



Diplomová práce

Model podvozku osobního automobilu pro simulaci přejezdu nerovnosti

Studijní program:

N0716A270006 Automobilové inženýrství

Autor práce:

Bc. Jakub Drahoš

Vedoucí práce:

Ing. Robert Voženílek, Ph.D.

Katedra vozidel a motorů

Liberec 2023



Zadání diplomové práce

Model podvozku osobního automobilu pro simulaci přejezdu nerovnosti

Jméno a příjmení:

Bc. Jakub Drahoš

Osobní číslo:

S22000251

Studijní program:

N0716A270006 Automobilové inženýrství

Zadávací katedra:

Katedra vozidel a motorů

Akademický rok:

2022/2023

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rozbor typů podvozků používaných u osobních vozidel a přístupů k jejich modelování.
2. Vytvořte model podvozku osobního automobilu ve specializovaném simulačním softwaru umožňující změnu jeho parametrů.
3. Navrhněte jízdní režimy vozidla pro simulaci přejezdu nerovností.
4. Výsledky získané z reálného měření na vybraném automobilu ve spolupráci se Škoda Auto a.s. analyzujte a porovnejte s výsledky získaných ze simulací.
5. Během řešení diplomové práce spolupracujte se společností Škoda Auto a.s..

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy: cca 50 stran
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: Čeština

Seznam odborné literatury:

- [1] VLK, F.: *Podvozky motorových vozidel*. Nakladatelství a vydavatelství Vlk. BRNO 2001
- [2] SAJDL, J.: *Elastokinematický model přední nápravy a metoda jeho verifikace*. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci. 2009.
- [3] DOROTKA, M.: *Simulace jízdy vozidla*. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. 2015.
- [4] Běžně dostupné materiály – odborné časopisy, konference, internet.

Vedoucí práce: Ing. Robert Voženílek, Ph.D.
Katedra vozidel a motorů

Datum zadání práce: 9. listopadu 2022

Předpokládaný termín odevzdání: 9. května 2024

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
děkan

L.S.

Ing. Robert Voženílek, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 9. listopadu 2022

Podklad pro zadání DIPLOMOVÉ práce studenta

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub Drahoš**
Osobní číslo: **S22000251**
Adresa: **Turistická 1783/8, Plzeň – Bolevec, 32300 Plzeň 23, Česká republika**
Téma práce: **Model podvozku osobního automobilu pro simulaci přejezdu nerovnosti**
Téma práce anglicky:
Jazyk práce: **Čeština**
Vedoucí práce: **Ing. Robert Voženílek, Ph.D.**
Katedra vozidel a motorů

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rozbor typů podvozků používaných u osobních vozidel a přístupů k jejich modelování.
2. Vytvořte model podvozku osobního automobilu ve specializovaném simulačním softwaru umožňující změnu jeho parametrů.
3. Navrhněte jízdní režimy vozidla pro simulaci přejezdu nerovností.
4. Výsledky získané z reálného měření na vybraném automobilu ve spolupráci se Škoda Auto a.s. analyzujte a porovnejte s výsledky získaných ze simulací.
5. Během řešení diplomové práce spolupracujte se společností Škoda Auto a.s..

Seznam doporučené literatury:

- [1] VLK, F.: *Podvozky motorových vozidel*. Nakladatelství a vydavatelství Vlk. BRNO 2001
[2] SAJDL, J.: *Elastokinematický model přední nápravy a metoda jeho verifikace*. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci. 2009.
[3] DOROTKA, M.: *Simulace jízdy vozidla*. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. 2015.
[4] Běžně dostupné materiály – odborné časopisy, konference, internet.

Stav schvalování: Podklad pro VŠKP schválen děkanem

Podpis studenta:

Datum:

Podpis vedoucího práce:

Datum:

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

28. května 2023

Bc. Jakub Drahoš

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce, Ing. Robertu Voženílkovi PhD. z katedry vozidel a motorů technické univerzity v Liberci za vedení práce, připomínky a konzultace nad poznatky při tvorbě textu.

Dále bych rád poděkoval Ing. Martinu Procházkovi ze společnosti Škoda Auto a. s. a jeho kolegům z oddělení vývoje podvozků za odborné konzultace v oblasti techniky podvozků osobních vozidel, jejich zkoušení a praktické znalosti kolem nich.

Rád bych také poděkoval rodině a přátelům, kteří mě při studiu a tvorbě práce podporovali a hlavně bych rád poděkoval mé snoubence Magdaléně, která mi byla během tohoto období tou největší oporou.

Anotace

Tato práce pojednává o tvorbě výpočtového modelu podvozku osobního automobilu pro simulaci přejezdu příčné nerovnosti na vozovce. V rešeršní části jsou popsány systémy zavěšení použité v modelu a softwary pro tvorbu modelů. V praktické části je popsána struktura výpočtového modelu a jeho stavba. Ve validační části je popsáno provedení fyzického testu s měřením, které slouží k validaci modelu. Práce je zakončena citlivostní analýzou.

Klíčová slova: Výpočtový model automobilu, Podvozek, Validací zkouška, příčná nerovnost

Annotation

This thesis work is about the creation of computational model of a car suspension for simulation of drive over a transversal obstacle. In research part are stated suspension systems further used in model and softwares for creation of suspension models. In work part the structure and build of model is defined. In validation part is described execution of physical test with measurements used to validate the model. Work is closed with a sensitivity analysis.

Key words: Numerical Model of a car Suspension, Validation test, Transversal obstacle

Obsah

Seznam obrázků	- 9 -
Seznam rovnic	- 12 -
Tabulka veličin	- 13 -
1. Úvod	- 14 -
2. Rešerše	- 15 -
2.1. Zavěšení kol osobních vozidel	- 15 -
2.1.1. Zavěšení předních kol	- 16 -
2.1.2. Zavěšení zadních kol	- 17 -
2.2. Počítačové řešiče	- 18 -
2.2.1. MSC Adams	- 18 -
2.2.2. Simulia, Motionsolve, Carsim a Cruise	- 19 -
2.3. Nerovnosti vozovky	- 20 -
2.4. Kinematika podvozku	- 20 -
2.4.1. Pohyblivost komponent podvozku	- 22 -
2.5. Výpočet chování podvozku	- 23 -
2.5.1. Čtvrtinový model	- 23 -
2.5.2. Poloviční model vozu	- 24 -
3. Tvorba výpočetního modelu	- 25 -
3.1. Model vozu	- 25 -
3.1.1. Modelování přední nápravy	- 26 -
3.1.2. Modelování zadní nápravy	- 30 -
3.1.3. Modelování dalších částí vozu	- 34 -
3.1.4. Modelování celého vozu	- 37 -

3.2.	Definice nerovnosti v modelu.....	- 39 -
3.2.1.	Pozitivní nerovnost.....	- 40 -
3.2.2.	Negativní nerovnost	- 41 -
3.2.3.	Nastavení výpočtu	- 42 -
3.3.	Výsledky prvotního modelu	- 43 -
4.	Fyzické měření na vozidle.....	- 45 -
4.1.	Volba měřicí techniky	- 45 -
4.2.	Nastavení zkoušky.....	- 52 -
4.3.	Průběh zkoušky.....	- 53 -
4.4.	Výsledky zkoušky.....	- 54 -
5.	Porovnání modelu s fyzickým testem	- 57 -
6.	Využití modelu.....	- 61 -
6.1.	Citlivostní analýza – změna rozměru kol	- 61 -
6.2.	Citlivostní analýza - Změna rozvoru vozu	- 63 -
7.	Závěr.....	- 65 -
	Reference.....	- 66 -

Seznam obrázků

Obrázek 1:	Zastoupení konstrukčního řešení náprav v osobních vozidlech (7)	- 15 -
Obrázek 2:	Přední náprava McPherson (14)	- 16 -
Obrázek 3:	Zadní vlečená náprava (14)	- 17 -
Obrázek 4:	Adams/Car (17)	- 18 -
Obrázek 5:	MBS softwary Simulia (11) - vlevo nahoře, Motionsolve (12) - vpravo nahoře, Carsim (10) - vlevo dole, Cruise (13) - vpravo dole	- 19 -

Obrázek 6: Osy vozidla	- 21 -
Obrázek 7: Schéma čtvrtinového modelu	- 23 -
Obrázek 8: Schéma polovičního modelu	- 24 -
Obrázek 9: Šablona McPherson od MSC.....	- 26 -
Obrázek 10: sestava přední nápravy při kontrolní simulaci samostatné nápravy	- 27 -
Obrázek 11: Modifikovaný modelMcPherson – 1- Horní uložení ke karoserii, 2 – Pružina, 3 – Tlumič, 4 – Těhlice, 5 – Táhlo řízení, 6 – Spodní trojúhelníkové rameno, 7- Nápravnice	- 28 -
Obrázek 12: Obecná charakteristika tlumiče vozidla.....	- 29 -
Obrázek 13: Obecná charakteristika bumpstopu.....	- 29 -
Obrázek 14: Šablonová zadní náprava	- 30 -
Obrázek 15: Model zadní nápravy s viditelnými vazbami.....	- 31 -
Obrázek 16: Model zadní nápravy	- 32 -
Obrázek 17: Zadní náprava při simulaci samostatné nápravy.....	- 33 -
Obrázek 18: Model řízení.....	- 34 -
Obrázek 19: Rozložení váhy vozu	- 35 -
Obrázek 20: Definice hmoty a těžiště karoserie.....	- 35 -
Obrázek 21: Karoserie vozidla	- 35 -
Obrázek 22: Model motoru	- 36 -
Obrázek 23: Šablona celého vozu	- 38 -
Obrázek 24: Model sestavy vozu	- 38 -
Obrázek 25: Model sestavy vozu shora.....	- 39 -
Obrázek 26: Definice nerovnosti v pozitivním směru. Textová definice (vlevo), vizualizace v softwaru (vpravo nahoře), rozměry nerovnosti (vpravo dole)	- 40 -
Obrázek 27: Definice nerovnosti v negativním směru. Textová definice (vlevo), vizualizace v softwaru (vpravo nahoře), rozměry nerovnosti (vpravo dole)	- 41 -

Obrázek 28: Nastavení výpočtu Maintain	- 42 -
Obrázek 29: Průběh zrychlení středu kol náprav při přejezdu pozitivní nerovnosti	- 44 -
Obrázek 30: Průběh zrychlení středů kol při přejezdu negativní nerovnosti	- 44 -
Obrázek 31: Polohy umístění senzorů.....	- 46 -
Obrázek 32: Uložení snímače zrychlení na přední nápravě	- 47 -
Obrázek 33: Detail uložení snímače na těhlici přední nápravy.....	- 48 -
Obrázek 34: Uložení snímače na zadní nápravě vozu.....	- 49 -
Obrázek 35: Uložení snímače na zadním tlumiči pro sledování zrychlení karoserie	- 50 -
Obrázek 36: Snímek vozu s terčí z fotogrammetrie v průběhu zkoušky.....	- 51 -
Obrázek 37: Schéma průběhu zkoušky	- 53 -
Obrázek 38: Zrychlení středu kol při jízdě zkoušce při přejezdu nerovnosti v pozitivním směru	- 54 -
Obrázek 39: Vertikální poloha středu kola z fotogrammetrie se zkreslením.....	- 55 -
Obrázek 40: Poloha středu kola při přejezdu nerovnosti s korekcí zkreslen.....	- 55 -
Obrázek 41: Snímky návratu kola do kontaktu s vozovkou s časovým oknem.....	- 56 -
Obrázek 42: Návrat kola do kontaktu s vozovkou u virtuálního modelu.....	- 56 -
Obrázek 43: Zrychlení osy předního kola modelu a zkušebního vozu při přejezdu pozitivní nerovnosti	- 58 -
Obrázek 44: Zrychlení osy zadního kola modelu a zkušebního vozu při přejezdu pozitivní nerovnosti	- 59 -
Obrázek 45: Zrychlení osy předního kola modelu a zkušebního vozu při přejezdu negativní nerovnosti	- 60 -
Obrázek 46: Zrychlení osy zadního kola modelu a zkušebního vozu při přejezdu negativní nerovnosti	- 60 -
Obrázek 47: Zrychlení středu kola přední nápravy s rozdílnými koly.....	- 62 -

Obrázek 48: Zrychlení středu kola zadní nápravy s rozdílnými koly	- 62 -
Obrázek 49: Graf zrychlení předního kola při změně rozvoru.....	- 64 -
Obrázek 50: Graf zrychlení zadního kola při rozdílném rozvoru	- 64 -

Seznam rovnic

(1) Pohyb karoserie $\frac{1}{4}$ modelu	- 23 -
(2) Pohyb kola $\frac{1}{4}$ modelu	- 23 -
(3) Pohyb předního kola $\frac{1}{2}$ modelu	- 24 -
(4) Pohyb zadního kola $\frac{1}{2}$ modelu	- 24 -
(5) Pohyb karoserie $\frac{1}{2}$ modelu	- 24 -
(6) Klonění karoserie $\frac{1}{2}$ modelu	- 24 -
(7) Odchylka hodnot	-56 –

Tabulka veličin

Název veličiny	Symbol veličiny	Jednotky
Hmotnost odpružené hmoty vozu	m_v	kg
Hmotnost neodpružené hmoty (kola)	m_k	kg
Hmotnost přední neodpružené hmoty (předního kola)	m_{wf}	kg
Hmotnost zadní neodpružené hmoty (zadního kola)	m_{wr}	kg
Moment setrvačnosti odpružené hmoty vozu	I_v	kg·m ²
Zrychlení odpružené hmoty vozu	\ddot{x}_v	m·s ⁻²
Rychlost odpružené hmoty vozu	\dot{x}_v	m·s ⁻¹
Posuv odpružené hmoty vozu	x_v	m
Úhlové zrychlení odpružené hmoty vozu	$\ddot{\theta}$	rad·s ⁻²
Úhlová rychlost odpružené hmoty vozu	$\dot{\theta}$	rad·s ⁻¹
Úhlová poloha odpružené hmoty vozu	θ	rad
Zrychlení neodpružené přední hmoty (předního kola)	\ddot{x}_{wf}	m·s ⁻²
Rychlost neodpružené přední hmoty (předního kola)	\dot{x}_{wf}	m·s ⁻¹
Poloha neodpružené přední hmoty (předního kola)	x_{wf}	m
Zrychlení neodpružené zadní hmoty (zadního kola)	\ddot{x}_{wr}	m·s ⁻²
Rychlost neodpružené zadní hmoty (zadního kola)	\dot{x}_{wr}	m·s ⁻¹
Poloha neodpružené zadní hmoty (zadního kola)	x_{wr}	m
Rychlost změny jízdního profilu	\dot{x}_R	m·s ⁻¹
Poloha změny jízdního profilu	x_R	m
Rychlost změny jízdního profilu pod předním kolem	\dot{x}_{Rf}	m·s ⁻¹
Poloha změny jízdního profilu pod předním kolem	x_{Rf}	m
Rychlost změny jízdního profilu pod zadním kolem	\dot{x}_{Rr}	m·s ⁻¹
Poloha změny jízdního profilu pod zadním kolem	x_{Rr}	m
Vzdálenost předního kola od těžiště vozu	L_f	m
Vzdálenost zadního kola od těžiště vozu	L_r	m
Tuhost pružiny odpružené hmoty vozu ¼ modelu	k_z	N·m ⁻¹
Tuhost pneumatiky ¼ modelu	k_k	N·m ⁻¹
Tuhost pneumatiky předního kola	k_{wf}	N·m ⁻¹
Tuhost pneumatiky zadního kola	k_{wr}	N·m ⁻¹
Tuhost pružiny mezi zadním kolem a karoserií	k_{cf}	N·m ⁻¹
Tuhost pružiny mezi předním kolem a karoserií	k_{cr}	N·m ⁻¹
Tlumení tlumiče odpružené hmoty vozu ¼ modelu	b_z	N·s ⁻¹
Tlumení pneumatiky ¼ modelu	b_k	N·s ⁻¹
Tlumení pneumatiky předního kola	b_{wf}	N·s ⁻¹
Tlumení pružiny mezi zadním kolem a karoserií	b_{cf}	N·s ⁻¹
Tlumení pneumatiky zadního kola	b_{wr}	N·s ⁻¹
Tlumení pružiny mezi předním kolem a karoserií	b_{cr}	N·s ⁻¹

1. Úvod

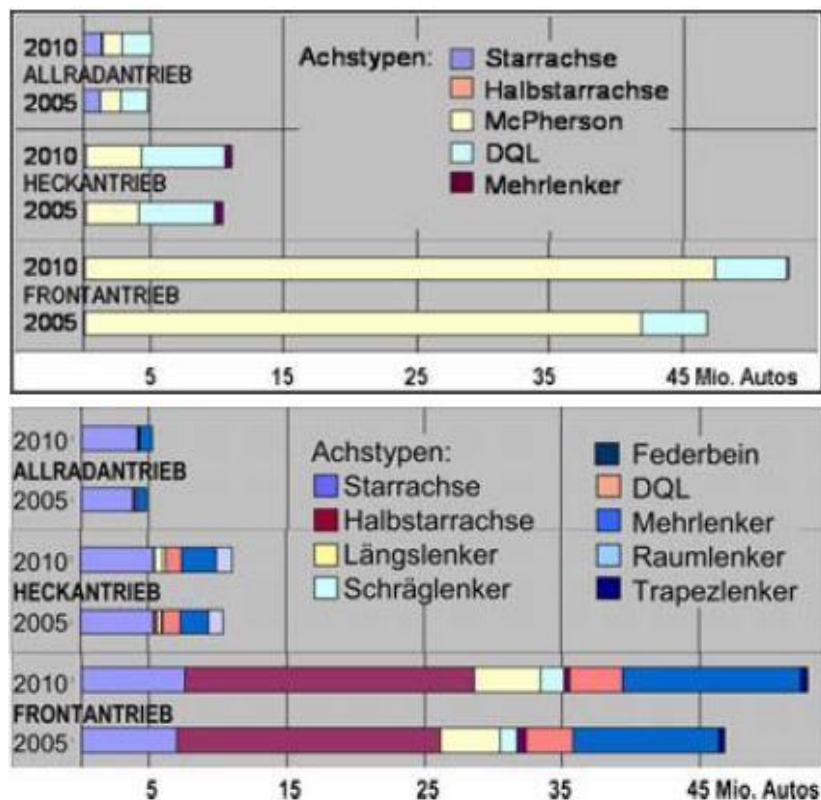
Podvozek je základním stavebním prvkem osobních vozidel a také hlavní část vozidla spojující karoserii s vozovkou. Pod pojmem podvozek se nachází řada komponent spojených mechanickou vazbou s možností vzájemného pohybu. Do podvozku je zahrnuto odpružení vozidla, tlumení, řízení, kola a brzdová soustava. U osobních vozidel je jedním z hlavních účelů podvozku zajistit jízdní komfort a bezpečnost jízdy po dráze, která může být svým povrchem velice rozličná. Vozidlo by mělo zůstat komfortní a ovladatelné na všech typech povrchů, pro které je provoz vozidla předpokládán. Tím se myslí rozdílnost konstrukce podvozku vozidla navrženého pro provoz na městských, dlažbou tvořených cestách s menšími dírami a výmoly od podvozku terénního vozidla s předpokládaným provozem v lesích či kamenitých cestách.

Úkolem této diplomové práce je navrhnout model podvozku osobního vozidla při přejezdu nerovnosti pro zjištění jeho chování. Znalost silových poměrů na komponentách podvozku je klíčová pro jejich správný konstrukční návrh. Součástí práce je také provedení měření na vozidle při překonání zadané překážky. Vytvořený model se následně validuje s výsledky získanými během fyzické zkoušky. Korelace hodnot udá přesnost virtuálního modelu.

2. Rešerše

2.1. Zavěšení kol osobních vozidel

Podvozkové systémy jsou starší než samotný automobilový průmysl. Podvozek je možné najít už na starých kočárech a vozech, které byly taženy koňským spřežením. Už tehdy bylo třeba pro zvýšení komfortu zajistit pružné spojení mezi soukolím a kabinou. Od té doby uplynuly stovky let a s příchodem vozidel poháněných spalovacími motory prošly podvozky značným vývojem. Starší systémy jako například De Dijon nebo pevná náprava s Wattovým přímovodem se dnes již u osobních automobilů téměř nevyskytují. Automobilový průmysl se uchýlil k používání pouze pár typů zavěšení, která se osvědčila a v menších modifikacích se používají u majority vozidel.



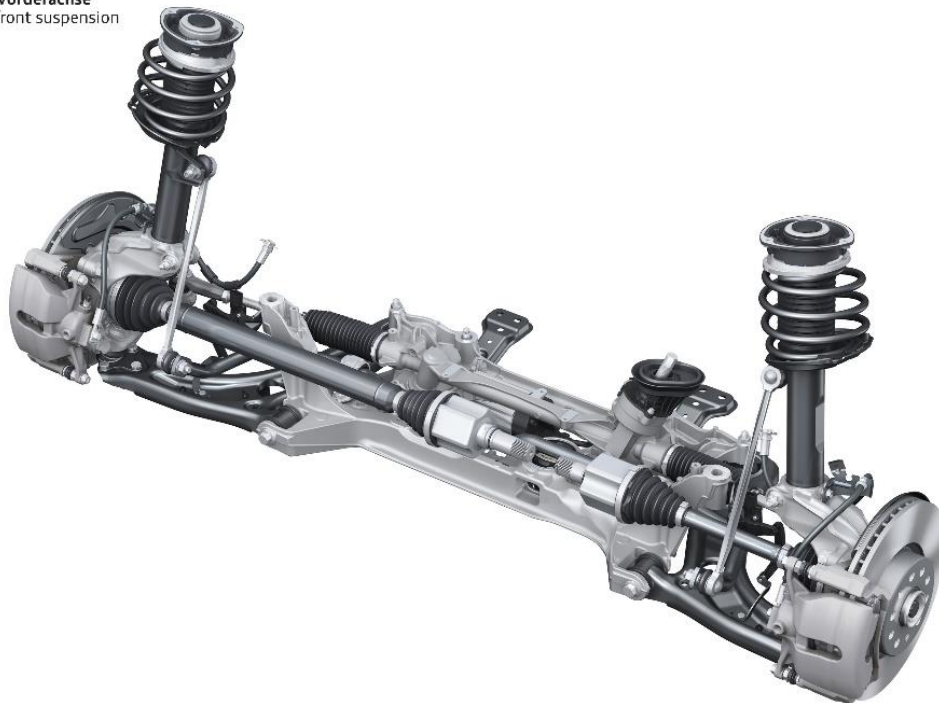
Obrázek 1: Zastoupení konstrukčního řešení náprav v osobních vozidlech (7)

2.1.1. Zavěšení předních kol

Mezi jedno z dnes nejpoužívanějších konstrukčních řešení předních náprav pro osobní vozidla patří zavěšení typu McPherson. Ten je technicky založený na uložení tlumiče s pružinou v těhlici a druhým koncem otočně spojený ke karoserii vozidla. Vespod je těhlice připojena jedním nebo dvěma rameny a natočení těhlice zajišťuje táhlo řízení řídicí tyče. Podstata systému je vždy stejná, technické provedení je však často velice rozličné podle výrobce.

Audi A3 Sportback

McPherson-Vorderachse
McPherson front suspension
03/20



Obrázek 2: Přední náprava McPherson (14)

Výhodou zavěšení McPherson je jeho technická jednoduchost. Pro jeho sestavení stačí minimálně jedno rameno tvaru L, táhlo řízení a tlumič s pružinou. Konstrukční jednoduchost a zaběhllost systému v současném automobilovém průmyslu snižuje čas nutný pro vývoj a s tím jde ruku v ruce také cena, která je nižší také z hlediska počtu komponent zavěšení.

2.1.2. Zavěšení zadních kol

Zadní náprava se v dnešní době produkuje ve dvou technických provedeních, a to v závislém a nezávislém. Závislé zavěšení zadní nápravy spojuje levé i pravé kolo jedním tělesem. Často se těleso označuje semi-tuhou zadní nápravou. Druhou variantou je nezávislé zavěšení. U něj se každé kolo může pohybovat nezávisle na sobě, tedy má vlastní vedení vertikálního pohybu.

Semi-tuhé zadní nápravy lze v dnešní době najít v menších a levnějších osobních vozidlech. Nejčastějším řešením je vlečená zadní náprava, ve které jsou obě zadní kola spojena příčkou. Ta je kyvně uložena ke karoserii vozidla nebo k podvozkovému rámu. Příčka sama pak funguje také jako stabilizátor. Mezi výhody vlečené nápravy patří konstrukční a výrobní jednoduchost. Nízká komplexita systému dovoluje snižovat produkční cenu vozu. Proti víceprvkové nápravě odpadá přítomnost těžké nápravnice, sady ramen, násobku elastokinematických členů a také stabilizátor není přítomen. Nevýhodou vlečené nápravy je snížení jízdního komfortu omezením nezávislého pohybu zadních kol.



Obrázek 3: Zadní vlečená náprava (14)

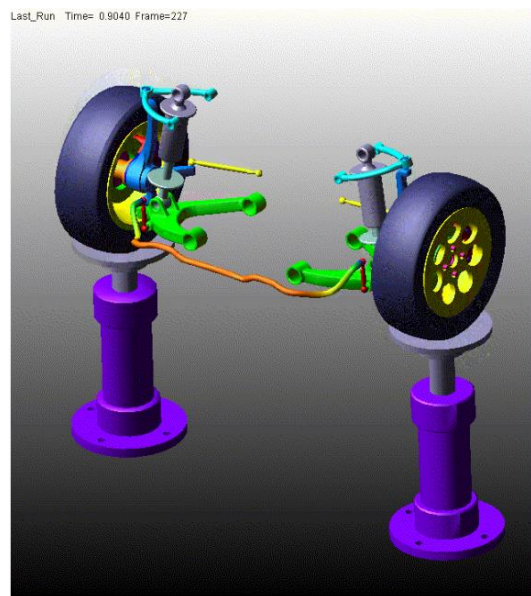
2.2. Počítačové řešiče

V současnosti se pro řešení chování podvozků používají počítačové softwary, které dovedou ohodnotit model zavěšení v závislosti na vstupních datech. Ty se nazývají Multibody software. Tyto softwary jsou přímo navrženy pro řešení vícečlenných mechanismů, stavebních struktur a řešení jejich dynamiky při zatížení vnějšími silovými účinky. V prostředí softwaru je možné nastavit mnoho situací, které během jízdy vozidla vznikají a tím virtuálně sledovat chování jednotlivých komponent. Virtuální model pomáhá pochopit a odhadnout chování při situacích, které by byly z hlediska fyzické zkoušky časově, ekonomicky a fyzicky náročné. Výhodou virtuálního řešení je poté snížení chybovosti při tvorbě prototypů a vytváří představy o chování podvozků v určitých, uživatelem zadaných situacích. Takové informace jsou pro inženýra velice důležité. V praxi se zjištěné rychlosti, akcelerační a silové poměry používají dále jako vstupy pro řešení pevnostních výpočtů.

Zástupci těchto programů jsou například Simulia od Dassault Systèmes, Motionsolve od Altairu nebo v této práci použitý Adams od MSC Software.

2.2.1 MSC Adams

Během 80. let 20. století došlo ke komunikaci výrobců automobilů a návrhu vzniku nadstavby programu Adams přímo pro automobilový průmysl a vývoj podvozků. Nadstavba Adams/Car slouží specificky pro automobilový průmysl. Adams Car dovoluje definici prvků, jako jsou vlastnosti pneumatik, elastokinematických členů a jejich automatickou tvorbu pro levou a pravou stranu. Zároveň obsahuje databázi podvozků, které je možné použít pro počátek práce a následně je modifikovat pro potřebné rozměry. Adams/Car umožňuje jednoduše nastavovat hodnoty jako je rozvor či rozchod.



Obrázek 4: Adams/Car (17)

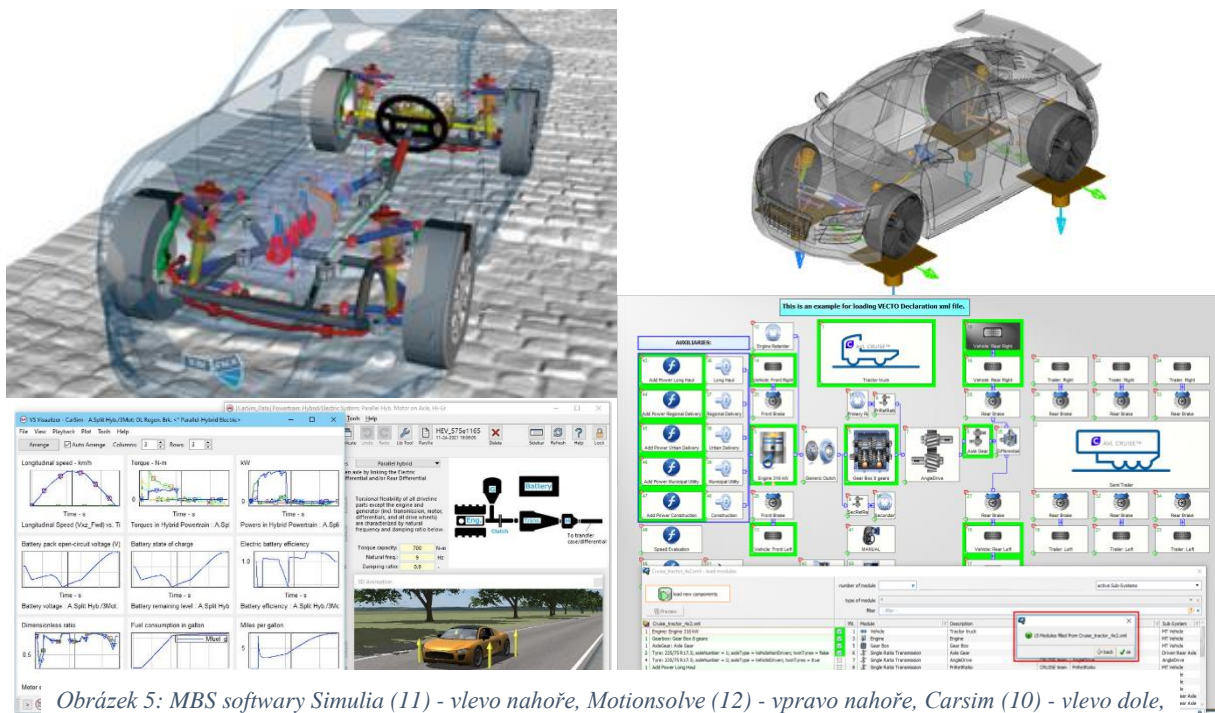
2.2.2. Simulia, Motionsolve, Carsim a Cruise

Simulia od společnosti Dassault Systèmes je výpočtový program který dokáže řešit proudění, elektromagnetismus, optimalizaci a také multibody.

Produkt Motionsolve od Altair je moderní multibody software řešící dynamiku mechanismů. Motionsolve dovoluje vkládat externí modely nebo ve vlastním prostředí tvořit vlastní model. V programu existuje nadstavba pro vozidla, která má knihovnu prvků jako jsou pružiny a tlumiče, které je možné zrychleně definovat a usnadnit tvorbu celého výpočtového modelu.

Výpočetní program Carsim od společnosti Mechanical simulation dodává software, který je přizpůsobený pro řešení dynamiky osobního vozidla. Spoluprací s automobilovými výrobci po desítky let vytvořila společnost program obsahující předdefinované nápravy a situace, které zjednoduší práci při tvorbě modelu podvozku. Carsim plně spolupracuje s Matlabem pro lepší definici problematiky a také dovoluje uživateli skriptem připravit simulaci a urychlit práci s celým programem.

AVL Cruise je výpočetní program pro řešení celého vozu. S programem je možné se zaměřit na jednotlivé části jako je podvozek nebo pohon, případně řešit kompletní vozidlo. Dovoluje také řešení hybridních a elektrifikovaných vozů.



Obrázek 5: MBS softwary Simulia (11) - vlevo nahoře, Motionsolve (12) - vpravo nahoře, Carsim (10) - vlevo dole, Cruise (13) - vpravo dole

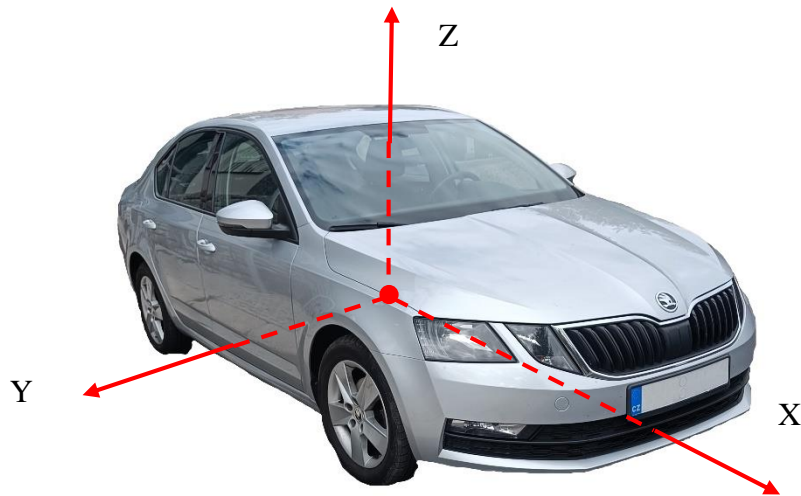
2.3. Nerovnosti vozovky

Nerovnosti vozovky jsou buď uměle vytvořené, nebo vzniklé jejich používáním, či působením přírodních vlivů. Tyto nerovnosti vytváří při jízdě nejen diskomfort, ale také zvyšují silové namáhání komponent zavěšení.

Uměle vytvořené nerovnosti jsou na vozovku přidány účelně. Častým zástupcem takových nerovností v ČR je příčný zpomalovací práh. Jde o oblouk spojený s vozovkou, který má za úkol regulovat rychlost toku dopravy na vozovce. Profil zpomalovacího prahu je navržen pro určitou rychlost. Při překonání překážky za rychlosti vyšší než předpokládané dojde k vyvolání hlukového a silového diskomfortu ve vozidle, čímž se dá řidiči signál o příliš vysoké rychlosti. Takový typ nerovnosti může při vysokých rychlostech zapříčinit dokonce poškození vozidla, pravděpodobně i způsobení defektu pneumatiky. Další variantou uměle vytvořené nerovnosti může být odvodňovací žlab, který se vyskytuje v horských oblastech převádějící vodu z jedné strany vozovky na druhou.

2.4. Kinematika podvozku

Vozidlo při jízdě podléhá řadě vnějších účinků. Je důležité chápat způsob jejich působení na vozidlo pro správné řešení podvozkových komponent. Jelikož je karoserie vozidla uložena k podvozku pomocí pružných elementů, je zde částečně dovolený pohyb v osách X, Y a Z. Shoda sdružení automobilových inženýrů SAE, norma DIN 70 000 či ISO 4130 udává, že osa X protíná osu vozidla ve směru jeho jízdy, osa Y je osa kolmá na osu X a je rovnoběžná s osou kol. Osa Z je osa vertikální. Tento osový systém je vyobrazen na obrázku 6. Takto popsany souřadnicový systém umožňuje popsat mechanický pohyb vozu v jednotlivých rovinách, ale také popis polohy jednotlivých komponent vůči sobě.



Obrázek 6: Osy vozidla

Karoserie vozidla se díky pružnému uložení k podvozku může v osách s omezením posouvat a také se kolem os natáčet. Různé jízdní situace způsobují tyto efekty. Například rychlý přejezd přes horizont vyvolá vlivem odstředivých sil posuv karoserie ve vertikální ose Z. Při akceleraci dochází k tzv. přidřepnutí vozu, kdy se světlá výška vozu v přední části zvýší a v zadní sníží. Dochází zde k natočení karoserie kolem tzv. anti-dive bodu. Posuvy v osách X a Y také existují, avšak jsou velmi malé a jejich omezení vychází z pružného uložení náprav ke karoserii.

Pro pochopení chování podvozku je nutno objasnit, jak se kolo vzhledem k autu pohybuje. Při jízdě vozidla koná kolo vůči karoserii komplexní pohyb. Ten je ovlivněn propružením, změnou sbíhavosti, odklonu, deformací elastických lůžek atd. Dle typu zátěže dochází k pohybu v ose X, Y a Z. Mimo tyto pohyby se může v rámci nastavení geometrie podvozku také měnit odklon kola a jeho sbíhavost, a hodnoty těchto rozměrů se mění nejen během jízdy, ale také v průběhu životnosti auta vlivem opotřebování lůžek ramen a zavěšení, kdy s nárůstem doby provozu vozidla dochází k alteraci geometrie podvozku. V této práci se řeší chování podvozku při přejezdu nerovnosti.

V takové situaci dochází nejen k vertikálnímu pohybu kola, ale také k dalším pohybům vlivem přejezdu definované překážky. Ráz vyvolaný překážkou zatíží kolo ve všech směrech, tedy v osách X, Y a Z. Při ideálním kolmém nájezdu lze sílu v ose Y zanedbat.

2.4.1. Pohyblivost komponent podvozku

Každá hlavní komponenta zavěšení má svoji definovanou pohyblivost. Znalost pohyblivosti komponent zavěšení je klíčová pro správnost stavby modelu zavěšení. Rozeznáváme vazby rotační, posuvné, šroubové, sférické, plošné a pevné. Každá z vazeb odebírá příslušný počet stupňů volnosti vyplývající z jejího názvu.

U přední nápravy spodní trojúhelníkové rameno koná rotační pohyb kolem spojnice úložných šroubů, které jej drží v nápravnici. Ve skutečnosti je tento pohyb ještě ovlivněn elastokinematickými vlastnostmi silentbloků v nápravě. Jelikož dokáže program MSC Adams vstup silentbloků uvažovat, bude definován i v této práci. Tlumič je ukotven k těhlici přední nápravy pevnou vazbou svěrným spojením a druhou stranou je připojen kulovou vazbou ke karoserii pomocí tzv. horního uložení. Těhlice je pak spojena s příčným ramenem prostřednictvím sférické vazby, který odpovídá kulovému čepu.

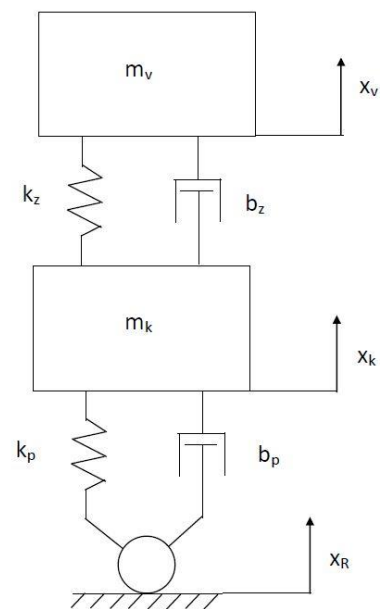
Zadní náprava je tvořena jedním svařencem spojujícím obě strany vozu. Tato náprava je rotačně uložena v elastokinematických prvcích ke karoserii vozidla. Tlumící prvky spojují karoserii s nápravou pomocí rotačních členů.

2.5. Výpočet chování podvozku

Pro výpočtové řešení podvozku existuje více přístupů. Nejsložitějším, ale nejpřesnějším přístupem je řešení celého vozu, kdy je chování vozu popsáno soustavou mnoha pohybových rovnic. Tyto rovnice musí vyjádřit závislost mezi předními a zadními koly, mezi koly na nápravě a zároveň uvažovat vliv pohybu karoserie. Pro některé situace je možné výpočtový model zjednodušit na poloviční model, kde se uvažuje, že vozidlo má pouze jedno přední a jedno zadní kolo. Model popisuje soustavu hmot spolu spojených pomocí tlumičů a pružin.

2.5.1. Čtvrtinový model

Čtvrtinový model podvozku slouží k popisu chování vozidla hlavně při pohybu ve vertikálním směru, tedy při situacích jako je přejezd nerovnosti. Model uvažuje čtvrt hmoty vozu uložené pomocí pružiny a tlumiče k neodpružené hmotě kola. Kolo, které je ve skutečnosti v kontaktu s vozovkou pomocí vzduchem nahuštěné pneumatiky, je zde řešeno pomocí paralelně připojeného tlumiče a pružiny reprezentující tlumící a pružící vlastnosti pneumatiky.



Obrázek 7: Schéma čtvrtinového modelu

Rovnice pohybu karoserie lineárního $\frac{1}{4}$ modelu

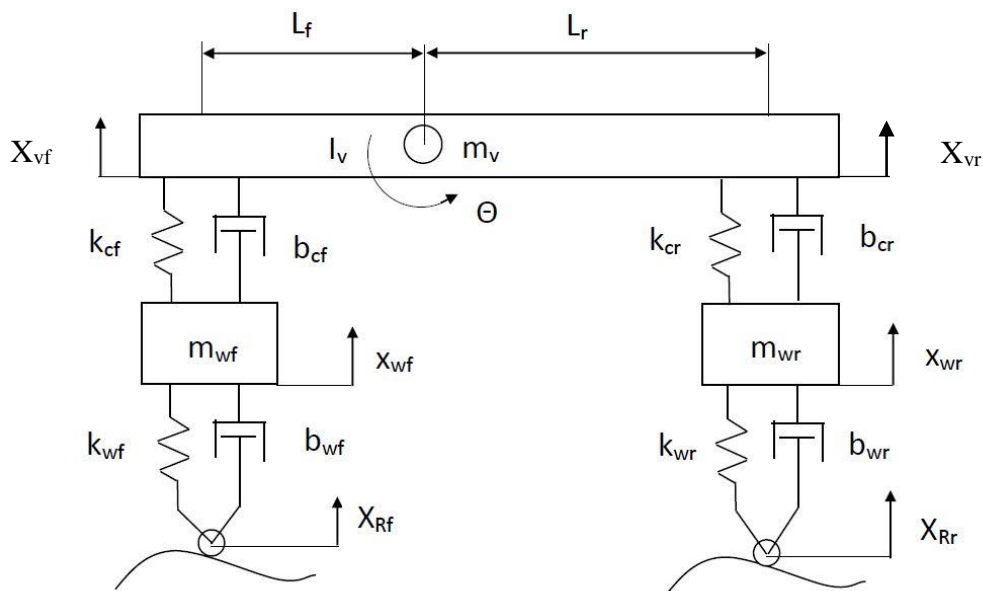
$$m_v \cdot \ddot{x}_v + b_z(\dot{x}_v - \dot{x}_k) + k_z(x_v - x_k) = 0 \quad (1)$$

Rovnice pohybu kola $\frac{1}{4}$ modelu

$$m_k \cdot \ddot{x}_k + b_z(\dot{x}_v - \dot{x}_k) + k_z(x_v - x_k) - b_p(\dot{x}_k - \dot{x}_R) - k_p(x_k - x_R) = 0 \quad (2)$$

2.5.2. Poloviční model vozu

Poloviční model již uvažuje nezávislé chování přední a zadní nápravy spojené jedním tělesem reprezentujícím karoserii vozidla. Do chování přední a zadní části vstupuje klonění karoserie, tedy rotační pohyb podél osy Y. Jednostopý model je rozšířením čtvrtinového modelu o jednu část.



Obrázek 8: Schéma polovičního modelu

Rovnice pohybu předního kola 1/2 modelu

$$m_{wf} \cdot \ddot{x}_{wf} - k_{wf} \cdot (x_{Rf} - x_{wf}) - b_{wf} \cdot (\dot{x}_{Rf} - \dot{x}_{wf}) + k_{cf} \cdot (x_{wf} - x_{vf} + L_f \cdot \theta) + b_{cf} \cdot (\dot{x}_{wf} - \dot{x}_{vf} + L_f \cdot \dot{\theta}) = 0 \quad (3)$$

Rovnice pohybu zadního kola 1/2 modelu

$$m_{wr} \cdot \ddot{x}_{wr} - k_{wr} \cdot (x_{Rr} - x_{wr}) - b_{wr} \cdot (\dot{x}_{Rr} - \dot{x}_{wr}) + k_{cr} \cdot (x_{wr} - x_{vr} - L_r \cdot \theta) + b_{cr} \cdot (\dot{x}_{wr} - \dot{x}_{vr} - L_r \cdot \dot{\theta}) = 0 \quad (4)$$

Rovnice pohybu karoserie 1/2 modelu

$$m_v \cdot \ddot{x}_v - k_{cf} \cdot (x_{wf} - x_v + L_f \cdot \theta) - b_{cf} \cdot (\dot{x}_{wf} - \dot{x}_v + L_f \cdot \dot{\theta}) - k_{cr} \cdot (x_{wr} - x_v - L_r \cdot \theta) - b_{cr} \cdot (\dot{x}_{wr} - \dot{x}_v - L_r \cdot \dot{\theta}) = 0 \quad (5)$$

Rovnice klonění karoserie 1/2 modelu

$$I_v \cdot \ddot{\theta} + k_{cf} \cdot (x_{wf} - x_v + L_f \cdot \theta) \cdot L_f + b_{cf} \cdot (\dot{x}_{wf} - \dot{x}_v + L_f \cdot \dot{\theta}) \cdot L_f - k_{cr} \cdot (x_{wr} - x_v - L_r \cdot \theta) \cdot L_r - b_{cr} \cdot (\dot{x}_{wr} - \dot{x}_v - L_r \cdot \dot{\theta}) \cdot L_r = 0 \quad (6)$$

3. Tvorba výpočetního modelu

V této části je popsán postup tvorby modelu v prostředí programu Adams/Car. Dalším krokem bude ověření funkčnosti modelu na základě výsledků získaných z fyzického měření na skutečném voze (viz. Kapitola 4). Toto srovnání zároveň slouží jako prostředek odhadu a zpřesnění některých funkčních závislostí složitějších systémů jako jsou např. pneumatiky.

Podvozek, kterým se tato práce zabývá, vychází z vozidla, na kterém bude prováděn fyzický test. Jde o vozidlo nižší střední třídy s McPherson zavěšením na přední nápravě a s vlečenou zadní nápravou. Pro návrh podvozku je třeba zjistit kinematické body sloužící jako místa napojení jednotlivých komponent a jako místa ovlivňující mechanickou odezvu systému.

3.1. Model vozu

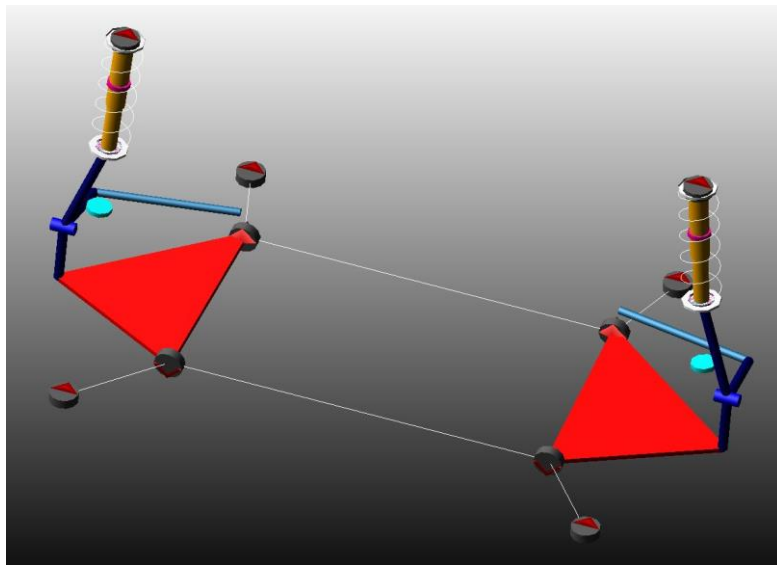
V prostředí programu existují skupiny a podskupiny, z nichž se seskládá celý vůz. Celá sestava vozidla se seskládá z podsestav. Pro případ této práce jsou třeba tyto podsestavy. Sestava předního zavěšení, sestava zadního zavěšení, sestava řízení, přední kola, zadní kola, těleso karoserie, pohonná jednotka a testovací prostředí. Program dovoluje zapojení i připojení sestavy brzdového systému. Brzdový systém je pro tento druh výpočtu zanedbán, protože při samotné jízdě nedojde k brzdnému manévru. Neodpružená hmota brzdového systému v modelu zanedbána není. Pohonná jednotka je pro některé druhy výpočtů volitelná, avšak pro jízdě režim je třeba pro pohon vozidla. Při jejím zanedbání by se ale musela hmota pohonné jednotky definovat navíc ke hmotnosti karoserie vozu.

Jednotlivé sestavy se skládají z podsestav. Podsestava je model, který vychází ze šablony. Šablona je nejzákladnější stavební kámen modelu, kde jsou definovány kinematické body zavěšení, vazby mezi elementy a komunikační parametry umožňující správně fungování jednotlivých podsestav v celé sestavě.

MSC Adams Car má k dispozici vzorové modely celého vozu a podsestav zavěšení. Stejně tak obsahuje i vzorové šablony. Pokud se v šablonách nevyskytuje systém, který by odpovídal řešené problematice, je třeba vytvořit šablonu kompletně od začátku a dbát na správné definování jednotlivých komponent.

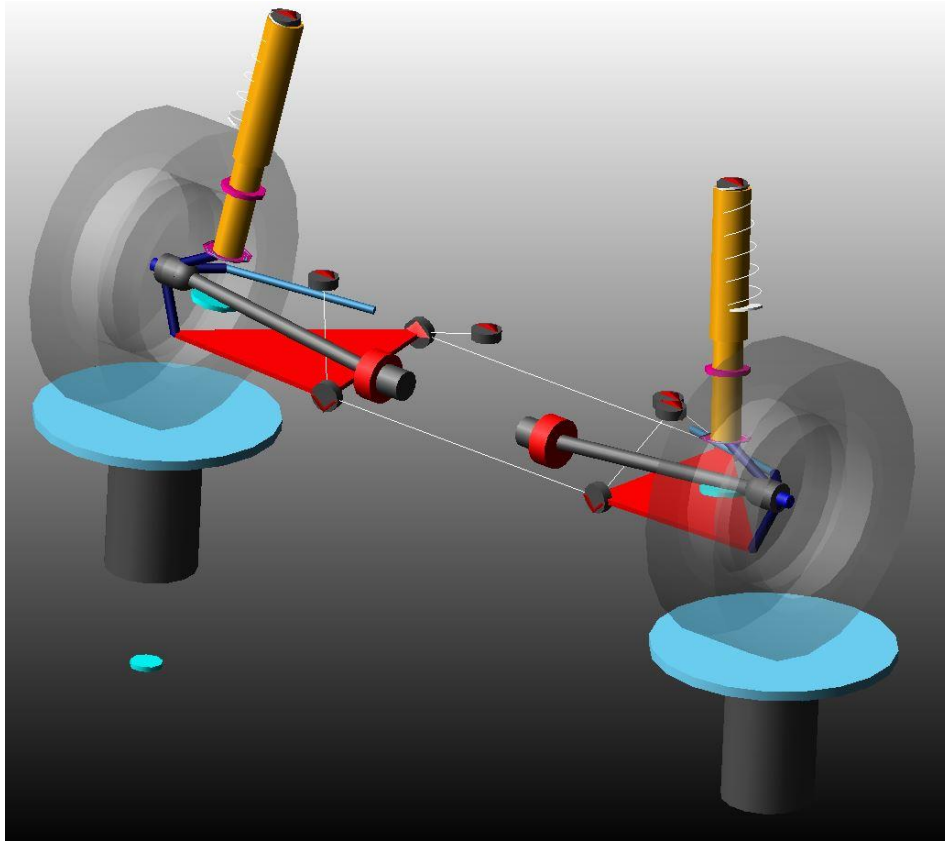
3.1.1. Modelování přední nápravy

Při návrhu předního zavěšení je vhodné vycházet z šablony obsažené v knihovně Adams Car. Řešená přední náprava je osazena McPherson zavěšením s trojúhelníkovým spodním ramenem, jako je tomu v šabloně. Při modifikaci šablony je třeba provést kompletní modifikaci všech členů podvozku, definovat charakteristiky elastických členů a usadit nápravu do správné polohy z hlediska vozidlového souřadného systému.



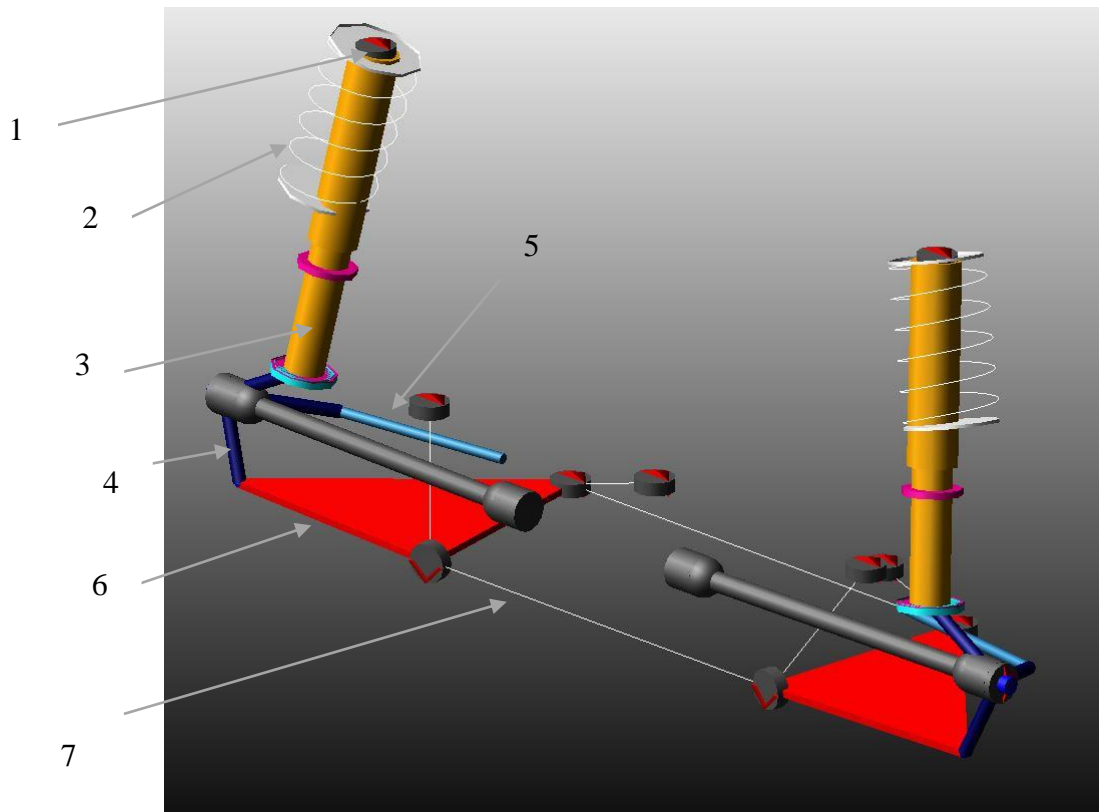
Obrázek 9: Šablona McPherson od MSC

Prvním krokem je přemístění bodů definující důležité polohy do polohy odpovídající skutečnému vozu. Je třeba modifikovat všechny uzly na jedné straně vozu a přesunout je. Po přesunu je třeba zkontrolovat, zda vazby mezi komponentami jsou správně definované a posuvem nedošlo k otočení smyslu pohybu některé z vazeb. Pro kontrolu je nejprve spuštěna funkce kontroly modelu, která vypíše počty stupňů volnosti, počty vazeb a chybně definované elementy. Následně je provedena simulace samostatné nápravy na stolici, při které dojde ke kompresi nápravy a sledování pohybu komponent. Při potvrzení správného pohybu se provede kontrola textového dokumentu výpočtu pro sledování chybových hlášení. Na základě chybových hlášení jsou provedeny úpravy. Chybová hlášení vznikla např. chybným spojením vazeb mezi komponenty.



Obrázek 10: sestava přední nápravy při kontrolní simulaci samostatné nápravy

Při znalosti správného fungování sestavy je v dalším kroku třeba upravit členy zavěšení. Prvním úkolem je definování hmot jednotlivých komponent. Tvorba součásti se nemůže provést bez definování hmotnosti a momentu setrvačnosti k těžišti tělesa. V tomto momentě je již tvar modelu odpovídající ke tvaru zavěšení použitého na voze.

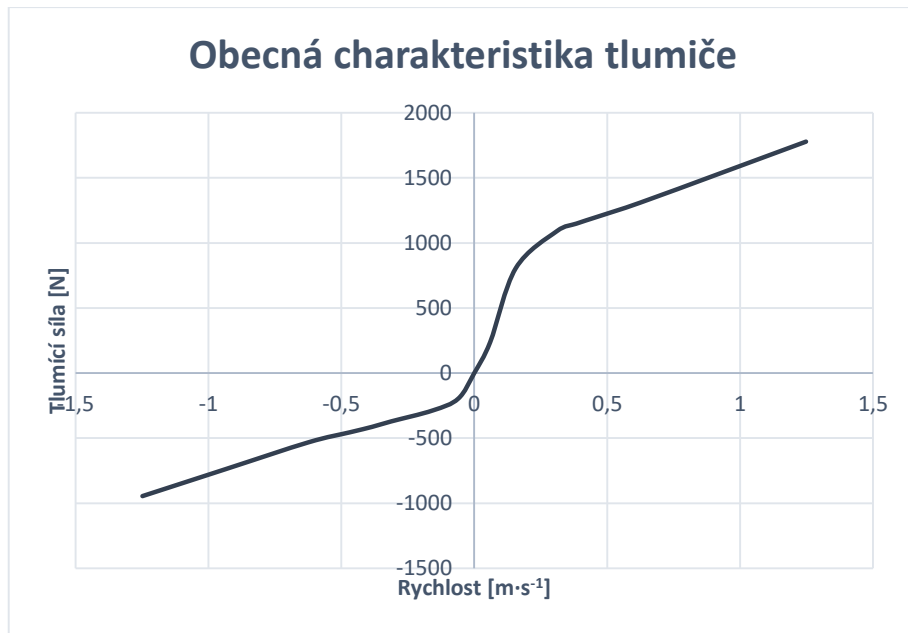


Obrázek 11: Modifikovaný model McPherson – 1- Horní uložení ke karoserii, 2 – Pružina, 3 – Tlumič, 4 – Těhlice, 5 – Táhlo řízení, 6 – Spodní trojúhelníkové rameno, 7- Nápravnice

Třetím krokem je editace souborů definující charakteristiku pružných členů, jako jsou pružiny, tlumiče, silentbloky, apod. Každý z těchto členů, které jsou v programu pojmenovány jako silové elementy, odkazují na soubor vlastností komponenty. Soubor v sobě popisuje například tabulku pro tlumič přiřazující tlumící charakteristiku při dané rychlosti posuvu pístu. Ta je následně vykreslena křivkou. Soubor popisující zadanou charakteristiku pak řídí chování tlumiče při výpočtu.

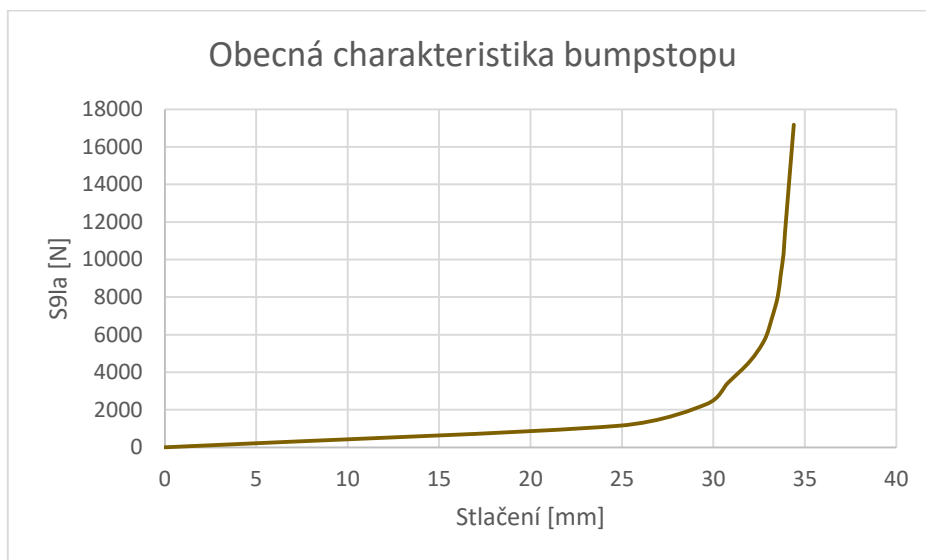
Definice pružiny vychází buď z definice délky pružiny a poměru tlumení, nebo druhou možností je předepsání charakteristiky podle délky stlačení pružiny v případě úvahy nelineární charakteristiky pružiny, či použití pomocné pružiny. V tomto případě je pružina definována právě pomocí její lineární charakteristiky, tedy stoupání silového odporu proti stlačení.

Tlumič přední nápravy má definovanou charakteristickou křivku přiřazující hodnotu silového odporu při rychlosti pohybu pístu tlumiče. Zde by předpis pouhým lineárním modelem nestačil a značně by odlučoval chování tlumiče od reality, a je třeba jej definovat přibližně tak, aby odpovídal charakteristice tlumiče použitého na skutečném voze.



Obrázek 12: Obecná charakteristika tlumiče vozidla

Reálná soustava zavěšení obsahuje také dorazy a ve virtuálním modelu je to třeba zohlednit. V softwaru Adams je lze najít pod pojmem Bumpstop a Reboundstop. Tyto dorazy jsou definované vzdáleností, kterou element urazí, než dojde ke kontaktu dorazových ploch.

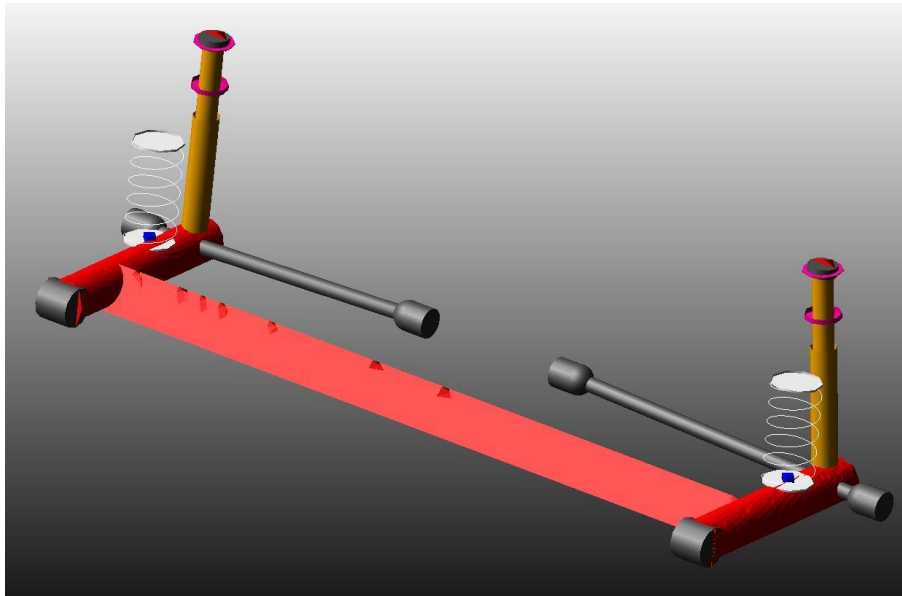


Obrázek 13: Obecná charakteristika bumpstopu

Silentbloky hrají v chování podvozku značnou roli a je třeba jim definovat správnou charakteristiku. Obdobně jako u tlumičů je tomu u silentbloků, které mají nelineární charakteristiku tlumení. Tato charakteristika je rozličná ve všech směrech pohybu a je třeba mít silentblok v modelu správně orientován vzhledem k definici charakteristik.

3.1.2. Modelování zadní nápravy.

Šablona zadní nápravy je v Adamsu tvořena flexibilním tělesem. Jelikož se tvarově neshoduje s nápravou na testovaném voze, je třeba vytvořit šablonu novou.

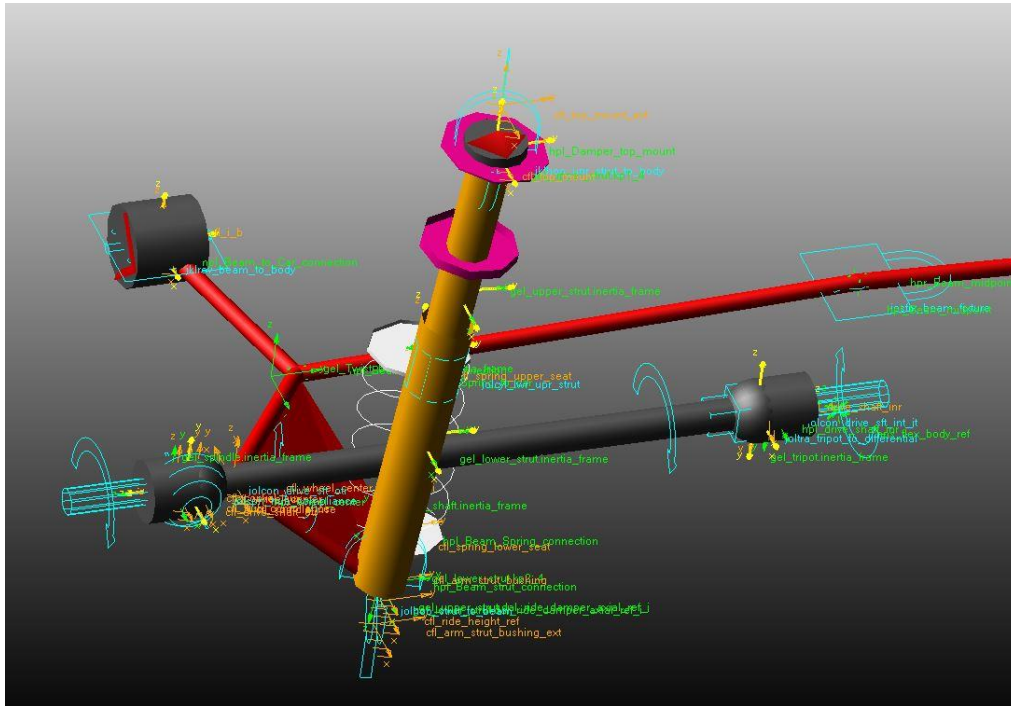


Obrázek 14: Šablonová zadní náprava

Prvním krokem je vytvoření hardpointů. Jde o body definující důležité body nápravy. Dalším krokem je na těchto bodech vytvořit tělesa nápravy. Pro správné fungování modelu je vytvořena levá a pravá polovina příčky. Je třeba doplnit, že řešení zadní nápravy jako jednoho centrálního tělesa se po mnoha pokusech ukázala jako nefunkční a bylo nutné najít funkční alternativu. Funkční alternativou jednotného tělesa je dvojice pevně spojených těles chovající se jako jedno. Jelikož se v tomto modelu zanedbává kroucení nápravy, jsou obě poloviny spojeny pevnou vazbou. Celá náprava poté bude moci vykonávat pouze kývavý pohyb kolem uložení do karoserie. Mezi ostatními body jsou následně vytvořena tělesa a ložiska, spodní a vrchní části tlumiče.

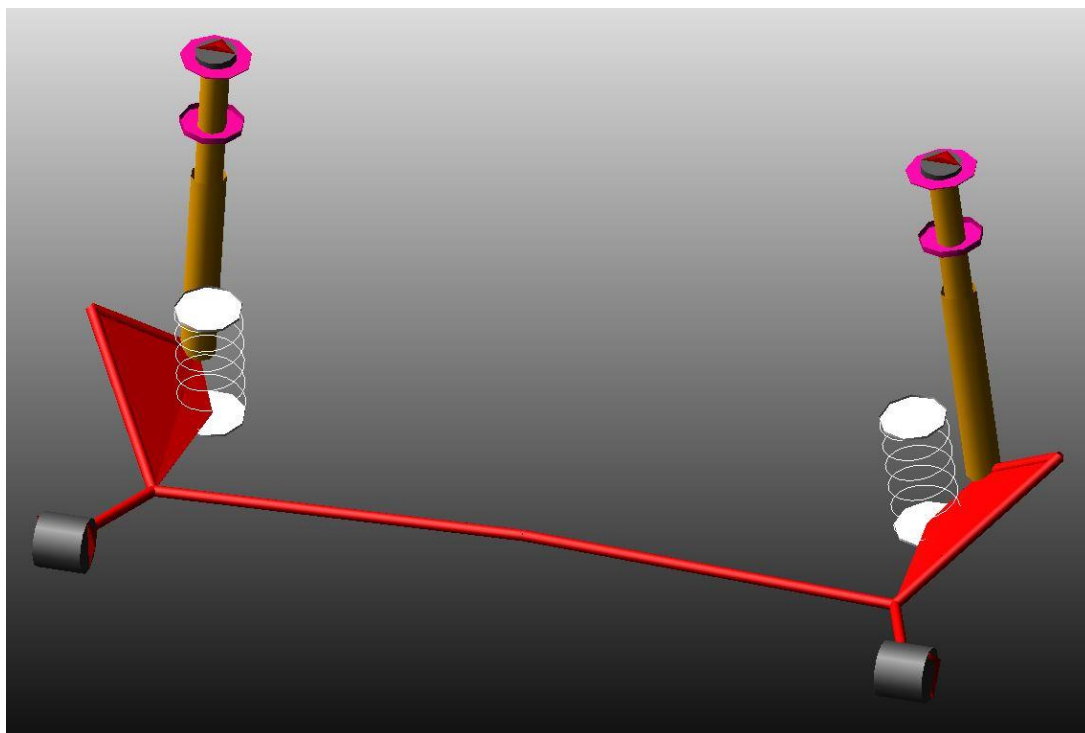
Dalším krokem je definování silových prvků. Tlumič je těleso skládající se ze dvou komponent, pístu a válce, a na jedné straně je uchyceno do vozu a na druhé do nápravy. Pružina je definována mezi uložení do nápravy a do vozu. Následně se dodají dorazy tlumičů a silentbloky do uložení nápravy k vozu a tlumičů do vozu.

Třetím krokem je definování vazeb mezi jednotlivými tělesy. Mezi nápravou a vozem je definován rotační pohyb, mezi tlumičem a vozem a tlumičem a nápravou je umístěn Hookeův kloub. Mezi spodní a vrchní částí tlumiče je definována posuvná vazba. Ložisko vůči ku nápravě dostane rotační vazbu.



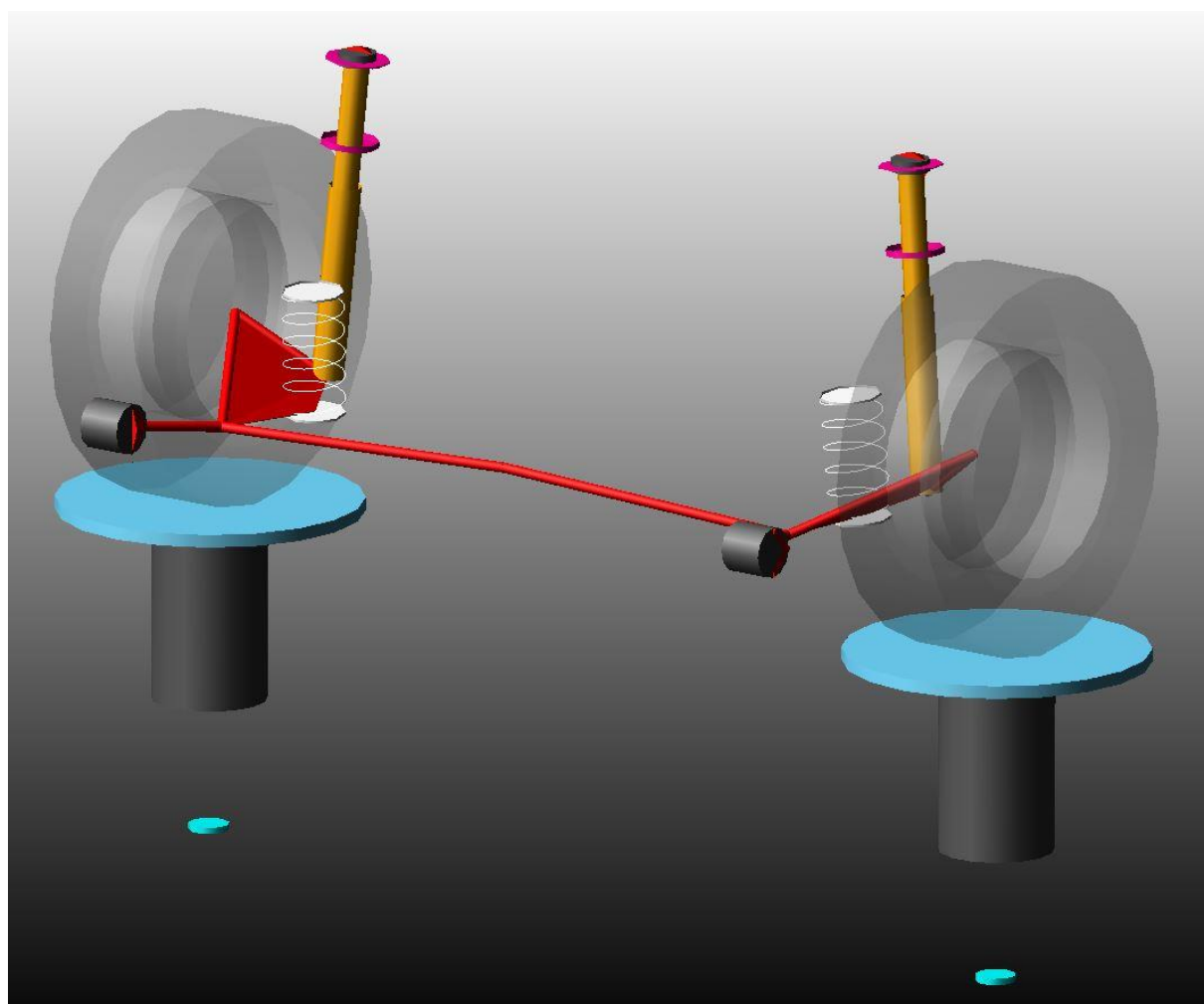
Obrázek 15: Model zadní nápravy s viditelnými vazbami

Čtvrtým krokem je definice charakteristik elastokinematických členů jako tomu bylo u přední nápravy. U tlumiče, dorazu tlumiče a silentbloků se dodefinují charakteristiky odpovídající zkušebnímu vozu. Pružina je definována tlumící konstantou, vloženou délkou a délkou nezátíženého stavu, kterou se nadefinuje předpětí pružiny. Při nastavování parametrů vozu se vychází ze stavu vozu, který stojí na zemi, a komponenty podléhají zátěži odpovídající hmotnosti vozu.



Obrázek 16: Model zadní nápravy

V tomto momentě je sestavena zadní náprava a je třeba ověřit její funkčnost. Jak již bylo zmíněno, během stavby bylo vytvořeno několik variant s různým přístupem ke stavbě modelu. Právě simulace nápravy ukázala, která řešení fungují a která ne. Současné řešení, stejně jako přední náprava, je simulováno samostatně při sledování chybových hlášek a upravováno do té doby, dokud chybové hlášky zcela nevyjmizí.

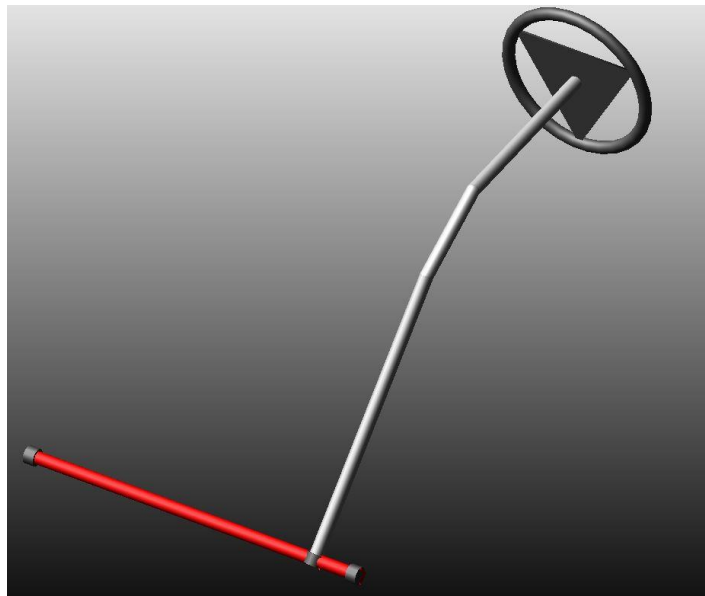


Obrázek 17: Zadní náprava při simulaci samostatné nápravy

3.1.3. Modelování dalších částí vozu

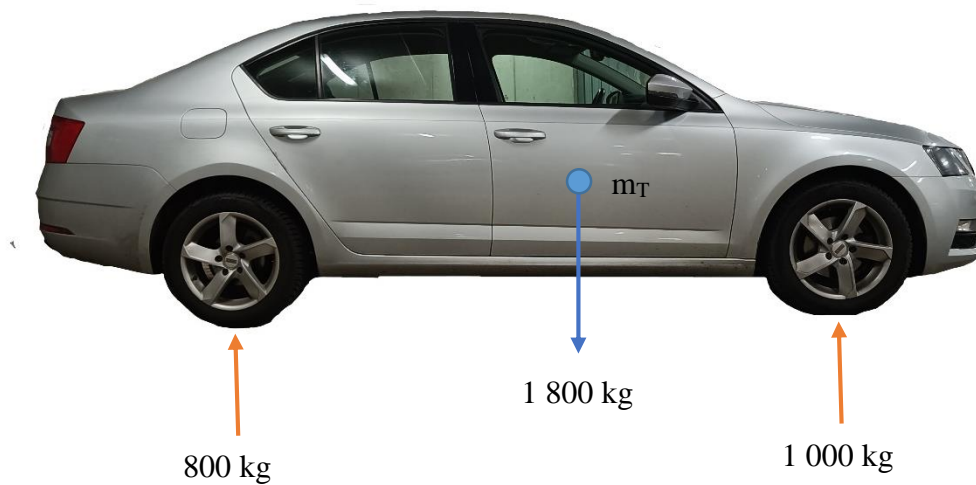
Pro stavbu modelu celého vozu je minimálně třeba definovat více než jen model přední a zadní nápravy. Software vyžaduje modely předních kol, zadních kol, řízení, karoserie vozu a pohonné jednotky.

Řízení vychází ze šablony, a protože má již provázané komunikační kanály pro práci s McPherson šablonou, bude vhodné opět vyjít z jejího využití. Úprava spočívá v posunutí bodů do polohy navazující na model zavěšení. Body spojení táhla řízení s převodkou řízení se sladí, aby si odpovídaly, a poté je již celé řízení funkční. Pro dodatečnou přesnost je volant posunut do odpovídající polohy skutečného vozu. U systému je provedena kontrola jednoduchou jízdou zkouškou celého vozu.



Obrázek 18: Model řízení

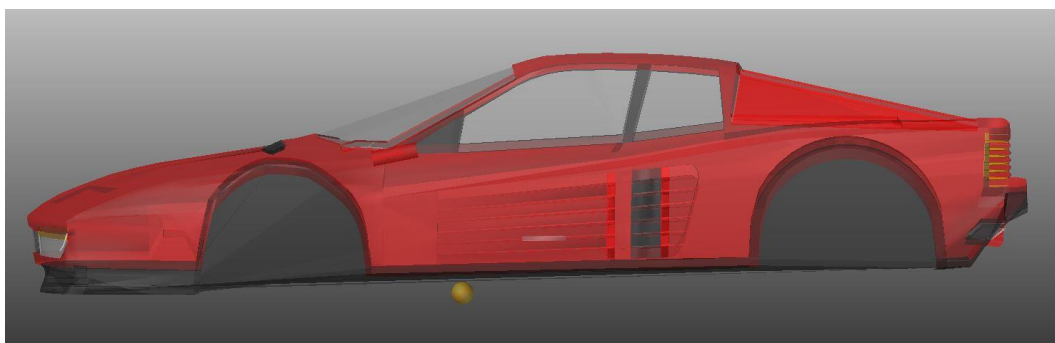
Karoserie vozidla je prvek, který slouží pro definici spojení předního a zadního zavěšení. Jejím dalším úkolem je definovat polohu těžiště a hmotu v těžišti reprezentující hmotnost vozu. Hmotu a polohu těžiště vychází ze skutečného vozu, které bylo před provedenou zkouškou váženo. Samotnému modelu je ponechána grafická reprezentace šablonové karoserie pro lepší sledování pohybu karoserie při sledování virtuálního videozáznamu jízdny simulace. Model by bez reprezentačního tělesa fungoval stále stejně, avšak pro uživatelskou přívětivost je příhodné grafický model zachovat. Žlutá sféra na obrázku karoserie (obrázek 21) je bod reprezentující těžiště vozu.



Obrázek 19: Rozložení váhy vozu

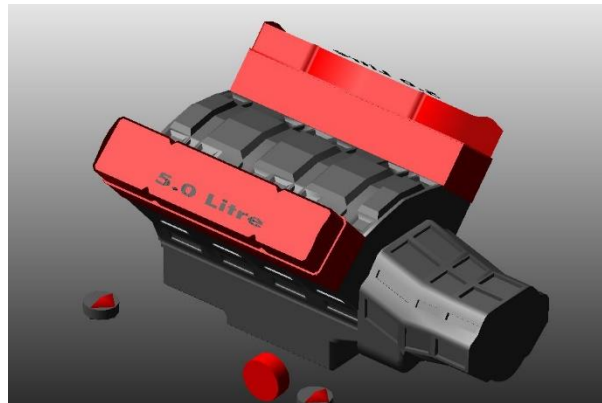
Mass	1800.0	Sprung Mass [%]	100.0	any
lxx	2.204453E+08	<input type="checkbox"/> Off-Diagonal Terms		
		lyy	1.067216E+09	
			lzz	1.181078E+09
CM location relative to	Part	1080.0,0.0,120.0		
Density	<input checked="" type="radio"/> Material <input type="radio"/> User Entered			
Material Type	.materials_steel			

Obrázek 20: Definice hmoty a těžiště karoserie



Obrázek 21: Karoserie vozidla

Pohonná jednotka má v šabloně grafickou reprezentaci motoru s osmi válci a podélným uložením. Vzhled nemá vliv na fungování modelu. Hlavním prvkem v tomto modelu je připojení na poloosy. Pohonná jednotka je posunuta do polohy, kde se bude napojovat na přední poloosy. Hmotu motoru je definována velice blízko nule, jelikož odpružené hmoty jsou již kompletně obsaženy v modelu karoserie.



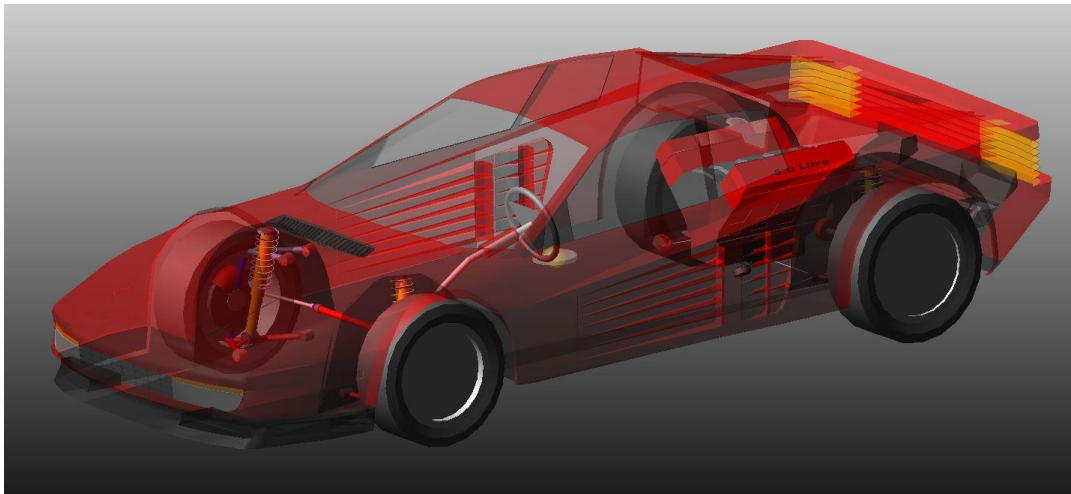
Obrázek 22: Model motoru

Kola jsou v Adamsu reprezentována několika způsoby. V každém případě je fyzická reprezentace stejná, ale rozhodující je charakteristika a výpočtový model, na které se model odkazuje. Kolo může být popsáno pomocí modelu Fiala, Pacejka či FTyre. Pro účel zjednodušeného modelu tato práce vychází ze základního modelu kola. Základní model využívá výpočtový model dle Pacejky. Hmotu kola odpovídá kolu použitým na voze o rozměru 18 palců, které má katalogovou hmotnost 11,5 kg. Hodnota vychází z katalogu Škoda Auto. Pneumatika o odpovídajícím rozměru ke kolu má dle katalogu pneumatik 10,95 kg. Dohromady má celá sestava kola 22,45 kg. Geometrické parametry taktéž souhlasí s rozměry zvoleného kola.

3.1.4. Modelování celého vozu

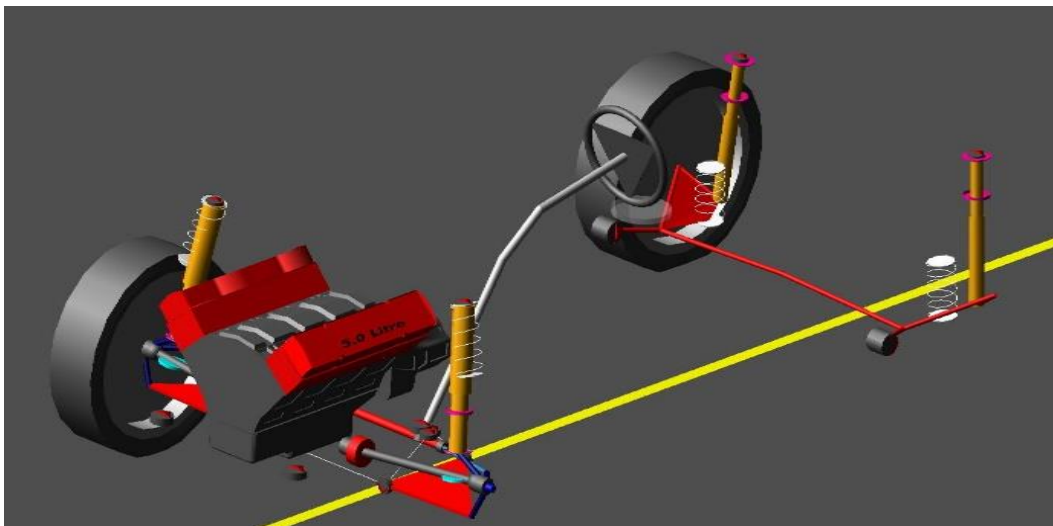
Při stavbě modelu celého vozu je nejprve nutné pochopit funkci komunikačních kanálů. V softwaru jsou zvané Communicator. Tyto komunikační uzly jsou naprosto klíčové pro správné fungování sestavy. Každý model obsahuje vstupní a výstupní uzly a modely na sebe navazující musí mít shodně nazvané komunikační uzly. To, co přesně komunikátor vykonává, je transfer informací členů, které jsou propojeny. Na modelu nápravy je uložení do karoserie definováno pomocí součásti typu Mount, tedy uložení. Tato součást s sebou nese právě zmíněný komunikátor, který poté karoserii předá informaci, že právě vrchol tlumiče je ta část, která je v karoserii uložena pevně, a síly, rychlosti a zrychlení, které se na vrcholu tlumiče vyskytují, se stejným způsobem přenáší do karoserie. Při stavbě sestavy je třeba správně hlídat komunikátory a také vytvořit nové pro nově vytvořené a modifikované komponenty. Tím se zaručí správné spojení jednotlivých modelů dohromady. Při stavbě modelu bylo třeba vytvořit všechny komunikační kanály pro zadní nápravu a modifikovat kanály pro nápravu přední. Při špatné definici komunikačního kanálu výpočet skončí během prvních pár sekund nesplněním základních podmínek, nebo dojde k chybnému výpočtu. Při jednom z pokusů došlo například k provedení výpočtu, ale při nájezdu přední nápravy na nerovnost došlo ke katapultování zadní nápravy mimo výpočtovou oblast, což vedlo k ukončení výpočtu. V jiném případě propadla přední náprava vozovkou. Takových pokusů proběhlo mnoho, dokud nebyly všechny komunikátory definovány správně.

Při modelování celého vozu je postupováno systematickými kroky. Prvním validačním pokusem modelu celého vozu je otevření šablony celého vozu, u které je přední náprava nahrazena upravenou sestavou. Následně je provedena simulace jízdy celého vozu. Při prvním pohledu je vzhled sestavy nestandardní, ale komunikační kanály fungují správně a textový soubor výpočtu neviduje žádná chybová hlášení. Identicky se verifikuje funkčnost zadní nápravy. Třetím krokem je verifikace fungování obou náprav nahrazených v modelu sestavy. Ve všech případech je provedena simulace jízdy přes šablonovou překážku a sledováno chování celého vozu.

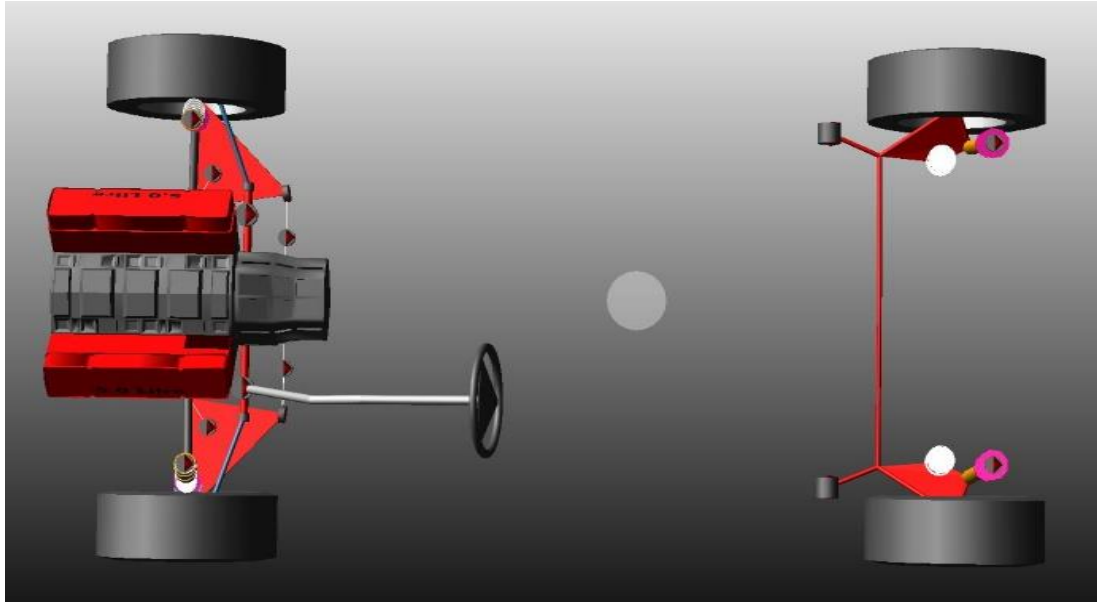


Obrázek 23: Šablona celého vozu

Při znalosti správného fungování obou náprav na vzorovém modelu je možno přejít na stavbu kompletního modelu celého vozu složeného z vytvořených částí. Po složení sestavy je první krok audit modelu. Audit modelu je funkce, která kontroluje více prvků modelu, například momenty setrvačnosti k osám X, Y a Z. Dále sleduje, zda se v modelu nenachází fyzikálně nesmyslné definice, které by mohly zabránit správnému průběhu modelu. Po zjištění chyb z auditu a jejich opravy je možné spustit simulaci jízdy. V aktuálním stavu je model kompletní a připraven k práci.



Obrázek 24: Model sestavy vozu



Obrázek 25: Model sestavy vozu shora

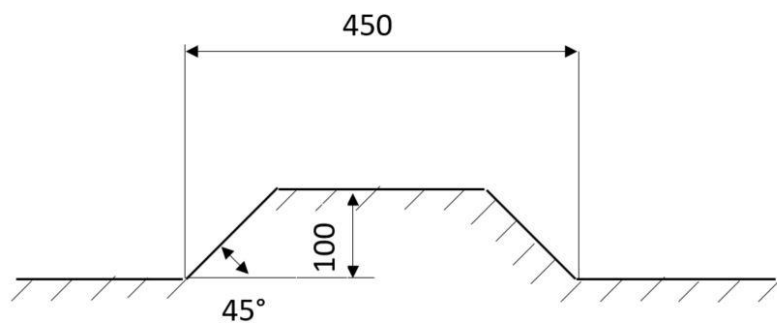
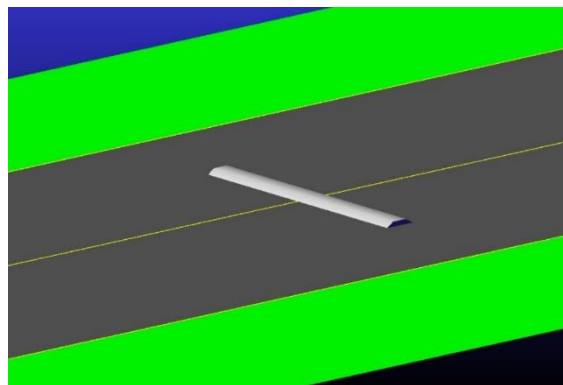
3.2. Definice nerovnosti v modelu

Program MSC Adams Car obsahuje databázi vzorových cest pro simulaci jízdy. Kromě rovné cestou bez nerovností je také k dispozici hrbolatá cesta se sinusovým profilem, nájezdová rampa, nebo překážky typu „plank“ reprezentující hranol na silnici, případně „pothole“ reprezentující díru ve vozovce. Pomocí programu Visual Studio Code jsou modifikovány tratě tak, aby odpovídaly řešené nerovnosti. V textovém souboru se definuje překážka a její parametry, které se následně vykreslí i v modelu. Po úpravě je otestována funkčnost modelu nerovnosti šablonovým modelem vozidla celého vozu. Vůz překonal nerovnost oběma nápravami a nedošlo k žádné chybě v řešiči, čímž lze považovat model překážky za funkční.

3.2.1. Pozitivní nerovnost

U pozitivní nerovnosti je upravena hodnota výšky na 0,1 metru, šířka na 6 metrů, aby bylo zaručeno, že nerovnost přejede vozidlo oběma koly. Dalším změněným parametrem je úhel nerovnosti, který byl definován kolmo ke směru jízdy, aby vozidlo najelo oběma koly na nerovnost zároveň. Posledním parametrem, který je upraven, je poloha nerovnosti vůči počátku. Kratší vzdálenost k nerovnosti ušetří výpočtový čas a sníží datovou náročnost výpočtu.

```
<Obstacle  
  name="PLANK"  
  active="true"  
  userDefined="false"  
  coordinate_system="local"  
  start_location="(-6 0 0)"  
  start_distance="0"  
  stop_location=(-22 0 0)"  
  stop_distance="0"  
  length="0.45"  
  width="6"  
  friction="0.9"  
  road_type="plank"  
  curb_height="0"  
  curb_round_off="0"  
  curb_top_width="0"  
  curb_edge_width="0"  
  curb_side="left"  
  sin_amplitude="0"  
  sin_wave_length="0"  
  sin_wave_offset="0"  
  plank_height="0.1"  
  plank_bevel_edge_length="0.075"
```

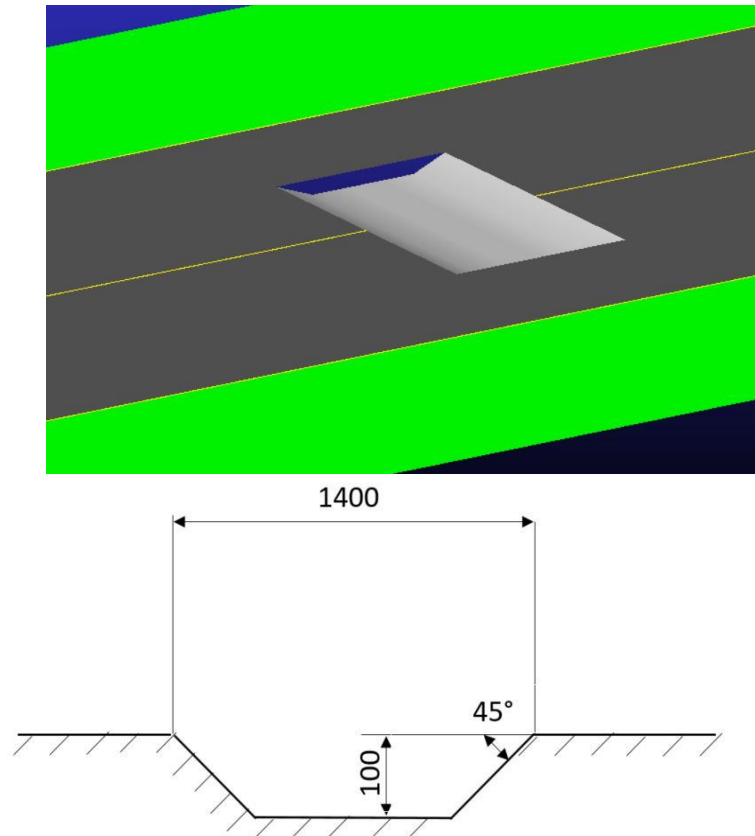


Obrázek 26: Definice nerovnosti v pozitivním směru. Textová definice (vlevo), vizualizace v softwaru (vpravo nahoře), rozměry nerovnosti (vpravo dole)

3.2.2. Negativní nerovnost

Negativní nerovnost vychází z úpravy nerovnosti typu „pothole“, která je originálně definována jako několik metrů dlouhá prohlubeň s nízkou šířkou, aby na ni reagovala jen jedna strana vozidla. Úpravou došlo k jejímu zkrácení na 1,4 metru, rozšíření na 6 metrů po vzoru pozitivní nerovnosti a hloubka byla upravena na 0,1 metru.

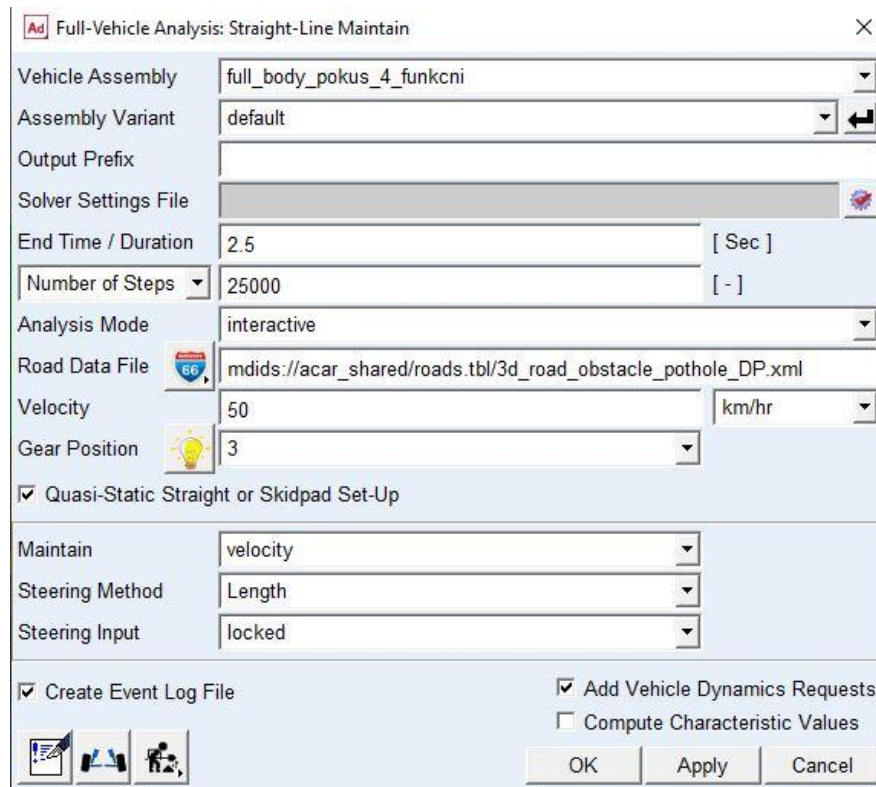
```
<Obstacle  
name="POTHOLE"  
active="true"  
userDefined="true"  
coordinate_system="local"  
start_location="(-6 0 0)"  
start_distance="0"  
stop_location="(-22 0 0)"  
stop_distance="0"  
length="1.4"  
width="6"  
friction="0.9"  
road_type="pothole"  
curb_height="0"  
curb_round_off="0"  
curb_top_width="0"  
curb_edge_width="0"  
curb_side="left"  
sin_amplitude="0"  
sin_wave_length="0"  
sin_wave_offset="0"  
plank_height="0"  
plank_bevel_edge_length="0"  
poth_depth="0.1"
```



Obrázek 27: Definice nerovnosti v negativním směru. Textová definice (vlevo), vizualizace v softwaru (vpravo nahoře), rozměry nerovnosti (vpravo dole)

3.2.3. Nastavení výpočtu

Software Adams Car má definované situace přímo pro požadavky automobilového průmyslu. V jeho knihovnách lze nalézt podklad pro simulaci celého vozu. Pro tento výpočet je vhodné užít simulaci jízdy v přímce, kdy je vstup do řízení uzamčen, takže vůz nikam nezatačí. Jízda v přímce má ještě řadu podružných variant, kde je pro tento problém volena funkce maintain. Maintain znamená zachování jízdní rychlosti. Při volbě Maintain se otevře specifikační okno, ve kterém se volí okrajové podmínky a modely. Jako modely se volí model vozu a trať, po které vůz pojedje. Dále se v okně volí rychlost vozidla a doba, kterou má výpočet trvat. Poslední důležitou hodnotou je počet snímků, na které bude celé časové okno rozděleno. S vyšším počtem snímků lze situaci sledovat přesněji, avšak za cenu delšího času výpočtu.



Obrázek 28: Nastavení výpočtu Maintain

Pro potřeby tohoto jízdního stavu stačí simulaci provést ve 2,5 s, kdy v 0,45 s vůz najede na překážku a během dalších dvou sekund dojde k jeho ustálení. Počet snímků zachycených v tomto časovém okně je stanoven na 25 tisíc, což je 10 tisíc snímků na každou sekundu. Pro účel této simulace jde o dostatečně jemný záznam pro vykreslení křivek a zachycení všech signifikantních vrcholů výkmitů. Snímkovací frekvence 10 tisíc snímků je také volena kvůli nastavené vzorkovací frekvenci snímačů použitých na vozidle. Při stejné snímkovací frekvenci se hodnoty lépe skládají k sobě.

Dalším prvkem, který lze v softwaru upravovat, je samotné nastavení simulace. Přesněji definice limitů přírůstkové chyby či celkové chyby, kterou by neměl model přesáhnout. Zde se nejprve vycházelo z výchozího nastavení softwaru. Při prvních pokusech výpočtů však docházelo k nedokončení výpočtu z důvodu nedostatečného povoleného množství výpočtových iterací. Ve výchozím nastavení má výpočet předepsaných 25 iterací, a pokud se zachová vysoká povolená přesnost, neměl by na kvalitu výsledku nárůst maximálního počtu iterací vnášet zkrslující vliv. V tomto řešení byl definován maximální počet iterací na 2000. Při samotném řešení se k tomuto limitu výpočet zdaleka nepřiblížil a s počtem 38 byla s nejvíce iteracemi počítána statická rovnováha modelu. Během testování modelu bylo nastavení korigováno pro navýšení přesnosti.

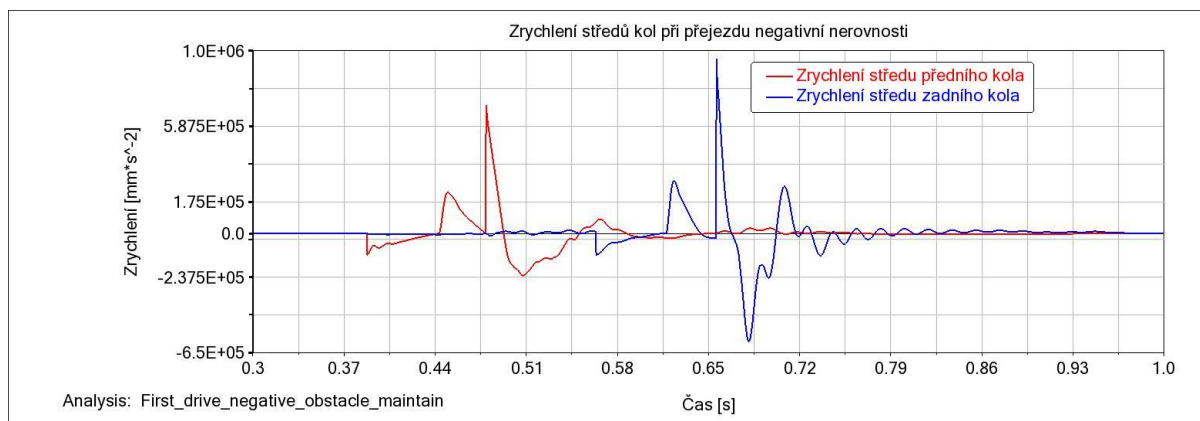
3.3. Výsledky prvotního modelu

V aktuálním stavu je výpočtový model plně funkční. Grafy na první dojem vykazují hodnoty bez nelogických špiček zrychlení. Prvotní výkmit jde ve správném směru, tedy kladném, a pohybuje se v řádech nižších stovek $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. Následně dochází k překlopení hodnoty zrychlení do záporných hodnot vyvolaných působením tíhové síly a síly od pružiny. Sekundární výkmit v pozitivním smyslu vyjadřuje opětovný kontakt pneumatiky s vozovkou a její snahu odrazit se zpět vyvolanou pružností pneumatiky. Po tomto prokmitu následuje postupné ustálení v nízkých desítkách až jednotkách $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$.



Obrázek 29: Průběh zrychlení středů kol náprav při přejezdu pozitivní nerovnosti

Při vyhodnocení přejezdu negativní nerovnosti je prvním jevem pád kola do nerovnosti. Při vyšší rychlosti nestíhá kolo udržovat stálý kontakt s vozovkou a na moment dojde k přerušení vzájemného kontaktu. Při opětovném kontaktu už díra z hlediska její délky končí a kolo je vymrštěno směrem vzhůru hranou nerovnosti. První výkmit vyvolá velký šokový impuls vygenerovaný nejspíše odrazem pneumatiky od vozovky.



Obrázek 30: Průběh zrychlení středů kol při přejezdu negativní nerovnosti

První výsledky jsou důležité pro přípravu fyzického testu. Nyní je známa oblast hodnot, ve které se může nacházet zrychlení středu kola. Nejkritičtější stavem je zrychlení $870\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ u zrychlení zadního kola.

4. Fyzické měření na vozidle

V tomto případě slouží zkouška ke zjištění korelace mezi skutečností a virtuálním modelem. Pokud má model sloužit pro řešení reálných situací, je třeba znát jeho kvalitu. Při dosažení vzájemné korelace modelu s fyzickým testem je možné předpokládat správnost fungování modelu a je možné jej využívat. V kapitole fyzického měření je popsána volba měřicí techniky a jejího umístění na voze, příprava vozu na jízdní zkoušku a průběh zkoušky. Následně je popsáno vyhodnocení výsledků z jízdní zkoušky a jejich příprava na korelační analýzu.

4.1. Volba měřicí techniky

Pro správné měření bylo třeba definovat okrajové podmínky a oblasti extrémních hodnot zrychlení, ve kterých se budou části vozu vyskytovat. Jelikož jde o zkoušku, ve které vznikají veliké rázové síly, je třeba zvolit vhodné akcelerometry, které budou schopné takové jevy správně zaznamenat. U zkoušky bylo stanoveno dosažení hodnot zrychlení přesahující $800 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Pro získání časové závislosti je třeba stanovit i minimální hodnotu vzorkovací frekvence. Při délce překážky je pro měření nutné dosáhnout frekvence minimálně 1000 Hz.

Výběr akcelerometrů podléhal nejen parametru maximální hodnoty, ale také měřitelné amplitudy. Některé modely akcelerometrů měly nízký limit měření, při jehož překonání by došlo k vynulování měření a data by poté byla znehodnocena. Nejlepším akcelerometrem, který byl k dispozici, je jednoosý piezorezistivní akcelerometr Kistler M0040A.

Akcelerometr karoserie - Osa Z

Akcelerometr karoserie - Osa Z



Akcelerometr středu kola - Osa Z

Akcelerometr středu kola - Osa Z

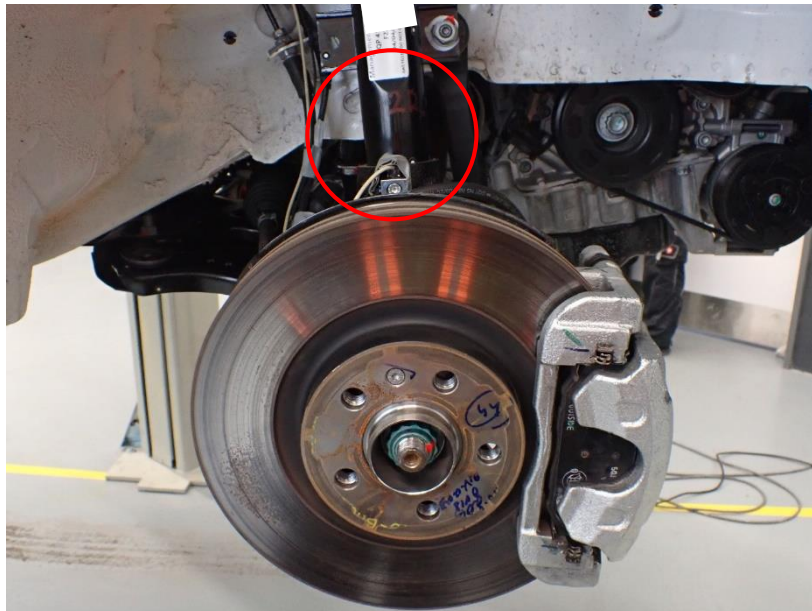
Obrázek 31: Polohy umístění senzorů

U akcelerometrů existuje více přístupů uložení. Uložení kov na kov pomocí šroubového spoje bylo vyloučeno hned na začátku, jelikož by vstupní signál náprav byl více zašuměný. Firma Kistler ke svým senzorům dodává vosk, který působí jako tlumící vrstva a také adhezivo. Vosk očistí signál od nejhrubšího šumu. Jelikož je děj zkoušky rázový, je třeba ověřit, kolik vosk snese bez odtržení. Odlepení senzoru je totiž nepřijatelné a mohlo by vést k jeho poškození nebo zničení. Byla provedena subjektivní zkouška, při které byl kovový hranol přilepen pomocí vosku k desce stolu. Hranol byl zatížen malou rázovou silou v řádech nízkých jednotek N, při které došlo k oddělení hranolu od stolu. Bylo usouzeno, že vosk není z hlediska soudržnosti vhodný pro tuto zkoušku. Finálním řešením bylo použití lepidla. Lepidlo je ideální kompromis mezi pevným spojením šroubem a měkkým spojením pomocí vosku. Pro zamezení uvolnění byl přesto pro jistotu senzor přilepen lepicí páskou. Lepicí páska slouží k zabránění ztráty senzoru při případném odtržení senzoru od kontaktní plochy. Jelikož bylo třeba akcelerometry orientovat správně do požadovaného směru, byly vytvořeny přípravky, které se uchytily ke komponentám vozu, na které se uložily akcelerometry.

Je nutné také rozhodnout, kam budou akcelerometry umístěny. Pro validaci je potřeba získat data zrychlení co nejbližě středu kola obou náprav a zrychlení karoserie v ose kola. Dále je třeba definovat, jak akcelerometr umístit, aby došlo k co nejspolehlivějšímu záznamu.

U přední nápravy je ideální umístit akcelerometr na těhlici. Je dostatečně velká a má několik volných ploch, kam je možné senzor umístit. Jako nejvhodnější místo byl označen vrchol těhlice u spojení s tlumičem. K těhlici je šroubem připojen přípravek nesoucí senzor a dle vodováhy je narovnána do co nejproveditelnější roviny. Na přípravek je pomocí lepidla uložen akcelerometr snímající zrychlení v ose Z kartézského souřadnicového systému. Účel uložení je lepší korelace s modelem, ve kterém je zrychlení odečítáno ve stejném souřadném systému. Tento přípravek je vidět na obrázcích 32 a zblízka na obrázku 33. Mezi další varianty uložení akcelerometrů patřilo spodní rameno. Idea byla připevnit akcelerometru zespod ramene, avšak tato poloha nebyla optimální kvůli vzdálenosti od středu kola.

Pro zrychlení karoserie je senzor uložen do motorového prostoru ke šroubům spojující horní uložené tlumiče do karoserie. Zde je senzor vlepen a přidržen lepicí páskou. Alternativním místem uložení byla volena přední nápravnice. Uložení na těleso karoserie se však ukázalo lepším řešením hlavně z hlediska vedení kabelu senzoru ke stanici.



Obrázek 32:

zrychlení na přední nápravě

Uložení snímače



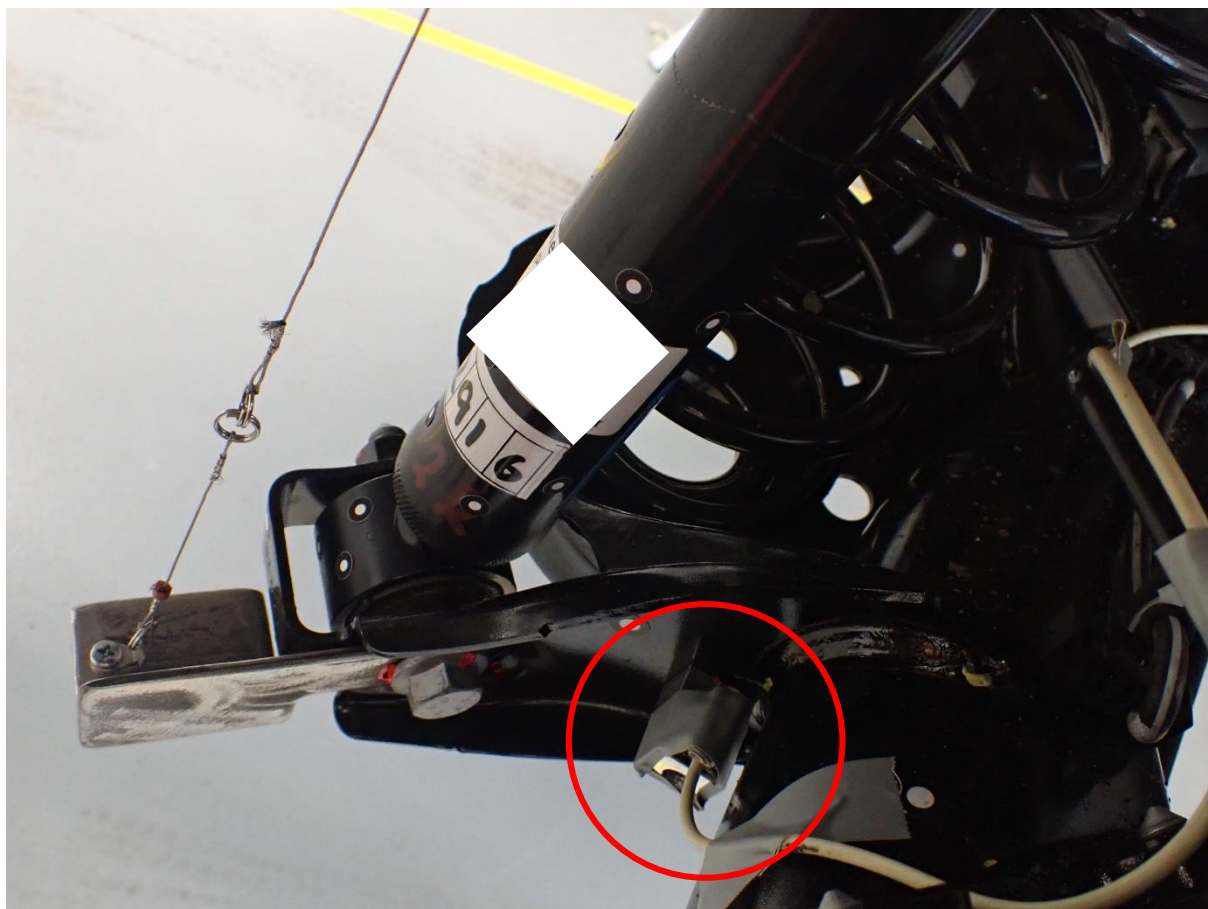
Obrázek 33: Detail uložení snímače na těhlici přední nápravy

U zadní nápravy byl první volbou pro uložení senzoru otvor pro uchycení ABS senzoru. Jelikož vůz při zkoušce jede bez ABS senzorů, bylo možné toto místo využít. Vlastní rozměry přípravku nedovolily implementaci snímače do původně zamýšleného místa. Bylo třeba nalézt nové místo, které svojí pozicí montáž umožní a zaručí ekvivalentní výsledky k prvně navržené poloze. Přípravek nesoucí akcelerometr je uložen na držák tlumičové jednotky. Stejně jako u přední nápravy, u zadního přípravku byla vrchní plocha nesoucí snímač vyrovnaná do osy Z, aby korespondovala s modelem.

Pro sledování zrychlení karoserie byl přípravek vytvořen tak, aby šel dobře uchytit k tlumičové jednotce. Uložení je zobrazeno na obrázku 35. Přípravek je tvořen ploškou a okem, které se vkládá mezi přírubu tlumiče a hlavu šroubu držící tlumič v karoserii. Ploška přípravku je podle CAD dat natočena pod takovým úhlem, aby na ní nalepený snímač ležel v rovině kolmé k ose Z. Pokud by nebylo z hlediska bezpečnosti možné uložit snímač k tlumičové jednotce, bylo vybráno náhradní místo pro uložení přípravku se snímačem na karoserii v místě uložení rezervního kola.

Všechny šroubové spoje jsou po dotažení natřeny červeným pruhem přes šroub a protikus, aby bylo možné mezi jízdami vizuálně potvrdit soudržnost spojů. Pokud by došlo k povolení nějakého spoje, lze skutečnost rychle identifikovat a spoj dotáhnout.

Na obrázku 34 je v levé části vidět lanko snímače, který byl součástí jiného měření prováděného na vozidle. V rámci měření tedy není toto zařízení podstatné.

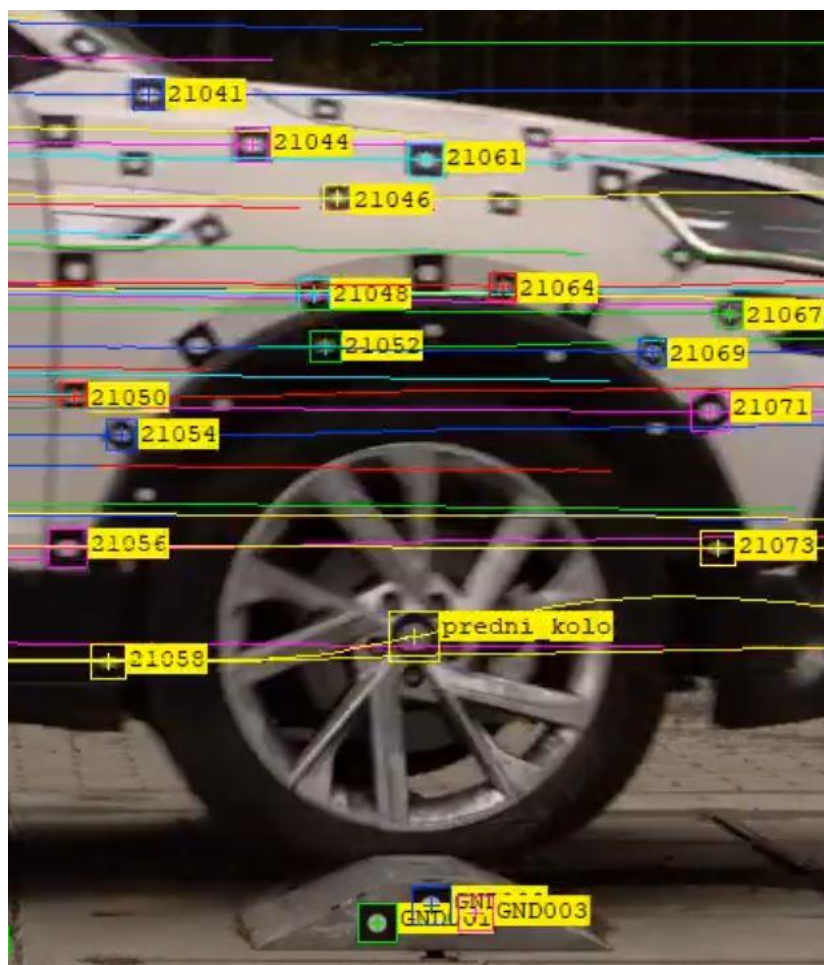


Obrázek 34: Uložení snímače na zadní nápravě vozu



Obrázek 35: Uložení snímače na zadním tlumiči pro sledování zrychlení karoserie

Mimo měření akcelerometry proběhne také měření pomocí fotogrammetrie. Pro měření bylo třeba polepit vůz a překážku terčí. Terče si software umí přiřadit a sledovat jejich trajektorii v průběhu průjezdu v zobrazované oblasti. Ke každému bodu pak přiřadí polohu v kartézském souřadnicovém systému pro každý zaznamenaný snímek. Vůz budou snímat dvě kamery tak, aby došlo k měření ve stereo prostoru. Rozmístění terčů je dáno hustěji kolem kol a řídce po zbytku karoserie. Kolem kola je rozložena řada terčů okolo lemu kol a jedním terčem je osazeno samotné kolo v jeho středu.



Obrázek 36: Snímek vozu s terčí z fotogrammetrie v průběhu zkoušky

4.2. Nastavení zkoušky

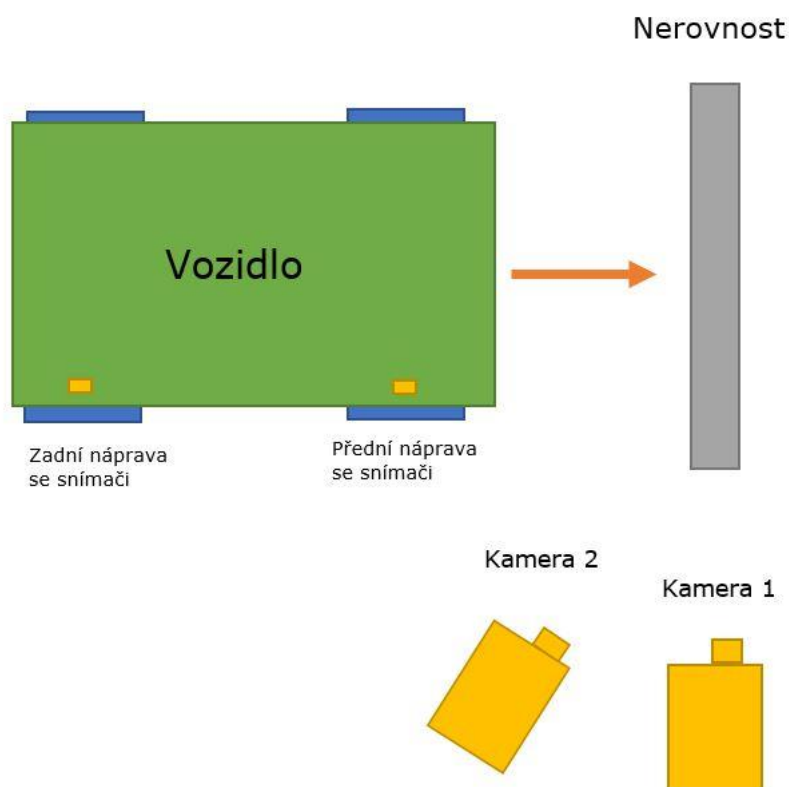
Zkouška vozu proběhla na uzavřeném polygonu s uměle vytvořenými překážkami odpovídající požadavku. Na trati je vybudována nerovnost v pozitivním i v negativním směru se stejnými geometrickými rozměry, jaké jsou uvedeny v části 3.2.2 definující nerovnost v modelu.

Vozidlo je třeba nejprve zkontrolovat a ověřit vyhovující technický stav. Dále je třeba uvést vůz do správné hmotnosti. Zkouška byla definována na vyšší zatížení vozu s hmotností 1800 kg celého vozu s rozložením hmotnosti ve prospěch přední nápravy. Pro správné navážení bylo nutné vůz postavit na váhy a vkládat závaží. Jako závaží byly použity pytle s hmotnostmi 5, 10, 15 a 20 kg a poté dutá torsa naplněná vodou simulující hmotnost pasažérů. Poloha umělých pasažérů je daná tím, že jsou usazení na sedadla a uchyceni bezpečnostním pásem. Pytle s pískem byly poté rozmístěny do zavazadlového prostoru, do dveřních přihrádek a i do motorového prostoru, aby bylo dosaženo správného rozložení vah. Po navážení vozu došlo k finální kontrole tlaku pneumatik. Jako poslední se kontrolovala bezpečnost vozidla. Jelikož vůz řídí člověk, je třeba upřednostnit hlavně jeho bezpečí. Z vozu je odstraněno ABS, které mimo jiné slouží i k odečítání rychlosti vozu. Pro odečtení přesné rychlosti je do vozu umístěn rychloměr, který řidiči udává přesnou rychlost jízdy dle satelitní navigace.

Aby bylo zjištěno správné fungování senzorů, provede se jednoduchá zkouška odezvy, kdy se popojede vozem po rovné ploše a sleduje se, zda dochází k měření signálu. Po provedení zkušební jízdy se ještě jednou potvrdí technický stav vozu a projde se záznam z akcelerometrů. Záznam nevykazoval žádné nestandardní výkmity, a tak po potvrzení funkčnosti došlo na samotnou jízdu zkoušku.

4.3. Průběh zkoušky

Vůz se připraví ve směru, ve kterém najede na již připravenou nerovnost. Řidič se rozjede na konstantní rychlost odpovídající zákaznickému provozu, kterou se snaží udržet s co nejvyšší přesností. Pomocí kuželů vytyčující směr navede vozidlo v co nejkolmějším směru na nerovnost. Až několik sekund po najetí na překážku může řidič zastavit vozidlo. Toto setrvání na rychlosti je z důvodu omezení vlivu brzdění na klonění a ustálení pohybu karoserie po přejezdu nerovnosti. Po každé jízdě se ještě dodatečně vůz kontroluje pro sledování stavu vozidla. Sleduje se, zda nedošlo k porušení spojů, defektu pneumatik, či porušení dílů. Takto se provede celkem šest jízd. Tři přejezdy nerovnosti v pozitivním směru a tři přejezdy nerovnosti v negativním směru.



Obrázek 37: Schéma průběhu zkoušky

4.4. Výsledky zkoušky

Z každé jízdy je k dispozici čtveřice řad naměřených hodnot, které je třeba odfiltrovat a získat sadu čistých dat. Jelikož se jedná o rychlou jízdní zkoušku s rázem vyvolaným hranou překážky, je vhodný filtr dat hledán v oblasti nárazových zkoušek. Norma SAE J211, případně ISO 6487, popisuje právě měřicí techniky u nárazových zkoušek. Tato norma definuje různé typy filtrů měřených signálů pro jednotlivé způsoby měření a jejich použití a nastavení. Pro akcelerometry na vozidle je dle normy doporučený filtr CFC180. CFC 180 je vysokofrekvenční filtr pro frekvence nad 1800 Hz. Z hlediska hledání ideálního filtru dat je tato volba považována za vhodnou a dále použita pro zpracování signálu.

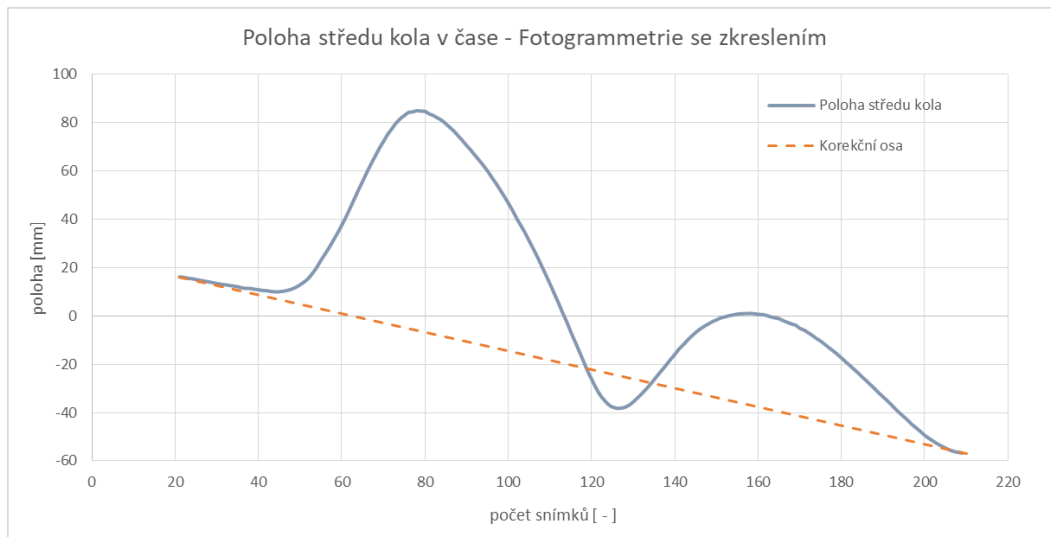
Výsledná sada vyfiltrovaných dat je vsazena do počátku časové osy tak, aby kontakt předního kola s nerovností vycházel do počátku časové osy. Jelikož jsou z přejezdu každé nerovnosti zaznamenány tři signály, je z nich vytvořena střední hodnota, která je brána jako výchozí pro validaci virtuálního modelu.

Pro tuto práci jsou klíčová data z vertikálního zrychlení středů kol. Při sledování křivek je v prvním výkmitu pozorovatelná reakce zadní nápravy vyvolaná pohybem karoserie. Obdobně je možné sledovat reakci přední nápravy při nájezdu zadní nápravy na překážku. Opět způsobená vzájemnou vazbou karoserií vozu. První kladný výkmit je zrychlení vyvolané nájezdem na překážku. Následovně záporné zrychlení vychází ze silového účinku pružiny a hmoty kola. Spodní extrém je poté zastaven návratem kola do kontaktu s vozovkou. Druhý výkmit v pozitivním směru je vyvolán odražením kola od vozovky zpět směrem vzhůru.



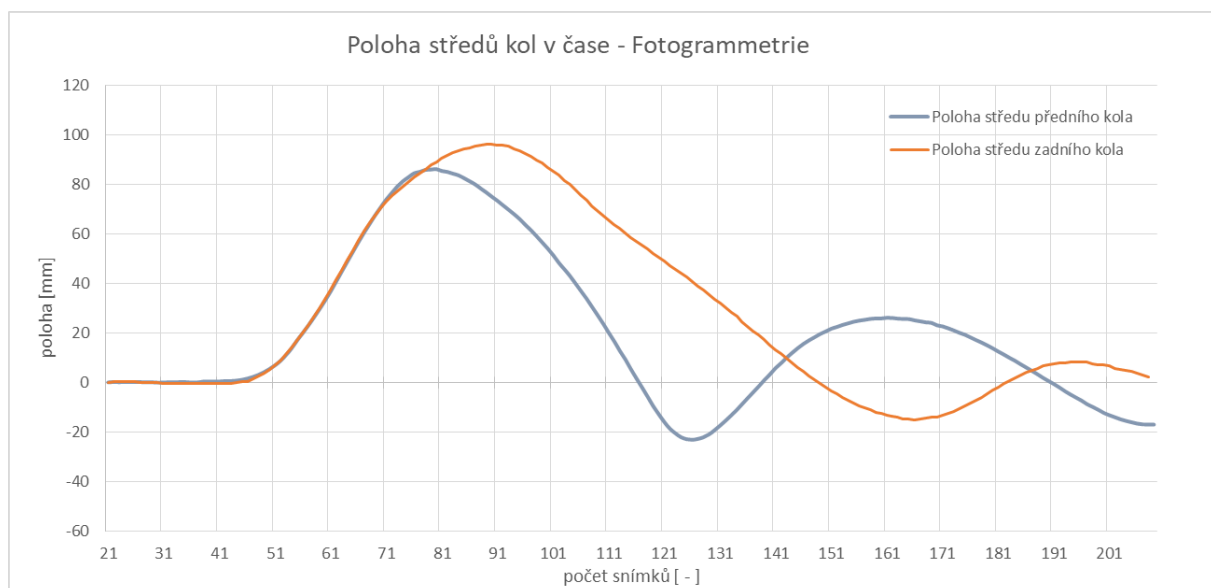
Obrázek 38: Zrychlení středu kol při jízdní zkoušce při přejezdu nerovností v pozitivním směru

Jelikož kamery nebyly uloženy symetricky vůči ose překážky, došlo při měření ke zkreslení sledovaných hodnot. S časem se vozidlo od kamery vzdalovalo mimo osy X i v ose Y, a na výsledcích se to projevilo pootočením vůči nulové poloze. Pravděpodobná osa reálného pohybu je v grafu na obrázku vynesena čárkovanou čarou.



Obrázek 39: Vertikální poloha středu kola z fotogrammetrie se zkreslením

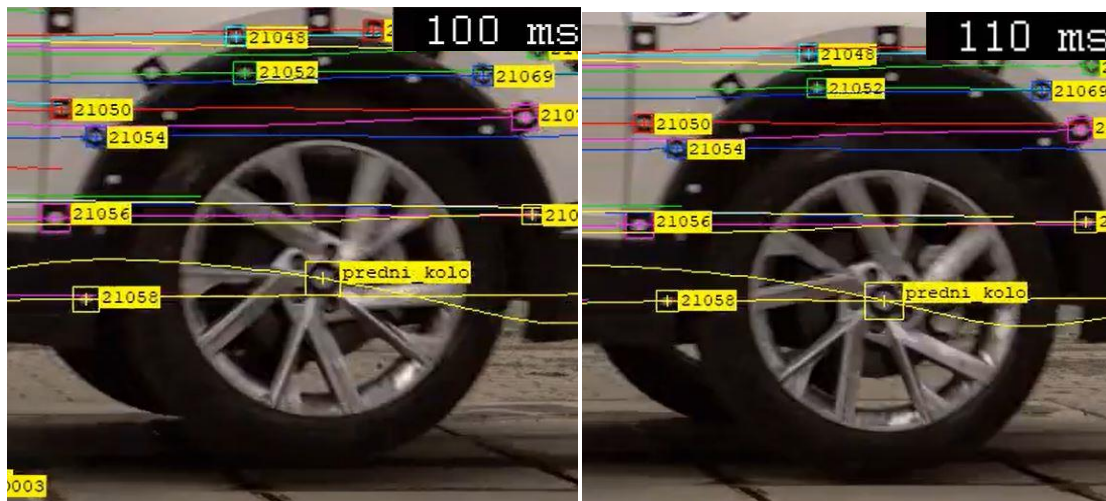
Sklon křivky je korigován, aby došlo k eliminaci vneseného zkreslení.



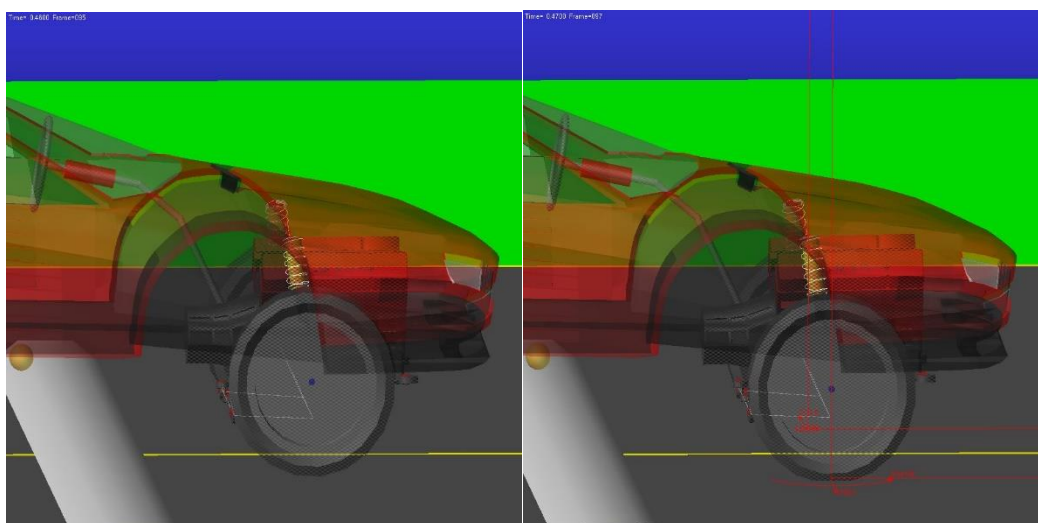
Obrázek 40: Poloha středu kola při přejezdu nerovnosti s korekcí zkreslen

Po korekci zkraslení dat z fotogrammetrie byla na modelu provedena jízdní zkouška při sledování středu předního kola stejně jako u dat z fotogrammetrie. Pro potřeby validace je využít videozáznam z kamer. Je možné takto porovnat čas, po kterém kolo zkoušeného vozu vypruží od překážky a dopadne zpět na vozovku, vůči výsledkům virtuálního modelu.

U testu došlo k nájezdu na překážku v 50 ms a přibližnému dopadu kola ve 110 ms. Virtuální model byl porovnán ve stejném časovém okně. Po 60 ms došlo ke kontaktu s vozovkou jako u skutečného vozu. Obdobě byla sledována zadní náprava a kontrola byla provedena také při přejezdu negativní nerovnosti. Díky tomu je možné sledovat podobnost pohybu kol virtuálního modelu a skutečného vozu.



Obrázek 41: Snímky návratu kola do kontaktu s vozovkou s časovým oknem



Obrázek 42: Návrat kola do kontaktu s vozovkou u virtuálního modelu

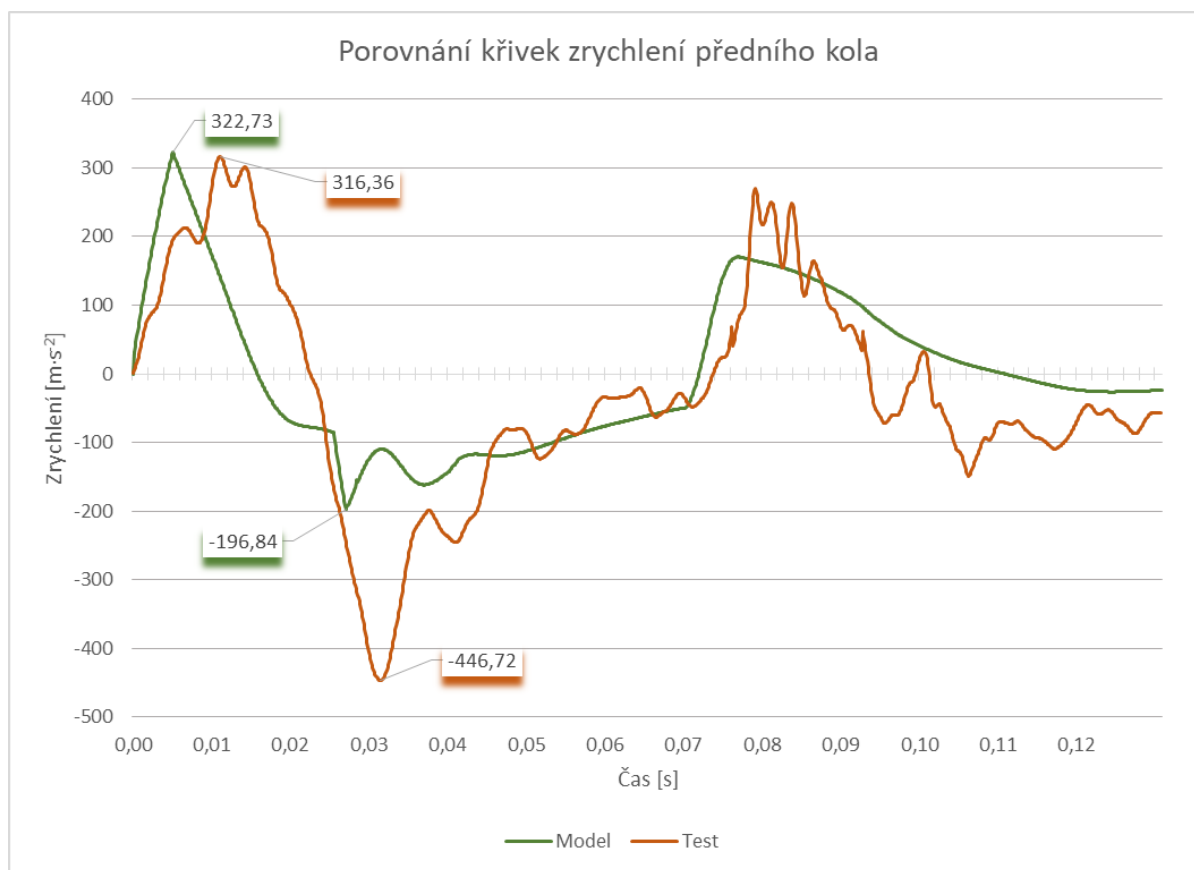
5. Porovnání modelu s fyzickým testem

Data z modelu je možné extrahovat do tabulky, která se vloží do jednoho souboru s průměrovanými křivkami přejezdu nerovnosti skutečného vozu. Pro kvalitní validaci modelu je vhodné nejen sledovat extrémní hodnoty, ale také to, jak jsou si křivky opticky podobné, zda je sklon podobný a pouze fázově posunutý, nebo jestli je nesouhlasný. Validace zde probíhá na sledování zrychlení středu kol při přejezdu pozitivní i negativní nerovnosti.

Pro zjištění přesnosti byla odchylka virtuálního modelu od dat z fyzického testu měřena na časovém úseku 500 ms. V tomto časovém úseku dojde k najetí vozu na překážku, maximální vertikální vychylce kola, návratu kola do kontaktu s vozovkou a ustálení větších výkmitů. Po tomto časovém úseku je již vůz ve stavu finálního ustalování pohybu, který vybudil přejezd nerovnosti.

$$\text{Přesnost modelu} = \frac{\text{Hodnoty praktické zkoušky} - \text{Hodnoty virtuální zkoušky}}{\text{Hodnoty praktické zkoušky}} \cdot 100 [\%] \quad (7)$$

Vzniklá odchylka podléhá mnoha vlivům, jakými jsou například zanedbání tuhosti karoserie, odchylky charakteristik měkkých členů, mezi které patří lůžka, poddajnosti spodních ramen předního zavěšení, nebo použitím jednoduššího modelu pneumatiky. Pro zvýšení přesnosti modelu je provedena řada modifikací a jemných úprav flexibilních komponent a je sledována změna velikosti chyby.

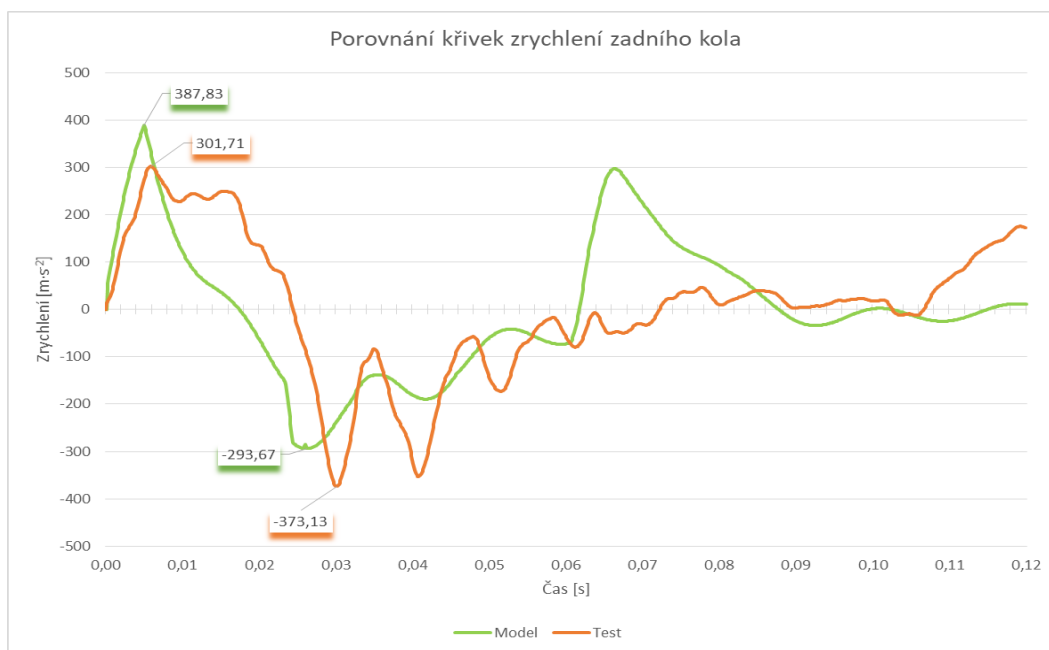


Obrázek 43: Zrychlení osy předního kola modelu a zkušebního vozu při přejezdu pozitivní nerovnosti

Z grafu je viditelná rozdílnost zrychlení vnesená již zmíněným zjednodušením. Maximum prvního výkmitu je fázově posunutý a vychází z flexibility pneumatiky. Minima je dosaženo dosažením konce dráhy kola, neboli dorazu při stlačení tlumiče. V datech z měření se objevuje také extrém v oblasti druhého kladného výkmitu, který podléhá otřesu, jenž vznikl při dosednutí kola k vozovce po odskočení. Výkmity jsou zde ovlivněné otřesem celé soustavy zavěšení. U modelu došlo pouze k odlehčení a nikoli odskoku kola, což může být zapříčiněno zjednodušením modelu pneumatiky. Co se týče odchylky v časovém úseku, je u přejezdu pozitivní nerovnosti odchylka přední nápravy 4% a zadní 75%

		Přední náprava		Zadní náprava	
		Zkouška	Model	Zkouška	Model
Extrém	Maximum	316,35 m·s ⁻²	322,73 m·s ⁻²	301,71 m·s ⁻²	387,83 m·s ⁻²
		2,02%		28,54%	
	Minimum	-446,7 m·s ⁻²	-196,83 m·s ⁻²	-373,13 m·s ⁻²	-293,67 m·s ⁻²
		55,90%		21,30%	

Tabulka 1: Odchylka maxima zrychlení při přejezdu nerovnosti v pozitivním směru



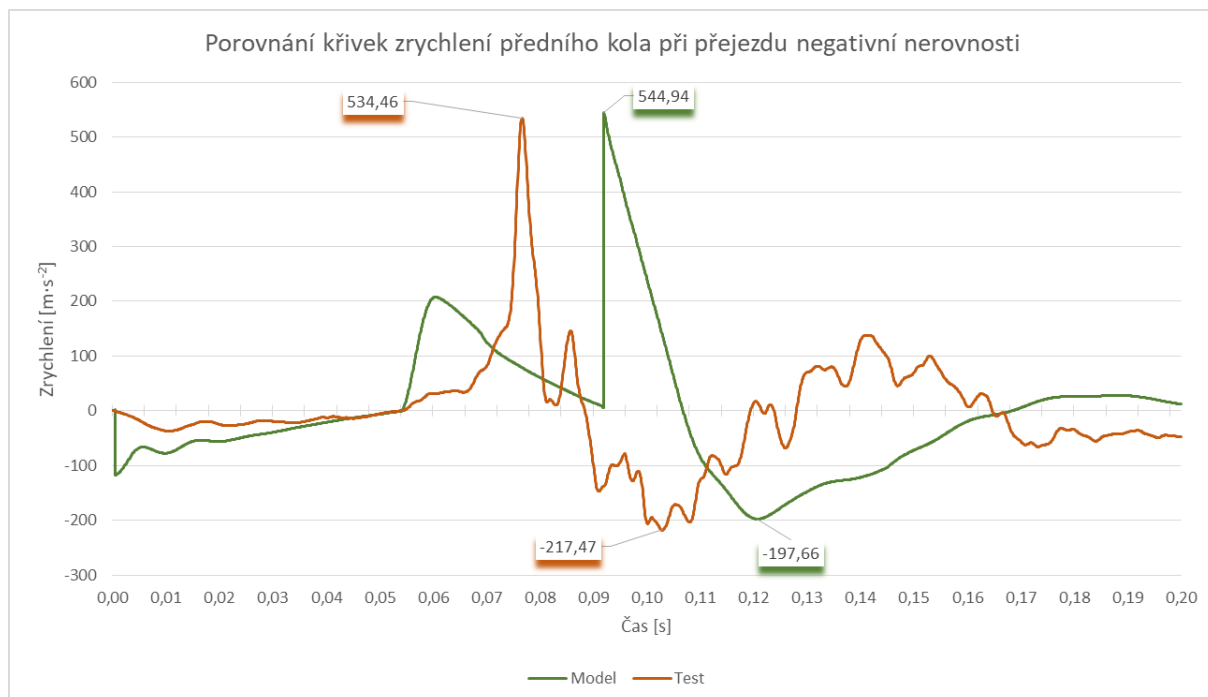
Obrázek 44: Zrychlení osy zadního kola modelu a zkušebního vozu při přejezdu pozitivní nerovnosti

U zadní nápravy je vyšší odlišnost znatelná již z prvního výkmitu. Fázový posun je opět vyvolán deformací pneumatiky při deformaci v nerovnosti. Tento skok je viditelný i u přední nápravy. V oblasti 0,07 s se v modelu vyskytuje velký výkmit, který se v reálném testu objevuje až později. To může být způsobeno rozdílem vlivu elasticity lůžek. Obecný trend křivky je vcelku srovnatelný. Charakteristiku chování podvozku lze považovat z hlediska rozsahu zjednodušení za vhodnou a dostatečně přesnou pro fungování v režimu zjednodušeného modelu.

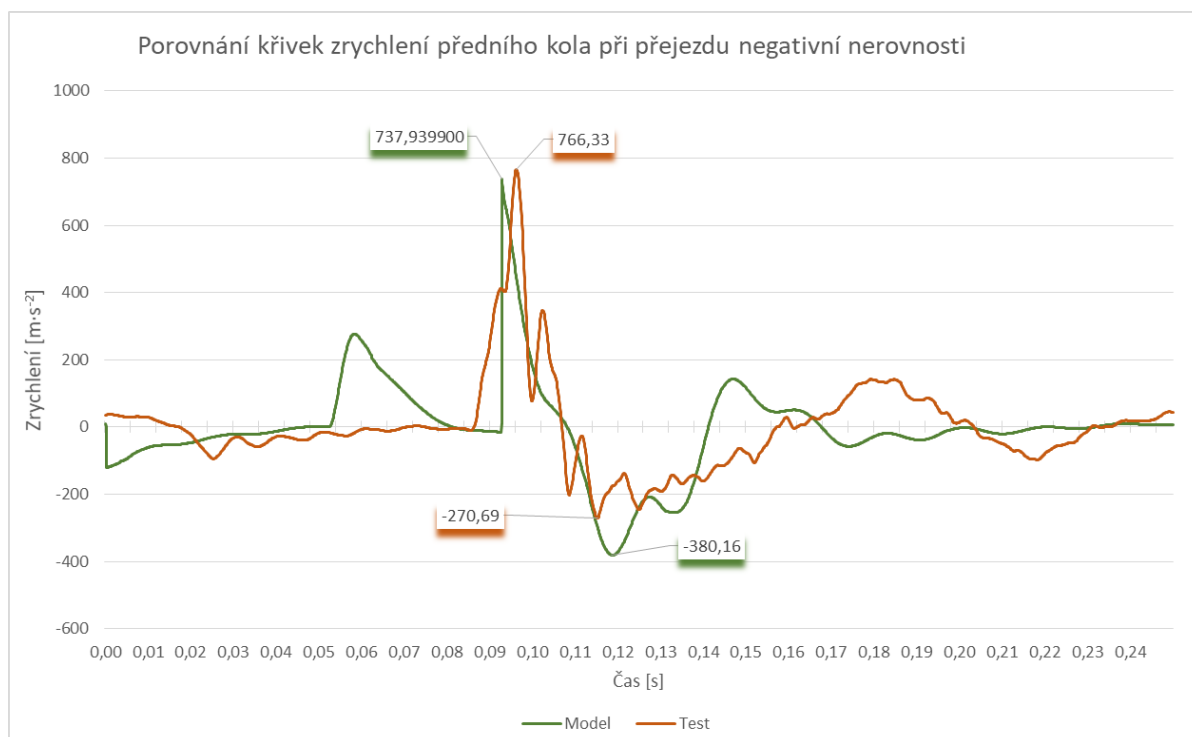
Při porovnání dat zrychlení středů kol u negativní nerovnosti je vidět fázový posun mezi extrémny u přední nápravy. U zadní nápravy je tato korelace daleko lepší a křivky se více překrývají. Velice dobrá je hlavně odchylka extrémních hodnot pohybující se v nízkých procentech. V obou případech je proti skutečnému testu v oblasti 60 ms výkmit. Vznik tohoto výkmitu může být vyvolán modelem pneumatiky, který vyvolá tento rázový stav.

		Přední náprava		Zadní náprava	
		Zkouška	Model	Zkouška	Model
Extrém	Maximum	534,44 m·s ⁻²	544,9 m·s ⁻²	766,32 m·s ⁻²	737,9 m·s ⁻²
		1,96%		3,7%	
	Minimum	-147,5 m·s ⁻²	-145,4 m·s ⁻²	-267,2 m·s ⁻²	-254,5 m·s ⁻²
		1,4%		4,7%	

Tabulka 2: Odchylka maxima zrychlení při přejezdu nerovnosti v negativním směru



Obrázek 45: Zrychlení osy předního kola modelu a zkušebního vozu při přejezdu negativní nerovnosti



Obrázek 46: Zrychlení osy zadního kola modelu a zkušebního vozu při přejezdu negativní nerovnosti

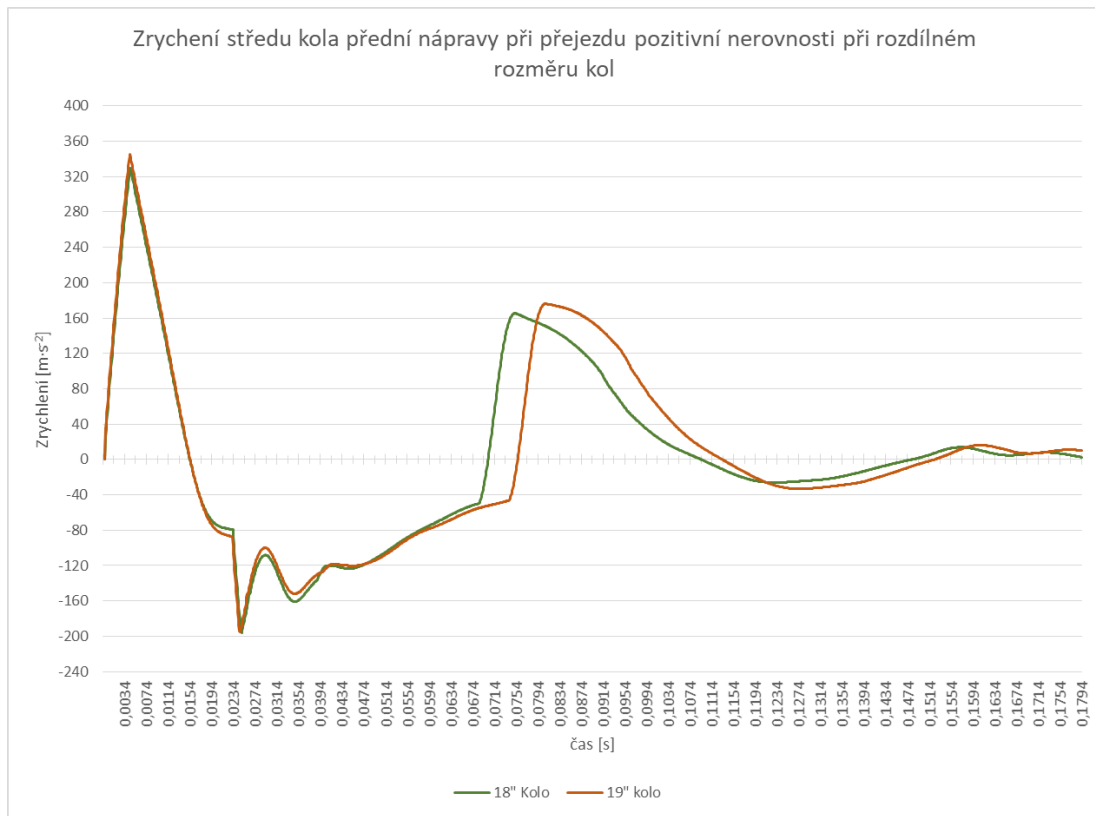
6. Využití modelu

Nyní je k dispozici funkční a validovaný model vozu. Účelem tohoto modelu je náhled do chování vozu při modelové situaci za alterace různých vlastností či komponent, jako může být změna velikosti kol či charakteristiky tlumení u tlumičů. Tento prvotní náhled může konstruktérovi ušetřit čas a zlepšit představu o řešené situaci. Grafy z obou reprezentací jsou kompletně obsaženy v přílohách ve větším měřítku pro lepší přehlednost.

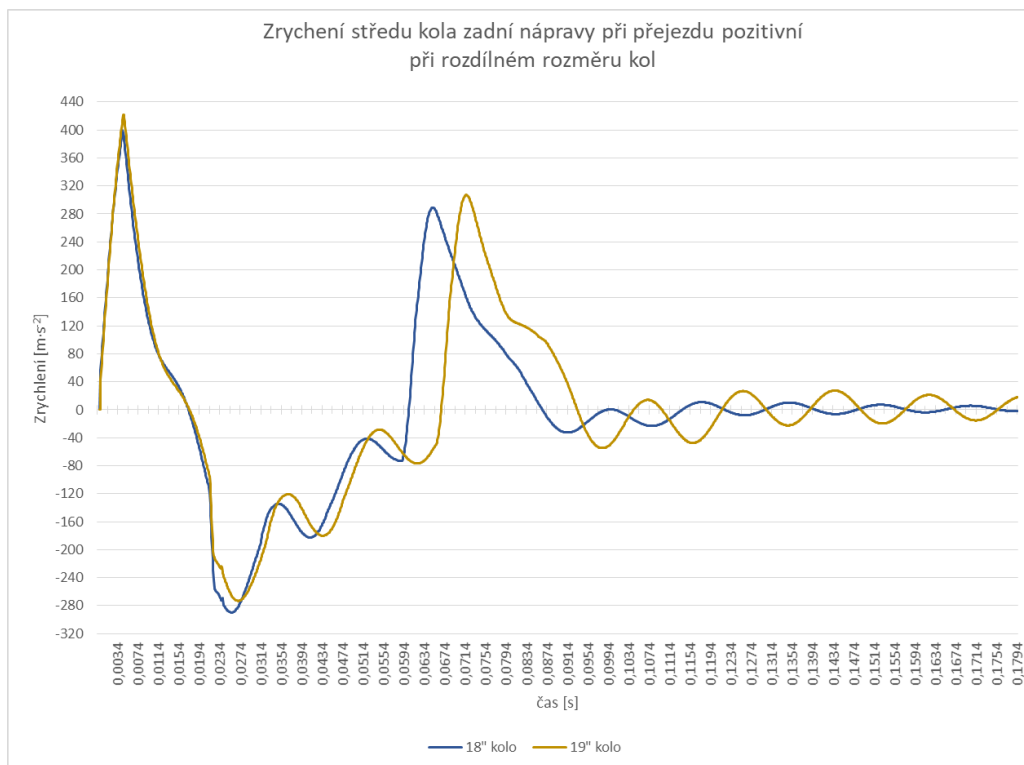
6.1. Citlivostní analýza – změna rozměru kol

Kola na automobilech existují v mnoha rozměrech a tvarech s rozdílnými tuhostními charakteristikami. Často jeden model vozu obsahuje paletu kol s rozdílnými rozměry průměru, šířky kola a rozměry pneumatik, která se budou lišit nejen velikostí, ale také hmotou. Finální výpočet v této práci sleduje rozdíly v kinematických a dynamických poměrech zavěšení při alteraci hmot kol. Pro alteraci je zvoleno kolo o rozměrech 19 palců a hmotností 13,5 kg a s pneumatikou o hmotnosti 12,25 kg. Druhé řešené kolo má hmotnost 25,75 kg, což je k původní hmotnosti kola 22,45 kg rozdíl 3,3 kg na jedno kolo. S nárůstem průměru kola je třeba snížit výšku bočnice pro dosažení stejného průměru kola s pneumatikou. Při nižší bočnici dojde ke změně vertikální tuhosti pneumatiky, tlumení atd. Modifikace proběhla v textovém souboru popisujícím charakteristiku pneumatiky, kde jsou definice tuhosti a tlumení konstantní.

Při úpravě modelu pro tento typ kola je proveden výpočet a výsledky této jízdní zkoušky jsou vůči sobě porovnány pro sledování rozdílu při osazení jiného rozměru kol. Po definování většího kola se jen mění odkaz na vlastnosti v nastavení modelu.



Obrázek 47: Zrychlení středu kola přední nápravy s rozdílnými koly



Obrázek 48: Zrychlení středu kola zadní nápravy s rozdílnými koly

Nárůstem velikosti kola je myšleno použití většího kola za zachování stejného vnějšího průměru pneumatiky. Se zvětšením kola roste hmotnost a neodpružená hmota kola. S rostoucím průměrem kola ale musí klesat výškový profil pneumatiky, stoupat tuhost bočnice a může klesat jízdní komfort. Předpoklad sloučení nárůstu hmoty a vertikální tuhosti ukazuje v grafech předvídaný nárůst zrychlení a ruku v ruce i síly, která se přenáší do komponent zavěšení a karoserie. Grafy korelace pro negativní nerovnost jsou k nalezení v příloze.

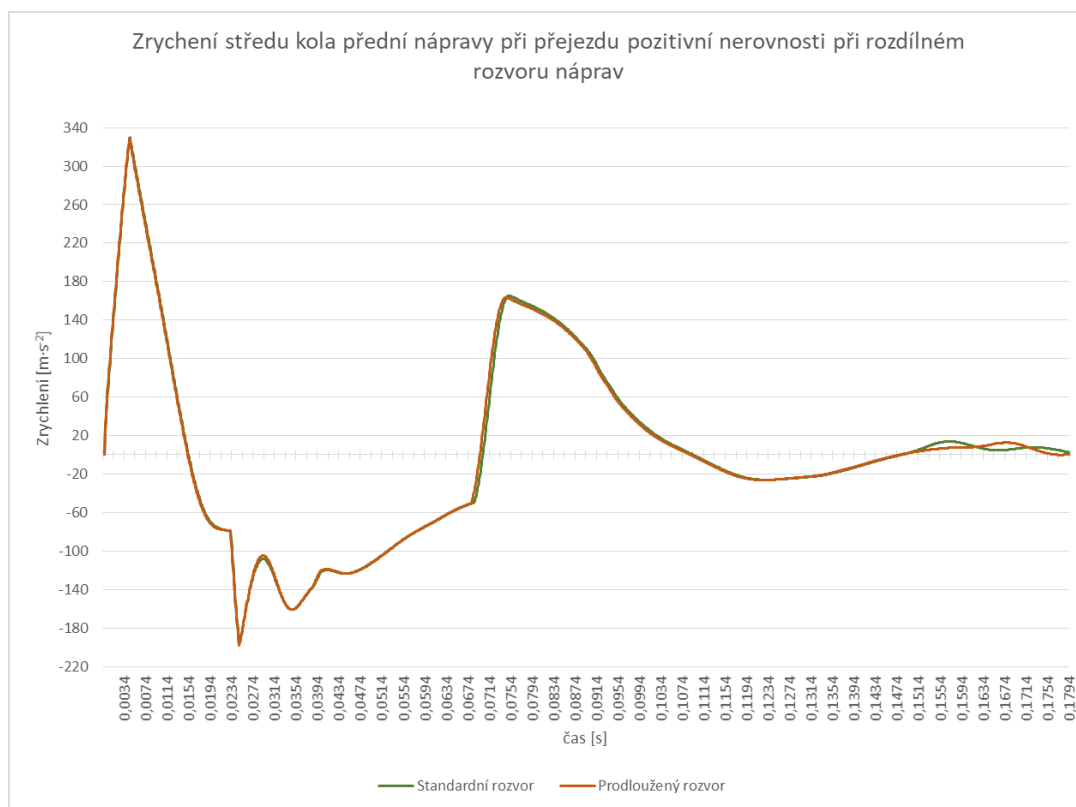
Typ výsledku	Rozměr kola	Maximum	Nárůst
Přední náprava	18"	329,66 m·s ⁻²	+ 4,67 %
	19"	345,05 m·s ⁻²	
Zadní náprava	18"	399,53 m·s ⁻²	+ 5,61 %
	19"	421,95 m·s ⁻²	
Posuv karoserie	18"	8,79 mm	+ 18,74 %
	19"	10,45 mm	

Tabulka 3: Nárůst hodnot při změně velikosti kol při přejezdu pozitivní nerovnosti

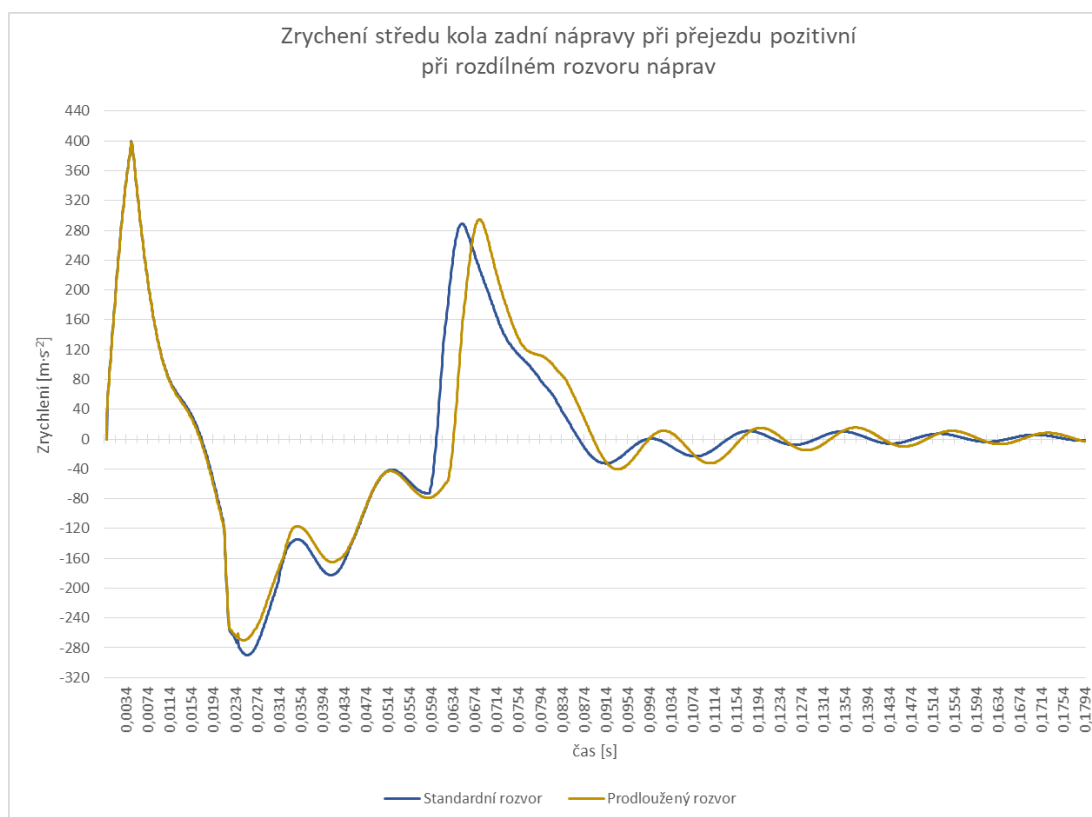
6.2. Citlivostní analýza - Změna rozvoru vozu

Standardem současného vývoje podvozků vozidel je tvorba platform. Ve stejné platformě mají vozy shodné elementy jako např. palivový systém, základ podvozkových modulů, paletu pohonných jednotek, řízení, apod. Vozy stejné platformy se mohou lišit rozvorem, charakteristikami kinematických elementů podvozku, aj. Další variantou, kdy se rozvor liší, je prodloužená varianta standardního vozu, která se vyskytuje převážně u luxusních vozů pro získání více místa v interiéru pro posádku. Tento pokus sleduje chování vozu při prodloužení rozvoru vozu o 100 milimetrů. Opět jsou za konstantní rychlosti zdolány nerovnosti a je sledován rozdíl průběhů zrychlení středů kol a posuv karoserie ve vertikální ose.

Z následujícího grafu je možné sledovat minimální vliv prodloužení rozvoru na zrychlení kola přední nápravy. Důvodem toho může být momentální nulové klonění karoserie v momentě prvního kontaktu s přední nápravou. Při kontaktu zadní nápravou už je karoserie v jemném pohybu a lehce vnáší vliv na dopad kola zpět k vozovce a ustálení zadní nápravy.



Obrázek 49: Graf zrychlení předního kola při změně rozvoru



Obrázek 50: Graf zrychlení zadního kola při rozdílném rozvoru

7. Závěr

Cílem této práce byla tvorba validního výpočtového modelu vozu přejíždějícího příčnou nerovností v pozitivním i negativním směru, který by ukázal reakci na změnu parametrů vozu jako je hmotnost, rozložení váhy na kola, rozvor, rozchod či velikost kol. Vytvořený model má dát náhled do těchto změn a poskytnout rychlou odpověď na otázku, zda se má vývojový inženýr myšlenkou změny nadále zabývat.

Pro validaci modelu bylo provedeno měření se skutečným vozem za identických podmínek. Pro samotné měření byl proveden přibližný odhad hodnot zrychlení, ve kterých se budou komponenty zavěšení při přejezdu nerovnosti pohybovat. Na základě toho byly zvoleny senzory a provedena jejich montáž na vůz. Pro dosažení více výsledků bylo provedeno šest jízd přes nerovnosti. Následný získaný signál se zpracoval pomocí filtrace vhodné pro rázové zkoušky měřené akcelerometry. Správnost volby měřících míst a zvolené filtrace signálu byla prokázána výsledky zkoušky.

Validace modelu s měřením potvrdila dobrou korelaci s odchylkou extrému v řádu procent a došlo k dosažení řádově stejných hodnot. V rámci fungování zjednodušeného modelu je možné prohlásit, že model dává kvalitní výsledky s ohledem na zanedbané parametry a prokazuje dobrou přesnost vůči měření. Pokud by bylo třeba dosáhnout vyšší přesnosti, bylo by nutné uvážit lepší model pneumatiky a u zadní nápravy použít flexibilní model semi-tuhé nápravy.

Následně byla provedena citlivostní analýza pro sledování chování modelu při změně parametrů. Analýza změny průměru kol dala očekávaný výsledek nárůstu zrychlení středů kol při zvětšení kol, respektive snížení výšky bočnice pneumatiky. Druhou citlivostní analýzou bylo zvětšení rozvoru a sledování nárůstu fázového posunutí křivek vyvolaného rozdílným časem nájezdu na nerovnost. Citlivostní analýza prokázala funkčnost modelu z hlediska změny parametrů.

Bylo prokázáno, že vytvořený model vozu v tomto stavu splňuje zadané požadavky z hlediska povolené odchylky od skutečného vozu a prokazuje dobrou funkčnost i při změně parametrů.

Reference

1. **VLK, František.** *Podvozky motorových vozidel.* 2. vyd. Brno : František Vlk, 2003. ISBN 80-239-0026-9.
2. **T. K. Garrett, K. Newton, W. Steeds.** *The Motor Vehicle.* Oxford : Butterworth-Heinemann, 2001. ISBN 07506 4449 4.
3. **Europa Lehrmittel.** *Tabellenbuch Kraftfahrzeugtechnik.* Gruitzen : VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL - Nourney, Vollmer GmbH Co. KG.
4. **MILLIKEN, William F. a Douglas L. MILLIKEN.** *Race car vehicle dynamics.* Warrendale : SAE International, 1995. ISBN isbn1-56091-526-9..
5. *5th International Munich Chassis Symposium 2014.* Munich : Chassis tech plus, 2014. ISBN 978-3-658-05977-4.
6. **John C. Dixon PhD, F.I.Mech.E., F.R.Ae.S.,** *Suspension Geometry and Computation.* místo neznámé : John Wiley & Sons, Ltd, 2009. ISBN 978-0-470-51021-6.
7. *Fahrwerkhandbuch - Grundlagen, Fahrwerktechnik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven.* ISBN 978-3-8348-0444-0.
8. **Michael Blundell, Damian Harty.** *The multibody systems approach to vehicle dynamics second edition.* Coventry UK : Elsevier, 2014. ISBN 978-0-08-099425-3.
9. **Pacejka, Hans.** *Tire and Vehicle Dynamics.* Helmond : Elsevier Ltd., 2005. ISBN 978-0-7506-6918-4.
10. **Mechanical Simulation Corporation.** <https://www.carsim.com/>. *Mechanical Simulation.* [Online] [Citace: 6. 10 2022.] https://www.carsim.com/publications/newsletter/2021_12_15.php.
11. **Dassault Systèmes.** 3ds.com. [Online] Dassault Systèmes. [Citace: 8. 10 2022.] <https://www.3ds.com/products-services/simulia/resources/simpack-multibody-simulation-and-working-with-simulia/>.
12. **Altair Engineering.** altair.com. [Online] Altair Engineering Inc. [Citace: 6. 10 2022.] <https://altair.com/motionsolve>.

13. AVL. avl.com. [Online] AVL List GmbH. [Citace: 14. 10 2022.] https://www.avl.com/symposium-on-internal-combustion-diagnostics/-/asset_publisher/gYjUpY19vEA8/content/avl-cruise-v2018-1-release.
14. AUDI AG. audi-mediacyenter.com. [Online] AUDI AG. [Citace: 14. 10 2022.] <https://www.audi-mediacyenter.com/en/audi-technology-lexicon-7180>.
15. Dieter Schramm, Manfred Hiller, Roberto Bardini. *Vehicle Dynamics Modeling and Simulation 2nd Edition*. Duisburg : Springer-Verlag GmbH Germany, 2018. ISBN 978-3-662-54482-2.
16. Bernd Heissing, Metin Ersoy. *Fahrwerkhandbuch Grundlagen Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven 2. Auflage*. Heidelberg : Vieweg+Teubner Verlag, 2008. ISBN 978-3-8348-0444-0.
17. Hexagon. hexagon.com. [Online] Hexagon AB. [Citace: 18. 10 2022.] <https://hexagon.com/products/product-groups/computer-aided-engineering-software>.
18. SAE. sae.org. [Online] SAE International, 19. 8 2022. [Citace: 12. 3 2023.] https://www.sae.org/standards/content/j211/1_202208/.

Příloha 1: Akcelerometr použitý při jízdním testu

Acceleration



Accelerometer

Type M0040A...

Uniaxial, Piezoresistive

Type M0040A... is a small piezoresistive accelerometer. It is designed to be compliant with the latest SAE J211/J2570 specifications.

- Measuring ranges $\pm 500 \dots 2\,000\text{ g}$
- Excitation $2 \dots 10\text{ VDC}$
- Low transverse sensitivity
- Silicon piezoresistive elements
- Critically damped sensor
- Zero offset $< \pm 20\text{ mV}$

Description

The sensor features built-in mechanical stops, anodized aluminium alloy housing and flexible cable output. The sensing element is fluid damped to extend useful frequency range and reduce the adverse effect of high frequencies ringing caused by sensor resonance.

Application

The sensor is designed especially for safety crash testing (auto, truck, recreational vehicles, shock testing).

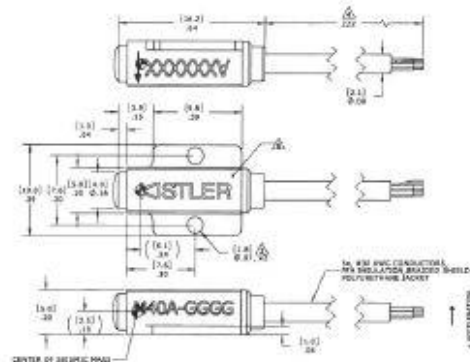


Fig. 1: Dimensions and center of seismic mass

Technical Data

Dynamic

Measuring range	g	± 500	$\pm 1\,000$	$\pm 2\,000$
Sensitivity ¹⁾ @ 10 VDC excitation	mV/g	0,30	0,15	0,075
Frequency response				
+2,5 %/-8 %	Hz	0 ... 1 100	0 ... 1 500	0 ... 2 500
+2,5 %/-20 %	Hz	0 ... 2 000	0 ... 2 700	0 ... 4 500
Natural frequency	Hz	>4 500	>6 000	>10 000
Amplitude non-linearity	% FSO	$< \pm 1$	$< \pm 1$	$< \pm 1$
Damping ratio, typ.		0,7	0,7	0,7
Transverse sensitivity	%	< 3	< 3	< 3
Shock limit	g	10 000	10 000	10 000

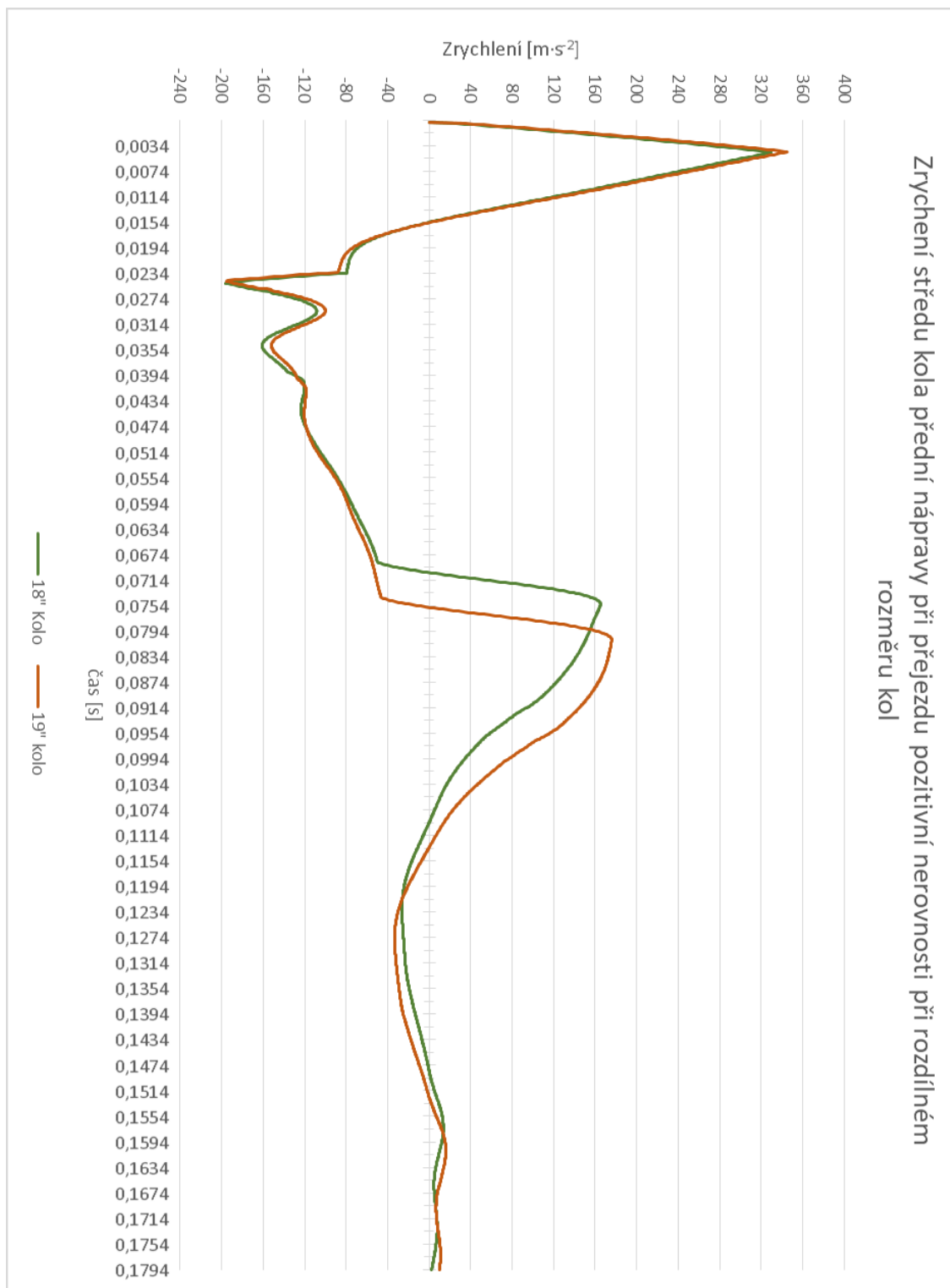
M0040A_003-091e-07-16

Page 1/2

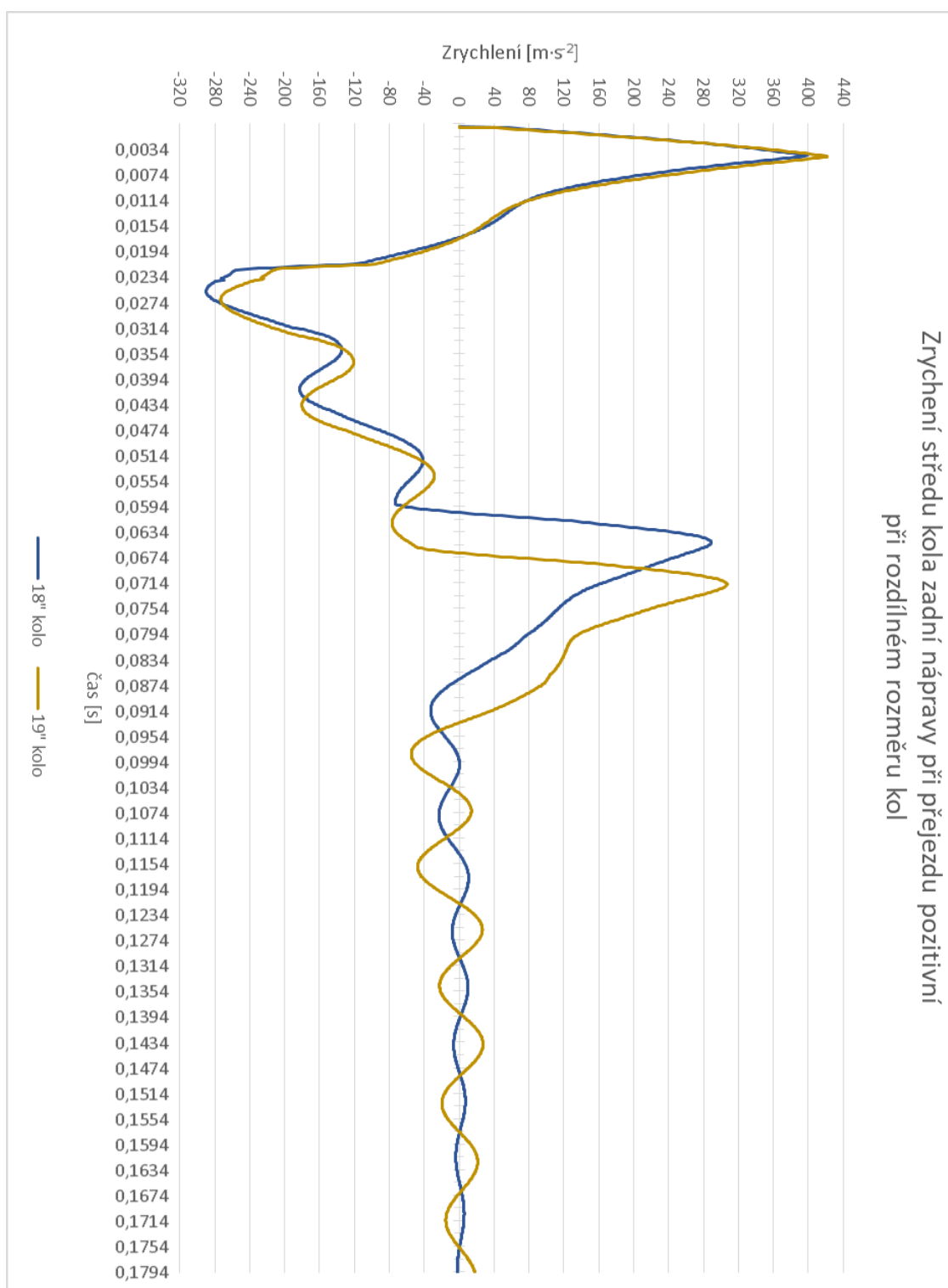
This information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes. Liability for consequential damage resulting from the use of Kistler products is excluded.

©2013 ... 2016, Kistler Group, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Switzerland
Tel. +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com
Kistler is a registered trademark of Kistler Holding AG.

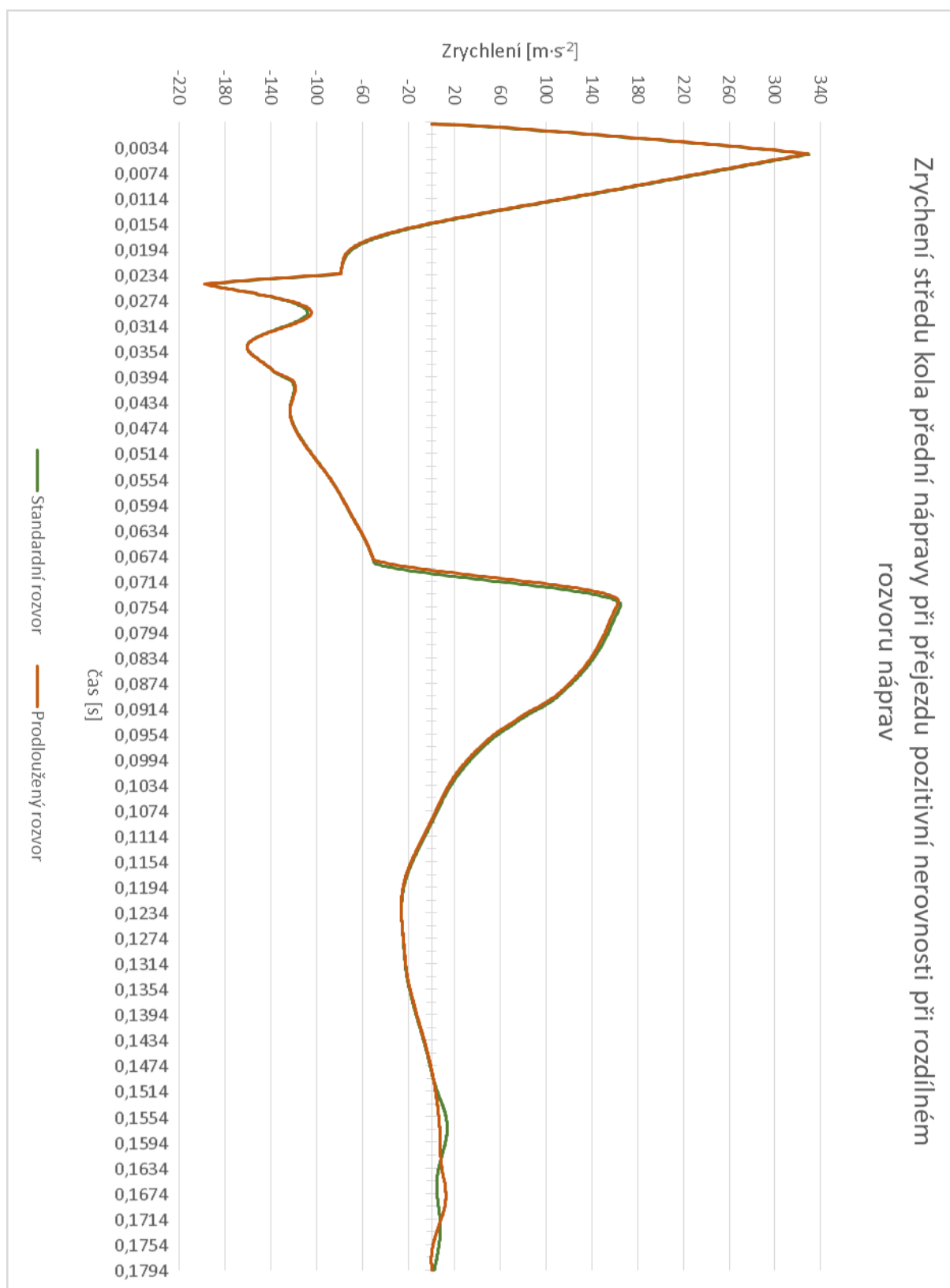
Příloha 2 – Graf zrychlení středu kola přední nápravy při přejezdu pozitivní nerovnosti při rozdílném rozměru kol



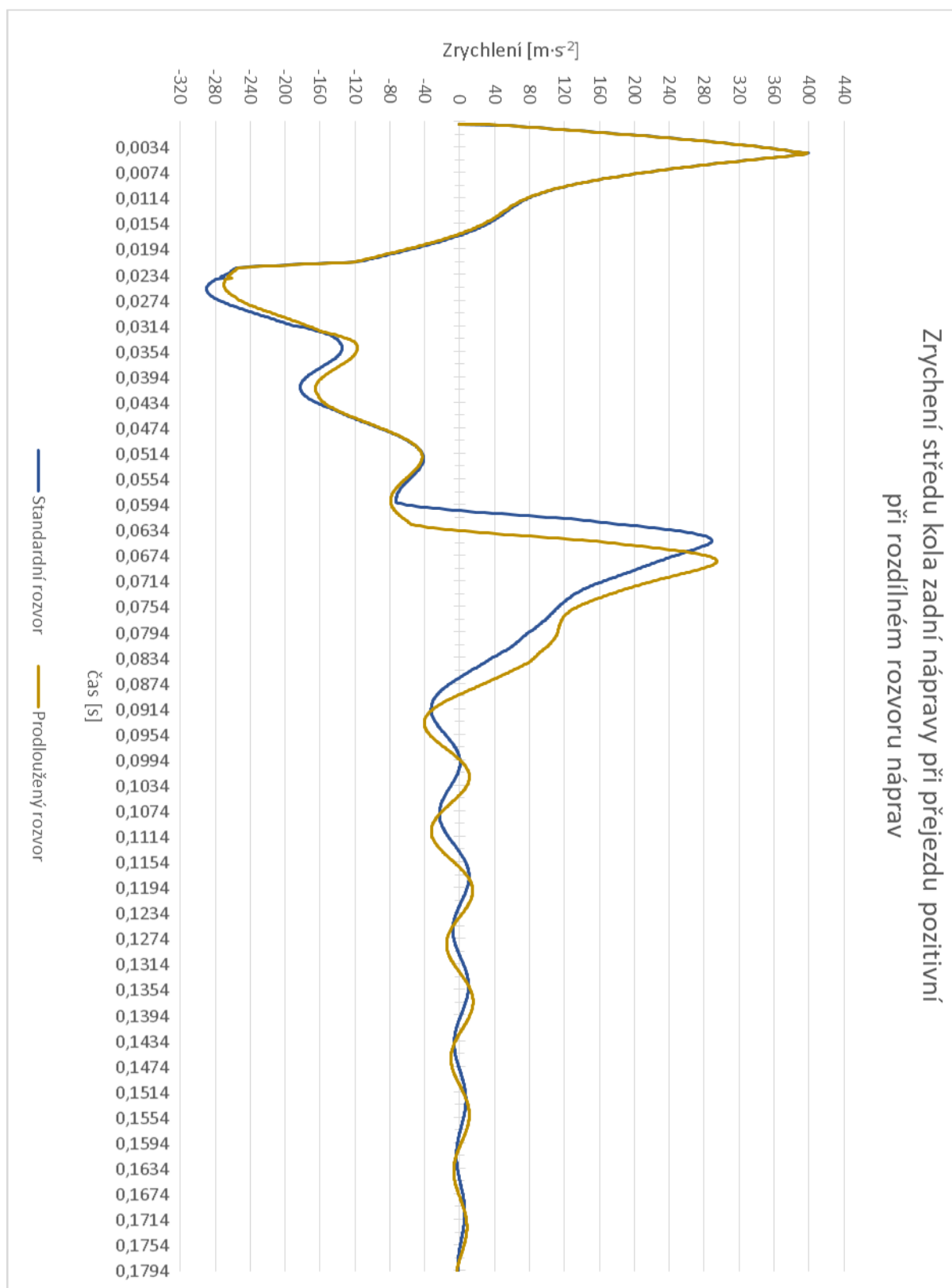
Příloha 3: Graf zrychlení středu kola zadní nápravy při přejezdu pozitivní nerovnosti při rozdílném rozměru kol



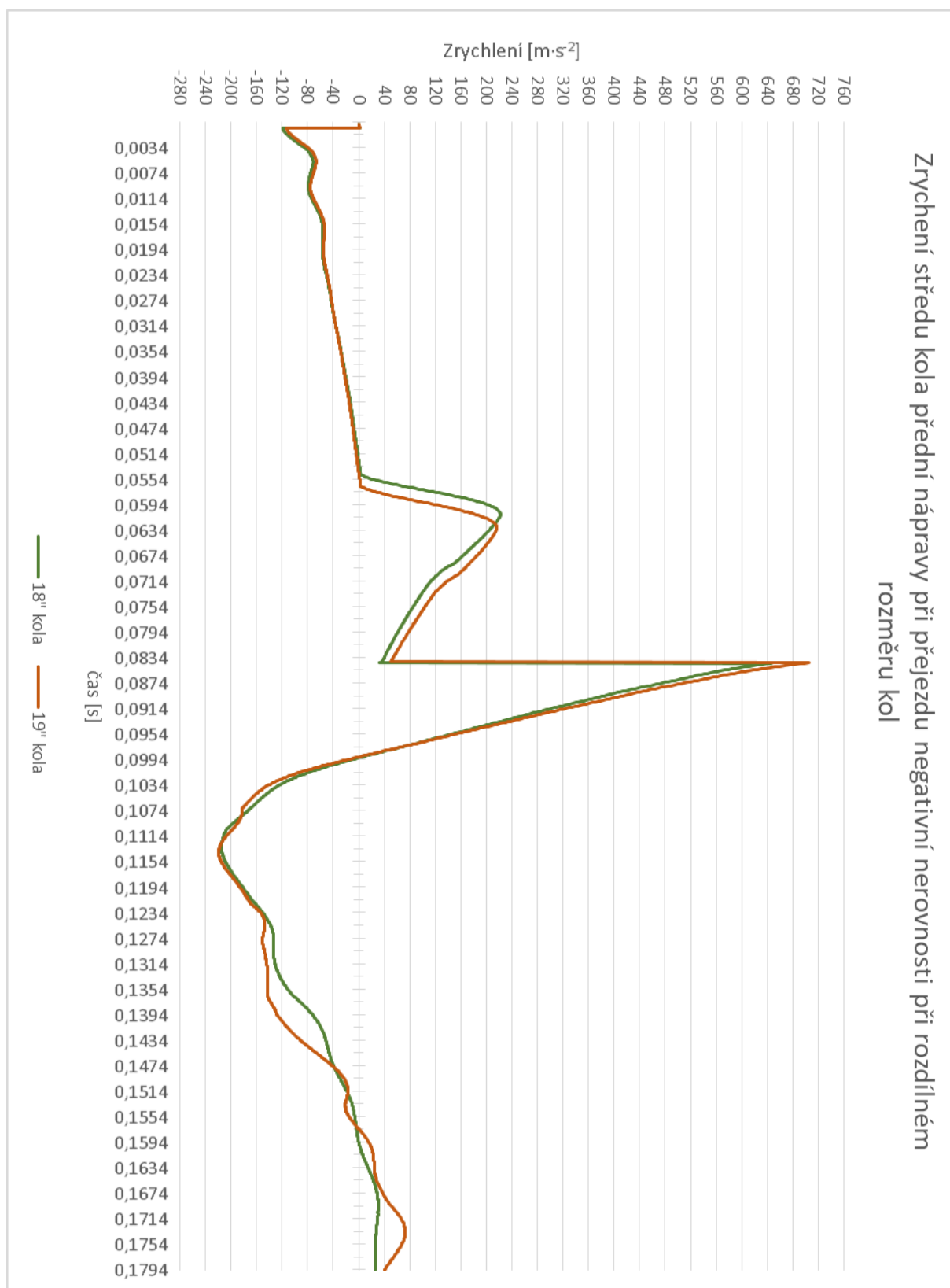
Příloha 4: Zrychlení středu kola přední nápravy při přejezdu pozitivní nerovnosti při rozdílném rozvoru náprav



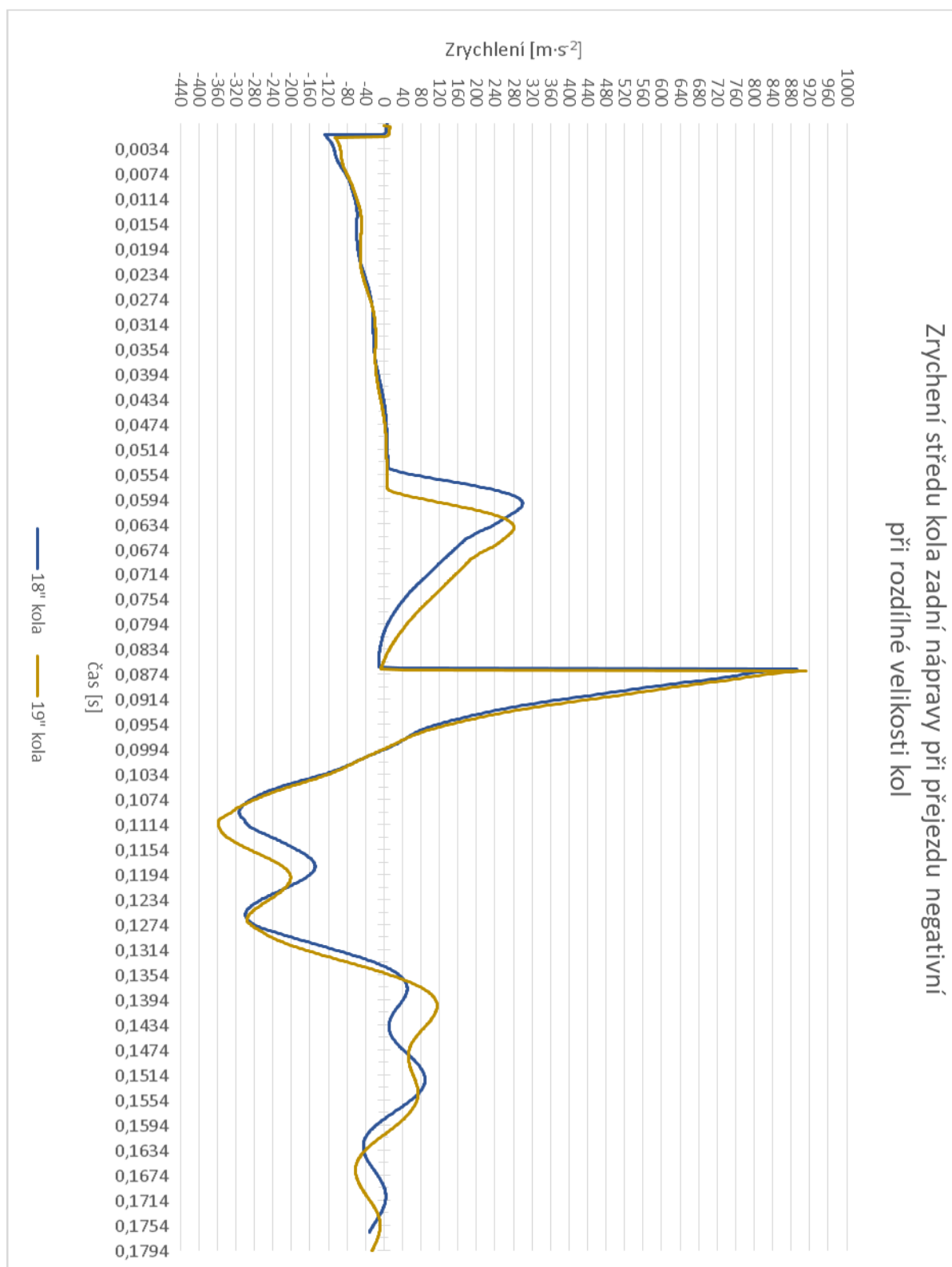
Příloha 5: Zrychlení středu kola zadní nápravy při přejezdu pozitivní nerovnosti při rozdílném rozvoru náprav



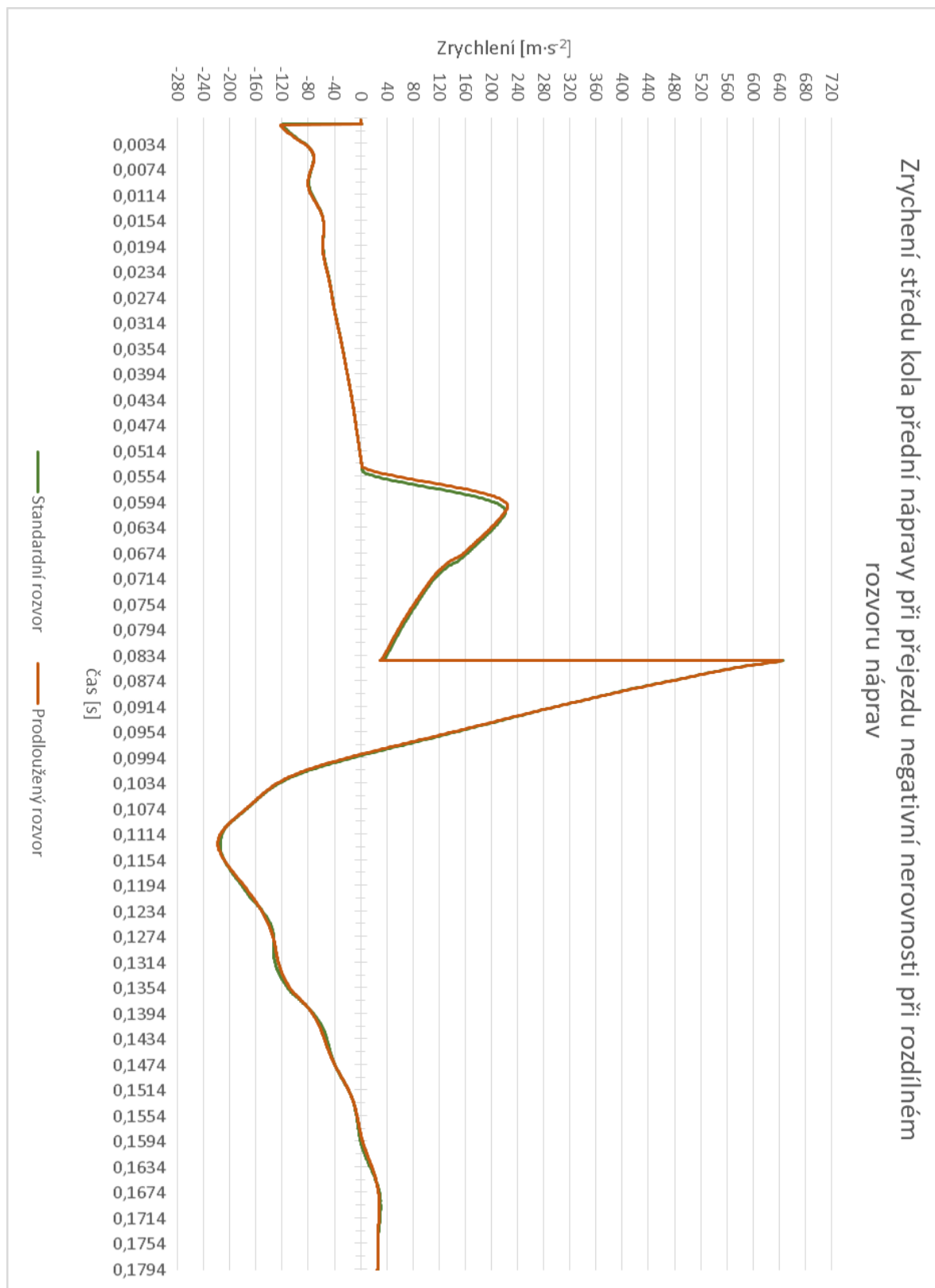
Příloha 6: Zrychlení středu kola přední nápravy při přejezdu negativní nerovnosti při rozdílném rozměru kol



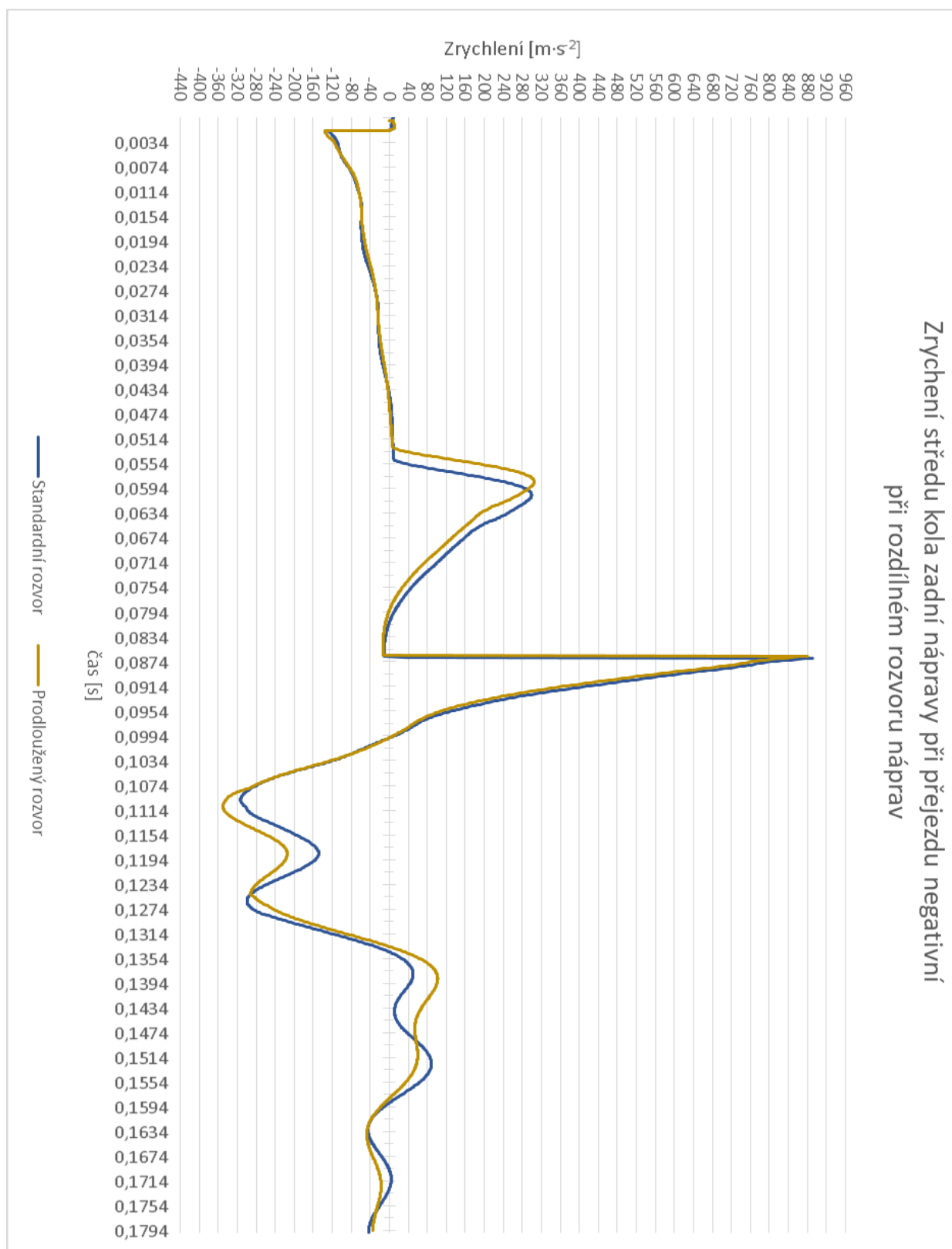
Příloha 7: Zrychlení středu kola zadní nápravy při přejezdu negativní nerovnosti při rozdílném rozměru kol



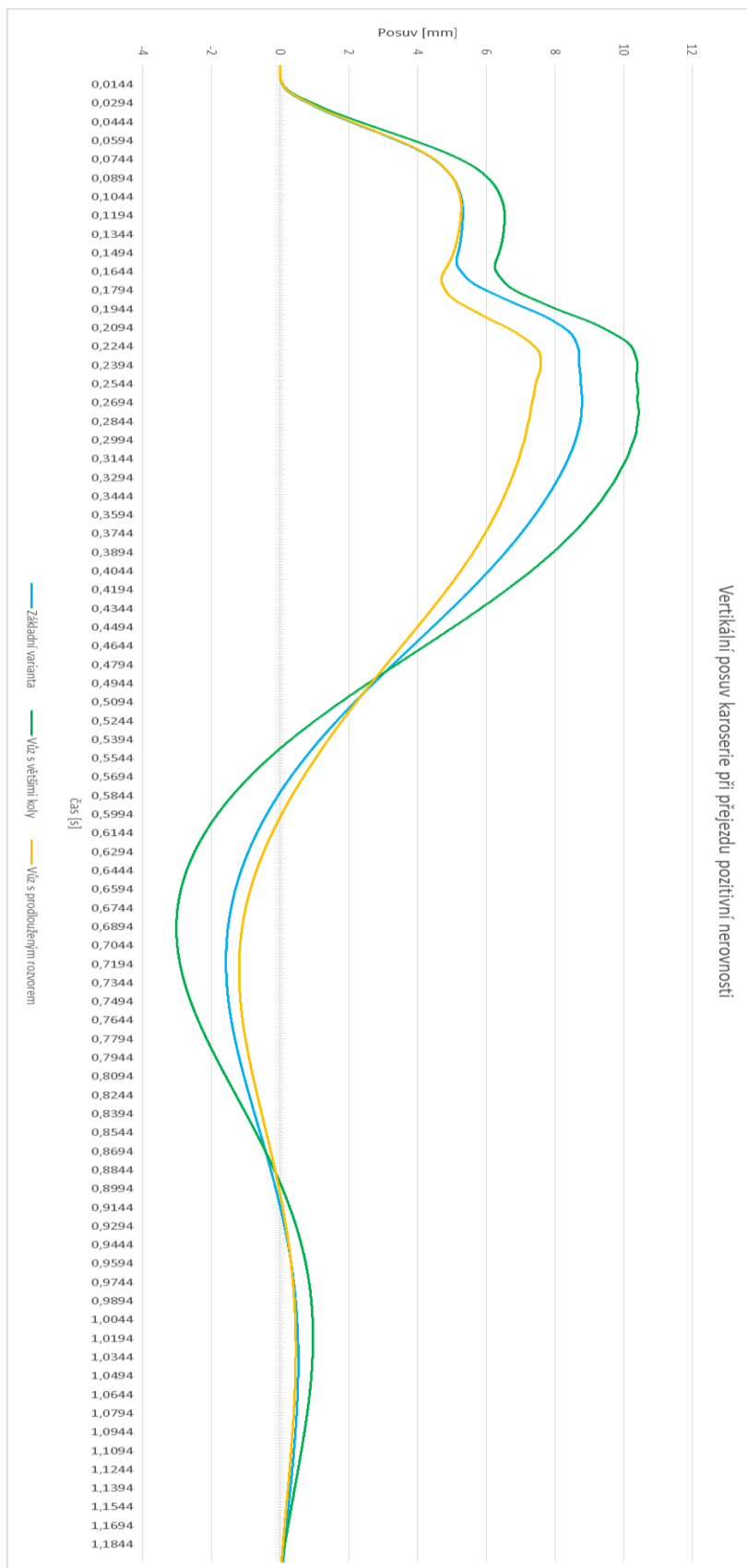
Příloha 8: Zrychlení středu kola přední nápravy při přejezdu negativní nerovnosti při rozdílném rozvoru náprav



Příloha 9: Zrychlení středu kola zadní nápravy při přejezdu negativní nerovnosti při rozdílném rozvoru náprav

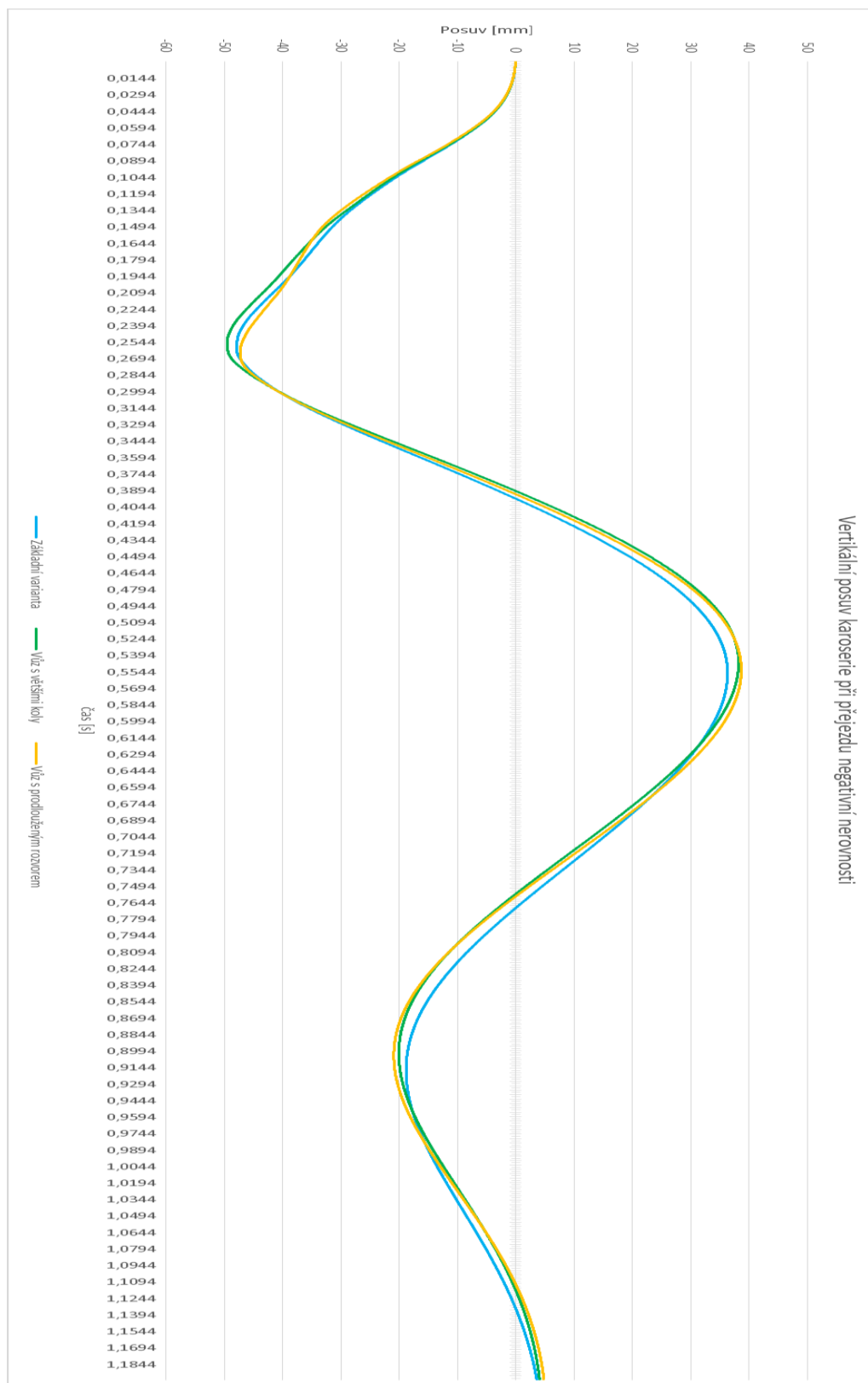


Příloha 10:
posuv
přejezdu
nerovnosti ve



Vertikální
karoserie při
pozitivní
více režimech

Příloha 11: Vertikální posuv karoserie při přejezdu negativní nerovnosti ve více režimech



Příloha 12: Nastavení výpočtu modelu

The image displays three screenshots of the 'Solver Settings' dialog box, arranged vertically. Each window shows a different configuration for solving a model named '.full_body_pokus_4_funkcni'.

Top Screenshot: Dynamics Solver

Category	Dynamics
Model	.full_body_pokus_4_funkcni
Integrator	GSTIFF
Formulation	SI2
Corrector	Modified
Error	0.1
Hmax	1.0
Hmin	(none)
Hinit	(none)
Adaptivity	(none)
Interpolate	<input type="radio"/> Yes <input checked="" type="radio"/> No
Kmax	6
Maxit	2000
Scale	1.0, 1.0, 1.0
Alpha	-0.3
Beta	0.36
Gamma	0.7
Fixed Iterations	off
Hratio	(none)
Max Error	(none)

Middle Screenshot: Kinematics Solver

Category	Kinematics
Model	.full_body_pokus_4_funkcni
Error	1.0E-04
Tlimit	1.0E+13
Alimit	30.0
Maxit	25
Aerror	1.0E-04
Amaxit	25

Bottom Screenshot: Equilibrium Solver

Category	Equilibrium
Model	.full_body_pokus_4_funkcni
Equilibrium Type	Static
Error	1.0E-04
Tlimit	20.0
Alimit	10.0
Maxit	2000
Stability	1.0E-04
Imbalance	1.0E-03
Static Method	Original
Atol	1.0E-06
Rtol	0.0
Maxitl	40
Etamax	0.9
Eta	1.0E-04

Bottom-most Screenshot: IC (Initial Conditions) Solver

Category	IC (Initial Conditions)
Model	.full_body_pokus_4_funkcni
Error	1.0E-10
Tlimit	1.0E+13
Alimit	30.0
Maxit	25
Amaxit	25
Aerror	1.0E-04