

VYSOKÁ ŠKOLA POLYTECHNICKÁ JIHLAVA

Aplikované strojírenství

KINEMATICKÁ A DYNAMICKÁ ANALÝZA ZÁVĚSU
KOLA AUTOMOBILU

Bakalářská práce

Autor práce: Petr Vlach

Vedoucí práce: doc. Ing. Radek Kolman, Ph.D.

Jihlava 2025

Vysoká škola polytechnická Jihlava

Tolstého 16, 586 01 Jihlava

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Autor práce: **Petr Vlach**

Studijní program: Aplikované strojírenství

Garant studijního programu: Ing. Miloslav Vilímek, Ph.D.

Název práce: **Kinematická a dynamická analýza mechanismu uložení závěsu kola automobilu**

Vedoucí práce: doc. Ing. Radek Kolman, Ph.D.

Cíl práce: Cílem práce bude numerický model kinematiky a dynamiky závěsu automobilu. Pro řešení úlohy bude použit komerční software ADAMS. Výsledkem práce bude kinematická a dynamická analýza mechanismu uložení závěsu kola automobilu pro typické provozní podmínky provozu.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá kinematickým a dynamickým modelováním závěsu kola automobilu. Cílem práce je vytvořit počítačový model tohoto mechanismu a pomocí simulačního programu MSC Adams a analyzovat jeho chování v typických jízdních podmínkách, například při zatáčení nebo při přejezdu nerovností. Práce popisuje základní druhy a principy zavěšení kol, dále postup tvorby numerického modelu a způsob, jak lze pomocí simulace sledovat pohyb a reakce jednotlivých prvků závěsu. Výsledkem je postup, který slouží jako návod k provedení kinematické a dynamické analýzy závěsu kola v prostředí MSC Adams.

Klíčová slova

XR-Buggy; zavěšení kol; MSC Adams; kinematická analýza; dynamická analýza; simulace

Abstract

This bachelor's thesis deals with the kinematic and dynamic modeling of a car wheel suspension. The aim of the thesis is to create a computer model of this mechanism and, using the MSC Adams simulation software, analyze its behavior under typical driving conditions, such as cornering or driving over uneven surfaces. The thesis describes the basic types and principles of wheel suspension, the process of creating a numerical model, and the methods by which the motion and responses of individual suspension components can be monitored through simulation. The outcome is a procedure that serves as a guide for performing kinematic and dynamic analysis of a wheel suspension in MSC Adams.

Keywords

XR-Buggy; wheel suspension; MSC Adams; kinematic analysis; dynamic analysis; simulation

Prohlašuji, že předložená bakalářská práce je původní a zpracoval jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušil autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, v platném znění, dále též „AZ“).

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje **AZ**, zejména § 60 (školní dílo).

Podle § 47b zákona o vysokých školách souhlasím se zveřejněním své práce podle Směrnice pro vedení, vypracování a zveřejňování závěrečných prací na VŠPJ, a to bez ohledu na výsledek obhajoby.

Beru na vědomí, že VŠPJ má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé bakalářské práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠPJ, která má právo ode mě požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených vysokou školou na vytvoření díla (až do její skutečné výše), z výdělku dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence.

V Jihlavě dne 20. listopadu 2025

.....

Podpis studenta/ky

Poděkování

Rád bych poděkoval doc. Ing. Radku Kolmanovi, Ph.D., za odborné vedení mé bakalářské práce, cenné rady a trpělivost během celého procesu zpracování. Poděkování patří také Ing. Davidu Vaňkovi, který mi poskytl technické podklady, podporu, pomoc a trpělivost při tvorbě modelu i simulací. V neposlední řadě děkuji své rodině za jejich podporu a motivaci během celého studia.

Obsah

Seznam obrázků.....	7
Seznam zkratk.....	8
Úvod	9
1 Teoretická část	10
1.2 Základní rozdělení náprav.....	10
1.3 Tuhé (pevné) nápravy	10
1.4 Nezávislé zavěšení kol.....	15
2 Praktická část	21
2.2 Kinematika	26
2.3 Dynamika	34
Závěr	41
Seznam použitých zdrojů.....	42

Seznam obrázků

Obrázek 1: Zadní poháněná tuhá náprava	11
Obrázek 2: Zadní nepoháněná náprava	12
Obrázek 3: Řídící tuhá náprava	13
Obrázek 4: Portálová náprava	14
Obrázek 5: Přední náprava McPherson	16
Obrázek 6: Přední víceprvková náprava.....	17
Obrázek 7: Náprava s vlečenými rameny.....	18
Obrázek 8: Náprava s vlečenými rameny.....	19
Obrázek 9: Přední lichoběžníková náprava	20
Obrázek 10: 3D model přední nápravy	22
Obrázek 11: Model přední nápravy v programu ADAMS View.....	23
Obrázek 12: Model přední nápravy v programu ADAMS View.....	24
Obrázek 13: Model přední nápravy v programu ADAMS View.....	25
Obrázek 14: grafy měření.....	26
Obrázek 15: Camber angel.....	27
Obrázek 16: Camber angel.....	28
Obrázek 17: Toe angle.....	29
Obrázek 18: Camber toe	30
Obrázek 19: Caster angel	31
Obrázek 20: Caster angle	32
Obrázek 21: změna rozchodu kol.....	33
Obrázek 22: Změna rozchodu kol	34
Obrázek 23: Nerovný povrch	35
Obrázek 24: Pneumatika	36
Obrázek 25: Nastavení hodnot v Adamsu.....	37
Obrázek 26: Měření spodního ramena	37
Obrázek 27: Měření vrchního ramena	38
Obrázek 28: Měření Těhlice	39
Obrázek 29: Měření tlumiče	40

Seznam zkratek

MSC Adams	Mechanical System Computer
NX Siemens	Modelovací software
CAD	Computer Aided design
MBD	Multibody Dynamics
STEP	Standard for the Exchange of Product Data
XR-Buggy	Název konkrétního modelu
VŠPJ	Vysoká škola polytechnická Jihlava
FEA	Finite Element Analysis

Úvod

Automobil jako dopravní prostředek prošel za více než století svého vývoje výraznou technologickou transformací, přičemž jedním z klíčových konstrukčních celků zůstává zavěšení kol. Tento prvek hraje zásadní roli nejen v komfortu cestujících, ale především v bezpečnosti a stabilitě vozidla při jízdě. Zavěšení kol spojuje nápravy s karoserií nebo rámem automobilu a zajišťuje přenos všech dynamických sil, které na vozidlo působí během akcelerace, brzdění, zatáčení nebo přejezdu nerovností. Správné fungování tohoto systému významně ovlivňuje jízdní vlastnosti a celkové chování vozidla.

V dnešní době, kdy se klade stále větší důraz na bezpečnost, hospodárnost provozu a přizpůsobení jízdních vlastností konkrétním podmínkám, nabývá významu návrh a simulace zavěšení kol už v počáteční fázi vývoje. Díky pokročilému výpočetnímu softwaru je možné virtuálně analyzovat pohybové i silové poměry v zavěšení a tím minimalizovat riziko chyb ještě před fyzickým prototypováním.

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou zavěšení kol automobilu, konkrétně vytvořením numerického modelu předního závěsu sportovního vozidla kategorie buggy. Jedná se o typ lehkého terénního vozidla určeného převážně pro jízdu mimo zpevněné komunikace. Právě v těchto podmínkách je konstrukce zavěšení vystavena zvýšené zátěži, a proto je vhodnou oblastí pro zkoumání vlivu geometrie a dynamických parametrů na celkové chování vozidla.

Vzhledem ke specifickému využití vozidla XR-Buggy, které se pohybuje převážně v lehkém terénu, je nutné klást důraz na správnou volbu geometrie zavěšení a jeho následnou analýzu. Využití numerické simulace v softwaru MSC Adams umožňuje provádět kinematické i dynamické výpočty a tím předem odhadnout chování jednotlivých komponent v provozních stavech.

Výsledkem této práce bude vytvořený kinematický a dynamický model závěsu kola, analýza pohybových vlastností a zhodnocení vlivu nastavení geometrie na chování vozidla.

1 Teoretická část

Teoretická část se zabývá rozdělením jednotlivých typů zavěšení kol (náprav), jejich charakteristikou, výhodami, nevýhodami a použitím v různých typech vozidel.

V této bakalářské práci se zabývám studií lichoběžníkové nápravy použité v XR-Buggy.

1.1.1 Úloha zavěšení kol ve vozidle

Zavěšení kol je mechanický systém spojující kola s rámem vozidla. Zajišťuje přenos sil mezi koly a karoserií, tlumí rázy od nerovností a udržuje stabilitu vozu. Správně navržené zavěšení přispívá k jízdnímu komfortu, bezpečnosti, menšímu opotřebení pneumatik i efektivnímu přenosu hnací síly. Kvalitní systém musí zajistit trvalý kontakt kola s vozovkou, přenos všech silových složek, tlumení vibrací, správnou geometrii při zatížení a minimalizaci opotřebení pneumatik.

1.2 Základní rozdělení náprav

Nápravy ovlivňují nejen mechanické vlastnosti podvozku, ale i komfort, bezpečnost a ovladatelnost vozidla. V této kapitole se zabývám krátkou rešerší k jednotlivým typům náprav.

Podle konstrukčního řešení zavěšení kol se nápravy dělí na dva základní typy. **pevné (tuhé) nápravy** spojují kola na levé a pravé straně jedním tuhým nosníkem, takže pohyb jednoho kola přímo ovlivňuje kolo druhé. Tento typ je využíván zejména u nákladních vozidel, užitkových automobilů, přívěsů a terénních vozů. Naproti tomu **nezávislé zavěšení kol** umožňuje každému kolu pohybovat se samostatně bez mechanického ovlivnění protilehlého kola, což zlepšuje komfort, stabilitu a ovladatelnost. Tento systém je dnes běžným řešením zejména u moderních osobních automobilů, a to jak na přední, tak i na zadní nápravě. Níže uvádím jednotlivé rozdělení.

1.3 Tuhé (pevné) nápravy

Definice a princip

Tuhá náprava (nazývaná také *pevná náprava*) je konstrukční prvek vozidla, který pevně spojuje kola levé a pravé strany pomocí jednoho tuhého nosníku. Jedná se o typ tzv. závislého zavěšení kol, což znamená, že pohyb jednoho kola bezprostředně ovlivňuje pohyb kola na druhé straně. Tato konstrukce byla standardem u vozidel až do poloviny 20. století a dodnes se používá zejména u nákladních vozidel, přívěsů, off-road vozů a u některých levnějších modelů osobních vozů, kde je prioritou jednoduchost a odolnost.

Základní typy tuhých náprav:

- Poháněná tuhá náprava
- Nepoháněná tuhá náprava
- Řídící tuhá náprava
- Portálová náprava

1.3.1 Poháněná tuhá náprava

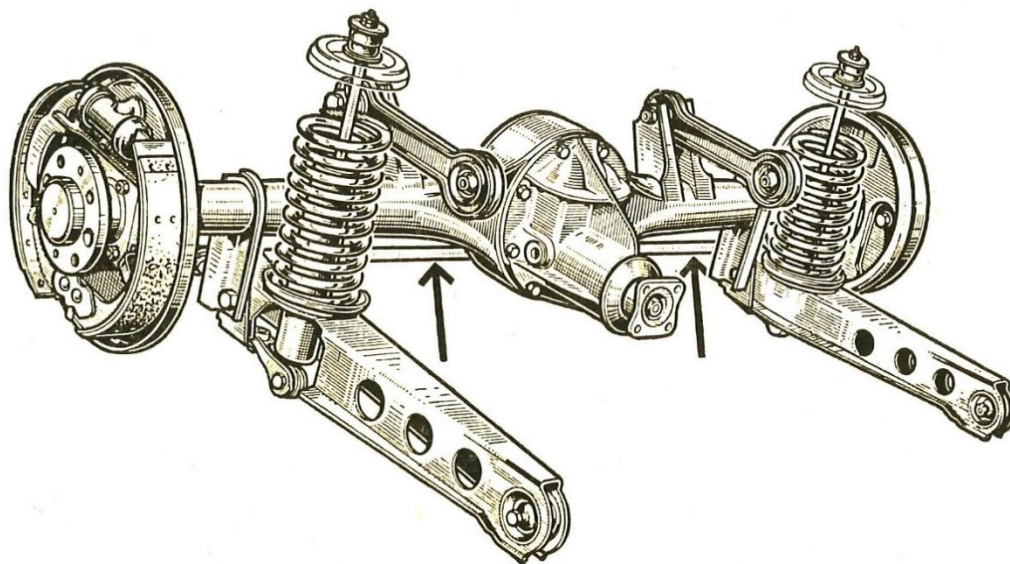
Je typem závislého zavěšení kol, kde jsou obě kola pevně spojena nosníkem a současně přenášejí hnací sílu z motoru na vozovku prostřednictvím diferenciálu umístěného na nápravě. Tato konstrukce byla historicky široce využívána pro svou jednoduchost a odolnost, hlavně u zadních náprav vozidel s pohonem zadních kol.

Tuhá náprava nabízí několik výhod. Patří mezi ně její vysoká robustnost a odolnost, díky nimž dokáže spolehlivě snášet velké zatížení i náročné provozní podmínky. Z tohoto důvodu je vhodná především pro terénní a užitková vozidla. Další výhodou je jednoduchá konstrukce, která usnadňuje údržbu a snižuje náklady na servis.

Současně má však tuhá náprava i své nevýhody. Přítomnost diferenciálu přímo na nápravě zvyšuje neodpruženou hmotnost, což má nepříznivý vliv na jízdní komfort i ovladatelnost vozidla. Pevné mechanické propojení obou kol navíc omezuje jejich schopnost samostatně kopírovat nerovnosti terénu, což může zhoršit kontakt pneumatik s vozovkou, především na nerovných cestách.

Shrnutí

Tuhá náprava je závislé zavěšení, kde jsou obě kola pevně spojena nosníkem a přenášejí hnací sílu přes diferenciál umístěný přímo na nápravě. Je ceněná pro svou jednoduchost, odolnost a schopnost zvládat vysoké zatížení, což ji činí vhodnou zejména pro terénní a užitková vozidla. Nevýhodou je vyšší neodpružená hmotnost a omezená schopnost kol samostatně reagovat na nerovnosti, což snižuje jízdní komfort i kontakt pneumatik s vozovkou (viz obr.1).



Obrázek 1: Zadní poháněná tuhá náprava

Zdroj: Autolexicon, 2025

1.3.2 Nepoháněná tuhá náprava

Nepoháněná tuhá náprava je typ zavěšení, u něhož jsou obě kola pevně spojena společným nosníkem, podobně jako u poháněné tuhé nápravy. Na rozdíl od ní však neobsahuje diferenciál ani jiné pohonné prvky, protože nepřenáší točivý moment z motoru na kola. Jejím účelem je

zajistit vedení kol, přenos hmotnosti vozidla a jejich odpružení. Díky své mechanické jednoduchosti, odolnosti a nízkým nárokům na údržbu se nepoháněná tuhá náprava používá především u přívěsů a návěsů, u nehnaných náprav vícenápravových nákladních vozidel a také u zadních náprav osobních automobilů s předním pohonem.

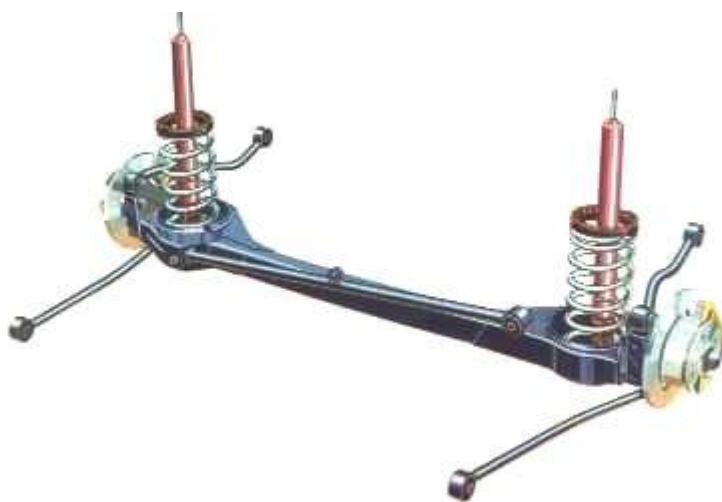
Nepoháněná tuhá náprava má řadu výhod, které souvisejí zejména s její jednoduchou a cenově nenáročnou konstrukcí. Díky malému počtu komponent je vhodná pro velkosériovou výrobu, vyžaduje minimální údržbu a opravy jsou obvykle levné. Vyznačuje se vysokou tuhostí a nosností, což je důležité zejména v nákladní dopravě. Další předností je dobrá odolnost vůči znečištění a mechanickému poškození, díky čemuž je tento typ nápravy vhodný i pro náročnější provozní podmínky.

Na druhou stranu má nepoháněná tuhá náprava také několik nevýhod. Kvůli vyšší neodpružené hmotnosti a pevnému propojení obou kol poskytuje horší jízdní komfort a omezenou schopnost kopírovat nerovnosti povrchu. Pohyb jednoho kola tak vždy ovlivňuje i kolo druhé, což vede k menší přesnosti vedení kol při průjezdu zatáčkami. Z tohoto důvodu není tento typ vhodný pro sportovní nebo vysoce dynamická vozidla.

Nepoháněná tuhá náprava nachází uplatnění u zadních náprav osobních vozů s předním pohonem, a to především u cenově dostupnějších modelů. Často se využívá také u karavanů, přívěsných vozíků, zemědělské techniky a lesních strojů, kde se oceňuje její jednoduchost, nosnost a odolnost.

Shrnutí

Nepoháněná tuhá náprava je jednoduchý a odolný typ zavěšení, v němž jsou obě kola pevně spojena nosníkem, přičemž nepřenáší hnací sílu, protože neobsahuje diferenciál ani pohonné prvky. Vyniká nízkou cenou, minimální údržbou, vysokou nosností a odolností, díky čemuž se používá hlavně u přívěsů, návěsů, nehnaných náprav nákladních vozidel a u zadních náprav levnějších osobních aut s předním pohonem. Jejím hlavním nedostatkem je vysoká neodpružená hmotnost a omezená schopnost kol reagovat na nerovnosti, což vede k horšímu komfortu, slabší přesnosti vedení kol a nižší vhodnosti pro dynamickou jízdu (viz obr.2).



Obrázek 2: Zadní nepoháněná náprava

Zdroj: Autolexicon, 2025

1.3.3 Řídicí tuhá náprava

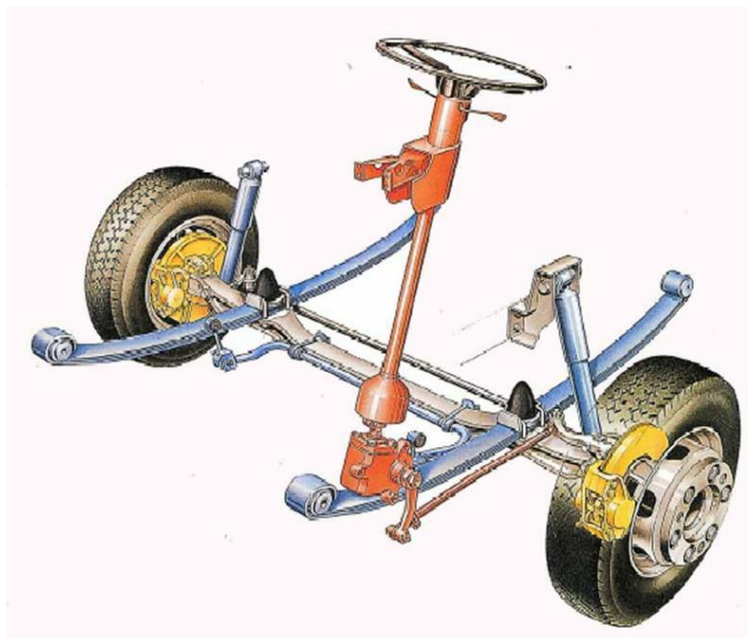
Řídicí tuhá náprava je typ závislého zavěšení kol, kde jsou obě kola pevně spojena nosníkem a současně umožňují řízení vozidla. To znamená, že kola na této nápravě nejen nesou hmotnost vozidla a přenášejí síly mezi vozidlem a vozovkou, ale také se otáčejí kolem svislých os, aby umožnila změnu směru jízdy.

Tato náprava má několik výhod, které vycházejí z její jednoduché a robustní konstrukce. Díky malému počtu součástí je odolná, spolehlivá a vykazuje dlouhou životnost i v náročných provozních podmínkách. K jejím přednostem patří také nízké výrobní a provozní náklady, protože nevyžaduje složitou údržbu. Významnou výhodou je rovněž vysoká nosnost, která činí tento typ nápravy vhodným pro užitková a terénní vozidla nebo další aplikace, kde je kladen důraz na odolnost a schopnost přenášet velká zatížení.

Současně však řídicí tuhá náprava má i několik nevýhod. Vyšší neodpružená hmotnost negativně ovlivňuje jízdní komfort a snižuje schopnost vozidla přesně kopírovat nerovnosti povrchu. Pevné spojení obou kol omezuje jejich nezávislý pohyb, což se může projevit sníženou trakcí a méně přesným řízením, zvláště při jízdě v zatáčkách nebo na nerovném terénu. Z těchto důvodů byly řídicí tuhé nápravy v moderních osobních automobilech postupně nahrazeny nezávislými zavěšeními kol.

Shrnutí:

Řídicí tuhá náprava představuje tradiční řešení zavěšení a řízení kol, které vyniká jednoduchostí, robustností a schopností přenášet vysoká zatížení. Přestože byla v osobních vozidlech nahrazena modernějšími systémy nezávislého zavěšení, v oblasti užitkových a terénních vozidel zůstává důležitým a funkčně vhodným konstrukčním prvkem (viz obr.3).



Obrázek 3: Řídicí tuhá náprava

Zdroj: eluc.ikap.cz, 2025

1.3.4 Portálová náprava

Portálová náprava je speciální typ tuhé nápravy, která se vyznačuje umístěním hnacího hřídele a diferenciálu nad osou kol. Toho je dosaženo použitím kolových redukcí (převodovek) na každém kole, které přenášejí točivý moment z hnacího hřídele na kola a současně zvyšují výšku vozidla. Tento konstrukční prvek umožňuje vozidlu lepší průchodnost terénem díky větší vzdálenosti mezi podvozkem a povrchem terénu.

Tato náprava přináší několik výrazných výhod, které souvisejí s jejím specifickým konstrukčním uspořádáním. Díky umístění hnacího hřídele nad osou kol poskytuje vozidlu výrazně zvýšenou výšku, což zlepšuje průchodnost terénem a schopnost překonávat překážky. Vyšší výška v kombinaci s robustní konstrukcí umožňuje vozidlu pohybovat se i v náročných podmínkách, kde by běžná tuhá náprava nestačila. Další výhodou portálové nápravy je využití kolových redukcí, které převádějí točivý moment do pomalejších otáček kol, čímž zvyšují dostupnou hnací sílu. To je výhodné zejména při jízdě v těžkém terénu nebo při překonávání prudkých stoupání.

Tato náprava má však i několik výrazných nevýhod. Její konstrukce je složitější než u standardních tuhých náprav, protože obsahuje kolové redukce a specifické uspořádání převodových prvků. Tato složitost zvyšuje hmotnost celé nápravy a může přispět ke zvýšení celkové hmotnosti vozidla. Z těchto důvodů se portálové nápravy používají převážně tam, kde jejich přínosy převyšují nároky na servis a hmotnostní nevýhody. Například vojenské transportéry, expediční vozy a speciální nákladní vozidla.

Shrnutí

Portálová náprava je varianta tuhé nápravy, u níž jsou diferenciál a hnací hřídel umístěny nad osou kol díky použití kolových redukcí. Tím se zvyšuje světlá výška vozidla a zlepšuje jeho schopnost překonávat náročný terén. Redukce zároveň zvyšují dostupnou hnací sílu, což je výhodné při jízdě do stoupání nebo v těžkých podmínkách. Nevýhodou je složitější konstrukce, vyšší hmotnost a náročnější údržba, což zvyšuje provozní náklady. (viz obr.4)



Obrázek 4: Portálová náprava

Zdroj: TATRA TRUCKS a.s., 2014

1.4 Nezávislé zavěšení kol

Podvozková soustava vozidla hraje klíčovou roli v oblasti bezpečnosti, jízdního komfortu a ovladatelnosti automobilu. Jedním z nejdůležitějších konstrukčních prvků této soustavy je zavěšení kol, které zajišťuje spojení mezi koly a nosnou částí vozidla (karoserií nebo rámem), přičemž umožňuje pohyb kol nezávislý na vertikálním pohybu karoserie. V současné automobilové konstrukci se stále více uplatňuje tzv. nezávislé zavěšení kol, které umožňuje každému kolu pohybovat se samostatně, bez přímého mechanického spojení s protilehlým kolem na stejné nápravě.

Nezávislé zavěšení kol významně zlepšuje jízdní vlastnosti, stabilitu vozidla a komfort cestujících. Díky schopnosti každého kola reagovat samostatně na nerovnosti vozovky je zajištěn lepší kontakt pneumatik s vozovkou a tím i lepší přenos sil. Tento princip je dnes široce používán u osobních vozidel, sportovních automobilů, luxusních SUV a některých užitkových vozů.

Historicky se první konstrukce nezávislého zavěšení začaly objevovat ve 20. a 30. letech 20. století, přičemž významný pokrok přinesla konstrukce McPhersonovy vzpěry, která umožnila jednoduchou a kompaktní konstrukci přední nápravy. Od té doby se vyvinula celá řada různých systémů. Od jednoduchých jednoramenných řešení až po složitá víceprvková zavěšení s optimalizovanou kinematikou.

Typy nezávislého zavěšení:

- McPhersonovo zavěšení
- Lichoběžníkové rameno
- Víceprvkové zavěšení
- Zadní náprava s vlečenými rameny

1.4.1 McPhersonovo zavěšení

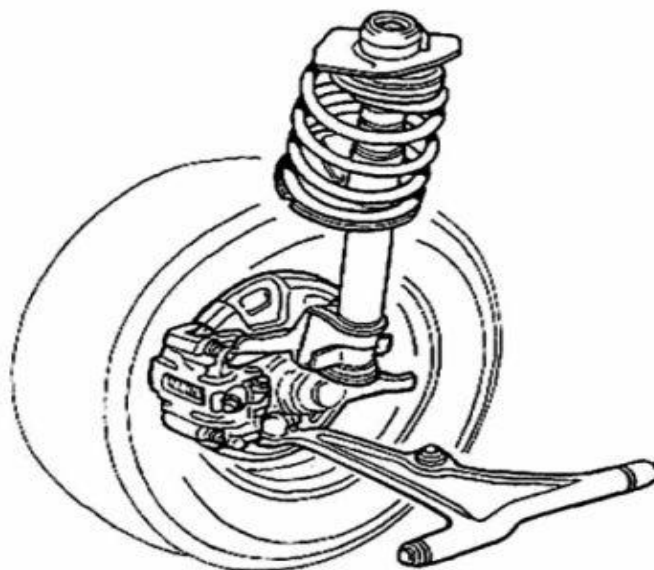
Toto zavěšení představuje typ nezávislého zavěšení kol, který využívá kombinaci tlumiče a vinuté pružiny integrované do jediné vzpěry, jež současně slouží jako nosný i tlumicí prvek. Díky této konstrukci se může každé kolo pohybovat nezávisle na ostatních, což pozitivně ovlivňuje jízdní komfort, stabilitu a schopnost vozidla přizpůsobit se nerovnostem vozovky. Systém je navržen tak, aby zabíral minimum prostoru, což je výhodné zejména u vozidel s pohonem předních kol.

Mezi hlavní výhody McPhersonova zavěšení patří jeho kompaktní konstrukce, která umožňuje efektivnější využití prostoru v motorovém prostoru, nižší hmotnost přispívající k lepší spotřebě paliva a celková jednoduchost, díky níž je výroba i údržba méně nákladná.

Nevýhodou je zvýšené namáhání ložisek a horního uložení vzpěry, protože většina sil působících na kolo se přenáší právě prostřednictvím této jediné konstrukční jednotky.

Shrnutí:

McPhersonovo zavěšení je efektivní, prostorově úsporné a ekonomické řešení nezávislého zavěšení kol, které díky svým konstrukčním výhodám nachází široké uplatnění v automobilovém průmyslu. Přestože vykazuje určitá omezení z hlediska kinematické přesnosti, ale jeho praktické přednosti z něj činí jednu z nejpopulárnějších konstrukcí moderních vozidel (viz obr.5).



Obrázek 5: Přední náprava McPherson

Zdroj: autolexicon, 2025

1.4.2 Víceprvkové zavěšení kol

Toto zavěšení představuje pokročilý typ nezávislého zavěšení, který využívá tři až pět samostatných ramen k uchycení každého kola k podvozku vozidla. Tato ramena mohou být orientována podélně i příčně, což umožňuje přesné řízení pohybu kola ve všech směrech. Systém vznikl vývojem z lichoběžníkového zavěšení s cílem dále zlepšit jízdní vlastnosti, stabilitu a komfort. Víceprvková konstrukce poskytuje konstruktérům vysokou míru flexibility při optimalizaci kinematiky kola, a tím umožňuje dosáhnout lepší trakce, minimální změny geometrie kol při propružení a jistého jízdního chování i ve vyšších rychlostech.

Mezi největší výhody víceprvkového zavěšení patří jeho vysoká kinematická přesnost. Díky samostatným ramenům lze efektivně oddělit podélné a příčné síly přenášené od kol do karoserie, což přispívá k vyšší stabilitě, komfortu jízdy a lepší ovladatelnosti. Systém se také lépe přizpůsobuje změnám v terénu či dynamickým zatížením, protože jednotlivá ramena mohou pracovat nezávisle a řídit pohyb kola s větší přesností než jednodušší konstrukce.

Víceprvkové zavěšení má opět i několik nevýhod. Je konstrukčně složitější a finančně náročnější jak na výrobu, tak na servisní zásahy. Vyžaduje také více prostoru v zástavbě vozidla, což může omezovat konstrukční možnosti karoserie nebo zavazadlového prostoru. Větší počet kloubů, čepů a ramen zvyšuje nároky na údržbu a může vést k vyšším provozním nákladům, pokud není systém správně servisován.

Tento typ zavěšení se proto nejčastěji používá u velice drahých vozidel, sportovních automobilů a některých typů SUV, kde je prioritou kombinace vysoké stability, přesné ovladatelnosti a jízdního komfortu. Typickými příklady jsou modely značek Audi, BMW nebo Mercedes-Benz.

Shrnutí:

Víceprvkové zavěšení kol je moderní a technicky vyspělý systém, který poskytuje vynikající jízdní vlastnosti, vysokou stabilitu a komfort. Přestože je jeho vývoj, výroba i údržba nákladnější než u jednodušších konstrukcí, jeho výhody z něj činí preferovanou volbu zejména pro sportovní a

prémiová vozidla, kde je kladen důraz na precizní ovladatelnost a dynamické schopnosti (viz.obr.6).



Obrázek 6: Přední víceprvková náprava

Zdroj: autolexicon, 2025

1.4.3 Zadní náprava s vlečenými rameny (kliková náprava)

Náprava s vlečenými rameny představuje typ polonezávislého zavěšení kol, u něhož je každé kolo uchyceno na podélném rameni připojeném přední částí ke karoserii vozidla a zadní částí k náboji kola. Pohyb kol je do určité míry nezávislý, avšak vzájemně propojený prostřednictvím příčné torzní tyče nebo torzní příčky, která zajišťuje potřebnou torzní tuhost. Tato konstrukce umožňuje relativně jednoduché a prostorově nenáročné řešení zadní nápravy, což je důvodem jejího častého využití v kompaktních a středně velkých vozidlech (viz obr.7).

Mezi hlavní výhody nápravy s vlečenými rameny patří její jednoduchá a lehká konstrukce, která přispívá k celkovému snížení hmotnosti vozidla. Díky kompaktnímu uspořádání umožňuje efektivní využití prostoru v zadní části vozu, což je výhodné například při umístění palivové nádrže nebo zvětšování zavazadlového prostoru. Významným pozitivem jsou také nízké výrobní náklady, které se příznivě promítají do konečné ceny vozidla a zjednodušují proces údržby.

K nevýhodám tohoto typu zavěšení patří omezené kinematické vlastnosti. Při propružení dochází ke změnám odklonu a sbíhavosti kol, což může mít negativní dopad na stabilitu a jízdní vlastnosti. Charakteristika sbíhavosti při působení příčných sil bývá přetáčivá, což může ovlivnit chování vozidla v zatáčkách. Dalším omezením je malá možnost nastavování geometrie kol i tuhosti odpružení, což komplikuje ladění jízdních vlastností u sportovně orientovaných vozidel.

Shrnutí:

Náprava s vlečenými rameny představuje kompromis mezi jednoduchou konstrukcí, nízkými výrobními náklady a uspokojivými jízdními vlastnostmi. Ačkoli nedosahuje kinematické přesnosti modernějších nezávislých systémů, její výhody činí toto řešení oblíbeným zejména v segmentu kompaktních vozidel, kde je důraz kladen na nízké náklady, funkčnost a úspornou zástavbu. Využívá se u vozidel s pohonem předních kol jako je Škoda, Volkswagen, Opel.



Obrázek 7: Náprava s vlečenými rameny

Zdroj: autolexicon, 2025

1.4.4 De Dionova náprava

De Dionova náprava představuje specifický typ zadní hnací nápravy, který kombinuje prvky tuhé nápravy a nezávislého zavěšení. Název nese po svém vynálezci, hraběti Jules-Albertovi de Dion, který tento koncept poprvé využil v roce 1896. Charakteristickým rysem této konstrukce je pevné spojení obou kol tuhým nosníkem, zatímco diferenciál je upevněn přímo ke karoserii vozidla, nikoli k samotné nápravě. Tím se zásadně liší od klasické tuhé nápravy a dochází k výraznému snížení neodpružené hmotnosti, což má pozitivní vliv na jízdní komfort a stabilitu při přejezdu nerovností.

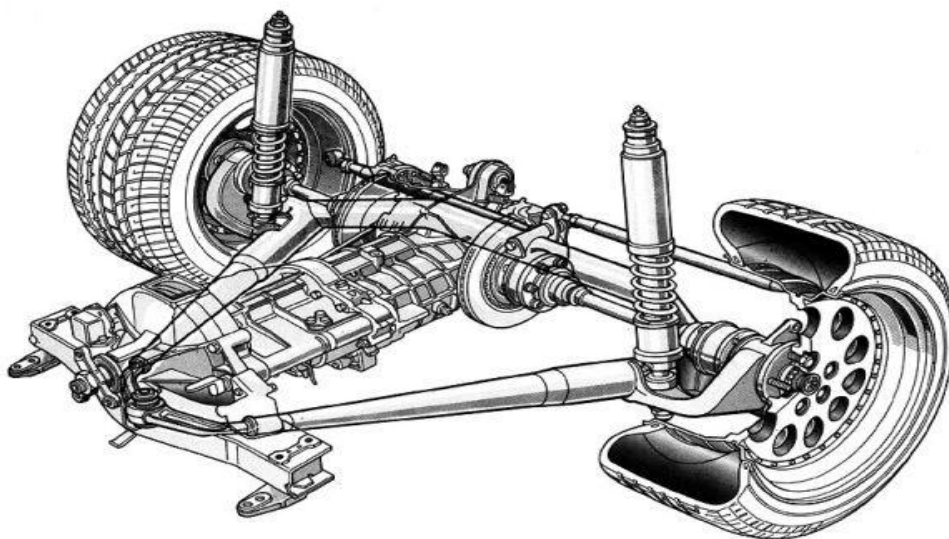
Mezi hlavní výhody De Dionovy nápravy patří nižší neodpružená hmotnost, protože diferenciál není součástí pohybujícího se nosníku, což přispívá ke zlepšení komfortu i jízdní stability. Konstrukce zároveň udržuje konstantní vzájemnou geometrii kol díky pevné tuhosti spojujícího nosníku, což má pozitivní vliv na chování vozidla v zatáčkách. Tento systém tak nabízí výhodnou kombinaci přesného vedení kol a zlepšené odezvy podvozku na nerovnosti.

Bohužel i De Dionova náprava má několik nevýhod. Je konstrukčně složitější než běžná tuhá náprava, protože vyžaduje kloubové poloosy, pevné uchycení diferenciálu ke karoserii a přesné mechanické vedení. Tato složitost se odráží také ve vyšších výrobních nákladech a větších požadavcích na zástavbový prostor, zejména kvůli poloosám a pohybu nápravy vzhledem k diferenciálu.

Shrnutí:

De Dionova náprava představuje konstrukční kompromis mezi tuhým a nezávislým zavěšením kol. Nabízí přesnou geometrii kol, nižší neodpruženou hmotnost a lepší jízdní komfort než klasická tuhá náprava. I když již není běžně používána, sehrála důležitou roli ve vývoji automobilové techniky a dodnes je ceněna pro svou technickou vyváženost. Proto si našla

uplatnění ve sportovních vozidlech Alfa Romeo, Lotus ale i v některých nákladních a terénních vozidlech (viz obr.8).



Obrázek 8: Náprava s vlečenými rameny

Zdroj: autolexicon, 2025

1.4.5 Lichoběžníkové zavěšení kol

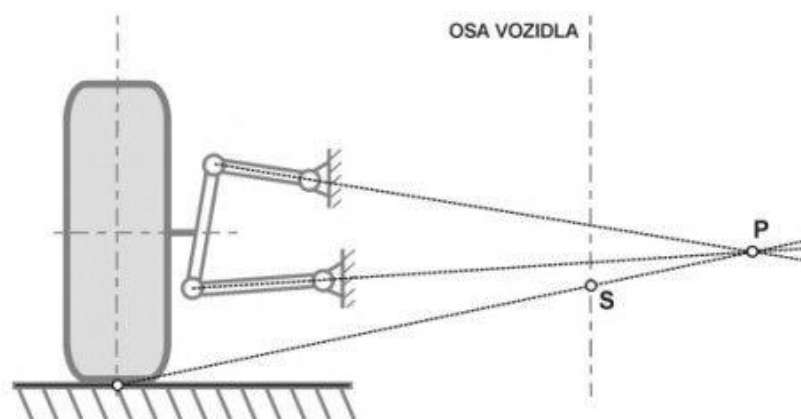
Lichoběžníkové zavěšení kol, často označované jako dvojité příčné zavěšení nebo *double wishbone*, představuje typ nezávislého zavěšení, který je využíván zejména u sportovních, luxusních, terénních a výkonných vozidel. Systém je tvořen dvojicí příčných ramen horním a spodním, která mají tvar písmene „A“ nebo tvoří lichoběžníkovou strukturu. Tato ramena spojují těhlici nesoucí kolo s karoserií či rámem vozidla a umožňují její přesné vedení při propružení. Díky tomu lze účinně minimalizovat změny geometrie kol během jízdy a dosáhnout velmi stabilního a jistého chování vozidla i ve vysokých rychlostech (viz obr.9).

Konstrukce lichoběžníkového zavěšení zahrnuje dvě příčná ramena, kulové čepy umožňující natáčení kola, těhlici, a zpravidla také samostatný tlumič a vinutou pružinu. Toto uspořádání poskytuje konstruktérům široké možnosti ladění, protože umožňuje přesné nastavení klíčových geometrických parametrů, jako je odklon (*camber*), sbíhavost (*toe*) apod. Díky tomuto vysokému stupni nastavitelnosti lze optimalizovat kinematické i dynamické vlastnosti podvozku podle požadavků na komfort, sportovní chování nebo terénní schopnosti.

Mezi hlavní výhody lichoběžníkového zavěšení patří dobrá ovladatelnost a stabilita, která vyplývá z přesného vedení kola a minimálních změn odklonu při propružení. Systém také umožňuje nezávislý pohyb každého kola, což zlepšuje jízdní komfort a snižuje přenos vibrací na karoserii. Díky flexibilitě v nastavení geometrie lze tento typ zavěšení snadno přizpůsobit specifickým požadavkům, například pro sportovní jízdu nebo závodní účely.

Nevýhodou lichoběžníkového zavěšení je jeho konstrukční složitost, která zvyšuje výrobní náklady a nároky na prostor. Zástavba dvou ramen vyžaduje více místa v motorovém nebo zavazadlovém prostoru, což může omezovat designové možnosti vozidla. Dalším negativem je vyšší hmotnost oproti jednodušším systémům zavěšení, což může nepříznivě ovlivnit spotřebu paliva nebo celkovou hmotnost vozidla.

Lichoběžníkové zavěšení se využívá především u vozidel, kde je kladen důraz na jízdní vlastnosti, přesné řízení a stabilitu. Typicky se s ním lze setkat u sportovních a luxusních automobilů, některých terénních vozidel, ale také u závodních strojů, například ve Formuli 1. Mezi značky využívající tento systém patří například Honda, BMW, Mercedes-Benz nebo různé buggy a off-road speciály.



Obrázek 9: Přední lichoběžníková náprava

Zdroj: autolexicon, 2025

2 Praktická část

Pro kinematickou a dynamickou analýzu byl použit software MSC Adams/View, který je průmyslovým standardem pro simulaci pohybu a sil v mechanických systémech. MSC Adams (*Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems*) je profesionální nástroj určený pro simulaci více tělesové dynamiky (*Multibody Dynamics* – MBD). Slouží k modelování, analýze a vizualizaci pohybu složitých mechanických sestav a umožňuje detailně studovat jejich kinematické i dynamické chování. Software vyvíjí společnost MSC Software Corporation, která je dnes součástí skupiny Hexagon AB. Díky své přesnosti, univerzálnosti a dlouhodobému vývoji je Adams považován za průmyslový standard, používaný zejména v automobilovém, strojírenském, leteckém a energetickém průmyslu.

Na Vysoké škole polytechnické Jihlava však software MSC Adams zatím není zaveden jako běžná součást výuky. V současné době je dostupný pouze ve zkušební, testovací fázi prostřednictvím vzdálené plochy školního serveru. Do budoucna se předpokládá jeho plná integrace do výuky a praktických cvičení, což studentům umožní podrobnější práci s vícetělesovými modely a rozšíří možnosti využití simulačních nástrojů v oblasti mechaniky, konstrukce a virtuální analýzy.

Součástí softwaru MSC Adams je několik vzájemně propojených modulů, které společně umožňují komplexní modelování a analýzu mechanických systémů. Základní částí je **Adams/View**, což je grafické uživatelské prostředí sloužící k tvorbě geometrie modelu, definici vazeb, silových působení a pohybů. Samotné numerické řešení rovnic pohybu zajišťuje modul Adams/Solver, který představuje výpočetní jádro celého systému. Pro následnou vizualizaci, animaci a zpracování výsledků slouží Adams/PostProcessor, jenž umožňuje přehledné zobrazení simulace i detailní analýzu jednotlivých veličin.

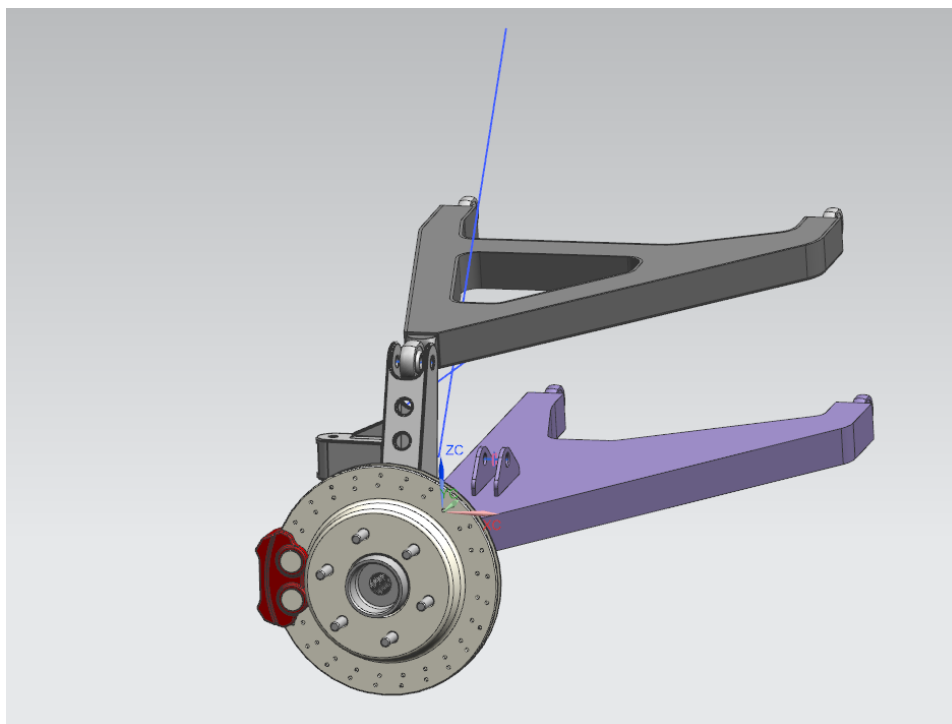
Kromě základních modulů jsou k dispozici také specializované nadstavby určené pro konkrétní inženýrské aplikace. Modul Adams/Car je určen pro simulace vozidel a specifických jízdních manévřů. Rozšíření Adams/Flex umožňuje zahrnout do modelu pružná tělesa vytvořená na základě FEA analýz, což je výhodné při simulacích, kde hraje významnou roli deformace konstrukčních prvků. Modul Adams/Controls slouží k propojení mechanického modelu s řídicími systémy, například s programem MATLAB/Simulink, a umožňuje tak analyzovat chování systému včetně řízení.

Použití softwaru MSC Adams přináší řadu výhod. Umožňuje vytvářet virtuální prototypy a ověřovat chování systému ještě před výrobou fyzického modelu, čímž snižuje náklady na vývoj. Nabízí detailní přehled o kinematických a dynamických veličinách, jako jsou síly, momenty, zrychlení nebo změny polohy, což umožňuje důkladně analyzovat chování jednotlivých komponent. Parametry modelu lze snadno měnit, což poskytuje možnost rychle testovat různé varianty řešení a porovnávat jejich vliv na výsledné vlastnosti systému. Významnou předností je také možnost vizualizace a animace výsledků, která usnadňuje prezentaci simulací i identifikaci případných problémů v modelu.

Model použitý v této práci vychází z dostupné dokumentace vozidla XR-Buggy (Göttler, 2023), které je vybaveno přední nápravou s dvojitým lichoběžníkovým zavěšením. Tento typ zavěšení využívá dvě příčná ramena, horní a spodní, která zajišťují vedení kola a umožňují jeho svislý pohyb při přejezdu nerovností.

2.1.1 První krok

Nejprve se musel vytvořit prostorový 3D model zavěšení v softwaru Siemens NX. Pro tuto práci byl využit model poskytnutý panem Dominikem Göttlerem, hlavním konstruktérem vozidla XR-Buggy. Následně bylo nutné doplnit referenční body definující jednotlivé souřadné osy (x, y, z). Tyto body jsou nezbytné pro následné vytvoření vazeb, přidání tlumiče, definici pohybů a celkové kinematické struktury v prostředí MSC Adams (viz obr.10).



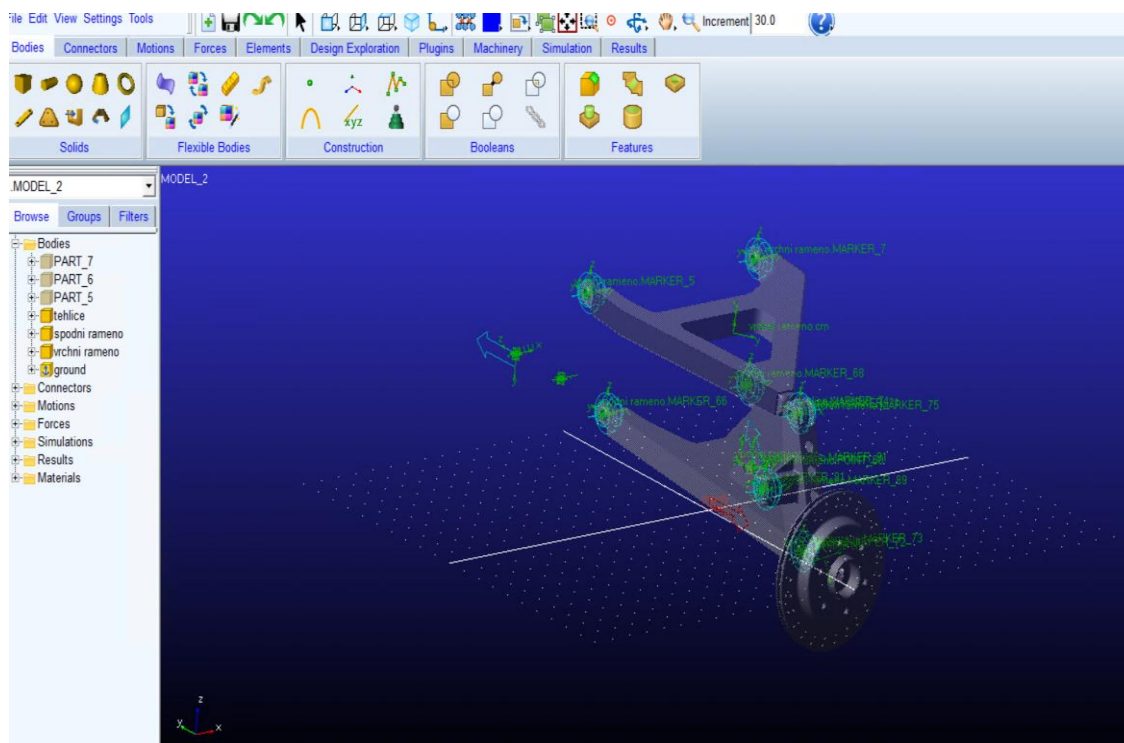
Obrázek 10: 3D model přední nápravy

Zdroj: Göttler, 2023, vlastní úprava

2.1.2 Druhý krok

Po dokončení úprav v softwaru Siemens NX byl celý model exportován do formátu .step a následně importován do prostředí Adams/View. Import geometrie představuje klíčovou fázi, protože umožňuje převést skutečné konstrukční prvky do digitální podoby vhodné pro simulační analýzu. Po načtení modelu bylo nutné provést základní přípravu geometrie, včetně úpravy orientace modelu, kontroly jednotek a ověření správného rozpoznání jednotlivých těles.

Následně byly v prostředí Adams/View vytvořeny specifické referenční body, které slouží jako definiční uzly pro následné modelování kinematických vazeb. Tyto body představují místa, kde se v reálném závěsu nacházejí čepy ramen, uchycení tlumiče, uložení náboje kola, kloubová spojení. Správná definice těchto bodů je zásadní pro to, aby bylo možné přesně vytvářet jednotlivé typy vazeb (joints), jako jsou kloubové spoje, rotační vazby nebo posuvné pohyby (viz obr.11)



Obrázek 11: Model přední nápravy v programu ADAMS View

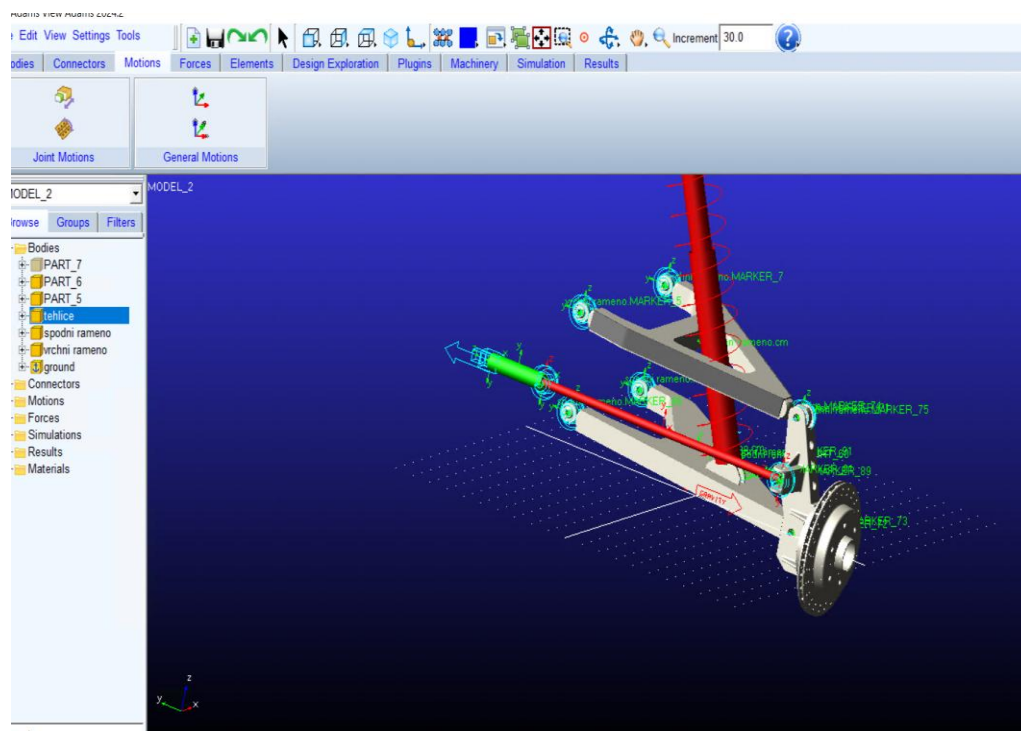
Zdroj: vlastní tvorba

2.1.3 Třetí krok

Byl vytvořen model tlumiče a mechanismu řízení, přičemž pro definici tlumiče byl v prostředí Adams/View použit prvek Translational Spring-Damper, který umožňuje simulovat kombinované působení pružiny a tlumiče v podélném směru. Pro jeho správnou funkci bylo nutné vytvořit dva referenční body, jeden umístěný na příslušném rameni zavěšení a druhý na karoserii (zemi). Vzdálenost mezi těmito body byla nastavena na 691,5 mm, což odpovídá katalogovým rozměrům skutečného tlumiče uvedeným v technické dokumentaci.

Současně bylo nutné vytvořit model základního řízení závěsu. Pro jeho konstrukci byly definovány další pomocné body, které slouží jako uzly pro uchycení řídicích tyčí. Následně byly vytvořeny dvě tyče, jež simulují skutečné táhla řízení a přenášejí pohyb od řízení na těhlici kola. Aby byl zajištěn správný směr pohybu a nedocházelo při simulaci k nežádoucím deformacím či volným pohybům sestavy, byl pomocí funkce Connectors definován jednosměrný řízený pohyb. Tento prvek omezuje volnost pohybu řízení pouze na požadovanou trajektorii a zabraňuje odchylkám, které by mohly negativně ovlivnit výsledky simulační analýzy.

Tímto byla vytvořena základní struktura odpružení i řízení, která umožňuje provádět kinematické i dynamické simulace odpovídající reálnému chování závěsu kola (viz obr.12).



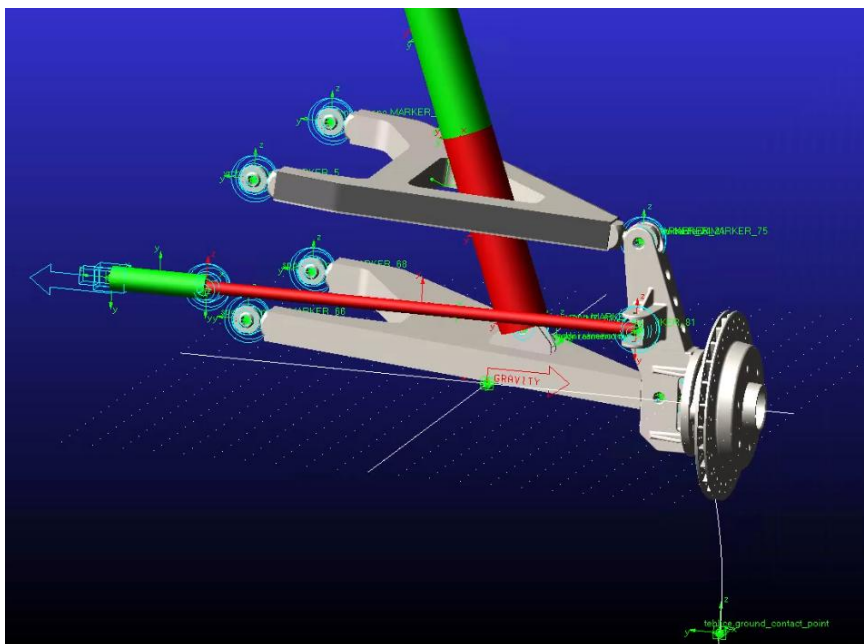
Obrázek 12: Model přední nápravy v programu ADAMS View

Zdroj: vlastní tvorba

2.1.4 Čtvrtý krok

Další činností bylo vytvoření pneumatiky do modelu. V ideálním případě by byla pneumatika reprezentována jako samostatný prvek s definovanými fyzikálními vlastnostmi, případně by byl využit specializovaný model pneumatik dostupný v nadstavbě Adams/Car. Vzhledem k technickým omezením a problémům s kompatibilitou v prostředí testovací verze programu však nebylo možné tuto funkci plnohodnotně využít. Proto byla pneumatika v modelu nahrazena zjednodušenou reprezentací ve formě jediného referenčního bodu, který simuluje její polohu a pohyb.

Aby bylo možné analyzovat trajektorii tohoto bodu během simulace, byla následně vytvořena *spline* křivka, která jeho pohyb vykresluje v prostoru. Toto řešení umožňuje vizuálně sledovat dynamiku pohybu kola a ověřit, zda modelované zavěšení pracuje správně – například zda nedochází k nežádoucím změnám geometrie, kolizím nebo nečekaným deformacím pohybu. Přestože se jedná o zjednodušenou variantu, poskytuje dostatečné informace pro posouzení kinematiky závěsu kola i simulace (viz obr.13).



Obrázek 13: Model přední nápravy v programu ADAMS View

Zdroj: vlastní tvorba

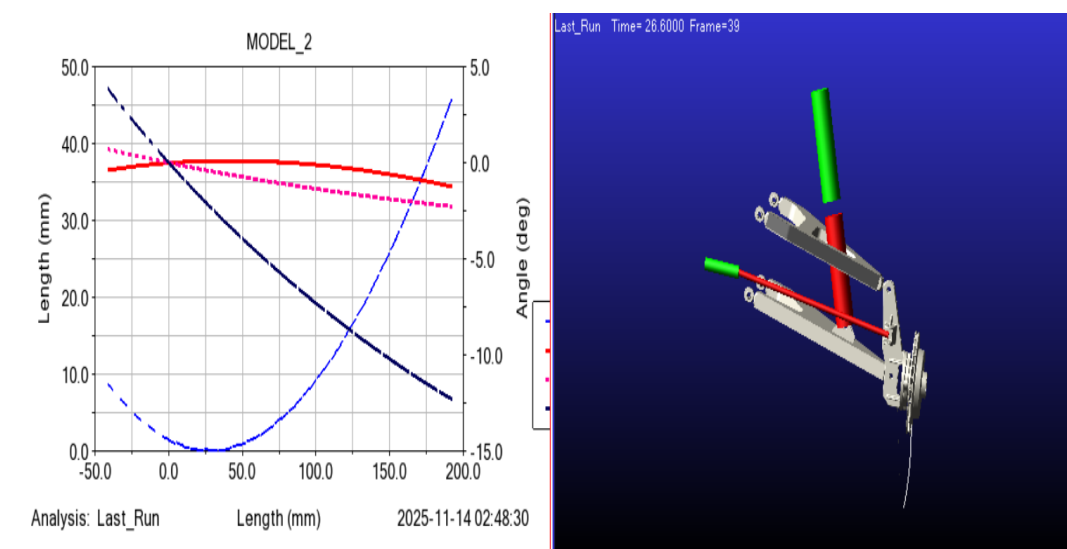
2.1.5 Pátý krok

Poslední úlohou bylo vytvoření samotné simulace v prostředí Adams/View. Nejdříve bylo nutné určit *marker*, jehož pohyb nebo zatížení chceme během simulace sledovat. V tomto případě byl zvolen *marker* označující Ground Contact Point (pojmenování poloměru pneumatiky), který v modelu představuje zjednodušenou náhradu pneumatiky a umožňuje sledovat její trajektorii během propružení.

Po výběru příslušného *markeru* se pomocí kontextového menu (pravým tlačítkem myši) zvolila položka Measure, která slouží k definici požadovaných měřených veličin. Uživatel zde zadá parametry, které chce během simulace sledovat například polohu, rychlost, zrychlení, zatěžující síly nebo momenty. Po nastavení měření a ověření všech vazeb a silových prvků lze spustit samotnou simulaci.

Po jejím dokončení jsou výsledky dostupné v záložce Results, v modulu Postprocessor. Ten umožňuje detailní vizualizaci výsledků, vykreslení trajektorií, grafů a animaci pohybu. Díky tomu je možné přehledně analyzovat chování *markeru* i dalších prvků modelu, porovnávat jednotlivé simulace a odhalit případné nedostatky v konstrukci nebo nastavení geometrie závěsu. Tvarování kontaktu mezi pneumatikou a vozovkou je hlavním důvodem, proč je *camber* tak významným parametrem závěsu kol. Správně nastavený *camber* umožňuje udržet optimální styčnou plochu pneumatiky s vozovkou i při zatížení v zatáčkách, což má přímý dopad na stabilitu a jízdní vlastnosti vozidla.

Správně zvolený *camber* poskytuje několik klíčových výhod: zlepšuje přilnavost v zatáčkách, zajišťuje klidnější chování vozu při vyšších rychlostech, snižuje tendenci vozidla odchylovat se od ideální stopy a zlepšuje odezvu řízení. Díky tomu má *camber* zásadní vliv na bezpečnost i dynamiku jízdy.



Obrázek 14: grafy měření

Zdroj: vlastní tvorba

2.2 Kinematika

Mým úkolem bylo analyzování kinematiky pro typické provozní podmínky. Vykreslil jsem úhel natočení, úhel sbíhavosti, záklon rejdové osy a změnu rozchodu kol.

2.2.1 Camber angle (odklon kola)

Je úhel, pod kterým je kolo nakloněné vůči svislé ose vozidla, když se na něj díváme zpředu. Zjednodušeně řečeno, jde o to, jestli je horní část kola nakloněná dovnitř, ven, nebo stojí úplně kolmo k vozovce. Laicky si to lze představit jako pozici kola u nákupního vozíku, někdy jsou kolečka rovná, jindy jsou nahoře trochu nakloněná. U auta je tento úhel záměrný a velmi důležitý, protože ovlivňuje to, jak velkou část plochy pneumatiky se skutečně dotýká vozovky při různých jízdních situacích.

Camber může být negativní, nulový nebo pozitivní.

Negativní *camber* znamená, že horní část kola je nakloněná dovnitř k vozidlu. To je nejčastější a nejdůležitější typ odklonu. Umožňuje, aby se pneumatika v zatáčce lépe „opřela“ o vozovku a vytvořila větší přilnavost. Když auto zatočí, karoserie se nakloní a kolo, které je zvenku zatáčky, se vlivem zatížení narovná. Díky tomu se celá plocha pneumatiky opře o silnici, což přináší lepší stabilitu a větší jistotu v řízení.

Pozitivní *camber* je, když horní část kola naklání ven. Toto se dnes používá jen výjimečně, například u některých terénních nebo užitkových vozidel, kde kvůli specifickému zavěšení pomáhá snížit namáhání některých komponent.

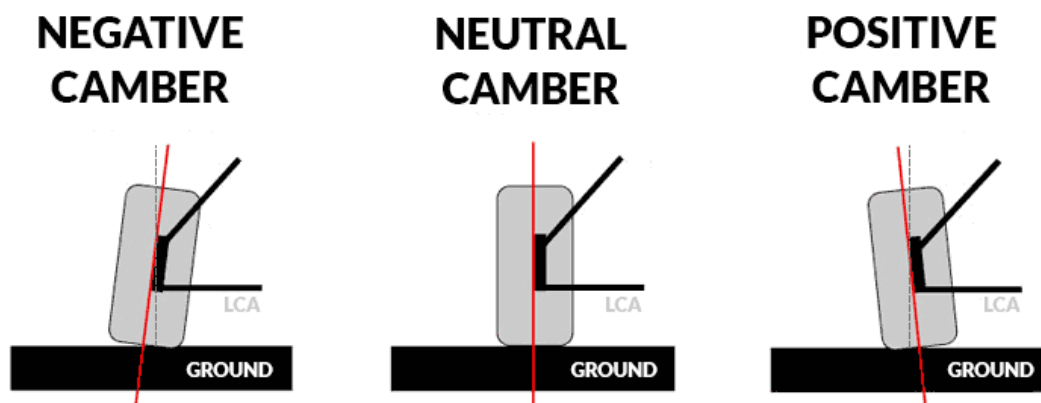
V ideální konstrukci by kolo mělo mít vždy takový *camber*, aby se pneumatika co nejlépe dotýkala vozovky. Jenže podvozek pracuje v různých situacích, například když auto zatáčí, brzdí, přenáší hmotnost dopředu či do strany a tlumiče se neustále pohybují. *Camber* se při těchto pohybech mění, a právě to je důvod, proč se nastavuje už v základní poloze tak, aby se v těch klíčových momentech chovalo správně. Běžná osobní auta mají obvykle jen mírně negativní hodnoty, protože prioritou je rovnoměrné opotřebení pneumatik a stabilita při přímé jízdě.

Sportovní auta mívají *camber* více negativní, protože jejich cílem je maximální přilnavost v zatáčkách.

Ale příliš velký negativní *camber* vede k nerovnoměrnému opotřebení pneumatik, kdy se rychleji sjíždí vnitřní strana běhounu. Proto je vždy potřeba hledat kompromis mezi výkonem, stabilitou a životností pneumatik.

Správně zvolený *camber* poskytuje několik klíčových výhod: zlepšuje přilnavost v zatáčkách, zajišťuje klidnější chování vozu při vyšších rychlostech, snižuje tendenci vozidla odchylovat se od ideální stopy a zlepšuje odezvu řízení. Díky tomu má *camber* zásadní vliv na bezpečnost i dynamiku jízdy.

Celkově tedy *camber angle* je jeden z klíčových parametrů zavěšení, který výrazně ovlivňuje to, jak auto zatáčí, jak drží stopu a jak se chová na různém povrchu. Dobře nastavený *camber* dokáže udělat auto předvídatelnější, bezpečnější a příjemnější na řízení, zatímco špatně nastavený *camber* se rychle projeví nejistým chováním nebo rychlým opotřebením pneumatik. Proto je jeho analýza důležitou součástí vývoje i hodnocení podvozku moderních vozidel (viz obr.15).



Obrázek 15: Camber angle

Zdroj: <https://www.comeanddriveit.com/suspension/camber-caster-toe>

Měření znázorňuje, jak se mění *camber angle*, tedy odklon kola od svislé osy, v závislosti na propružení zavěšení. Na levé straně je graf, který ukazuje průběh tohoto úhlu v celém rozsahu zdvihu tlumiče, a na pravé straně je zobrazeno 3 D provedení zavěšení v jedné ze simulovaných poloh.

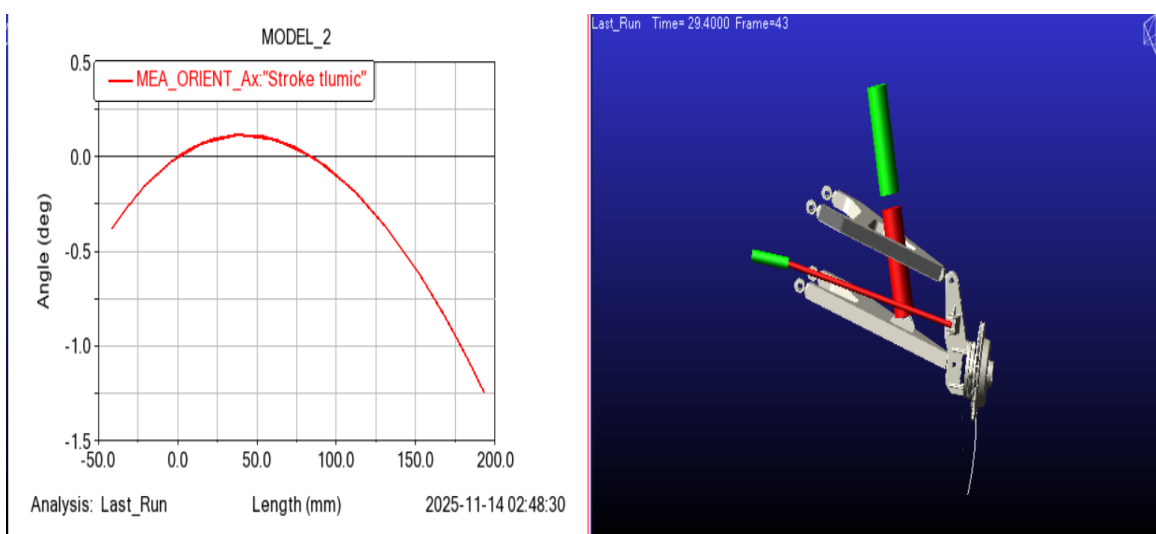
Křivka začíná v oblasti odlehčeného kola, tedy tam, kde tlumič pracuje nad svou běžnou polohou. V této části má kolo mírně negativní *camber*. Horní část kola je nakloněná dovnitř směrem k vozidlu. Tento stav je běžný u většiny zavěšení, protože geometrií ramen je dáno, že náboj kola při vyvěšení opisuje takový pohyb, který vede k většímu naklonění. Jakmile se kolo dostane do polohy, která odpovídá běžnému zatížení vozidla, *camber* se prakticky vyrovnává. Křivka ukazuje, že někde mezi 60 a 70 mm propružení se *camber* pohybuje kolem nuly, dokonce může být lehce pozitivní. To znamená, že kolo je téměř kolmé k vozovce, což je ideální pro rovnoměrný kontakt pneumatiky s povrchem silnice a tím i pro stabilitu při běžné jízdě.

Tento „nulový“ úsek křivky je pro jízdní chování klíčový. V této oblasti auto tráví většinu času, při jízdě po rovné silnici, při mírném brzdění nebo při průjezdu menších nerovností. Pokud je v této části *camber* stabilní, řidič má jistotu, že auto reaguje předvídatelně a že pneumatika pracuje

přesně tak, jak má. Právě zde se ukazuje správný návrh zavěšení, protože minimalizace změn *camberu* v této oblasti vede k lepší stabilitě a menšímu bočnímu skluzu.

Jakmile však propružení pokračuje do hlubší části zdvihu začíná *camber* opět výrazně klesat. V oblasti kolem 200 mm propružení je už silně negativní, což ukazuje na to, že kolo je při extrémním zatížení nakloněné výrazně dovnitř. Je to přirozený důsledek geometrie zavěšení: jak se ramena dostávají do krajních poloh, začínají kolo více „stahovat“ a úhel odklonu prudce narůstá. Tento stav není určen pro běžnou jízdu, ale ukazuje, jak se zavěšení chová v extrému a zda stále udržuje smysluplnou geometrii kontaktu pneumatiky s vozovkou.

Celkově lze říct, že průběh *camber angle* je u tohoto zavěšení dobře vyvážený. V běžném pracovním rozsahu je úhel minimální a zajišťuje stabilní kontakt pneumatiky s vozovkou, zatímco při hlubokém propružení přechází do většího negativního *camberu*, což je typické chování způsobené konstrukcí ramen a jejich uchycením. (viz obr.16).



Obrázek 16: Camber angel

Zdroj: vlastní tvorba

2.2.2 Toe angle (úhel sbíhavosti)

Je to úhel, který popisuje natočení kola vůči podélné ose vozidla při pohledu shora. Jinými slovy *toe* udává, zda jsou kola v klidové poloze mírně natočena směrem k sobě nebo od sebe. Tento úhel je důležitý parametr podvozkové geometrie, protože i malé odchylky v řádu desetin stupně mohou výrazně ovlivnit chování vozidla.

Pokud jsou přední hrany kol natočeny k sobě, hovoříme o sbíhavosti (*toe-in*). Naopak pokud jsou natočeny od sebe, jde o rozbíhavost (*toe-out*). Ideální teoretický stav by byl $toe = 0^\circ$, tedy kola dokonale rovnoběžná, ale v praxi se této hodnoty téměř nepoužívá, protože vozidlo během jízdy není statické a působí na něj síly, deformují se pneumatiky i závěsy a řízení musí zůstat stabilní.

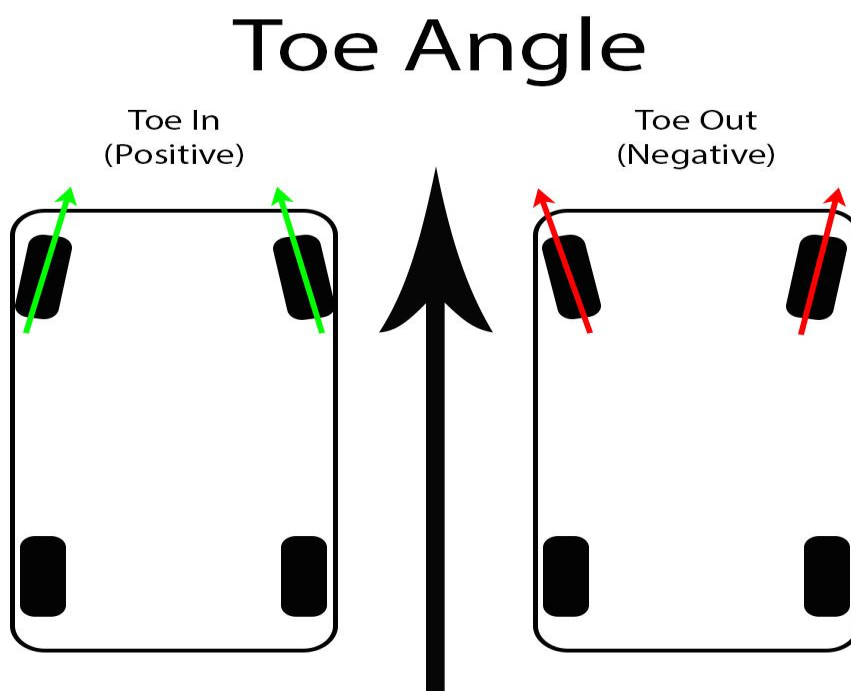
Toe angle se nastavuje především kvůli tomu, aby kompenzoval změny nastávající při jízdním zatížení. Jakmile vůz zrychluje, brzdí nebo zatáčí, mění se síly působící na zavěšení a pneumatiky se pod zatížením mírně deformují. Konstrukce podvozku je proto navržena tak, že statická hodnota *toe* není nulová, ale cíleně odchylována např. mírný *toe-in* na přední nápravě pomáhá kompenzovat tendenci kol se během jízdy roztáčet do *toe-out* vlivem vůlí, pružení a tažných sil.

Toe představuje důležitý geometrický parametr zavěšení kol, který má výrazný vliv na stabilitu, ovladatelnost a celkové jízdní chování vozidla. Na přední nápravě se obvykle používá mírný *toe-in*, který zvyšuje stabilitu v přímém směru a přispívá k tomu, že vozidlo „drží stopu“ bez nutnosti častých korekcí volantem. Naproti tomu *toe-out* zvyšuje agilitu vozidla a zlepšuje jeho ochotu zatáčet.

Na zadní nápravě se zpravidla nastavuje *toe-in*, protože přispívá k vyšší stabilitě vozidla při vyšších rychlostech i při dynamických manévrech, jako jsou rychlé změny směru nebo prudké vyhybací manévry. Správné nastavení *toe* je tedy klíčové pro bezpečné a předvídatelné chování vozidla v různých jízdních situacích.

Nesprávné nastavení *toe* může způsobit řadu problémů, například nerovnoměrné opotřebení pneumatik (každá desetina odchyly může výrazně zkrátit jejich životnost), zvýšení valivého odporu a spotřeby nebo nestabilitu při řízení. V extrémních případech může být vozidlo při vyšší rychlosti až neovladatelné. Proto se *toe* vždy seřizuje při geometrii kol a patří mezi nejsledovanější hodnoty při údržbě podvozku.

Toe angle tedy vyjadřuje nejen prosté natočení kol, ale především charakteristické chování vozidla při dynamické jízdě. Je to jeden z klíčových parametrů, který propojuje konstrukční návrh zavěšení s praktickým pocitem řidiče za volantem (viz obr.17).



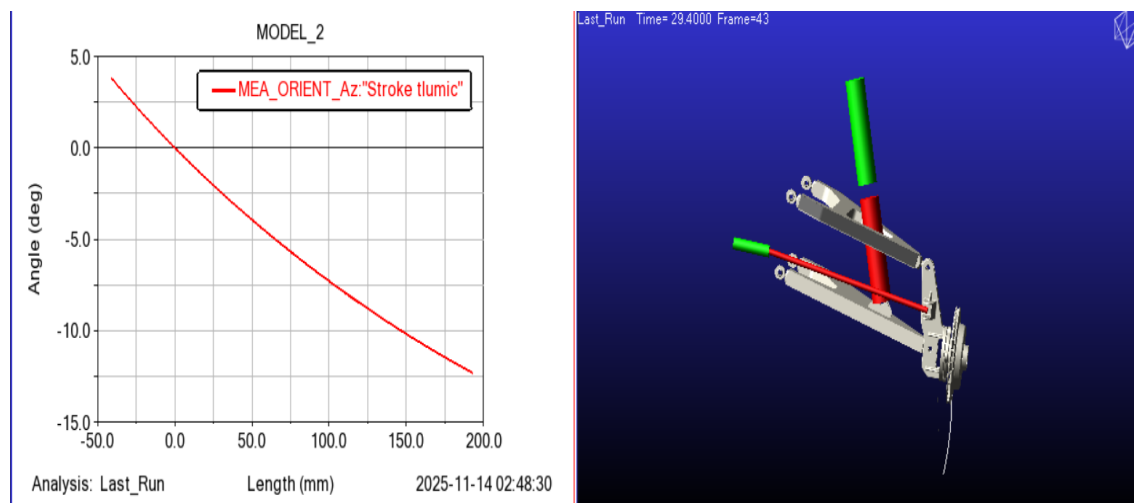
Obrázek 17: Toe angle

Zdroj: <https://help.summitracing.com/knowledgebase/article/SR-05257/en-us>

V mém měření je znázorněna změna *toe* úhlu (sbíhavosti kol) v závislosti na propružení zavěšení. *Toe* úhel je natočení kola při pohledu shora, tedy to, jestli jsou kola „špičkami“ lehce natočená k sobě (*toe-in*) nebo od sebe (*toe-out*). Tento parametr výrazně ovlivňuje stabilitu vozidla a jeho chování při nerovnostech i v zatáčkách. Graf ukazuje, že *toe* se během zdvihu tlumiče mění výrazně a prakticky lineárně.

V horní části zdvihu má kolo kladné hodnoty, což znamená výraznou sbíhavost. V této poloze by kolo mělo tendenci stabilizovat směr jízdy, protože se mírně „opírá“ proti druhému kolu. Takové nastavení může pomáhat udržet vozidlo rovně ale při příliš velké hodnotě zároveň zvyšuje odpor a opotřebení pneumatik. Jak zavěšení propružuje směrem dolů, sbíhavost postupně klesá. V oblasti zdvihu přechází *toe* z kladných hodnot, což je okamžik, kdy jsou kola vůči sobě dokonale rovnoběžná. To je běžná zóna, ve které se vůz pohybuje při běžné jízdě, takže nulová nebo jen mírně záporná sbíhavost může přispívat k rychlejší a citlivější odezvě řízení. Při větším propružení se *toe* dostává do záporných hodnot, tedy do *toe-out*, v nejspodnější části zdvihu. Takto velká rozbíhavost znamená, že se kola při silném propružení „rozevírají“ od sebe. V praxi by to způsobovalo citelné změny směru při přejezdu nerovností, znatelné tahání do volantu a nestabilitu v zatáčkách i při prudkém brzdění. Tak výrazný *bump-steer* (samovolné natáčení kol) obvykle naznačuje, že geometrie zavěšení nebo délky táhel řízení ještě nejsou optimalizované (viz obr.18).

Na pravé straně obrázku je vidět 3D model zavěšení.



Obrázek 18: Camber toe
Zdroj: vlastní tvorba

2.2.3 Caster angle (úhel rejdové osy)

Je jeden z klíčových parametrů geometrie předního zavěšení vozidla. Udává, jak moc je osa řízení (osa kolem níž se natáčí přední kolo) nakloněná dopředu nebo dozadu, když se na vozidlo díváme z boku. Jinými slovy, pokud si představíme čáru, kolem které se otáčí kolo při řízení, *caster* říká, zda tato čára „padá“ dopředu, nebo dozadu.

V moderních automobilech je běžné, že osa řízení je nakloněná dozadu, tedy že horní kulový čep je blíže k zadní části vozu než spodní. Takové nastavení se označuje jako kladný *caster* a využívá se téměř u všech nově vyráběných vozidel. Naopak záporný *caster* (osa nakloněná dopředu) se dnes prakticky nepoužívá, protože způsobuje nestabilitu a špatné samostředění řízení.

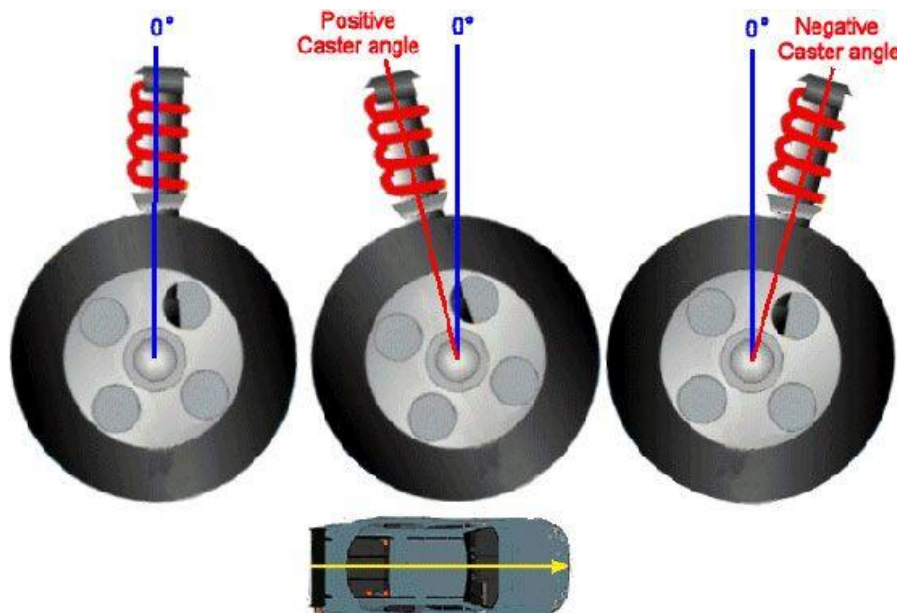
Caster má zásadní význam pro to, jak vozidlo drží směr, jak se chová volant při jízdě a jak řidič vnímá stabilitu. Díky kladnému *casteru* vzniká takzvaně samostředící efekt to znamená, že kolo se při jízdě samo snaží vrátit do rovné polohy. Je to podobný princip, jako když se pustí řídítka jízdního kola a vidlice je nakloněná a kolo má tendenci jet rovně. V autě tento efekt způsobuje,

že vůz na dálnici nevyžaduje neustálé korekce volantem. Čím větší je kladný *caster*, tím silnější je samostředicí moment, a tedy i stabilita (viz obr.19).

Dalším efektem *casteru* je to, že při zatočení dochází ke změně *camber* úhlu na jednotlivých kolech. To zlepšuje přilnavost v zatáčkách, protože vnější zatížené kolo získává dodatečný negativní *camber*, který zvětšuje styčnou plochu pneumatiky. V praxi to znamená jistější reakce při sportovní jízdě i rychlejší odezvu na řízení.

Caster však má i své limity. Pokud je příliš malý, vozidlo působí nestabilně a vyžaduje častou korekci řízení. Pokud je naopak příliš velký, volant je těžký, hůře se s ním manipuluje v nízké rychlosti a může docházet k nadměrnému opotřebení některých komponent. Důležité také je, aby *caster* na levé a pravé straně byl shodný a jakýkoliv rozdíl způsobí, že vozidlo bude táhnout ke straně.

Typické hodnoty *casteru* se pohybují kladně u běžných osobních vozů, u sportovních a závodních aut může být *caster* ještě vyšší, protože vyšší stabilita a rychlejší reakce řízení jsou žádoucí. Na konstrukci vozidla má *caster* velký vliv a obvykle je určen tvarem ramen zavěšení a polohou uložení tlumiče, takže se u běžných osobních aut neseřizuje.



Obrázek 19: Caster angel

Zdroj: <https://alphacarhire.com.au/blog/glossary/caster-angle/>

V mém měření je zobrazen průběh *caster* úhlu v závislosti na zdvihu tlumiče. Graf ukazuje, že se *caster* při propružení postupně zmenšuje, a to téměř lineárně v celém rozsahu simulovaného zdvihu. V horní části zdvihu má hodnota *casteru* kladné hodnoty, což odpovídá mírně kladnému naklonění osy řízení dozadu. To je stav, který podporuje samo středění řízení a pomáhá vozidlu držet rovný směr.

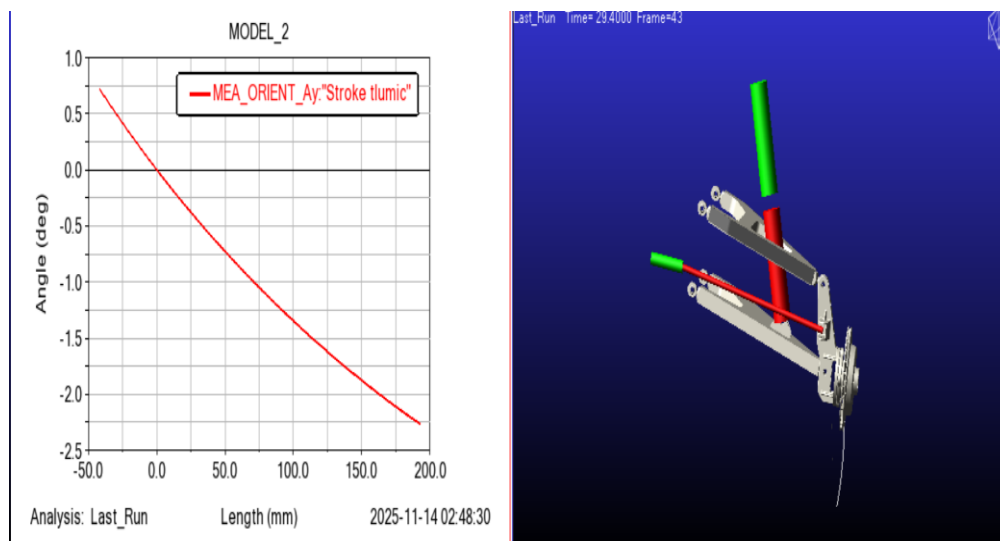
Jakmile však zavěšení propružuje směrem dolů, *caster* postupně klesá a v oblasti běžného pracovního zdvihu se přibližuje hodnotě 0° . To znamená, že osa řízení se v této poloze prakticky dostává do svislé polohy. V praxi by to znamenalo oslabení samostředicí síly řízení i menší stabilitu v přímém směru, protože vozidlo již nevyužívá výhod kladného *casteru*.

Při větším propružení *caster* přechází dokonce do záporných hodnot, tedy do stavu, kdy je osa řízení nakloněná dopředu. V nejspodnější části zdvihu dosahuje simulovaná hodnota záporných hodnot. Záporný *caster* se v moderních vozidlech běžně nevyskytuje, protože výrazně zhoršuje stabilitu a způsobuje, že volant nemá tendenci se vracet do roviny. Pokud by se taková hodnota objevila na reálném vozidle, řidič by vnímal řízení jako nepřesné.

Významné je, že tato změna probíhá plynule a bez náhlých skoků konstrukce závěsu se tedy chová mechanicky konzistentně, ale rozsah změny *casteru* naznačuje, že geometrie ještě není optimalizovaná. Ideální je, když *caster* zůstává kladný v celém rozsahu pracovního zdvihu, aby vozidlo nabízelo stabilní chování i při zatížení, přejezdu nerovností nebo brzdění.

Na pravé části obrázku je vidět 3D model zavěšení ve fázi propružení.

Celkově tedy analýza ukazuje, že při propružení dochází k výraznému úbytku *caster* úhlu, což může mít zásadní vliv na jízdní stabilitu. Pro finální návrh zavěšení by bylo vhodné upravit pozice ramen nebo body uchycení řízení tak, aby zůstal kladný *caster* i při větším zdvihu (viz obr.20).



Obrázek 20: Caster angle

Zdroj: vlastní tvorba

2.2.4 Změna rozchodu kol

Je jev, který nastává při propružení zavěšení, když se kola nepohybují jen čistě nahoru a dolů, ale zároveň se mírně posouvají do stran, tedy buď směrem k sobě, nebo od sebe. Rozchod kol je vodorovná vzdálenost mezi levým a pravým kolem na jedné nápravě. Lidé si často představují, že se kolo při propružení pohybuje po svislé přímce, ale skutečné zavěšení takto jednoduše nefunguje. Ramena zavěšení jsou uchycena v karoserii v různých výškách a úhlech, a proto se při pohybu kola opisuje zakřivená dráha, nikoliv rovná. Právě díky této zakřivené dráze dochází k bočnímu posunu kola a tím ke změně rozchodu.

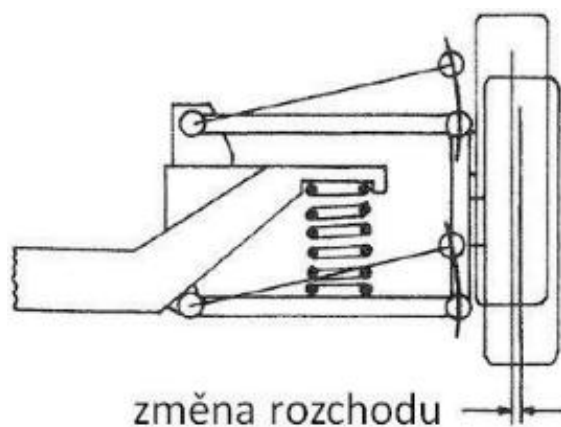
Tento jev se objevuje u všech typů zavěšení. Každý systém má jinak dlouhá a jinak umístěná ramena, a proto se změna rozchodu může lišit, někdy je velmi malá, téměř zanedbatelná, jindy může být výraznější. I malé hodnoty, například o 2–3 mm na jednu stranu, však mohou mít znatelný dopad na jízdní chování.

V ideálním případě by měl být rozchod během propružení co nejstálější, protože to přispívá ke stabilitě vozidla. Pokud se rozchod mění příliš, vůz reaguje nepředvídatelně. Například při přejezdu nerovnosti může jedno kolo sebou trhnout o něco více do strany než druhé, což se projeví jako krátké cuknutí ve volantu nebo boční trnutí celého auta. Řidič to vnímá, jako by auto na okamžik ztratilo stabilitu. Kromě toho se zvyšuje boční skluz pneumatiky, protože pneumatika při pohybu do stran lehce klouže po vozovce, což vede k rychlejšímu opotřebení.

U sportovních a závodních vozidel konstruktéři někdy změnu rozchodu cíleně řídí. Například v zatáčke může být výhodné, když se vnější kolo při propružení mírně posune ven rozšíří se tím efektivní základna vozidla a auto tak získá lepší stabilitu při přenosu bočních sil. V běžných autech se však změna rozchodu obvykle minimalizuje, protože prioritou je komfort, předvídatelnost a nízké opotřebení pneumatik.

Změna rozchodu se nejčastěji uvádí v milimetrech. Pokud graf ukazuje například +6 mm při propružení o 50 mm, znamená to, že kolo se během této části zdvihu posunulo o šest milimetrů směrem ven.

Celkově lze říct, že změna rozchodu kol je jedním z těch parametrů kinematiky zavěšení, které jsou na první pohled nenápadné, ale ve skutečnosti mají velký vliv na to, jak stabilně a jistě se auto chová. Pokud je změna rozchodu malá a dobře řízená, auto působí klidně a předvídatelně. Pokud je velká nebo nevyvážená mezi pravou a levou stranou, projeví se to okamžitě a řidič má pocit, že auto reaguje trhavě na nerovnosti nebo působí nervózně při vyšších rychlostech. Proto je správný návrh zavěšení a kontrola změny rozchodu klíčovou součástí vývoje každého moderního vozidla (viz obr.21).



Obrázek 21: změna rozchodu kol

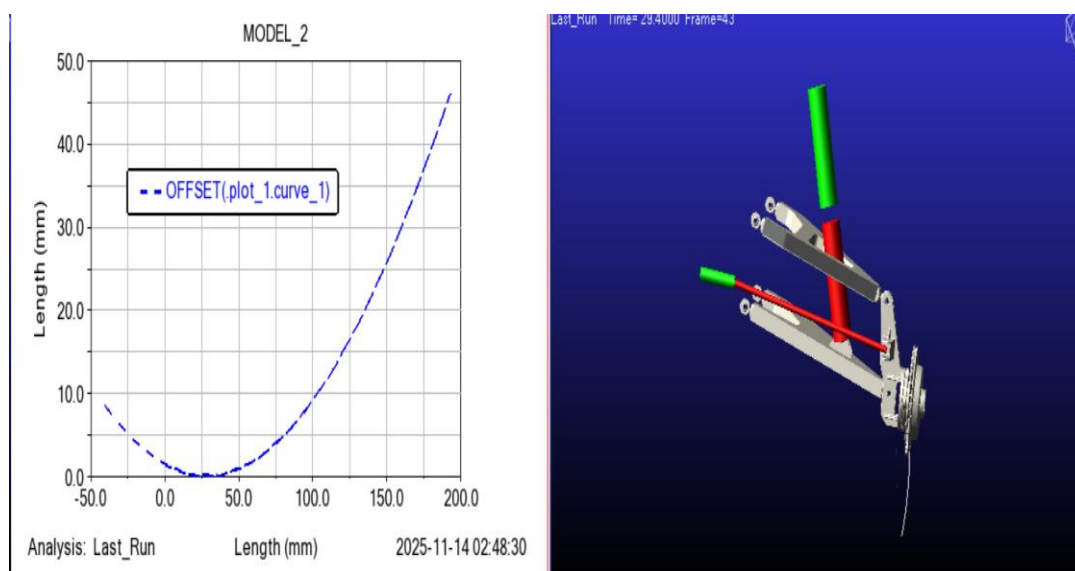
Zdroj: <https://www.spszengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/Mont%C3%A1%C5%BEE-N%C3%A1pravy-a-geometrie-UT.pdf>

V mém měření je znázorněno, jak se mění boční poloha kola, tedy rozchod, během propružení zavěšení. Graf vlevo ukazuje, o kolik se kolo během pohybu tlumiče posune směrem dovnitř nebo ven od karoserie, a pravá část obrázku zobrazuje odpovídající 3D model zavěšení v jedné z pracovních poloh. Na vodorovné ose grafu je rozsah zdvihu tlumiče od negativních hodnot, kdy je zavěšení odlehčené, až po velké propružení. Na svislé ose je potom velikost bočního posunu kola v milimetrech. Křivka začíná v oblasti lehkého odlehčení zavěšení, kde je kolo posunuté několik milimetrů do strany. Jakmile se tlumič dostane do běžné pracovní polohy, hodnota se postupně snižuje až téměř k nule. V tomto rozsahu je změna rozchodu minimální, což je z

pohledu stability vozidla ideální, protože auto se při menších nerovnostech nechová nepředvídatelně a řidič necítí žádné boční škubání.

Jak však propružení pokračuje do větší hloubky, křivka se prudce zvedá a ukazuje, že kolo se začíná výrazně posouvat směrem ven. V krajních polohách této simulace může jít až o několik centimetrů, což je způsobeno tím, že ramena zavěšení se při extrémním propružení dostávají do úhlů, kde už kolo nevede téměř rovná dráha, ale výraznější oblouk. Tento efekt je běžný u mnoha typů zavěšení. V malém zdvihu pracují ramena téměř ideálně, ale při velkém zatížení nebo přejezdu hluboké nerovnosti se jejich geometrie promění a kolo se více pohybuje do stran. Model na pravé straně obrázku to potvrzuje: je vidět výrazný náklon a natočení ramen, které právě způsobují tento boční posun.

Celý obrázek tak názorně ukazuje dvě věci. Za prvé, že v nejdůležitějším pracovním rozsahu, kde auto tráví většinu času, je změna rozchodu velmi malá a vůz díky tomu působí stabilně a klidně. A za druhé, že při extrémních situacích může být boční posun kola výraznější, což je přirozená vlastnost zavěšení a je potřeba s ní při návrhu geometrie počítat. (viz obr.22).



Obrázek 22: Změna rozchodu kol

Zdroj: vlastní tvorba

2.3 Dynamika

Dynamická analýza v této práci vychází ze simulace přejezdu kola přes nerovnost na silnici. Ta ukazuje, jaké síly při tom vznikají. Když kolo narazí na nerovnost, tlumič i ramena dostanou krátký ale poměrně silný ráz. Právě tyto síly je důležité sledovat, protože ovlivňují životnost jednotlivých dílů a celkovou stabilitu vozidla.

V modelu se proto simuloval přejezd kola přes nerovnou cestu. Software MSC Adams ukazuje, jak se model při přejezdu nerovného povrchu chová. Díky tomu je možné vidět, jak se závěs chová v situaci, která je pro auto běžná ale zároveň náročná.

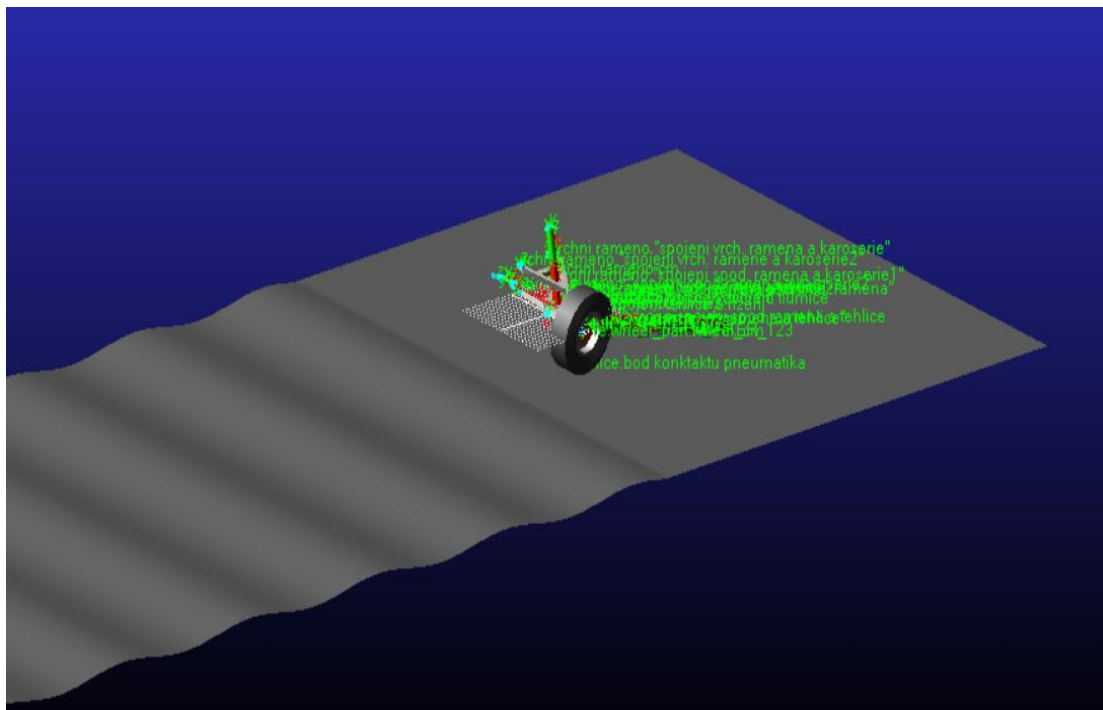
2.3.1 První krok

Pro potřeby dynamické analýzy bylo nutné vytvořit cestu, po které bude kolo v simulaci jezdit. Adams/View obsahuje vlastní knihovnu cest, které jsou uloženy ve formátu .tir (*tire file*). Jde o speciální soubor, ve kterém je zapsán tvar povrchu, kde se nachází hrbol, jak je vysoký, jak je dlouhý.

V programu jsem tedy otevřel knihovnu dostupných cest a vybral jednu z předdefinovaných variant. Tyto cesty lze snadno upravovat, dá se změnit výška nerovnosti, její šířka, délka, nebo i celkový tvar povrchu. Program tak umožňuje vytvořit velmi jednoduché i složitější překážky.

Pro účely této práce jsem použil jednoduché nerovnosti, které představují běžné hrboly na silnici. Ty byly následně vloženy do simulace tak, aby přes něj kolo přešlo, což vyvolá odpovídající dynamickou odezvu závěsu. Díky použití knihovny není potřeba vytvářet terén ručně ale stačí pouze vybrat vhodný typ povrchu a případně upravit jeho parametry.

Simulace přejezdu takového hrbole umožňuje sledovat, jakým způsobem závěs reaguje na rychlou změnu výšky vozovky, což je situace, která se v běžném provozu často vyskytuje.



Obrázek 23: Nerovný povrch

Zdroj: vlastní tvorba

2.3.2 Druhý krok

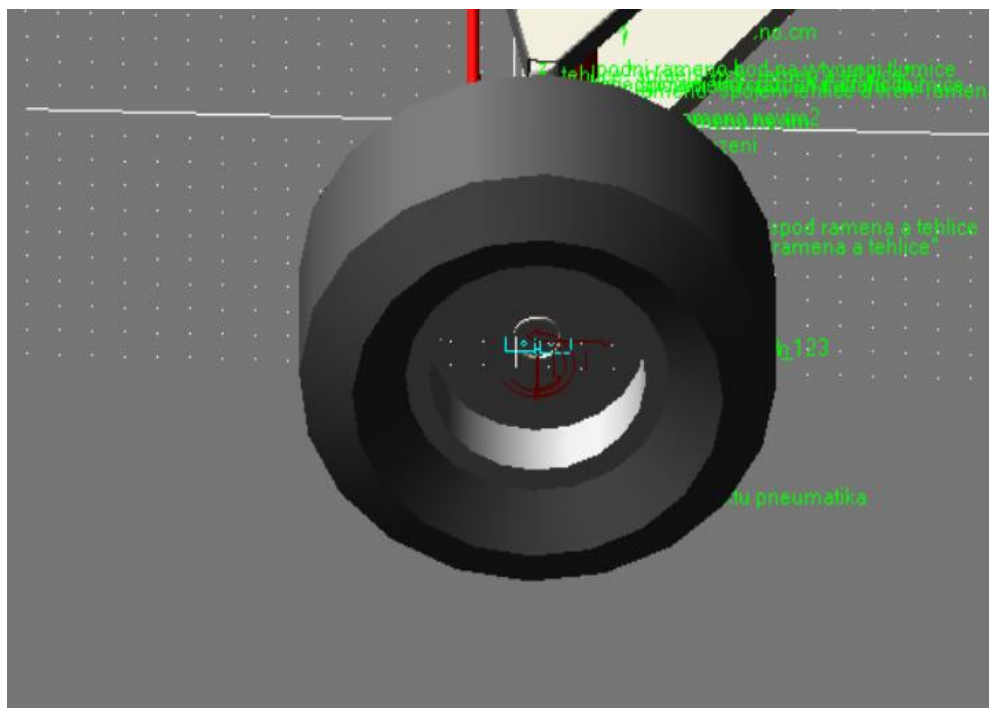
Pro dynamickou analýzu bylo nutné do modelu přidat také pneumatiku, protože bez ní by software nedokázal správně spočítat kontakt kola s povrchem a přenášené síly. Adams/View má vlastní knihovnu pneumatik. Tyto soubory obsahují parametry pneumatiky, například její tuhost, tvar, šířku, poloměr nebo způsob, jakým reaguje na kontakt s vozovkou.

V našem případě jsme z knihovny vybrali výchozí model pneumatiky, protože pro základní dynamickou simulaci plně postačuje. Následně jsme jej upravili tak, aby odpovídal reálným

rozměrům použitého kola na XR-Buggy. Nejdůležitějším krokem bylo nastavení poloměru a šířky, které musí souhlasit se skutečnou pneumatikou, aby simulace měla správné výsledky.

Po načtení a úpravě pneumatiky byla tato pneumatika přiřazena k modelu kola. Program pak automaticky nasimuluje, jak pneumatika reaguje při přejezdu nerovnosti.

Pro jednoduché dynamické simulace je tento standardní postup ideální, protože není potřeba vytvářet vlastní složité modely pneumatik. Stačí využít knihovní model a upravit základní rozměry tak, aby odpovídaly skutečnému vozidlu.



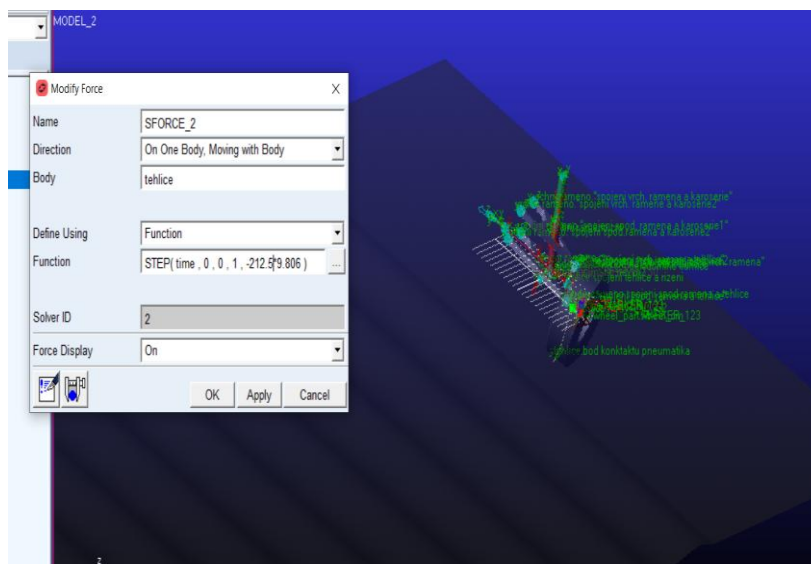
Obrázek 24: Pneumatika

Zdroj: vlastní tvorba

2.3.3 Třetí krok

Po vytvoření pneumatiky a cesty bylo nutné model správně připravit pro dynamickou simulaci, aby se všechny části chovaly tak, jak odpovídá reálnému prostředí. V Adams/View jsou totiž nově vložené objekty automaticky volné ve všech směrech, a proto je potřeba jim odebrat nežádoucí stupně volnosti. Silnice musí být v simulaci zcela pevná, takže ji byly odebrány stupně volnosti a byla spojena s pevným základem, aby se nemohla pohybovat ani otáčet. Podobně byly u závěsu kola vytvořeny příslušné klouby, které se v reálu nepohybují. Tím bylo zajištěno, že se žádná část nevybočí do nechtěného směru.

Dalším krokem by bylo nastavení zatížení ale našem případě bylo zvoleno zavěšení bez zatížení. Následně byla rychlost přejezdu kola přes nerovnost stanovena na 10 km/h. Po propojení pneumatiky s kolem a nastavení kontaktu mezi pneumatikou a povrchem byla simulace připravena k vyhodnocení dynamických reakcí závěsu.



Obrázek 25: Nastavení hodnot v Adamsu

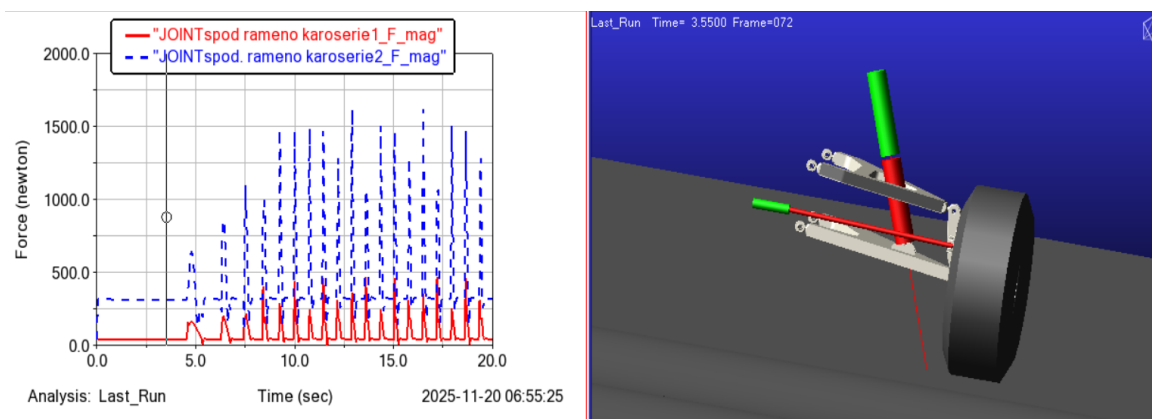
Zdroj: vlastní tvorba

2.3.4 Měření spodního ramena

Graf zachycuje, jaké síly působí ve spodním rameni závěsu, konkrétně v místě, kde je spodní rameno připojeno ke karoserii. Na grafu jsou dvě křivky a každá představuje jiný kloub (levý a pravý čep uchycení ramene).

Když kolo přejede přes nerovnost, spodní rameno musí zachytit velký ráz. To se v grafu projeví jako prudký nárůst síly. Nejprve roste pomalu, potom přijde náraz od hrbolu, a síla najednou vyskočí na několik tisíc newtonů. To je okamžik, kdy kolo narazí na nerovnost.

Poté se síla začne periodicky měnit což znamená, že závěs reaguje na kmitání tlumiče a pohyb kola po nerovném povrchu. Červená (zadní) a modrá (přední) křivka se liší, protože každá část (přední více) ramene je zatížena trochu jinak. Poté se síla začne periodicky měnit což znamená, že závěs reaguje na kmitání tlumiče a pohyb kola po nerovném povrchu. Červená (zadní) a modrá (přední) křivka se liší, protože každá část (přední více) ramene je zatížena trochu jinak. Je to běžné, protože rameno není při nárazu zatěžováno dokonale symetricky ovlivňuje to geometrie zavěšení, způsob dopadu kola na překážku i jeho natočení.



Obrázek 26: Měření spodního ramena

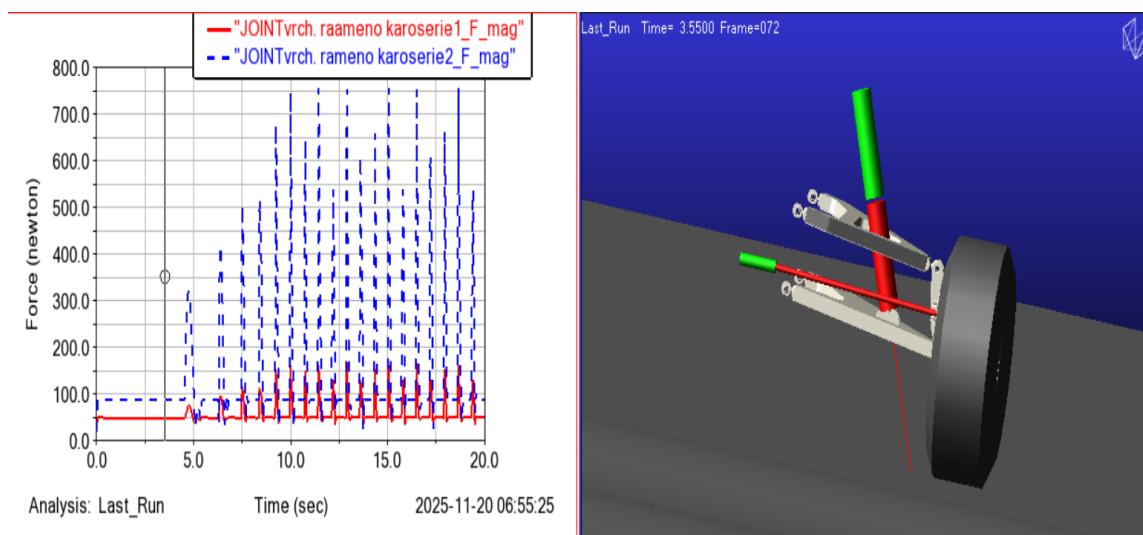
Zdroj: vlastní tvorba

2.3.5 Měření vrchního ramena

Tento graf zobrazuje síly působící v horním rameni závěsu, a to přímo v místech kde je horní rameno uchyceno ke karoserii. Stejně jako u spodního ramene zde vidíme dvě křivky, protože horní rameno má také dva upevňovací body, z nichž každý přenáší síly trochu jinak.

Na začátku simulace je průběh poměrně klidný – vozidlo jede po rovném povrchu a síly jsou nízké. V okamžiku, kdy kolo najede na nerovnost, síly v horním rameni prudce vzrostou. Tento nárůst představuje náraz od hrbolu, který horní rameno musí spolu se spodním ramenem zachytit. Horní rameno je však obecně méně zatěžované než spodní, což je v grafu patrné (má nižší hodnoty). Je to tím, že většina rázové i dynamické síly se přenáší především spodní částí závěsu.

Po přejezdu nerovnosti začnou obě křivky kmitat, podobně jako u spodního ramene. Tyto kmity odpovídají činnosti tlumiče a pružiny, které vracejí kolo do rovnovážné polohy. Rozdíl ve velikosti obou křivek vzniká ze stejných důvodů jako u spodního ramene. Je zcela normální, že horní rameno vykazuje nižší hodnoty než spodní, protože na něj působí menší část celkové síly přenášené od kola.



Obrázek 27: Měření vrchního ramena

Zdroj: vlastní tvorba

2.3.6 Měření těhlice

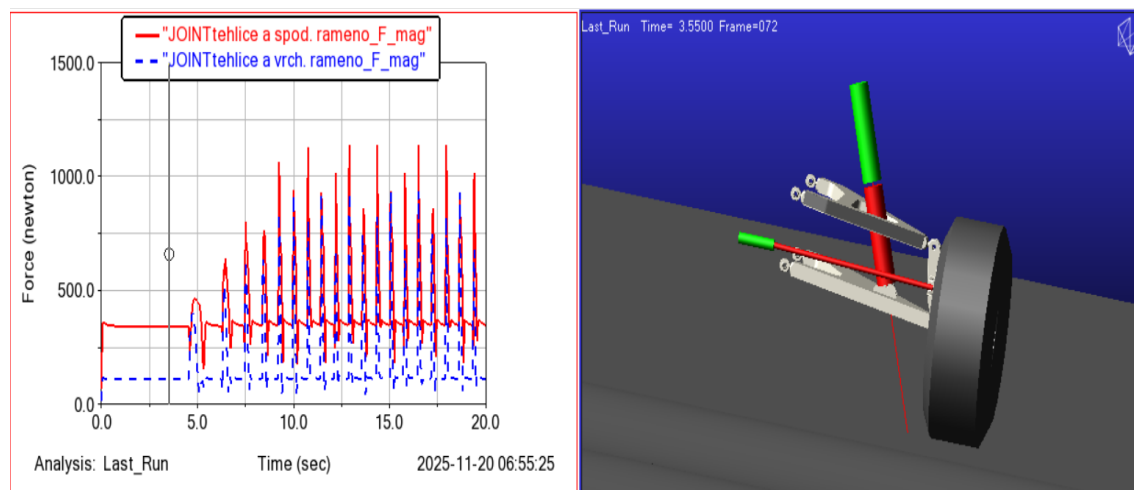
Na obrázku je zobrazen graf sil působících v kloubech horního a spodního ramene závěsu kola. Měřené hodnoty odpovídají silám přenášeným mezi rameny a těhlicí, tedy v místech, kde se zatížení z kola předává do konstrukce závěsu. Jednotlivé křivky jsou barevně odlišeny. Červená křivka představuje zatížení kloubu spodního ramene, modrá křivka zobrazuje síly v kloubu horního ramene. Pravá část obrázku ukazuje prostředí MSC Adams během jízdy přes nerovnost.

Na začátku simulace jsou obě křivky téměř konstantní, což odpovídá jízdě po rovném povrchu, kdy na závěs nepůsobí výraznější dynamické síly. Ve chvíli, kdy kolo najede na nerovnost, dochází k prudkému nárůstu zatížení. Spodní rameno vykazuje podstatně vyšší hodnoty sil, protože nese hlavní podíl svislého zatížení od kola a přes něj se síly přenášejí dále do pružiny a tlumiče. Z tohoto důvodu má červená křivka výrazná maxima.

Horní rameno je zatížené méně, což odpovídá jeho funkci, především vede těhlici a kontroluje změny geometrie zavěšení. Modrá křivka má proto menší hodnoty.

Po přejezdu nerovnosti obě křivky kmitají. Toto kmitání odpovídá tlumenému pohybu pružiny a tlumiče, které se snaží vrátit kolo zpět do klidové polohy. Spodní rameno má větší výkyvy, protože reaguje na dominantní svislé zatížení. Horní rameno kmitá méně výrazně, protože jeho zatížení je ovlivněno hlavně změnou bočních a úhlových sil.

Zobrazené výsledky tedy potvrzují rozdílné namáhání jednotlivých ramen u lichoběžníkového zavěšení. Spodní rameno přenáší větší dynamické síly, zatímco horní rameno zajišťuje převážně vedení těhlice.



Obrázek 28: Měření Těhlice

Zdroj: vlastní tvorba

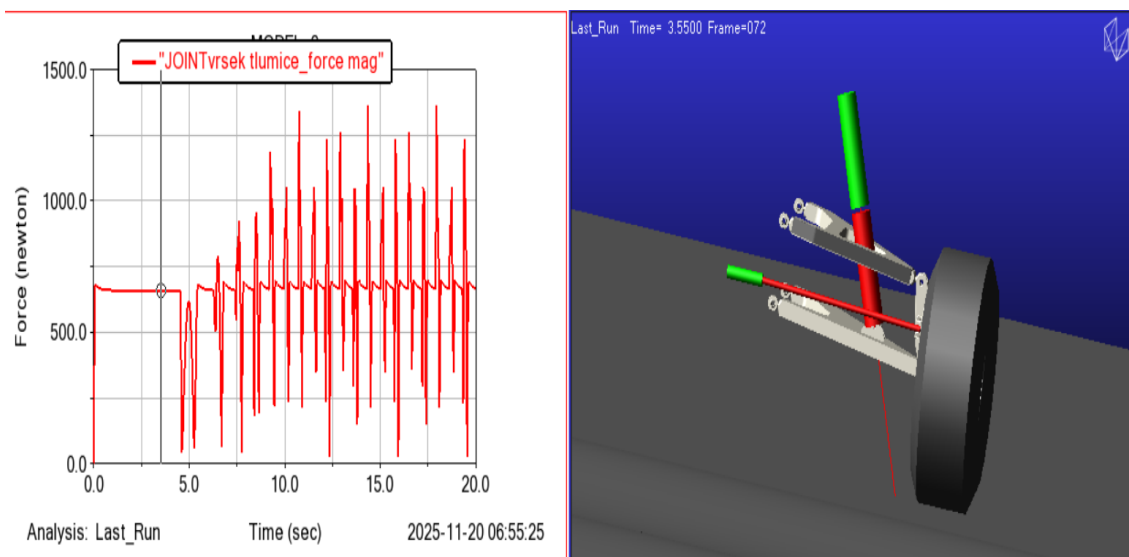
2.3.7 Měření síly v tlumiči

Tento graf zobrazuje velikost síly, která působí v tlumiči během přejezdu nerovnosti. Tlumič je v závěsu klíčovým prvkem, protože řídí rychlost propružení a pomáhá stabilizovat pohyb kola po nárazu. Z tohoto důvodu má jeho zatížení výrazný vliv na celkové chování vozu.

Na začátku simulace jsou síly v tlumiči relativně malé a stabilní. Vozidlo jede po rovném povrchu a tlumič pracuje pouze v rozsahu malých nerovností povrchu. Okolo třetí až čtvrté sekundy kolo najíždí na vytvořený hrbol, což se projeví prudkým poklesem a následně skokovým nárůstem síly v tlumiči. Tento ráz odpovídá okamžiku, kdy se tlumič musí velmi rychle stlačit a absorbovat energii nárazu.

Po přejezdu nerovnosti se graf začne pravidelně vlnit. Každá vlna odpovídá jednomu cyklu stlačení a roztažení tlumiče. Tento kmitavý pohyb je způsoben tím, že tlumič postupně tlumí energii, kterou závěs získal při nárazu na hrbol a snaží se vrátit kolo do stabilní polohy. Viditelné tlumicí kmitky dokazují, že tlumič pohlcuje energii a postupně stabilizuje pohyb závěsu.

Hodnoty ukazují maximální zatížení tlumiče při propružení. Tyto hodnoty jsou pro terénní vozidlo typu buggy běžné, protože při jízdě v nerovném terénu musí tlumič zvládat výrazné rázy a vysoké dynamické síly.



Obrázek 29: Měření tlumiče

Zdroj: vlastní tvorba

Závěr

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo ověřit, zda je možné vytvořit funkční kinematický a dynamický model závěsu kola vozidla XR-Buggy a pomocí něj popsat chování závěsu v typických provozních situacích. Z provedených simulací a analýz vyplývá, že tento cíl byl naplněn.

Kinematická analýza ukázala, jakým způsobem se mění základní geometrické parametry kola. *Camber*, *toe* a rozchod. Výsledky potvrdily předpoklad, že v běžném rozsahu zdvihu zůstává geometrie stabilní a závěs se chová předvídatelně. Při větším propružení se však mění zejména úhel sbíhavosti, což by v extrémních podmínkách mohlo ovlivnit ovladatelnost vozidla. Tím byla potvrzena hypotéza, že i u relativně jednoduchého lichoběžníkového zavěšení dochází k významnějším změnám geometrie až ve vyšších zatíženích.

Dynamická analýza přejezdu nerovnosti pak ukázala reálné zatížení jednotlivých částí závěsu. Průběhy sil v ramenech a tlumiči odpovídají očekávanému chování terénního vozidla: ráz při nájezdu na překážku a následná tlumené kmitání. Tyto výsledky potvrzují, že závěs XR-Buggy je konstrukčně použitelný ale ne dokonalý.

Přínos této práce spočívá především ve vytvoření kompletního postupu tvorby simulačního modelu v programu MSC Adams, který na škole dosud nebyl zaveden a byl dostupný pouze v testovací podobě. Díky tomu může tato práce sloužit jako praktický návod pro další studenty i jako základ pro rozvoj výuky simulačních metod na VŠPJ. Originálním přínosem je také přizpůsobení modelu konkrétní konstrukci XR-Buggy, která nebyla dříve numericky analyzována.

Dosažené výsledky jsou použitelné jak pro vývoj nové buggy, tak pro základní orientaci v tom, jak jednotlivé části závěsu reagují na zatížení. Model může být dále rozšiřován o pokročilejší model pneumatiky, pružné části rámu, brzdné a hnací síly nebo o kompletní model celého vozidla. Dalším směrem výzkumu může být porovnání výsledků simulace se skutečným měřením na fyzickém vozidle, což by umožnilo zpřesnit parametry a zároveň ověřit vytvořený numerický model.

Seznam použitých zdrojů

Automotive Chassis: Brakes, Suspension, and Steering. Ilustrované vydání. Thomson Delmar Learning, 2005. ISBN 1401856306, 9781401856304.

Advanced Vehicle Technology. Ilustrované vydání. Heinz Heisler Butterworth-Heinemann, 2002. ISBN 978-0750651318, 0750651318.

Podvozky motorových vozidel. Ilustrvané vydání. František Vlk, 2006. ISBN 802396464X.

Auto.cz. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.auto.cz/zadni-napravy-viceprvkova-torzni-pricka-tuha-ktera-je-nejlepsi-101479>. [cit. 2025-11-22].

Autolexicon.net. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/tuha-naprava/>. [cit. 2025-11-22].

Autolexicon.net. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/klikova-naprava/>. [cit. 2025-11-22].

Autodoc.cz. Online. 2025. Dostupné z: <https://club.autodoc.cz/magazin/jake-jsou-typy-zaveseni-kol>. [cit. 2025-11-22].

Eluc. Online. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/lekce/napravy>. [cit. 2025-11-22].

Uniflowdynamics. Online. Dostupné z: <https://uniflowdynamics.com/en/software/>. [cit. 2025-11-22].

Nexus.hexagon. Online. 2023. Dostupné z: https://nexus.hexagon.com/documentationcenter/en-US/bundle/Adams_2023.3_Adams_View_User_Guide/resource/Adams_2023.3_Adams_View_User_Guide.pdf. [cit. 2025-11-22].

Autolexicon.net. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/>. [cit. 2025-11-22].

Comeanddriveit. Online. 2020. Dostupné z: <https://www.comeanddriveit.com/suspension/camber-caster-toe>. [cit. 2025-11-22].

Comeanddriveit. Online. 2020. Dostupné z: <https://www.comeanddriveit.com/>. [cit. 2025-11-22].

Tatra. Online. 2014. Dostupné z: <https://www.tatra.cz/proc-tatru/technicka-koncepce-tatra/unikatni-podvozek-tactic/>. [cit. 2025-11-22].

ChatGpt. Online. 2025. Dostupné z: <https://chatgpt.com/>. [cit. 2025-11-22].

Summitracing. Online. 2025. Dostupné z: <https://help.summitracing.com/knowledgebase/article/SR-05257/en-us>. [cit. 2025-11-22].

Alphacarhire. Online. 2025. Dostupné z: <https://alphacarhire.com.au/blog/glossary/caster-angle/>. [cit. 2025-11-22].

Montáže – Nápravy a geometrie. Online. 2021. Dostupné z: <https://www.spszengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/Mont%C3%A1%C5%BEE-N%C3%A1pravy-a-geometrie-UT.pdf>. [cit. 2025-11-22].