 2014-01-29]. Dostupné z: <http://www.gom.com/3d-software/tritop-professional.html>
- [19] VLK, František. Podvozky motorových vozidel. 3. přeprac., rozš., aktualiz. vyd. Brno: Prof.Ing.František Vlk, DrSc, 2006, 464 s. ISBN 80-239-6464-x.
- [20] Kyvadlová (úhlová) náprava. SAJDL, Jan. *Autolexicon.net* [online]. 2013 [cit. 2014-01-29]. Dostupné z: <http://cs.autolexicon.net/articles/kyvadlova-uhlova-naprava/>
- [21] VLK, František. *Dynamika motorových vozidel*. vyd. 2. Brno: Prof.Ing.František Vlk,DrSc., nakladatelství a vydavatelství, 2006, 432 s. ISBN 80-239-0024-2.
- [22] MATEJA, D. *Měření kinematických charakteristik zavěšení kol*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2006.
- [23] HAŠEK, Roman a Pavel PECH. *Kvadratické plochy: Jejich reprezentace v programu MAPLE*. České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, 2010. ISBN 978-80-7394-271-7. Dostupné z: http://home.pf.jcu.cz/~kvadriky/kapitola1/Kap_1_11.pdf
- [24] Návod k programování řídicích systémů MEFI: TRANSFORMACE SOUŘADNÉHO SYSTÉMU. *MEFI* [online]. 2013 [cit. 2014-04-22]. Dostupné: <http://www.mefi.cz/files/dokumentace/cnc8x9/navodkprogramovani/kapitola14.pdf>
- [25] *TU Brno Racing* [online]. 2013 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.tubrnoracing.cz/cs/>
- [26] UNI-MAX.cz. *Přípravek pro aretaci volantu a pedálů* [online]. 2014 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.uni-max.cz/pripravek-pro-aretaci-volantu-a-pedalu/d/>



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

<i>ČVUT</i>		České vysoké učení technické v Praze
<i>LP</i>		levé přední kolo
<i>LZ</i>		levé zadní kolo
<i>PP</i>		pravé přední kolo
<i>PZ</i>		pravé zadní kolo
<i>ÚADI</i>		Ústav automobilního a dopravního inženýrství FSI VUT v Brně
<i>VUT</i>		Vysoké učení technické v Brně
A, B, C, X	[-]	body v prostoru
$\vec{a}, \vec{b}$	[-]	směrové vektory vytvořené z pozic bodu v prostoru
AB, BC	[-]	úsečky v prostoru
A_f	[-]	koeficient poddajnosti prvků řízení přední nápravy
A_r	[-]	koeficient poddajnosti prvků řízení zadní nápravy
a_y	$[m \cdot s^{-2}]$	příčné zrychlení
B	[N]	brzdná síla
d_r	[mm]	průměr okraje ráfku
e_i, e_j, e_k	[-]	ortogonální jednotkové vektory
F_x	[N]	podélná síla působící na kolo (nápravu)
F_y	[N]	příčná síla působící na kolo (nápravu)
F_z	[N]	svislá síla působící na kolo (nápravu)
K_{1fcs}	[-]	koeficient nedotáčivosti vlivem působení bočních sil
K_{SS}	$[N \cdot m^{-1}]$	tuhost pružiny nahrazující kinematické a pružné prvky řízení
K_{strg}	[-]	přírůstek nedotáčivosti vzhledem k soustavě řízení
L_i	[mm]	vzdálenost
M_{SK}	[Nm]	vratný moment pneumatiky
n	[mm]	závlek
$\vec{n}_{AB}, \vec{n}_{BC}$	[-]	normálové vektory rovin určujících osu otáčení kola
$\vec{n}_{ABC}$	[-]	normálový vektor kola
n_k, n_i	[-]	normálový vektor kola



N_{kola_L}	[°]	úhel kol v maximálním levém rejdu
N_{kola_P}	[°]	úhel kol v maximálním pravém rejdu
n_S	[mm]	rameno příčné síly
NV_v_lpL	[-]	normálový vektor LP kola v maximálním levém rejdu
NV_v_lpP	[-]	normálový vektor LP kola v maximálním pravém rejdu
NV_v_ppL	[-]	normálový vektor PP kola v maximálním levém rejdu
NV_v_ppP	[-]	normálový vektor PP kola v maximálním pravém rejdu
n_x, n_y, n_z	[-]	souřadnice průmětu normálového vektoru
o_k	[-]	osa otáčení kola
p	[mm]	stopa pneumatiky spojená s vyrovnáním momentu
p_{AB}, p_{BC}	[-]	parametry rovin určujících osu otáčení kola
p_{ABC}	[-]	parametr roviny disku kola
$P_{napravy}$	[°]	přesazení kol jedné nápravy
PR_lp	[-]	jednotkový vektor osy rejdivého čepu levého kola
PR_pp	[-]	jednotkový vektor osy rejdivého čepu pravého kola
R	[-]	pomocný bod v prostoru
R	[-]	pomocný bod pro sjednocení roviny disku kola
r	[mm]	poloměr kola
r_0	[mm]	poloměr rejdu
r_1, r_2	[-]	vektory pro sjednocení roviny disku kola
r_2''	[-]	posunutý vektor do roviny disku kola
R_{rejd}	[°]	rozdíl maximálních rejdu na kolech
RS_1', RS_2'	[-]	úsečky pro sjednocení roviny disku kola
S_2''	[-]	posunutý střed kola
$S_{celkova}$	[°]	celková sbíhavost
S_i	[N]	reakční síla příčném směru
S_k	[-]	střed kola
S_K	[mm]	posuv příčné síly
S_{leve}	[°]	dělená sbíhavost levého kola
S_{prave}	[°]	dělená sbíhavost pravého kola
$S_{X_predni\ kolo}$	[-]	souřadnice středu kola v ose X předních kol



$S_{x_zadni\ kolo}$	[-]	souřadnice středu kola v ose X zadních kol
$S_{y_leva\ strana}$	[-]	souřadnice středu kola v ose Y na levé straně vozidla
$S_{y_prava\ strana}$	[-]	souřadnice středu kola v ose Y na pravé straně vozidla
T	[-]	transformační matice
W_f	[kN]	dynamické zatížení přední nápravy
W_r	[kN]	dynamické zatížení zadní nápravy
x, y, z	[-]	souřadnice
α	[°]	úhel dělené sbíhavosti
β	[°]	odklon kola
$\beta_{f,r}$	[°]	přídavný úhel natočení kol vlivem klopení
γ	[°]	příklon rejdové osy
Δ	[mm]	vzdálenost rovin tvořených body na kolech
δ	[°]	záklon rejdové osy
δ_C	[°]	úhel řízení
δ_{Cf}	[N.m ⁻²]	prosté zatížení nápravy
$\Delta Z_{p,z}$	[N]	přírůstek zatížení kol jednotlivých náprav
ε	[°]	úhel sbíhavosti
ν	[°]	úhel volantu
ψ	[°]	úhel stáčení
	[m]	metr
	[m ³]	metr krychlový
	[mm]	milimetr
	[°]	úhlový stupeň





SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1. Dělení náprav	9
Obr. 1.2. Tuhá náprava „Hotchkiss“ [4]	10
Obr. 1.3. Tuhá náprava „Four Link“ [3]	10
Obr. 1.4. Tuhá náprava „de Dion“ [5]	11
Obr. 1.5. Náprava MacPherson“ [6]	12
Obr. 1.6. Víceprvková náprava [7]	12
Obr. 1.7. Přední náprava SLA [8]	13
Obr. 1.8. Znázornění odklonu (vlevo) a příklonu kola (vpravo) [9]	14
Obr. 1.9. Příklon rejdové osy [9]	15
Obr. 1.10. Poloměr rejdu [9]	16
Obr. 1.11. Záklon rejdové osy [9]	17
Obr. 1.12. Znázornění sbíhavosti (vlevo) a rozbíhavosti kol (vpravo) [9]	18
Obr. 1.13. Přední a zadní nápravnice - OPEL Omega [20]	20
Obr. 1.14. Znázornění samořízení - přetáčivost [1]	20
Obr. 1.15. Znázornění samořízení - nedotáčivost [1]	21
Obr. 1.16. Zadní nápravy VW Golf IV a Škoda Octavia – pohled shora [19]	22
Obr. 1.17. Elastokinematické uložení přední nápravy - Opel AG [19]	23
Obr. 1.18. Model soustavy řízení [1]	24
Obr. 2.1. Síly působící na kolo při přímé jízdě konstantní rychlostí [11]	26
Obr. 2.2. Působení sil na kola při průjezdu zatáčkou konstantní rychlostí [10]	26
Obr. 2.3. Vratný moment působící na kolo v zatáčce [10]	27
Obr. 2.4. SPM 4000-HS - popis částí [12]	29
Obr. 2.5. ABD Dynamic Arm [12]	30
Obr. 2.6. Grafické vyhodnocení průběhu zkoušky SPM 4000 [12]	32
Obr. 2.7. MTS K&C System [13]	33
Obr. 2.8. Šestiosé měřicí zařízení polohy kol [14]	34
Obr. 2.9. Měřicí zařízení tuhosti zavěšení, FS ČVUT [15]	35
Obr. 2.10. Schéma měřicího stavu [15]	36
Obr. 2.11. Schéma modernizované měřicí hlavy [15]	38
Obr. 3.1. Koncepce měřicího zařízení [10]	39
Obr. 3.2. Konstrukce pracovního stolu [10]	40
Obr. 3.3. Mechanismus pohonu [10]	41
Obr. 3.4. Snímač tahové síly S9, výrobce HBM [10]	42
Obr. 3.5. Snímání velkých těles zařízením TRITOP [16]	43
Obr. 3.6. Fotoaparát systému Tritop [2]	44
Obr. 3.7. Paměťová karta s adaptérem [2]	44
Obr. 3.8. Makroblesk fotoaparátu [2]	44
Obr. 3.9. Kalibrační tyče [2]	45
Obr. 3.10. Kódované referenční body [2]	45
Obr. 3.11. Nekódované referenční body [2]	45
Obr. 3.12. Počítač pro zpracování dat [2]	46
Obr. 3.13. Pohyb fotoaparátu při měření [17]	47



Obr. 4.1. Analytické určení normálového vektoru a středu kola	50
Obr. 4.2. Střed kružnice v rovině	51
Obr. 4.3. Průměrování jednotkových normálových vektorů	52
Obr. 4.4. Sjedení roviny kola	53
Obr. 4.5. Souřadný systém vozidla	55
Obr. 4.6. Kola na pravé straně vozidla	57
Obr. 4.7. Kola na levé straně vozidla	58
Obr. 4.8. Osa rejdrového čepu pravého kola	60
Obr. 4.9. Osa rejdrového čepu levého kola	61
Obr. 5.1. Formule Student Dragon II [25]	69
Obr. 5.2. Příprava vozidla pro měření	70
Obr. 5.3. Umístění kalibračních tyčí	70
Obr. 5.4. Vhodné umístění kódovaných bodů	71
Obr. 5.5. Umístění bodů pro souřadný systém	71
Obr. 5.6. Disk kola	72
Obr. 5.7. Snímání vozidla zařízením Tritop	73
Obr. 5.8. Určování přesnosti metody	74
Obr. 5.9. Modifikace výpočtu normálového vektoru z více poloh	75
Obr. 5.10. Schéma poloh opakovaného měření	77
Obr. 5.11. Metoda zvedání vozidla	83
Obr. 5.12. Metoda posunování vozidla	85
Obr. 5.13. Měření se zařízením HUNTER	87
Obr. 6.1. Modifikace pracovního stolu	91
Obr. 6.2. Přípravek pro fixaci volantu [26]	92
Obr. 6.3. Návrh kotvení vozidla	92
Obr. 6.4. Klopení rámu vozidla	94
Obr. 6.5. Deformace os náprav	95



SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Rozvor kol	55
Tab. 2. Míra přes kola	56
Tab. 3. Sbíhavost kol na pravé straně	57
Tab. 4. Sbíhavost kol na levé straně	58
Tab. 5. Celková sbíhavost	58
Tab. 6. Odklon kol na pravé straně	59
Tab. 7. Odklon kol na levé straně	59
Tab. 8. Příklon rejdového čepu pravého kola	61
Tab. 9. Záklon rejdového čepu pravého kola	61
Tab. 10. Příklon rejdového čepu pravého kola	62
Tab. 11. Záklon rejdového čepu pravého kola	62
Tab. 12. Kola v pravém rejdu	63
Tab. 13. Kola v levém rejdu	63
Tab. 14. Rozdíl rejdů	64
Tab. 15. Přesazení kol	64
Tab. 16. Popis datových souborů	65
Tab. 17. Kódované body v pro výpočet geometrie	66
Tab. 18. Kódované body pro kalibraci	67
Tab. 19. Statistické vyhodnocení pro určení úhlu otáčení kola	76
Tab. 20. Statistické vyhodnocení pro určení počtu bodů na kole vozidla	82
Tab. 21. Relativní chyba měření	82
Tab. 22. Geometrie Formule Dragon II - metoda zvedání	84
Tab. 23. Geometrie Formule Dragon II - metoda posunování	86
Tab. 24. Opakované měření zařízením Hunter	88
Tab. 25. Srovnání metod měření geometrie vozidel	89
Tab. 26. Přehled stavu zařízení ÚADI	90
Tab. 27. Chyba měření	93
Tab. 28. Výhody a nevýhody zařízení ÚADI vůči zařízení ČVUT	95





SEZNAM GRAFŮ

Graf 1. Souřadnice středu v ose X	78
Graf 2. Souřadnice středu v ose Y	78
Graf 3. Souřadnice středu v ose Z.....	79
Graf 4. Souřadnice normálového vektoru v ose X.....	80
Graf 5. Souřadnice normálového vektoru v ose Y	80
Graf 6. Souřadnice normálového vektoru v ose Z	81





SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHY NA CD OBSAHUJÍCÍ ALGORITMY ZPRACOVÁVÁNÍ MĚŘENÝCH DAT

I	Určení konfigurace metody	P1
II	Metoda posunování vozidla	P3
III	Metoda zvedání vozidla	P4
IV	Opakované měření polohy kola	P5





I URČENÍ KONFIGURACE METODY

Formule_STUDENT_konfigurace_bodu_a_uhlu		Název adresáře
Typ souboru	Název souboru	Poznámka
Datové soubory	up_0.xls	Body jsou seřazeny ve tvaru: • rám • PP • PZ • LP • LZ
	up_30.xls	
	up_60.xls	
	up_90.xls	
	up_120.xls	
	up_150.xls	
	up_180.xls	
	up_210.xls	
	up_240.xls	
	up_270.xls	
	up_300.xls	
	up_330.xls	
Hlavní skript	DP_Suchy_konfigurace_bodu_a_uhlu.m	
Skripty dílčích funkcí	SSkaroserie.m	Transformace souřadnic.
	BODY_SSkaroserie.m	
	center.m	Pomocná funkce.
	Center_of_wheel3.m	Funkce pro výpočet středu kola a normálového vektoru.
	Center_of_wheel3_60st.m	
	Center_of_wheel3_90st.m	
	Center_of_wheel4.m	
	Center_of_wheel4_60st.m	
	Center_of_wheel4_90st.m	
	Center_of_wheel5.m	
	Center_of_wheel5_60st.m	
	Center_of_wheel5_90st.m	
	Center_of_wheel6.m	
	Center_of_wheel6_60st.m	
	Center_of_wheel6_90st.m	
Center_of_wheel7.m		
Center_of_wheel7_60st.m		



Typ souboru	Název souboru	Poznámka
Skripty dílčích funkcí	Center_of_wheel7_90st.m	Funkce pro výpočet středu kola a normálového vektoru.
	Center_of_wheel8.m	
	Center_of_wheel8_60st.m	
	Center_of_wheel8_90st.m	
	Center_of_wheel9.m	
	Center_of_wheel9_60st.m	
	Center_of_wheel9_90st.m	
	CW_60st.m	Pomocné funkce.
	CW_90st.m	
	norm_par.m	
	norm_parA.m	
	posun60.m	Sjednocení roviny kola.
	posun90.m	
	posun120.m	
Výpis	WC_NV_konfigurace.xls	



II METODA POSUNOVÁNÍ VOZIDLA

Formule_STUDENT_posunovani		Název adresáře	
Typ souboru	Název souboru	Poznámka	
Datové soubory	base_0_left.xls	Seřazení bodů je provedeno v hlavním skriptu.	
	base_0_right.xls		
	base_0_str.xls		
	base_120_str.xls		
	base_240_str.xls		
Hlavní skript	DP_Suchy_posunovani.m		
Skripty dílčích funkcí	BODY_SSkaroserie.m BODY_SSvozidla.m	Transformace souřadnic.	
	Center_of_wheel.m	Výpočet středu a normálového vektoru kola, sjednocení roviny kola.	
	DV_SSvozidla.m NAPRAVY_SSvozidla.m	Určení polohy souřadného systému vozidla.	
	SSkaroserie.m SSvozidla.m WC_SSkola.m	Transformace souřadnic.	
	WC_SSkola_rovne.m	Určení základní polohy.	
	WC_SStritop.m	Transformace souřadnic.	
	Výpis	FormuleD2_geometrie_posunovani.xls	



III METODA ZVEDÁNÍ VOZIDLA

Formule_STUDENT_zvedani		Název adresáře
Typ souboru	Název souboru	Poznámka
Datové soubory	M_base_0_left.xls	Seřazení bodů je provedeno v hlavním skriptu.
	M_base_0_right.xls	
	M_base_0_str.xls	
	M_up_0_str.xls	
	M_up_120_str.xls	
	M_up_240_str.xls	
Hlavní skript	DP_Suchy_zvedani.m	
Skripty dílčích funkcí	BODY_SSkaroserie.m	Transformace souřadnic.
	BODY_SSvozidla.m	
	Center_of_wheel.m	Výpočet středu a normálového vektoru kola, sjednocení roviny kola.
	DV_SSvozidla.m	Určení polohy souřadného systému vozidla.
	NAPRAVY_SSvozidla.m	
	SSkaroserie.m	Transformace souřadnic.
	SSvozidla.m	
	WC_SSkola.m	
WC_SSkola_rovne.m	Určení základní polohy.	
WC_SSritop.m	Transformace souřadnic.	
Výpis	FormuleD2_geometrie_zvedani.xls	



IV OPAKOVANÉ MĚŘENÍ POLOHY KOLA

Formule_STUDENT_opakovane_mereni		Název adresáře
Typ souboru	Název souboru	Poznámka
Datové soubory	up_0.xls	Body jsou seřazeny ve tvaru: • rám • PP • PZ • LP • LZ
	up_30.xls	
	up_60.xls	
	up_90.xls	
	up_120.xls	
	up_150.xls	
	up_180.xls	
	up_210.xls	
	up_240.xls	
	up_270.xls	
	up_300.xls	
	up_330.xls	
Hlavní skript	DP_Suchy_opakovane_mereni.m	
Skripty dílčích funkcí	SSkaroserie.m	Transformace souřadnic.
	BODY_SSkaroserie.m	
	center.m	Pomocná funkce.
	Center_of_wheel3.m	Funkce pro výpočet středu kola a normálového vektoru.
	Center_of_wheel4.m	
	Center_of_wheel5.m	
	posun120.m	Sjednocení roviny kola.
Výpis	NV_WC_opakovane_mereni.xls	