

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

Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových  
vozidel



**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Návrh zavěšení kol zadní nápravy s motory v náboji kol

Vedoucí práce: Ing. Vojtěch Klír, Ph.D.

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jansa** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **465368**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**  
Studijní program: **Dopravní a transportní technika**  
Specializace: **Motorová vozidla**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Návrh zavěšení kol zadní nápravy s motory v náboji kol**

Název diplomové práce anglicky:

**Rear Suspension Design for In-wheel Electric Motor**

Pokyny pro vypracování:

Proveďte zhodnocení možných technických řešení zavěšení poháněných kol zadní nápravy osobního automobilu nižší střední třídy se stálým pohonem předních kol. Uvažujte použití elektromotorů v nábojích kol pro účely použití v definovaných režimech jízdy vozidla. Zaměřte se na okolnosti vyplývající z tohoto řešení (neodpružená hmotnost, zástavbové rozměry, zatížení náprav, umístění baterií, jízdní stabilita vozidla). Navrhněte nejvýhodnější řešení s ohledem na, v současné době požadované, jízdní vlastnosti automobilu.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Vojtěch Klír, Ph.D. ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **20.04.2022** Termín odevzdání diplomové práce: **13.07.2022**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Ing. Vojtěch Klír, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Oldřich Vítek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem zavěšení kol zadní nápravy pro elektrifikované vozidlo, které má elektromotory připevněné k nábojům zadních kol.

V teoretické části je zpracovaný přehled na možné typy zadních náprav a jejich výskyt v současných automobilech, problematiku spjatou s neodpruženou hmotou, geometrii zadních kol, a možná řešení asistovaného pohonu zadních kol.

V praktické části je vytvořen výpočetní program, pomocí kterého se získají základní hodnoty pro návrh pružiny a tlumiče. Dále vyhodnotí, zda je výkon a točivý moment vozidla dostatečný k překonání stanovených jízdních odporů. Poté vykreslí grafy s vychýlením, rychlostí a zrychlením odpružené i neodpružené hmoty vozidla, a následně i velikost síly a propérování kola do karoserie.

Nakonec je také vytvořen kinematický model nápravy, ze kterého zjistíme změnu geometrie kola při jeho vertikálním pohybu, a zároveň i *3D CAD* model pro ilustraci výsledné nápravy.

## Klíčová slova

Náprava, elektromotor, asistovaný pohon, neodpružená hmota

## Abstract

This master's thesis is focusing on rear wheel suspension for an electric car with in-wheel electric motors.

In the theoretical part there is a preview of viable types of rear suspensions and their occurrence in current cars, problematics connected with unsprung mass, geometry of rear wheels, and possible solutions of on-demand four-wheel drive.

In the practical part a computational program is written, that gives us fundamental values for design of a spring and a shock absorber. Next it calculates if the power and torque of the vehicle are sufficient to overcome the specified resistances. Then it creates graphs with deflection, velocity, and acceleration of sprung and unsprung mass of the car, followed by the size of the force from the wheel to the body and their relative position.

Finally, a kinematic model was designed to determine the changes in wheel geometry during its vertical movement, along with a *3D CAD* model to illustrate the suspension.

## Keywords

Suspension, electric motor, on-demand four-wheel drive, unsprung mass

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem celou svoji diplomovou práci vypracoval zcela samostatně pod vedením Ing. Vojtěcha Klíra, Ph.D., s použitím pouze té literatury, která je uvedena v seznamu na konci této diplomové práce.

V Praze dne 13. 7. 2022

.....

Podpis

## Poděkování

Tímto bych chtěl velmi poděkovat především vedoucímu mé diplomové práce, *Ing. Vojtěchu Klírovi, Ph.D.*, za jeho vstřícný přístup, ochotu, čas, trpělivost a cenné rady, které mi velmi pomohly. Dále bych chtěl poděkovat mojí rodině a přátelům za podporu během celého mého studia.

# Obsah

---

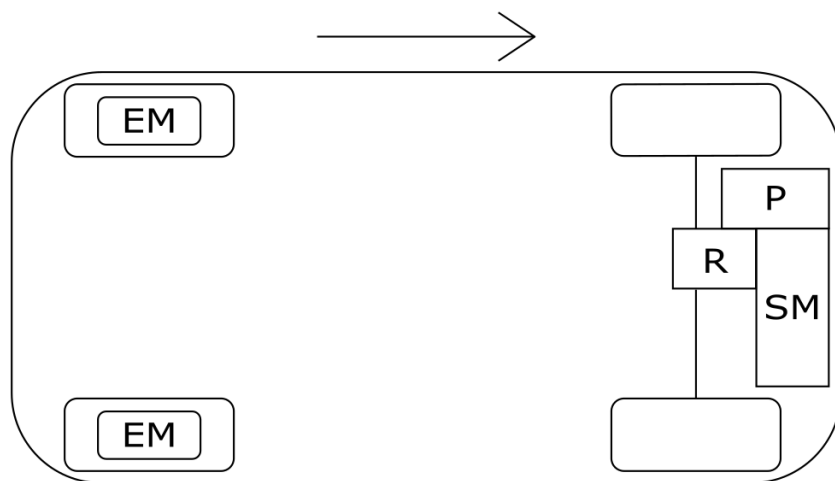
1	Úvod .....	7
2	Nápravy osobních automobilů .....	8
2.1	Základní typy zadních náprav .....	10
2.1.1	Tuhá náprava .....	10
2.1.2	Vlečená náprava s torzním prvkem .....	11
2.1.3	Lichoběžníková náprava .....	12
2.1.4	Víceprvková náprava .....	13
2.2	Typy zadních náprav v sériových automobilech .....	13
2.2.1	Automobily nižší střední třídy .....	13
2.2.2	Automobily s asistovaným pohonem zadních kol .....	15
2.3	Základní charakteristiky zadních náprav .....	16
2.3.1	Neodpružená hmota vozidla .....	16
2.3.2	Geometrie kol .....	16
2.3.2.1	Odklon kola .....	17
2.3.2.2	Sbíhavost/rozbíhavost kol .....	17
3	Asistovaný pohon zadních kol .....	19
3.1	Základní typy asistovaných pohonů zadních kol .....	20
3.1.1	Elektromotor s diferenciálem mezi koly .....	20
3.1.2	Elektromotory v nábojích kol .....	21
3.2	Typy asistovaných pohonů zadních kol v sériových automobilech .....	21
4	Návrh zadní nápravy s motory v nábojích kol vozidla nižší střední třídy .....	23
4.1	Výpočetní program .....	23
4.1.1	Vstupní parametry vozidla .....	24
4.1.2	Výstupní parametry vozidla .....	25
4.1.3	Kontrola dostatku výkonu a točivého momentu .....	26
4.1.4	Chování vozidla při přejezdu překážky .....	28
4.2	Kinematický model nápravy .....	34
4.3	CAD model nápravy .....	39
5	Závěr .....	46
6	Seznam použitých zkratk a symbolů .....	47
7	Seznam obrázků .....	50
8	Seznam tabulek .....	52
9	Seznam použité literatury .....	53

# 1 Úvod

V současné době, kdy začíná být ekologická situace aktuálně velmi řešené téma, se neustále zpřísňují emisní normy pro automobily, čímž se výrobci automobilů stále více zaměřují na elektrifikaci svých vozidel. Ať už se jedná o úplnou, či pouze částečnou elektrifikaci, je jedním z možných způsobů, jak elektricky pohánět vozidla, vložení elektromotorů přímo do nábojů kol. Tento způsob pohonu má jako vše své výhody a nevýhody.

Hlavní nevýhodou, kvůli které se toto řešení stále nezačalo ve větší míře využívat, je velmi vysoká neodpružená hmotnost pohonu, což se poté negativně projevuje na obtížnosti při návrhu a optimalizaci náprav vozidel, ať už z hlediska komfortu jízdy, tak ovladatelnosti vozidla. Další nevýhodou je potřeba naprogramovat přesné chování elektromotorů za specifických podmínek, jako je průjezd vozidla zatáčkou, rozdílný koeficient tření mezi jednotlivými koly a vozovkou a případně i pokud dojde k poruše jednoho z elektromotorů.

Nicméně tato technologie má i své nesporné výhody. Hlavní výhodou je přemístění elektromotorů do jinak nevyužitelného místa a zároveň to, že není potřeba jak diferenciál, tak ani kloubové hřídele, díky čemuž se uvolní prostor mezi koly, který se může použít buď pro baterie, nebo pro zvětšení zavazadlového prostoru. Další výhodou je snížení celkové hmotnosti vozidla oproti způsobu asistovaného pohonu zadních kol, kdy je elektromotor s diferenciálem mezi koly.



Obrázek 1: Schéma vozidla s elektromotory v nábojích zadních kol

Jednotlivé zkratky na *Obrázku 1* znamenají:

- *EM* – elektromotor
- *P* – převodovka
- *R* – rozvodovka
- *SM* – spalovací motor

Cílem této diplomové práce je tedy vypracovat rešerši, pomocí které se určí, jaká je ideální náprava pro toto konstrukční řešení, a poté tuto nápravu navrhnout jak výpočetně, tak i kinematicky, a pro lepší vizualizaci vytvořit i *3D CAD* model.

## 2 Nápravy osobních automobilů

Náprava je část vozidla, která spojuje kola s karoserií či rámem vozidla takovým způsobem, že umožňuje pohyb kola pouze ve svislém směru, případně i otáčení kolem rejdové osy u řízených kol. Skládá se z následujících funkčních celků:

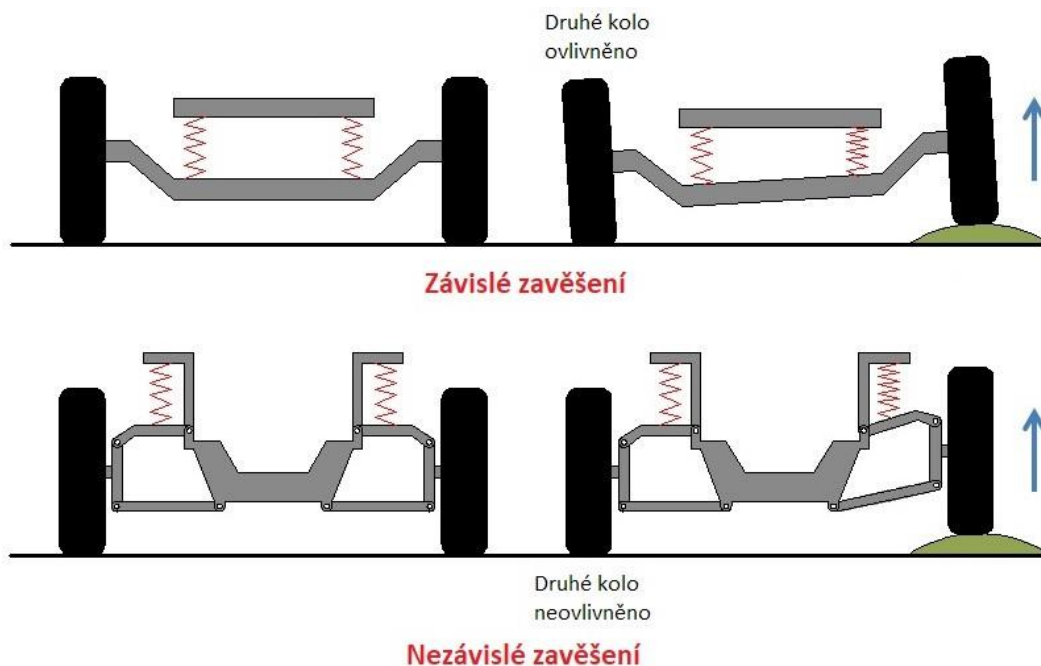
- Zavěšení kola
- Uložení kola
- Odpružení kola
- Brzdy
- Řídicí ústrojí (pouze u řízených kol)
- Hnací ústrojí (pouze u hnaných kol)

Na nápravy je kladeno mnoho požadavků, mezi které patří:

- Vysoký komfort jízdy
- Dobrá ovladatelnost vozidla
- Přenos sil a momentů mezi koly a karoserií
- Eliminace pohybu kol v nežádoucích směrech
- Udržení přijatelného opotřebení pneumatik

Zavěšení kol, tedy samotné spojení kol s karoserií, lze rozdělit na dva základní typy:

- Závislé
- Nezávislé

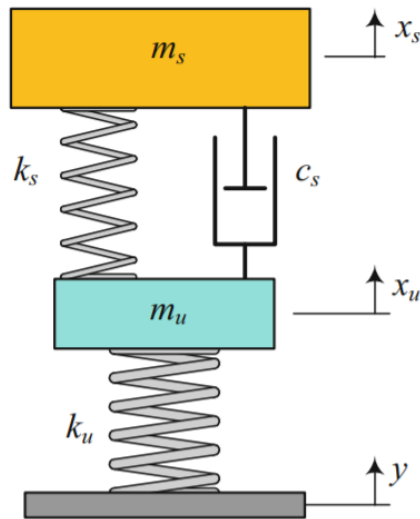


Obrázek 2: Porovnání závislého a nezávislého zavěšení kol [15]



Jak je vidno na *Obrázku 2*, u závislého zavěšení kol jsou obě kola spojena tuhým prvkem. Pokud tedy jedno kolo najede na nerovnost, tak je tím přímo ovlivněno i kolo druhé. Zatímco u nezávislého zavěšení kol nejsou kola nijak propojena, proto pokud najede jedno kolo na nerovnost, není tím druhé kolo přímo ovlivněno, pouze nepřímo skrz klonění karoserie.

Nezávislé zavěšení kol se dá zjednodušeně zobrazit pomocí čtvrtinového modelu automobilu, který lze vidět na *Obrázku 3*. Tento model se často používá k předběžnému výpočtu dynamiky odpružení vozidla.



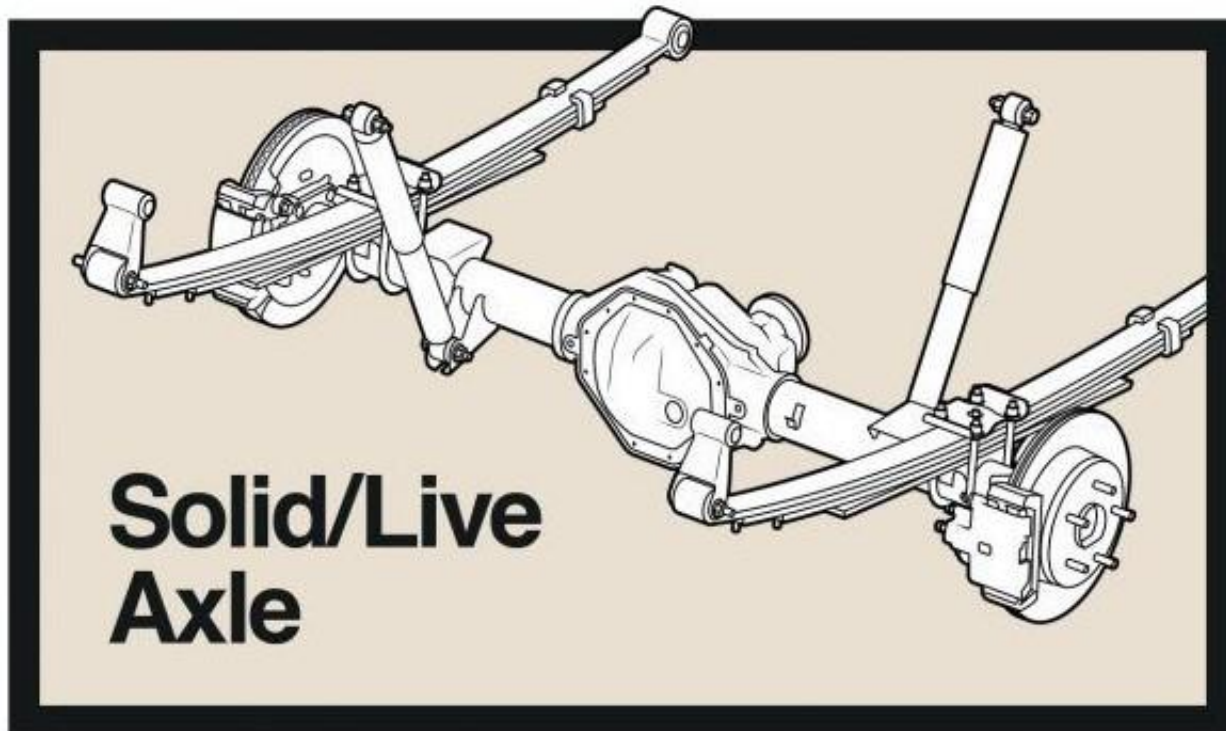
Obrázek 3: Čtvrtinový model automobilu [12]

Jednotlivé zkratky na *Obrázku 3* znamenají:

- $c_s$  – tlumení tlumiče
- $k_s$  – tuhost pružiny
- $k_u$  – radiální tuhost pneumatiky
- $m_s$  – odpružená hmotnost čtvrtiny vozidla
- $m_u$  – neodpružená hmotnost čtvrtiny vozidla
- $x_s$  – vychýlení odpružené hmoty
- $x_u$  – vychýlení neodpružené hmoty
- $y$  – vychýlení vozovky

## 2.1 Základní typy zadních náprav

### 2.1.1 Tuhá náprava



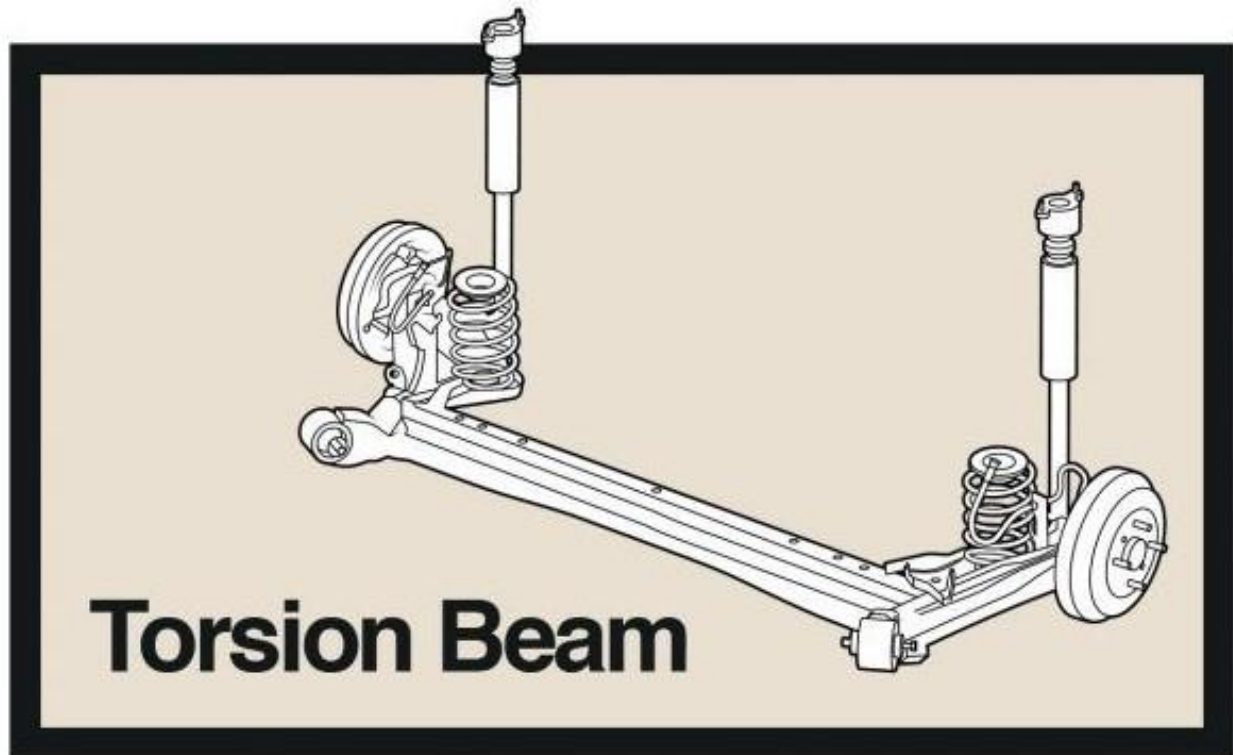
Obrázek 4: Tuhá náprava [13]

Tuhá náprava je nejstarším typem nápravy, kdy jsou obě kola spojena tuhým prvkem. K uchycení nápravy ke karoserii se s oblibou používají listové pružiny, jako to je zobrazeno na *Obrázku 4*.

Mezi výhody tuhé nápravy patří jednoduchost a vysoká pevnost konstrukce, ale bohužel velmi silně přispívá k velikosti neodpružených hmot, které následně za běžných podmínek zhoršují komfort jízdy a jízdní vlastnosti. Mezi další nevýhody patří, jak už bylo ukázáno v *Kapitole 2*, že při najetí jedním kolem na nerovnost je vychýlením tohoto kola přímo ovlivněno i kolo druhé, což vede k dalšímu zhoršení jízdních vlastností.

Tato náprava se používá primárně u terénních automobilů a pick-upů, kde je vysoká pevnost nápravy požadována, a zároveň nejsou potřeba velmi dobré jízdní vlastnosti.

## 2.1.2 Vlečená náprava s torzním prvkem



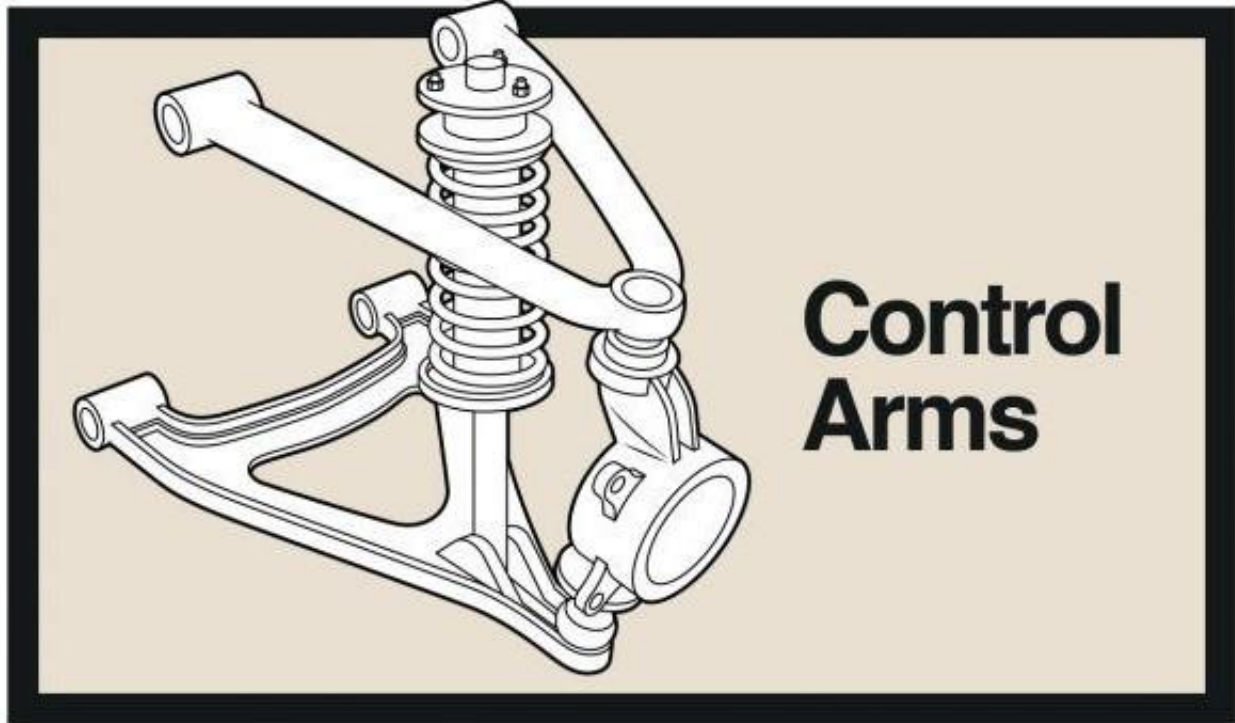
Obrázek 5: Vlečená náprava s torzním prvkem [13]

Vlečená náprava s torzním prvkem je „mezistupněm“ mezi závislou a nezávislou nápravou. Skládá se ze dvou vlečených ramen, která jsou spolu spojena ohybově tuhým, ale torzně poddajným prvkem. Tento prvek má většinou průřez ve tvaru *U* nebo *H*.

Největší výhodou této nápravy je její jednoduchost, a tím pádem i nízká cena. Také vyžaduje malý zástavbový prostor v příčném směru, takže v autě zůstane více místa pro zavazadlový prostor. Na druhou stranu se nedají moc dobře měnit jízdní vlastnosti vozidla, a z dynamických důvodů se nedá použít pro poháněná kola. Dále také poměrně výrazně přispívá k velikosti neodpružených hmot vozidla, což stejně jako u tuhé nápravy zhoršuje za běžných podmínek jízdní komfort a jízdní vlastnosti vozidla.

Tato náprava se používá v levných automobilech s nepoháněnými zadními koly, kde se hledí primárně na cenu, a ne na co nejlepší jízdní vlastnosti.

### 2.1.3 Lichoběžníková náprava



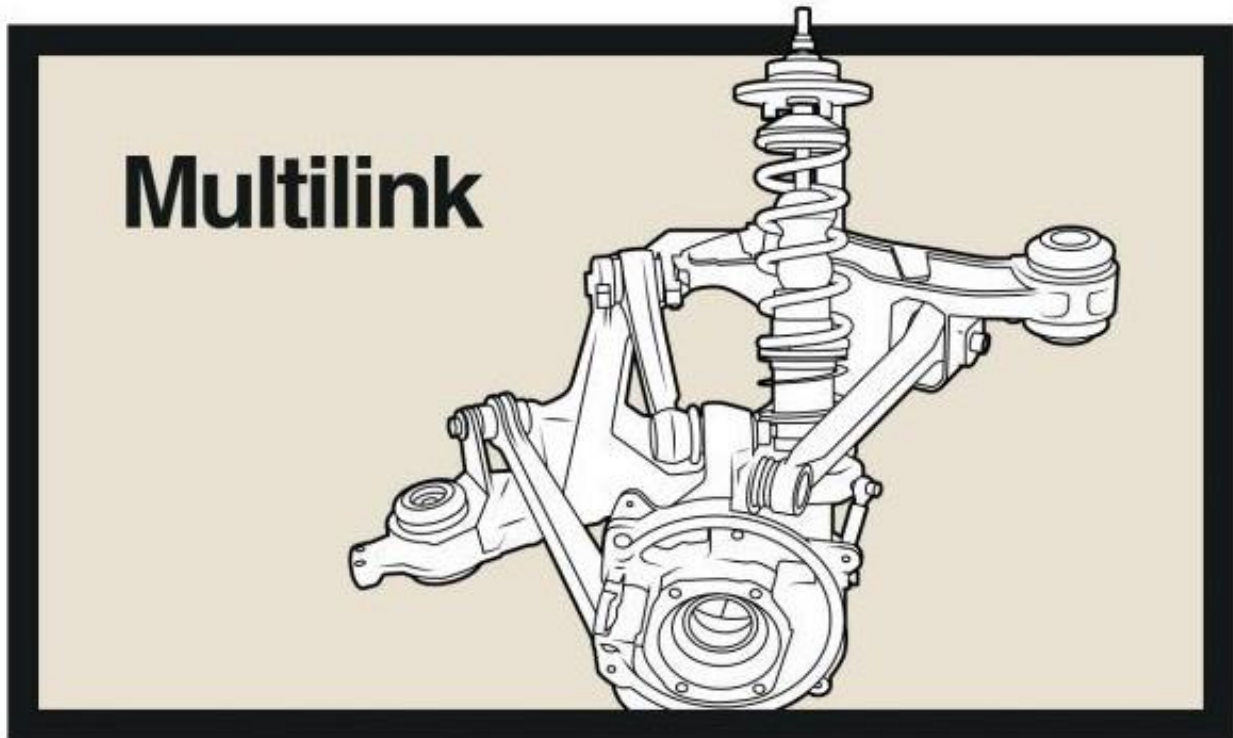
Obrázek 6: Lichoběžníková náprava [13]

Lichoběžníková náprava spojuje kolo s karoserií pomocí dvou ramen ve tvaru trojúhelníku umístěných pod sebou. Při pohledu ve směru jízdy vozidla vytvářejí tato ramena pomyslný lichoběžník, jelikož je horní rameno kratší než to spodní, z čehož vychází název pro tuto nápravu.

Výhodou jsou bezpochyby výborné jízdní vlastnosti, včetně malých velikostí neodpružených hmot. Hlavní nevýhodou je poté velký zástavbový prostor v příčném směru, čímž se snižuje velikost zavazadlového prostoru.

Kvůli vyjmenovaným výhodám a nevýhodám se lichoběžníková náprava používá primárně u vozidel, kde je na prvním místě výkon.

## 2.1.4 Víceprvková náprava



Obrázek 7: Víceprvková náprava [13]

Víceprvková náprava je speciálním případem nápravy lichoběžníkové, kdy je minimálně jedno rameno rozděleno na jednotlivé prvky, z čehož může vzniknout tři až pět prvků. Z tohoto důvodu se této nápravě říká víceprvková.

Oproti lichoběžníkové nápravě se díky jednotlivým prvkům mohou lépe odladit jízdní vlastnosti vozidla, ale za cenu složitější konstrukce, která více přispívá k velikosti neodpružených hmot.

Automobilky využívají tuto náprava v dražších vozidlech, případně i ve vozidlech levných, pokud mají poháněná zadní kola, kde se nedá využít vlečená náprava s torzním prvkem.

## 2.2 Typy zadních náprav v sériových automobilech

### 2.2.1 Automobily nižší střední třídy

Základní přehled v současné době používaných typů náprav je uveden v *Tabulce 1*. Zde jsou zahrnuty pouze nejnovější modely automobilů, které se v současné době stále vyrábějí, a jsou dostupné na evropském či americkém trhu.

Tabulka 1: Typy zadních náprav v jednotlivých automobilech nižší střední třídy

	Typ nápravy			
	Tuhá	Vlečená – torzní	Lichoběžníková	Víceprvková
Alfa Romeo Giulietta				•
Audi A3		•		•
BMW 1				•
BMW 2				•
Citroën C-Elysée		•		
Citroën C4		•		
Dacia Logan		•		
Fiat Tipo		•		
Ford Focus		•		•
Honda Accord				•
Honda Civic				•
Hyundai i30		•		•
Kia Ceed				•
Lexus CT			•	
Mazda 3		•		
Mercedes A		•		•
Mercedes CLA				•
Mitsubishi Mirage		•		
Nissan Leaf		•		
Opel Astra		•		
Peugeot 308		•		
Renault Mégane		•		
SEAT Leon		•		•
Subaru Impreza			•	
Škoda Octavia		•		•
Škoda Scala		•		
Toyota Camry				•
Toyota Corolla				•
Toyota Prius				•
Volkswagen Golf		•		•
Volkswagen Jetta		•		

Tabulka 2: Četnost jednotlivých typů zadních náprav v automobilech nižší střední třídy

	Typ nápravy			
	Tuhá	Vlečená – torzní	Lichoběžníková	Víceprvková
<b>Absolutní četnost [-]</b>	0	19	2	17
<b>Relativní četnost [%]</b>	0	50	5	45

Jak je v *Tabulce 2* zřetelně vidno, nejčastějšími nápravami nižší střední třídy jsou vlečená náprava s torzním prvkem a víceprvková náprava, kde vlečená se vyskytovala spíše u levnějších modelů, zatímco víceprvková u modelů dražších, případně u levnějších vozidel s pohonem zadních kol. Na třetím místě je lichoběžníková náprava, která se hojně využívá u automobilů s vysokým výkonem. Tuhá náprava se nevyskytla ani v jednom vozidle nižší střední třídy, což není žádným překvapením, jelikož je vhodná primárně pro pick-upy a terénní automobily.

### 2.2.2 Automobily s asistovaným pohonem zadních kol

Typy náprav jednotlivých automobilů s asistovaným pohonem zadních kol jsou zaznamenány v *Tabulce 3*. Vybrány byly pouze nejnovější modely automobilů, které se stále vyrábějí, jsou dostupné na evropském nebo americkém trhu, a mají přední kola poháněna spalovacím motorem, zatímco zadní kola samostatným elektromotorem.

Tabulka 3: Typy zadních náprav v jednotlivých automobilech s asistovaným pohonem zadních kol

	Typ nápravy			
	Tuhá	Vlečená – torzní	Lichoběžníková	Víceprvková
<b>BMW 2</b>				•
<b>BMW X1</b>				•
<b>BMW X2</b>				•
<b>DS 7</b>				•
<b>Jeep Compass</b>				•
<b>Jeep Renegade</b>				•
<b>Jeep Wrangler</b>				•
<b>Mitsubishi Outlander</b>				•
<b>Peugeot 3008</b>				•
<b>Peugeot 508</b>				•
<b>Toyota Highlander</b>				•
<b>Toyota Prius</b>				•
<b>Volvo S60/V60</b>				•
<b>Volvo S90/V90</b>				•
<b>Volvo XC40</b>				•
<b>Volvo XC60</b>				•
<b>Volvo XC90</b>				•

Tabulka 4: Četnost jednotlivých typů zadních náprav v automobilech s asistovaným pohonem zadních kol

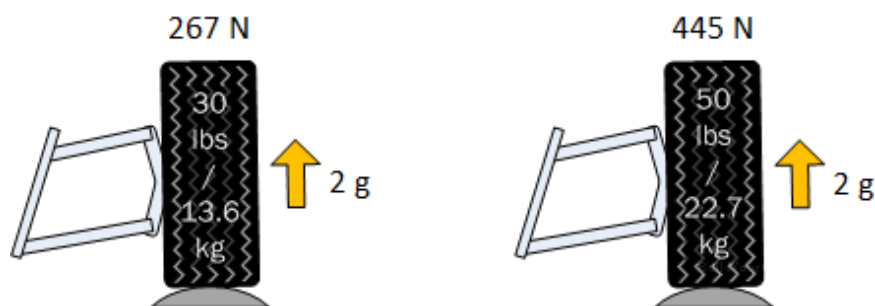
	Typ nápravy			
	Tuhá	Vlečená – torzní	Lichoběžníková	Víceprvková
Absolutní četnost [-]	0	0	0	17
Relativní četnost [%]	0	0	0	100

Jak lze vidět v *Tabulce 4*, všech 17 automobilů, které byly vybrány, používají víceprvkovou nápravu.

## 2.3 Základní charakteristiky zadních náprav

### 2.3.1 Neodpružená hmota vozidla

Neodpruženou hmotou vozidla označujeme díly, které se vyskytují mezi odpružením kola a vozovkou. Zahrnujeme zde všechny součásti, které nejsou napřímo spojeny s karoserií vozidla, tedy kola, pneumatiky, brzdové kotouče, brzdy, náboje kol s ložisky a těhlice, včetně jejich spojovacích součástí. Dále se nesmí zapomenout ještě na příslušnou část hmotnosti ramen/prvků, pružin, tlumičů, hnacích hřídelí a rejdových a jiných čepů.



Obrázek 8: Síla způsobená neodpruženou hmotou vozidla [14]

Vyšší hmotnost neodpružených hmot vozidla má za následek horší jízdní vlastnosti vozidla a nižší komfort jízdy na cestách s výraznějšími nerovnostmi. Jak je vidět na *Obrázku 8*, při projetí velké nerovnosti, která vyprodukuje zrychlení kola o velikosti  $2g$ , působí kolo o větší hmotnosti větší silou do karoserie, čímž se vedle silných rázů do karoserie i snižuje síla působící na vozovku, a tím pádem se snižuje trakce mezi pneumatikou a vozovkou. Na druhou stranu pomáhá vyšší hmotnost neodpružených hmot k lepšímu pohlcení vibrací, čímž se snižuje hluk a zároveň částečně zvyšuje jízdní komfort na cestách bez větších nerovností.

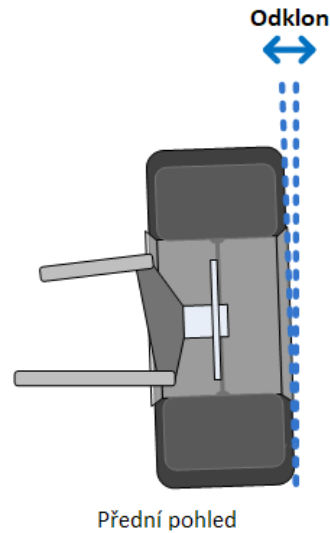
### 2.3.2 Geometrie kol

Geometrií kol se rozumí úhlové odchylky kol od určitých rovin, pomocí kterých lze nejen zlepšit jízdní vlastnosti vozidla a komfort jízdy, ale i snížit opotřebení pneumatik.

Jelikož zadní kola nejsou ve většině případů řiditelná, a tím pádem nemají rejdovou osu, řešíme u nich pouze odklon a sbíhavost/rozbíhavost kol.



### 2.3.2.1 Odklon kola

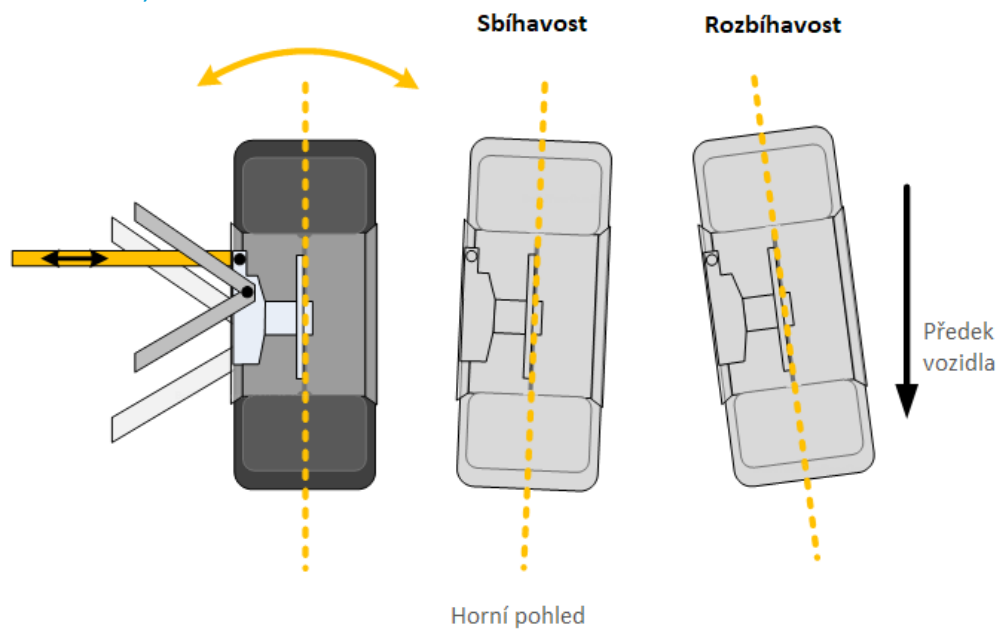


Obrázek 9: Odklon kola [14]

Odklon kola je úhel mezi čelem kola a kolmicí k vozovce, jako je znázorněno na *Obrázku 9*. Jestliže je horní část kola blíže ke středu vozidla než spodní část, jako to je naznačeno právě na *Obrázku 9*, jedná se o odklon negativní. V opačném případě mluvíme o kladném odklonu.

U zadních kol se dle *Literatury [3]* používá ideálně negativní odklon o velikosti přibližně  $0.3^\circ$ , čímž se zlepší stabilita vozidla a zvětší přilnavost pneumatik k vozovce při průjezdu zatáčkou. Úhel odklonu kola by ale neměl být o moc větší, aby nedocházelo k nerovnoměrnému opotřebenění pneumatik a zároveň se nezmenšovala přilnavost pneumatik k vozovce na rovině.

### 2.3.2.2 Sbíhavost/rozbíhavost kol



Obrázek 10: Sbíhavost/rozbíhavost kol [14]

Sbíhavost/rozbíhavost kol je úhel mezi zadními koly při pohledu shora. Sbíhavost kol je v případě, kdy jsou přední části kol k sobě blíže než části zadní. V opačném případě se jedná o rozbíhavost kol.

Dle *Literatury [3]* se u zadních kol využívá sbíhavost o velikosti přibližně  $0.1^\circ$ , což zvyšuje stabilitu vozidla. Větší úhel sbíhavosti by způsoboval vyšší opotřebení pneumatik. Naopak při použití rozbíhavosti kol by docházelo k vysoké nestabilitě vozidla, jelikož by vozidlo šlo v zatáčce do přetáčivého smyku.

### 3 Asistovaný pohon zadních kol

Asistovaný pohon zadních kol je technické řešení, kdy jsou přední kola nepřetržitě poháněna primárním motorem, zatímco zadní kola jsou poháněna pouze za určitých situací separátním elektromotorem. Při nízké rychlosti vozidla může být ovšem spalovací motor zastaven, a vozidlo tak poháněno pouze elektromotory.

Tento systém je velmi výhodný v situacích, kdy by samotná přední kola nestačila pro přenos požadovaného točivého momentu, a začala tak prokluzovat. Zadní motor tedy začne pohánět zadní kola v momentech, jako je rychlý průjezd zatáčkou, prudká akcelerace, jízda po kluzkém, případně nerovném povrchu, a při velkém stoupání vozovky.

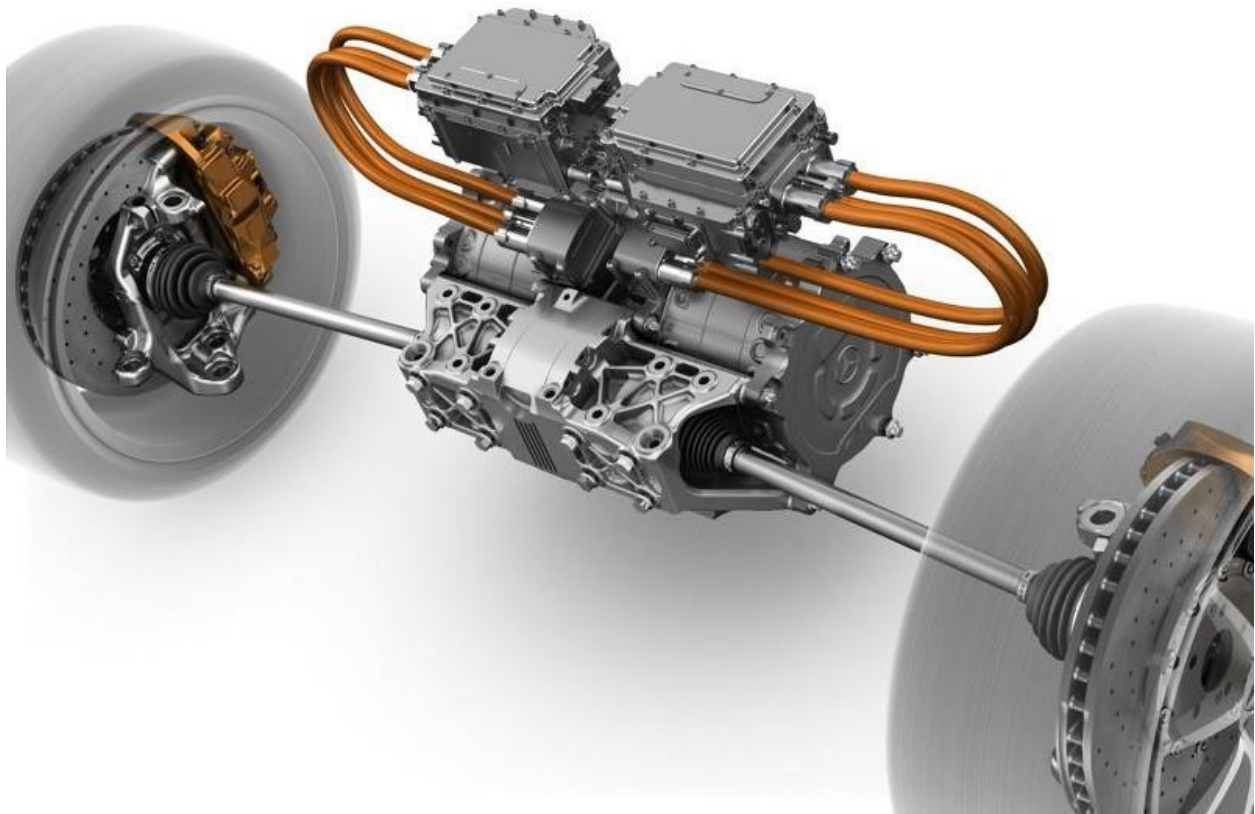
Dodatečné díly oproti automobilům s pohonem pouze přední nápravy ovšem zapříčiňují nejen vyšší cenu vozidla, ale i vyšší spotřebu kvůli větší hmotnosti vozidla a dodatečným mechanickým a elektrickým ztrátám. Toto je podpořeno hodnotami uvedenými v *Tabulce 5*, což jsou výrobci udávané kombinované spotřeby paliva pro 2WD a AWD verze několika vybraných automobilů, které používají k pohonu pouze spalovací motor.

Tabulka 5: Porovnání kombinované spotřeby paliva mezi 2WD a AWD verzemi jednotlivých vozidel

	Výrobce udávaná kombinovaná spotřeba paliva [l/100 km]	
	2WD	AWD
<b>Alfa Romeo Giulia</b>	8.7	9
<b>BMW 2</b>	8.4	9.8
<b>BMW 3</b>	7.8	8.4
<b>BMW 4</b>	8.7	9.8
<b>Dodge Charger</b>	10.2	11.2
<b>Kia K5</b>	7.6	8.1
<b>Kia Stinger</b>	9.4	9.8
<b>Lexus IS</b>	9.4	10.7
<b>Mazda 3</b>	7.8	8.4
<b>Mercedes CLA</b>	8.1	8.7
<b>Mercedes CLS</b>	9	9.4
<b>Toyota Camry</b>	7.4	8.1
<b>Volkswagen Arteon</b>	9.4	9.8

## 3.1 Základní typy asistovaných pohonů zadních kol

### 3.1.1 Elektromotor s diferenciálem mezi koly



Obrázek 11: Elektromotor s diferenciálem mezi koly [23]

Elektromotor s diferenciálem mezi koly je běžně používaný systém pohonu kol u elektrických vozidel a hybridních vozidel s paralelním zapojením pohonného ústrojí. Točivý moment z elektromotoru je přenášen do diferenciálu, kdy jsou obě součásti pevně připojeny ke karoserii. Tok točivého momentu z diferenciálu do kol je poté zajištěn pomocí kloubových hřídelí.

Hlavní výhodou tohoto systému je díky většině součástí připevněných pevně ke karoserii nízká neodpružená hmotnost. Dále není potřeba složitě programovat tok výkonu elektromotoru pro každé kolo zvlášť, jelikož je toto vyřešeno mechanicky pomocí diferenciálu.

I přes to, že hlavní výhodou je nízká neodpružená hmotnost, tak naopak je celková hmotnost kvůli dodatečným součástem velmi vysoká. Problém je také s nutností zmenšení zavazadlového prostoru, aby se pod něj všechny potřebné součásti vešly.

### 3.1.2 Elektromotory v nábojích kol



Obrázek 12: Elektromotor v náboji kola [16]

Elektromotor v náboji kola není nijak nová technologie, nicméně začíná se pomalu objevovat v konceptech vozidel až v posledních letech. Na rozdíl od výše představené varianty není potřeba diferenciál ani kloubové hřídele, jelikož je elektromotor přímo spojen s nábojem kola.

Výhody a nevýhody jsou v podstatě přesně opačné než pro výše popsany systém. Výhody jsou tedy nízká celková hmotnost díky použití pouze elektromotorů, a možnost většího zavazadlového prostoru, jelikož jsou elektromotory umístěny v nábojích kol, kde je v současné době místa mnoho.

Nevýhodou je vysoká neodpružená hmotnost, což může vést k velmi nepohodlné jízdě. Dále pak nutnost naprogramovat přesné chování elektromotorů za určitých podmínek, jako je průjezd zatáčkou, rozdílné tření mezi koly a vozovkou a případně i při poruše jednoho z elektromotorů.

## 3.2 Typy asistovaných pohonů zadních kol v sériových automobilech

Typy náprav jednotlivých vozidel s asistovaným pohonem zadních kol už jsou uvedeny *Tabulce 3*, ale je vhodné se podívat i na jejich typy pohonu, které lze vidět v *Tabulce 6*. Kritéria pro výběr vozidel jsou stejná, jako pro *Tabulku 3*.

Tabulka 6: Typy asistovaných pohonů v jednotlivých automobilech s asistovaným pohonem zadních kol

	Typ asistovaného pohonu	
	Elektromotor s diferenciálem	Elektromotory v nábojích kol
BMW 2	•	
BMW X1	•	
BMW X2	•	
DS 7	•	
Jeep Compass	•	
Jeep Renegade	•	
Jeep Wrangler	•	
Mitsubishi Outlander	•	
Peugeot 3008	•	
Peugeot 508	•	
Toyota Highlander	•	
Toyota Prius	•	
Volvo S60/V60	•	
Volvo S90/V90	•	
Volvo XC40	•	
Volvo XC60	•	
Volvo XC90	•	

Tabulka 7: Četnost jednotlivých typů asistovaných pohonů v automobilech s asistovaným pohonem zadních kol

	Typ asistovaného pohonu	
	Elektromotor s diferenciálem	Elektromotory v nábojích kol
Absolutní četnost [-]	17	0
Relativní četnost [%]	100	0

Z Tabulky 7 lze vyčíst, že všechny současné automobily s asistovaným pohonem zadních kol, které byly vybrány, využívají výhradně pohon pomocí elektromotoru s diferenciálem mezi koly.

## 4 Návrh zadní nápravy s motory v nábojích kol vozidla nižší střední třídy

---

Základní ideou této části je návrh zadní nápravy pro vozidlo *Audi RS3*, které je modifikováno tak, že místo klasického pětiválcového motoru bude mít motor čtyřválcový z *Audi A3* doplněný o dva elektromotory *Pd18* od firmy *Protean* v nábojích zadních kol. Tyto elektromotory mají zabudované třecí brzdy pro co největší optimalizaci neodpružené hmotnosti. Touto úpravou vozidla výrazně klesne spotřeba fosilních paliv, jelikož lze jezdit pouze na elektrický pohon, a navíc se zvedne i celkový výkon vozidla.

Hned na začátku musíme určit, jaký typ nápravy vůbec použijeme. Je potřeba zvolit takovou, která co nejlépe splňuje následující požadavky:

- Co nejmenší zástavbový prostor nápravy v příčném směru kvůli udržení místa pro baterie
- Co nejmenší vertikální zástavbový prostor nápravy kvůli udržení co největšího zavazadlového prostoru
- Co nejmenší neodpružená hmotnost nápravy z důvodu ovladatelnosti vozidla a komfortu jízdy
- Co nejlepší kinematické vlastnosti nápravy, opět z důvodu ovladatelnosti vozidla a komfortu jízdy
- Co nejnižší výrobní cena

Tuhá náprava je v tomto případě silně nevhodná, jelikož zabírá mnoho místa v příčném směru, a hlavně má hodně velkou neodpruženou hmotnost, což si v našem případě, kdy už máme velkou neodpruženou hmotnost kvůli elektromotorům, nemůžeme dovolit. Dále je na výběr náprava vlečená, která se ovšem kvůli své konstrukci nedá použít pro poháněné nápravy. Pak už nám zbývají pouze nápravy lichoběžníková a víceprvková. Tyto dvě varianty jsou si velmi podobné, ale u víceprvkové nápravy máme větší volnost v návrhu zástavbového prostoru i celkového chování nápravy.

Kvůli těmto důvodům je nejlepší variantou víceprvková náprava, která je využívána i v současné verzi *Audi RS3*. Ideální by ovšem byla náprava, která by měla ještě více zredukovanou neodpruženou hmotnost tím, že by byly brzdy připevněny ke karoserii, a tím se staly odpruženou hmotou, jenže to v našem případě nelze použít kvůli nepřítomnosti poloos.

### 4.1 Výpočetní program

Prvním krokem k navržení zavěšení kola je vytvoření výpočetního programu, který vypočte základní parametry nápravy. Dále určí, zda bude pohon vozidla stačit na překonání předem stanovených odporů. Nakonec vykreslí grafy, ve kterých je znázorněno chování čtvrtinového modelu vozidla při přejezdu předem definované překážky.

Tento výpočetní program, který lze najít v příloze této diplomové práce, je vytvořený v rámci této práce v programu *PTC Mathcad*.

## 4.1.1 Vstupní parametry vozidla

Tabulka 8: Vstupní parametry vozidla

Parametr	Hodnota	Jednotka	Popis
$A_x$	1.8	$[m^2]$	Čelní plocha vozidla
$c_x$	0.33	$[-]$	Součinitel vzdušného odporu
$d_{tire}$	647.7	$[mm]$	Průměr pneumatiky
$f_r$	0.015	$[-]$	Součinitel odporu valení
$f_s$	1.2	$[Hz]$	Vlastní frekvence pružiny
$F_{spring}$	2 200	$[N]$	Předpětí pružiny
$i_{final}$	3.125 / 4.167	$[-]$	Převodový poměr stálého převodu
$i_{trans}$	0.625 – 3.4	$[-]$	Převodový poměr převodovky
$k_u$	200 000	$\left[\frac{N}{m}\right]$	Radiální tuhost pneumatiky
$m_{rrear}$	45	$[%]$	Poměrné zatížení zadní nápravy
$m_{stotal}$	1 500	$[kg]$	Odpružená hmotnost vozidla
$m_{umotor}$	36	$[kg]$	Hmotnost elektromotoru
$m_{ususp}$	37.5	$[kg]$	Neodpružená hmotnost nápravy
$MR_{damper}$	0.68	$[-]$	Poměr pohybu tlumiče
$MR_{spring}$	0.41	$[-]$	Poměr pohybu pružiny
$P_{cmotor}$	80	$[kW]$	Maximální dlouhodobý výkon elektromotoru
$P_{engine}$	134	$[kW]$	Maximální výkon spalovacího motoru
$P_{pmotor}$	80	$[kW]$	Maximální krátkodobý výkon elektromotoru
$T_{cmotor}$	650	$[Nm]$	Maximální dlouhodobý točivý moment elektromotoru



$T_{engine}$	300	[Nm]	Maximální točivý moment spalovacího motoru
$T_{pmotor}$	1 250	[Nm]	Maximální krátkodobý točivý moment elektromotoru
$\eta$	85	[%]	Účinnost hnacího ústrojí
$\vartheta_{car}$	1.05	[-]	Součinitel rotačních hmot vozidla
$\vartheta_{motor}$	1.05	[-]	Součinitel rotačních hmot elektromotoru
$\vartheta_{trans}$	1.03 – 1.2	[-]	Součinitel rotačních hmot převodovky
$\rho$	1.25	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	Hustota vzduchu
$\zeta$	0.3	[-]	Poměrné tlumení tlumiče

Všechny vstupní parametry jsou zvoleny tak, aby co nejvíce odpovídaly vozidlu *Audi RS3*, kromě spalovacího motoru a převodovky, které jsou brány z *Audi A3*. Hodnoty elektromotoru jsou zvoleny podle elektromotoru *Protean Pd18*.

#### 4.1.2 Výstupní parametry vozidla

Tabulka 9: Výstupní parametry vozidla

Parametr	Hodnota	Jednotka	Popis
$c_s$	3 522.1	$\left[\frac{N \cdot s}{m}\right]$	Tlumení tlumiče
$f_u$	8.3	[Hz]	Vlastní frekvence pneumatiky
$k_s$	121 746.6	$\left[\frac{N}{m}\right]$	Tuhost pružiny

Na základě vstupních parametrů vozidla byly dopočítány pomocí výpočetního programu základní hodnoty pro návrh pružiny a tlumiče, jak je znázorněno na *Obrázku 13*. Pro zjednodušení jsou použity pružina a tlumič s lineárními charakteristikami.

Výstupní hodnoty	
$c_s = 3522.1 \frac{N \cdot s}{m}$	Tlumení tlumiče
$f_u = 8.3 \text{ Hz}$	Vlastní frekvence pneumatiky
$k_s = 121746.6 \frac{N}{m}$	Tuhost pružiny

Obrázek 13: Výstupní parametry vozidla

### 4.1.3 Kontrola dostatku výkonu a točivého momentu

Abychom zjistili, co vše je nově navržený pohon vozidla překonat, je možné v programu vybrat, zda se má zrovna využívat pouze spalovací motor, pouze elektromotory, nebo oba pohony současně. V případě pohonu vozidla spalovacím motorem, a to jak samostatně, tak společně s elektromotory, je nutné vybrat i zařazený převodový stupeň. Vše se vybírá pomocí rozbalovacího seznamu.

Vstupní hodnoty	
$Drive :=$ Engine + Motors ▾	Pohon vozidla
$Gear :=$ 1 ▾	Zařazený rychlostní stupeň

Obrázek 14: Volba pohonu vozidla

$Drive :=$ Engine + Motors ▾	Pohon vozidla
<ul style="list-style-type: none"> <li>Engine</li> <li>Motors</li> <li>Engine + Motors</li> </ul>	

Obrázek 15: Volba hodnot pomocí rozbalovacího seznamu

Dále se zvolí rychlost a zrychlení vozidla, úhel stoupání vozovky a dodatečná hmotnost cestujících a zavazadel.

$v := 50 \text{ } \mathit{kph}$	Rychlost vozidla
$a := 2 \frac{m}{s^2}$	Zrychlení vozidla
$\alpha := 10 \text{ } \mathit{deg}$	Úhel stoupání vozovky
$m_{add} := 100 \text{ } \mathit{kg}$	Hmotnost cestujících a zavazadel

Obrázek 16: Volba počátečních hodnot

Po zvolení počátečních hodnot program nejdříve vyhodnotí, zda je v případě používání spalovacího motoru zařazen správný převodový stupeň, a následně spočte, zda je pohon schopný vyprodukovat dostatečné množství výkonu a točivého momentu k překonání všech jízdních odporů. V případě, že jsou k pohonu využívány elektromotory, je programem kontrolováno i to, zda je tento výkon a točivý moment dlouhodobě udržitelný, nebo zda je pouze dočasný.

<b>Kontrola dostatku výkonu a točivého momentu</b>	
$Shifting = \text{"Correct gear"}$	Kontrola zařazení správného rychlostního stupně
$Power = \text{"Enough power"}$	Kontrola dostatku výkonu
$Torque = \text{"Enough torque"}$	Kontrola dostatku točivého momentu

Obrázek 17: Kontrola dostatku výkonu a točivého momentu

$Shifting = \text{"Upshift"}$	Kontrola zařazení správného rychlostního stupně
$Power = \text{"Engine destroyed"}$	Kontrola dostatku výkonu
$Torque = \text{"Engine destroyed"}$	Kontrola dostatku točivého momentu

Obrázek 18: Zařazení příliš nízkého převodového stupně

$Shifting = \text{"Downshift"}$	Kontrola zařazení správného rychlostního stupně
$Power = \text{"Engine stalled"}$	Kontrola dostatku výkonu
$Torque = \text{"Engine stalled"}$	Kontrola dostatku točivého momentu

Obrázek 19: Zařazení příliš vysokého převodového stupně

<i>Shifting</i> = “Correct gear”	Kontrola zařazení správného rychlostního stupně
<i>Power</i> = “Not enough power”	Kontrola dostatku výkonu
<i>Torque</i> = “Not enough torque”	Kontrola dostatku točivého momentu

Obrázek 20: Nedostatek výkonu a točivého momentu

<i>Shifting</i> = “Not using transmission”	Kontrola zařazení správného rychlostního stupně
<i>Power</i> = “Not enough continuous power”	Kontrola dostatku výkonu
<i>Torque</i> = “Not enough continuous torque”	Kontrola dostatku točivého momentu

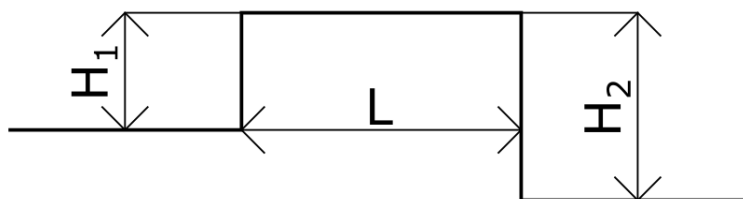
Obrázek 21: Nedostatek dlouhodobě udržitelného výkonu a točivého momentu

#### 4.1.4 Chování vozidla při přejezdu překážky

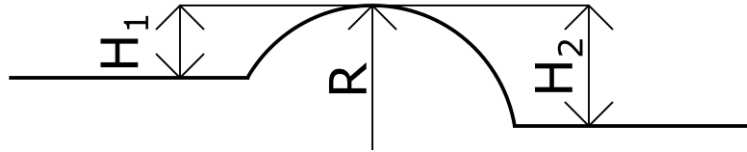
Pro prvotní určení, jak se bude vozidlo chovat při přejezdu určité překážky, se využije čtvrtinový model vozidla. Nastaví se, zda bude mít překážka hranatý nebo oblý tvar, a poté se definuje výška překážky na začátku a na konci a její délka. V případě oblé překážky se místo délky definuje její poloměr.

<i>Bump</i> := <input type="text" value="Square"/>	Typ překážky
$H_1 := 80 \text{ mm}$	Výška překážky na začátku
$H_2 := 120 \text{ mm}$	Výška překážky na konci
$L := 3000 \text{ mm}$	Délka překážky (hranatá překážka)
$R := 500 \text{ mm}$	Poloměr překážky (oblá překážka)

Obrázek 22: Definování překážky



Obrázek 23: Rozměry hranaté překážky



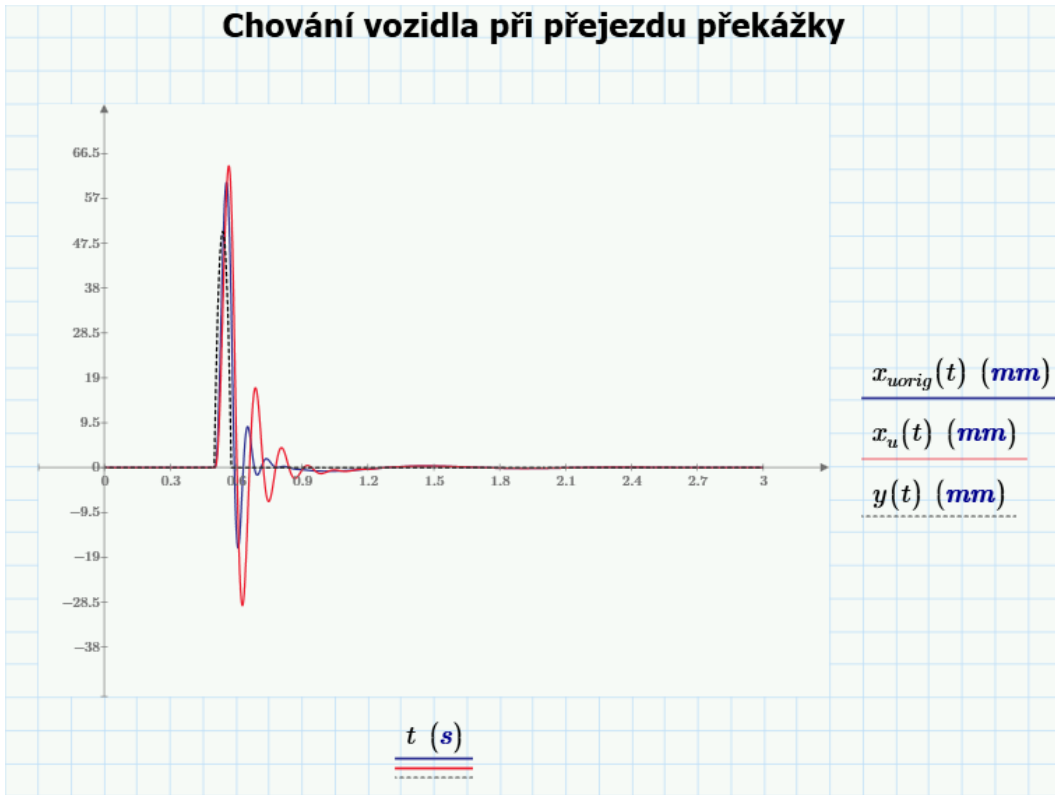
Obrázek 24: Rozměry oblé překážky

Pro danou rychlost vozidla a překážku se vykreslí grafy s vychýlením, rychlostí a zrychlením odpružené a neodpružené hmoty, a poté i velikost síly a propérování kola do karoserie, a to jak pro upravenou verzi vozidla (červené křivky), tak i pro tu původní (modré křivky). Černá čárkovaná křivka značí tvar překážky.

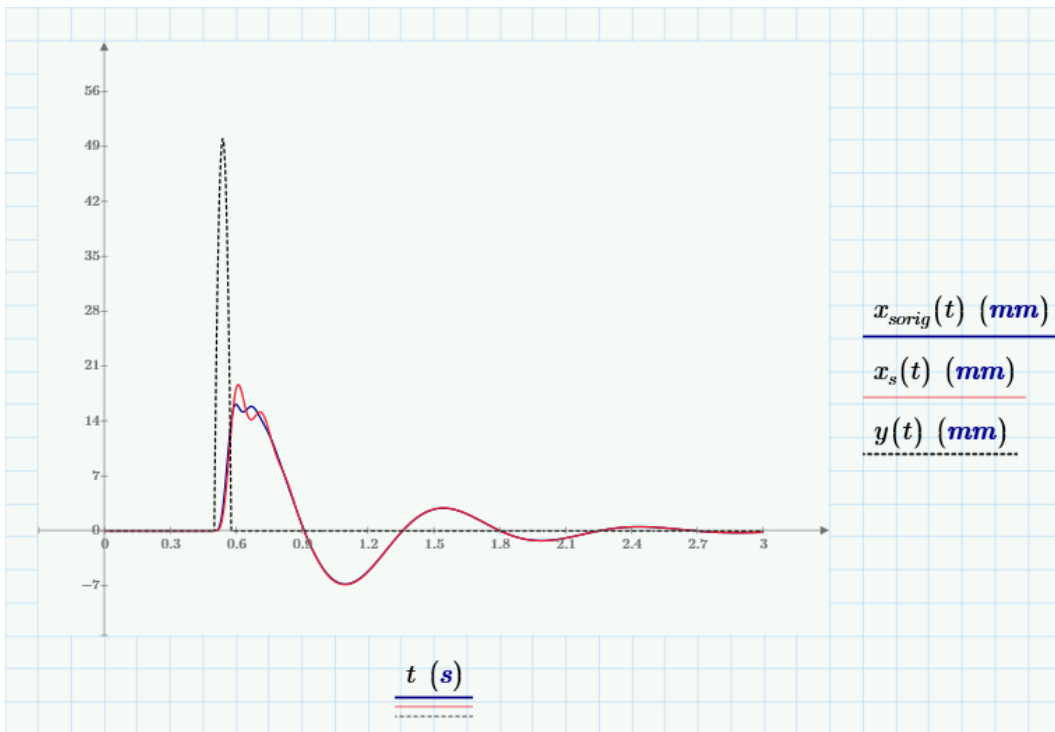
Pro porovnání chování obou vozidel při přejezdu překážky byl zvolen normovaný zpomalovací práh pro rychlost  $20 \text{ km/h}$ , který je definován hodnotami na *Obrázku 25*. Obě vozidla mají zvolenou stejnou hmotnost nápravy, jediný rozdíl v neodpružené hmotnosti dělá tedy pouze elektromotor.

<i>Bump</i> :=	Round ▾
<i>H</i> <sub>1</sub> :=	50 <i>mm</i>
<i>H</i> <sub>2</sub> :=	50 <i>mm</i>
<i>R</i> :=	487.25 <i>mm</i>

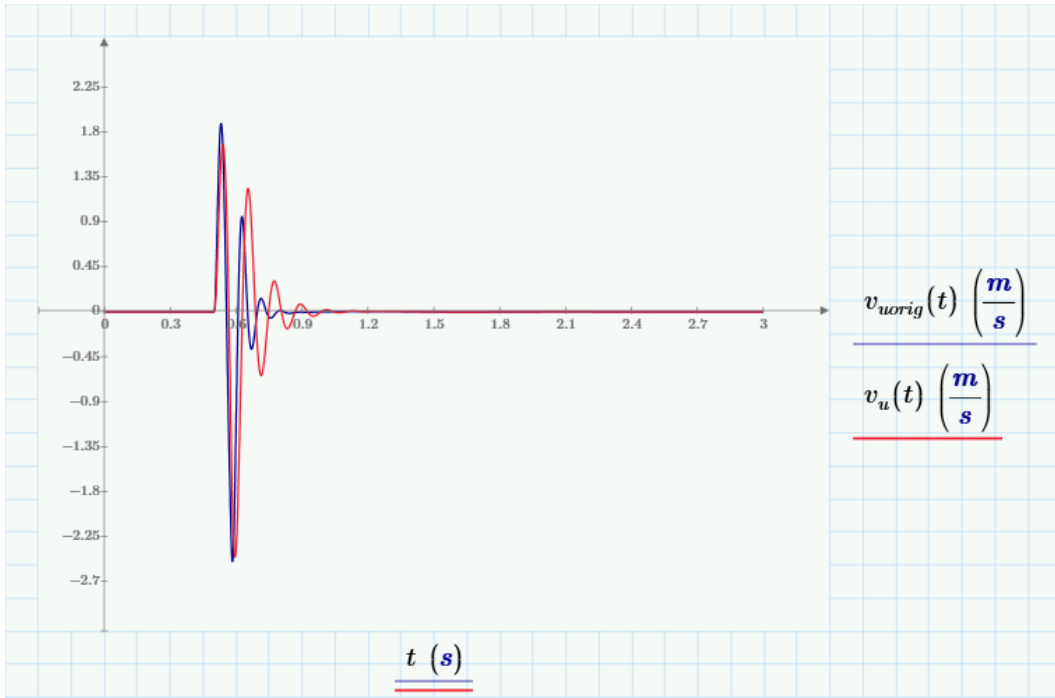
Obrázek 25: Rozměry použité překážky



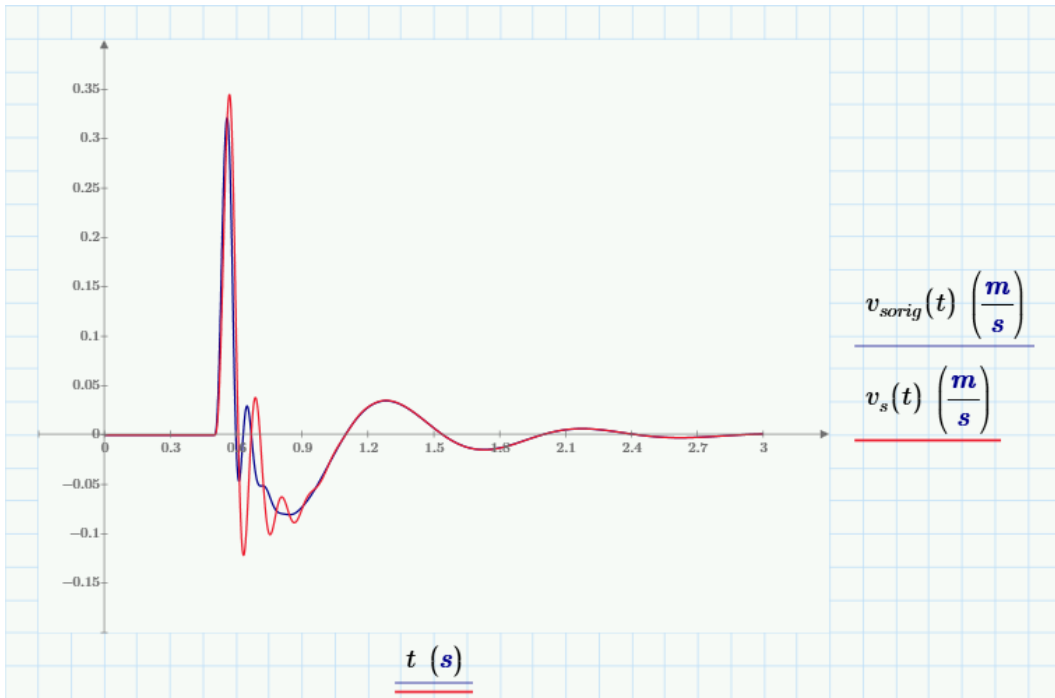
Obrázek 26: Výchylka neodpružené hmoty



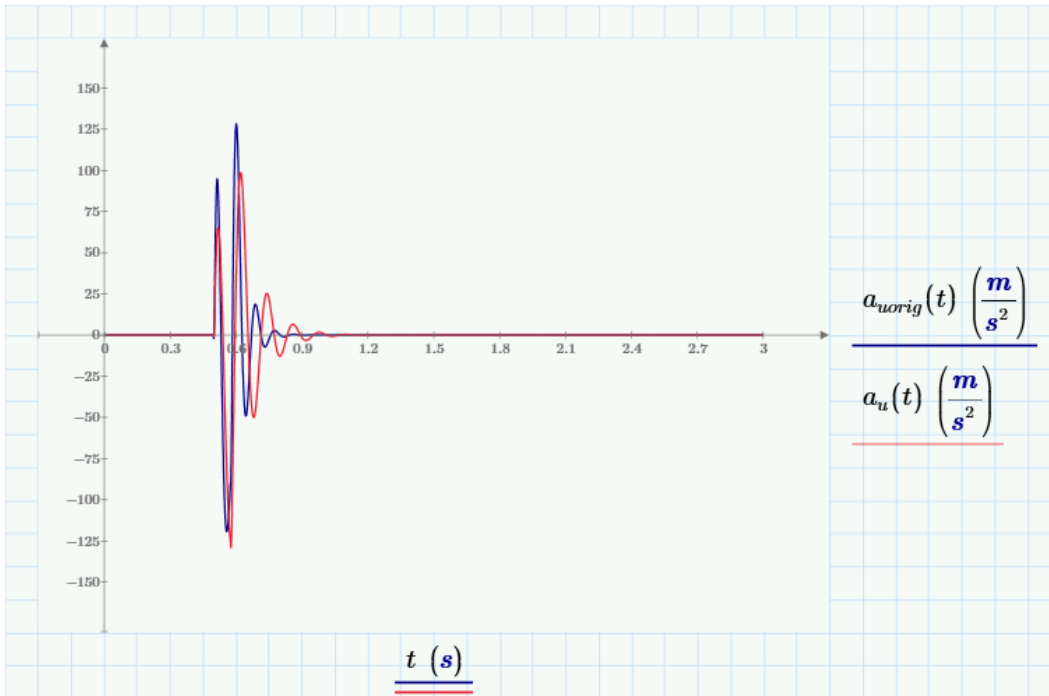
Obrázek 27: Výchylka odpružené hmoty



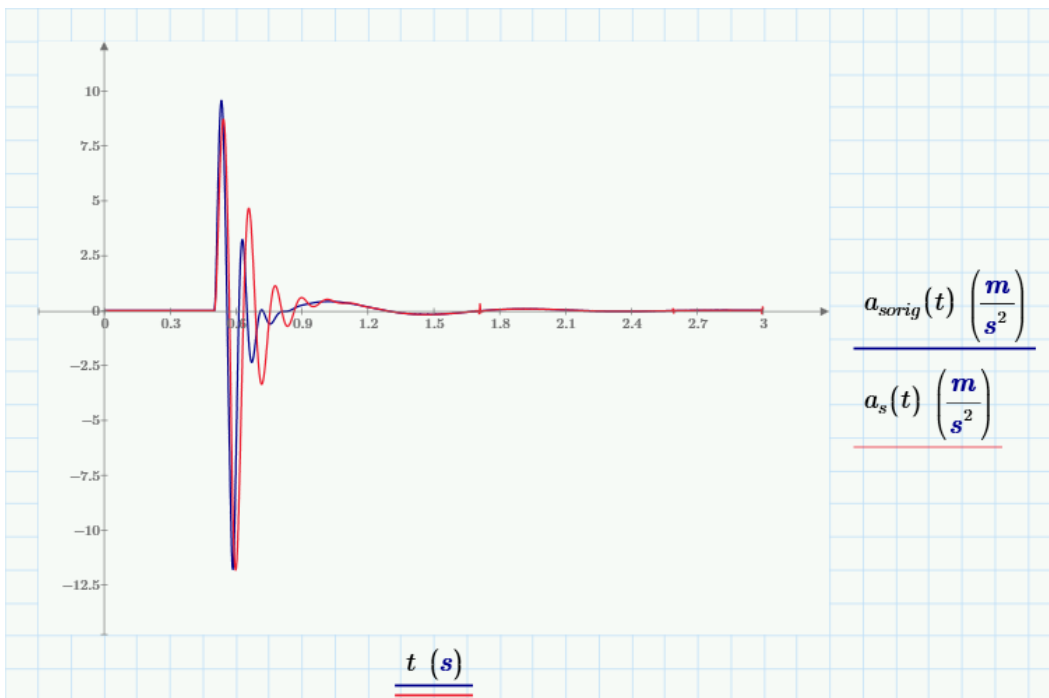
Obrázek 28: Rychlost neodpružené hmoty



Obrázek 29: Rychlost odpružené hmoty

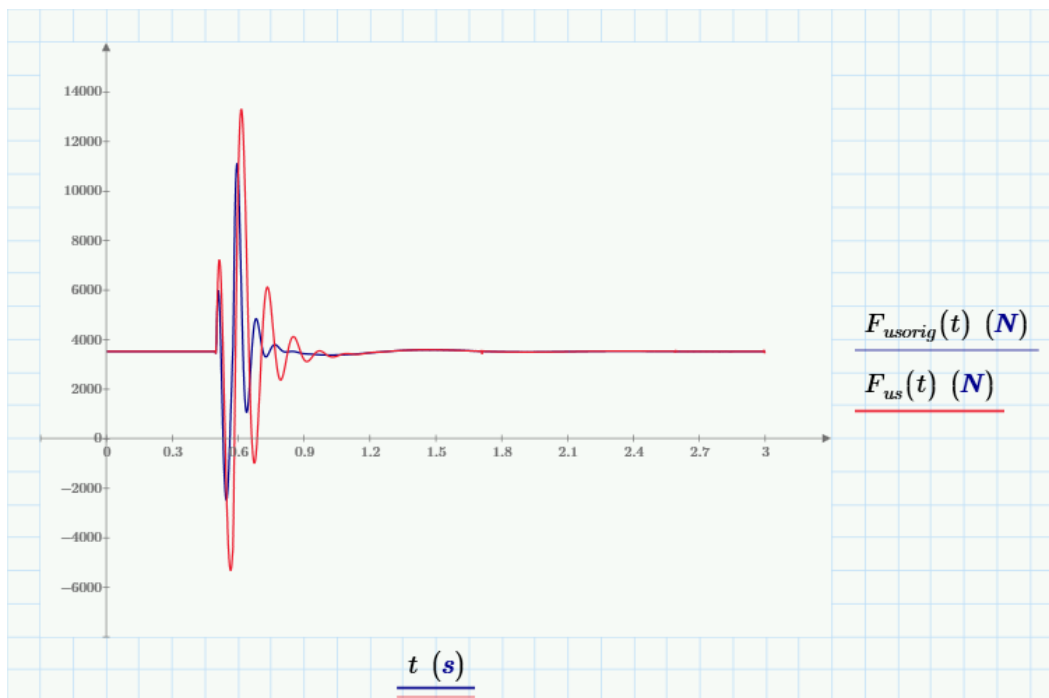


Obrázek 30: Zrychlení neodpružené hmoty

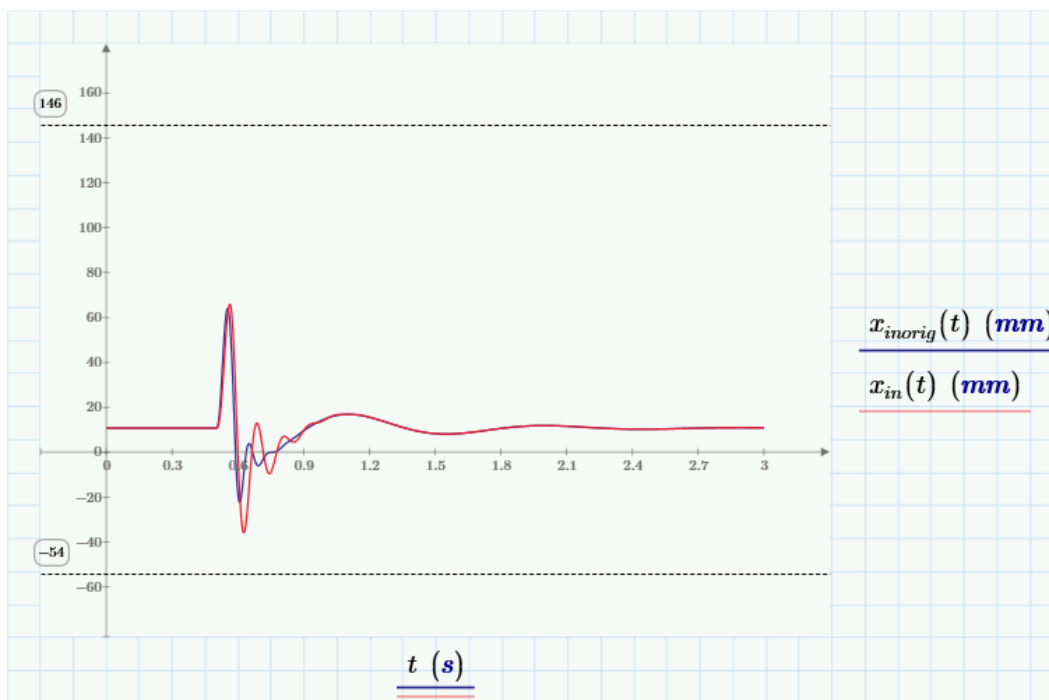


Obrázek 31: Zrychlení odpružené hmoty





Obrázek 32: Síla působící do karoserie od neodpružené hmoty



Obrázek 33: Propérování kola do karoserie

Osy s hodnotami  $-54 \text{ mm}$  a  $146 \text{ mm}$  na Obrázku 33 znázorňují krajní meze propérování kola z/do karoserie. Při překročení horní či dolní meze dochází k zastavení vertikálního pohybu kola

pomocí dorazů. Nulová hodnota vychýlení je statická poloha při nulovém dodatečném zatížení, ale jelikož bylo vozidlo zatíženo  $100\text{ kg}$ , tak je hodnota statického vychýlení vyšší než nula.

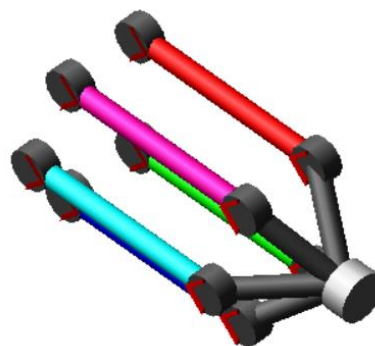
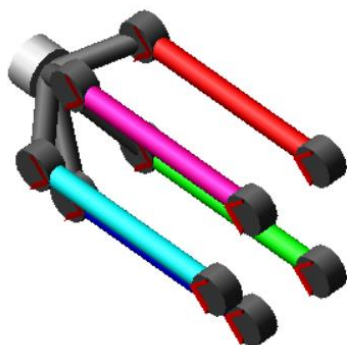
Předešlé grafy potvrzují informace o neodpružené hmotě uvedené v *Kapitole 2.3.1*, tedy že zvýšená neodpružená hmotnost snižuje při přejezdu nerovnosti kontakt mezi pneumatikou a vozovkou, čímž se zhoršuje ovladatelnost vozidla, a zároveň zvětšuje působící síly do karoserie od neodpružené hmoty, což negativně ovlivňuje jízdní komfort.

## 4.2 Kinematický model nápravy

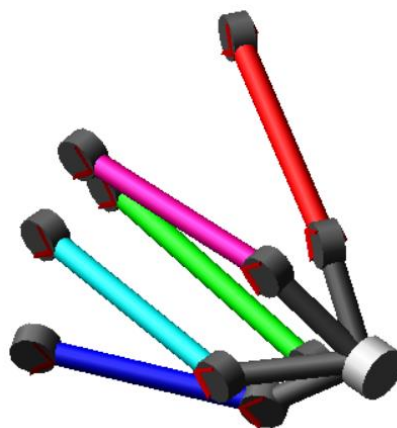
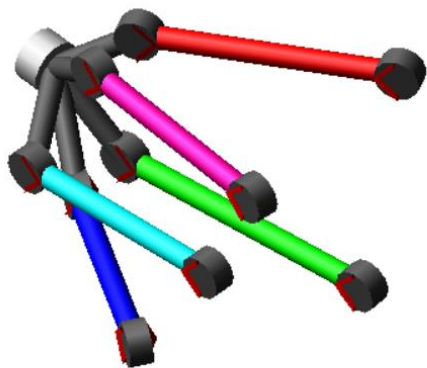
Jelikož je tento model dělaný pouze za účelem zjištění kinematiky nápravy, v našem případě tedy odklonu kola a sbíhavosti kol, tak stačí určit pouze polohu jednotlivých prvků. Není tedy třeba do modelu přidávat tlumič ani pružinu. Při určování polohy prvků se ovšem muselo vycházet nejen z výsledné kinematiky nápravy, ale i z CAD modelu kvůli možnostem zástavbového prostoru.

Geometrie kol ve statické poloze je zvolena podle hodnot z programu *Bosch ESI[tronic]* pro vozidlo *Audi RS3*. Odklon kola je tedy nastaven na  $-1^{\circ}20'$  a sbíhavost kol na  $0^{\circ}25'$ . Pro vyhodnocení změny geometrie při vertikálním pohybu kola byla provedena simulace souběžného pohybu kol.

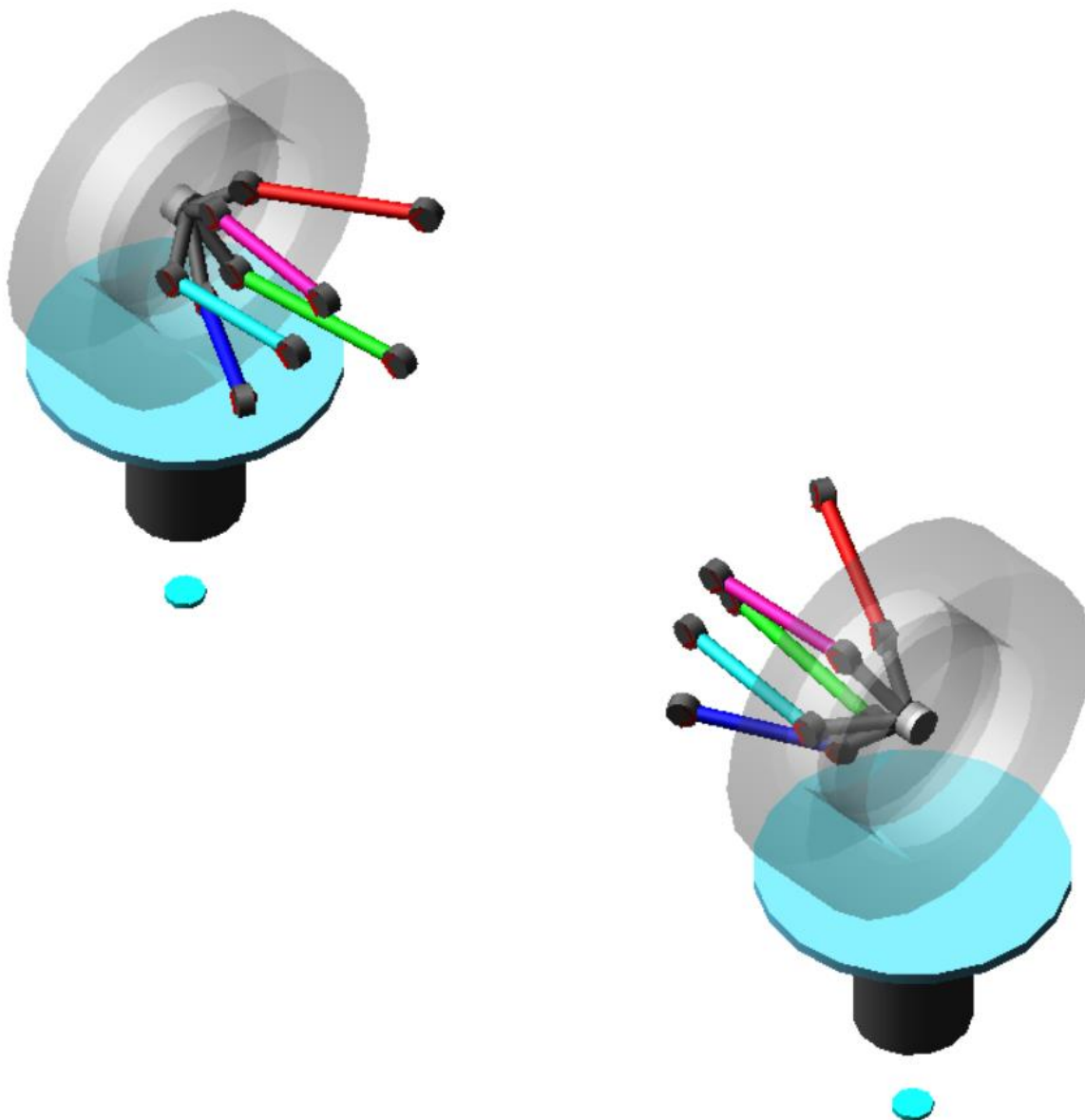
Tento kinematický model byl dělán v programu *MSC Adams* od šablony, přes podsestavu až po sestavu. Všechny tři stupně modelu jsou přiloženy v příloze této diplomové práce.



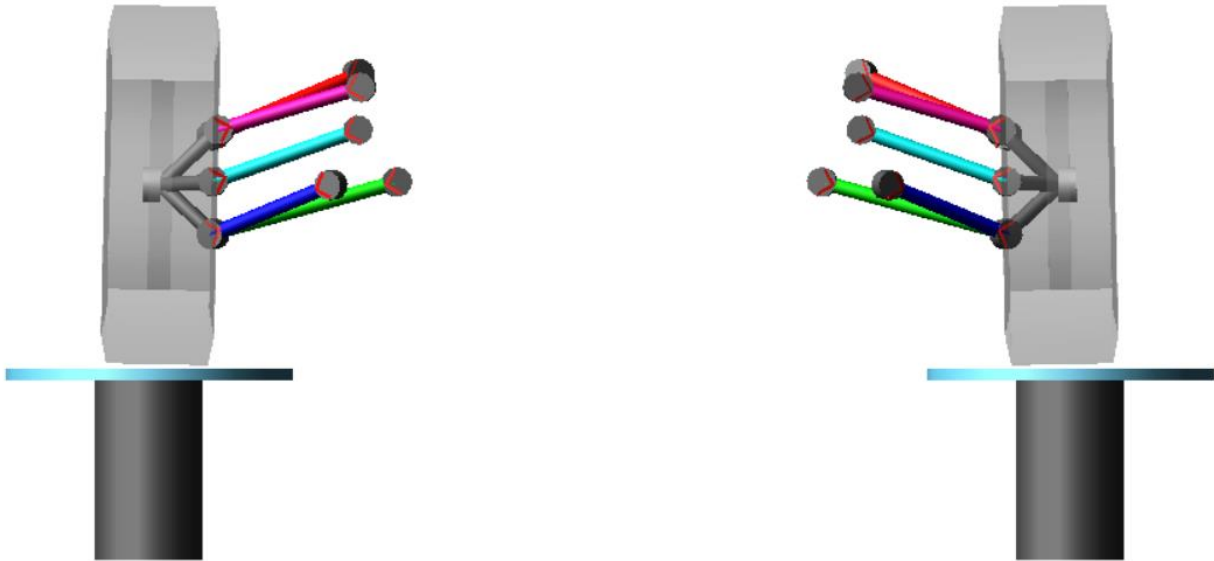
Obrázek 34: Šablona kinematického modelu nápravy



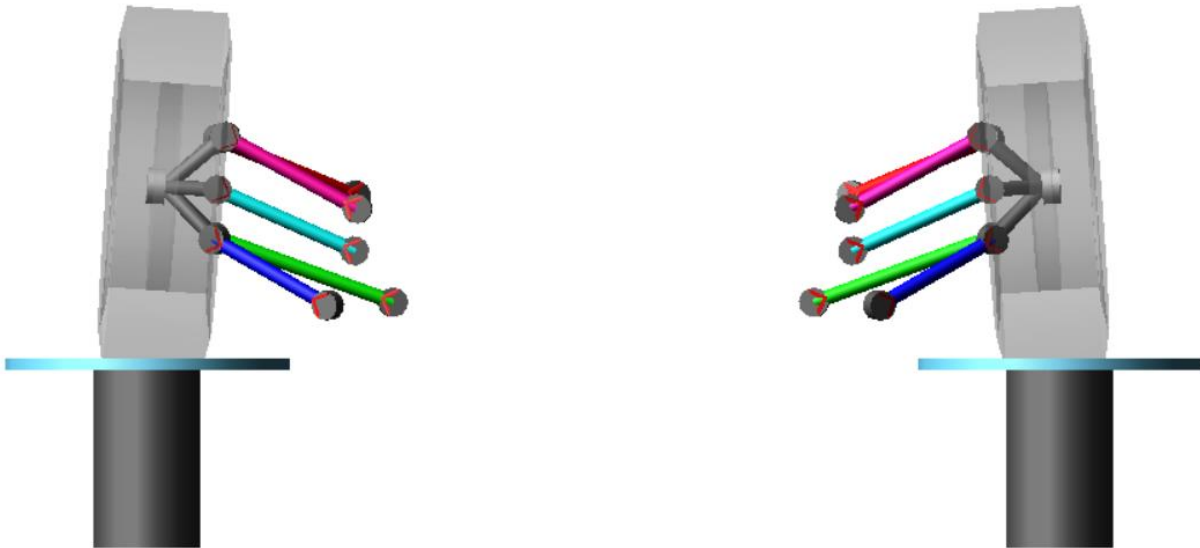
Obrázek 35: Podsestava kinematického modelu nápravy



Obrázek 36: Sestava kinematického modelu nápravy ve statické poloze

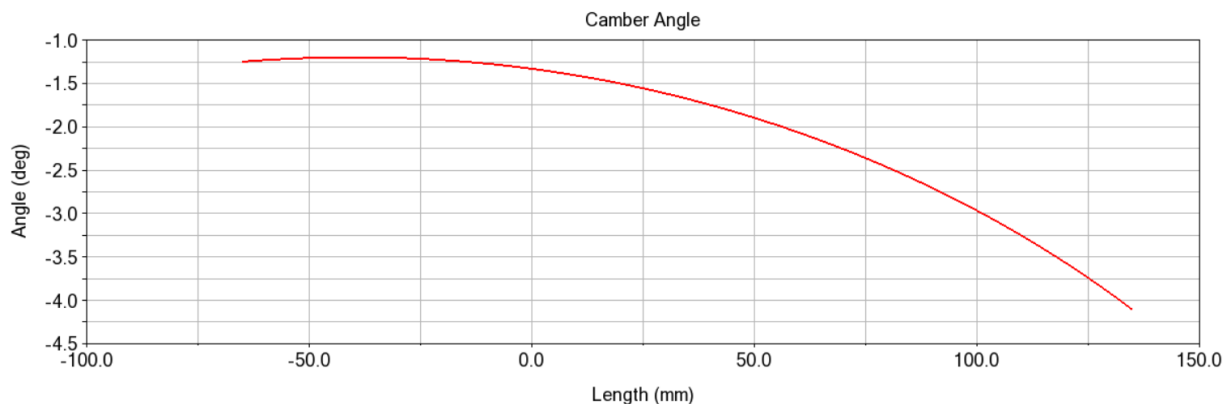


Obrázek 37: Sestava kinematického modelu nápravy v dolní poloze

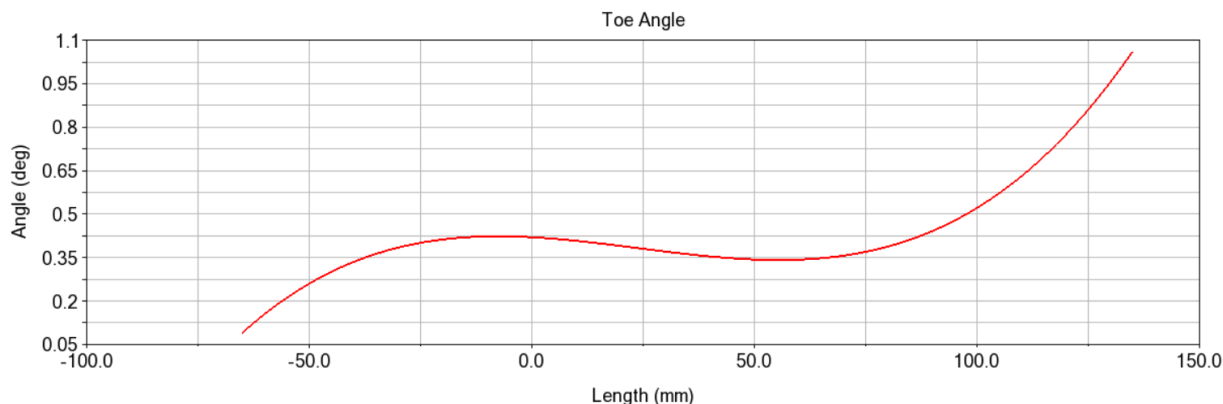


Obrázek 38: Sestava kinematického modelu nápravy v horní poloze

Na *Obrázcích 39 a 40* lze vidět průběh odklonu kola a sbíhavosti kol v závislosti na vertikální poloze kola. Nulová výchylka kola, pro kterou byly nastaveny počáteční hodnoty odklonu a sbíhavosti, odpovídá statickému propérování kola do karoserie při zatížení vozidla 100 kg. Maximální propérování kola z karoserie je v tomto případě -65 mm, zatímco do karoserie je to 135 mm.

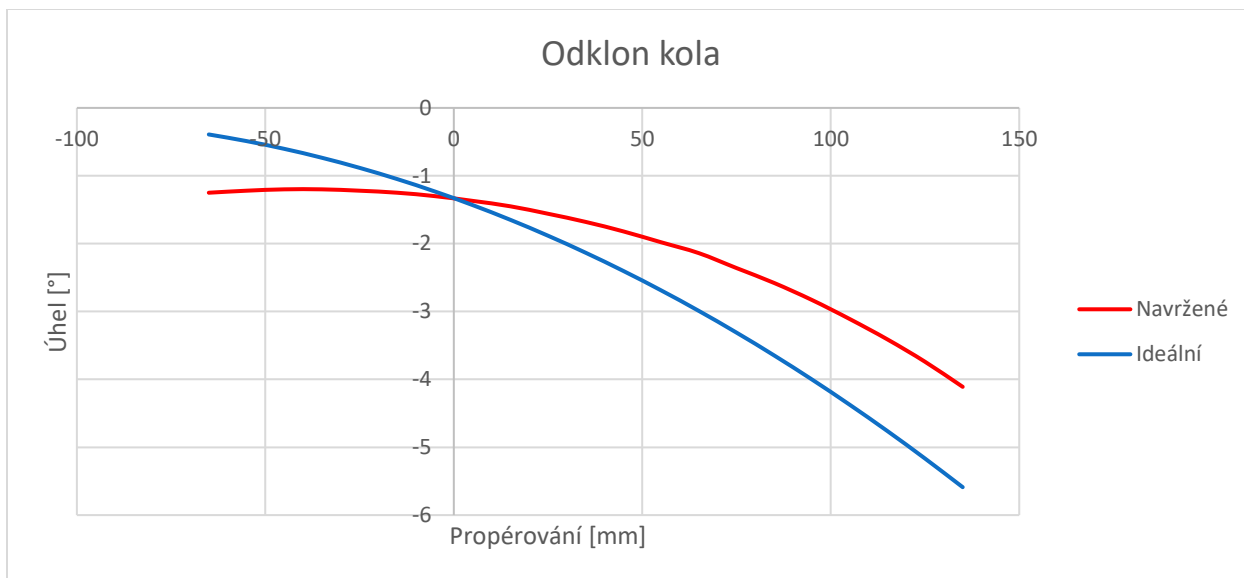


**Obrázek 39: Odklon kola v závislosti na vertikální poloze kola**

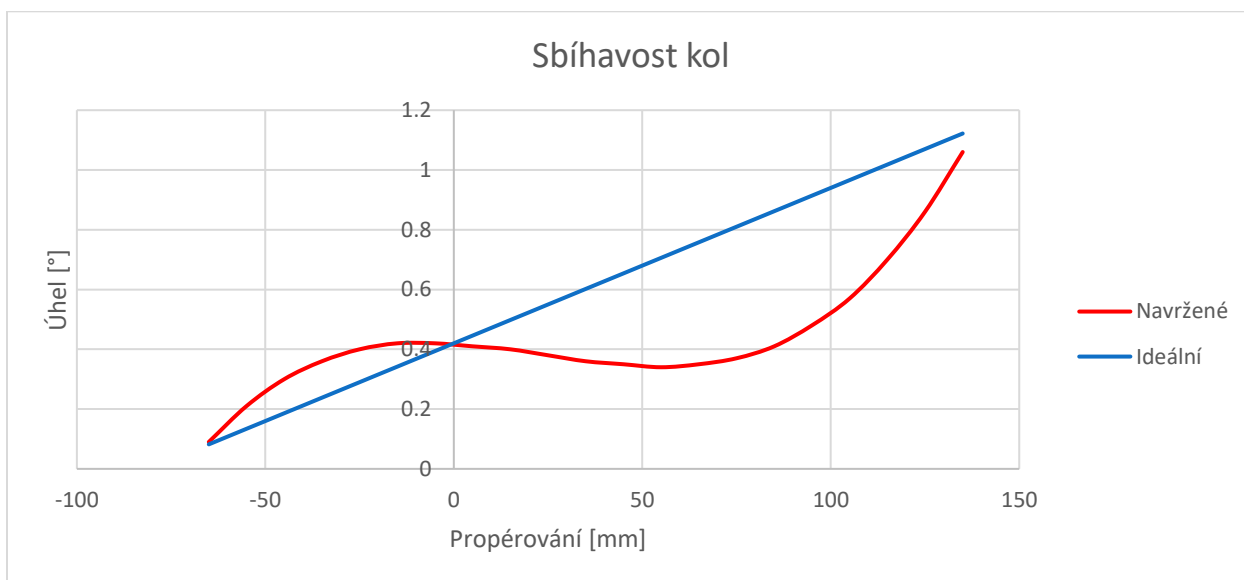


**Obrázek 40: Sbíhavost kol v závislosti na vertikální poloze kola**

Při optimalizaci kinematiky nápravy byla snaha se co nejvíce přiblížit ideálním průběhům odklonu kola a sbíhavosti kol dle *Literatury [24]*. Pro porovnání průběhů odklonu kola a sbíhavosti kol navržené nápravy a ideálních průběhů byly vytvořeny grafy zobrazené na *Obrázcích 41 a 42*.



Obrázek 41: Porovnání průběhu odklonu kola navržené nápravy s ideálním průběhem



Obrázek 42: Porovnání průběhu sbíhavosti kol navržené nápravy s ideálním průběhem

### 4.3 CAD model nápravy

Vytvořený CAD model znázorňuje celou výslednou sestavu zadní nápravy od pneumatiky až po nápravnici. Díly obsažené v sestavě jsou vypsány v *Tabulce 10*.

Tabulka 10: Seznam dílů CAD modelu

Název dílu	Počet kusů
Brzda	2
Brzdová destička	4
Brzdový kotouč	2
Elektromotor <i>Protean Pd18</i>	2
Kolo	2
Matice	30
Nápravnice	1
Pneumatika	2
Podložka	78
Pružina	2
Prvek	10
Silentblok	26
Středová krytka kola	2
Šroub	58
Těhlice	2
Tlumič	2

Po přiřazení konkrétního materiálu každému dílu byla naměřena neodpružená hmotnost jedné strany nápravy bez elektromotoru 37.5 kg, která byla zpětně použita ve výpočetním programu. Tato hmotnost je vyšší, než kolik by se očekávalo, a to z toho důvodu, že jednotlivé díly nejsou pevnostně optimalizovány, čímž by se výsledná hmotnost snížila, jelikož momentálně jsou tyto díly předimenzované. Následně se z modelu změřil i poměr pohybu jak pružiny, tak tlumiče, a tyto hodnoty se taktéž zpětně dosadily do výpočetního programu.

Tento CAD model byl vymodelován v programu *PTC Creo*. STEP i *Creo* verze modelu lze najít v příloze této diplomové práce.

Jak lze vidět z následujících obrázků nápravy, přesunutím elektromotorů do nábojů kol a odstraněním diferenciálu s hnacími hřídelemi se velmi výhodně využije jinak nevyužitelné místo v kole, a zároveň se uvolní prostor mezi koly, který se může využít buď pro baterie, nebo zvětšení zavazadlového prostoru.





Obrázek 43: Izometrický přední pohled na CAD model nápravy



Obrázek 44: Izometrický zadní pohled na CAD model nápravy



Obrázek 45: Detailní pohled na CAD model kola



Obrázek 46: Detailní přední pohled na CAD model zavěšení kola



Obrázek 47: Detailní zadní pohled na *CAD* model zavěšení kola

## 5 Závěr

---

Tato diplomová práce začíná teoretickou částí, ve které je popsáno, co to jsou nápravy a jejich jednotlivé typy pro zadní kola společně s jejich výhodami a nevýhodami. Dále byly shrnuty údaje o výskytu konkrétních typů náprav ve vozidlech nižší střední třídy a ve vozidlech s asistovaným pohonem zadních kol. Následně byla popsána problematika neodpružené hmoty společně s geometrií zadních kol. Teoretická část je zakončena kapitolou o asistovaných pohonech zadních kol, kde je tato technologie popsána společně s výskytem jednotlivých typů asistovaného pohonu ve vozidlech s touto technologií.

Praktická část je zaměřena na tři související výstupy, což jsou výpočetní program, kinematický model a *3D CAD* model.

Pomocí výpočetního programu získáme po dosazení vstupních hodnot základní parametry pro návrh pružiny a tlumiče. Program poté určí, zda bude mít vozidlo při vybraném typu pohonu, případně i zařazeném převodovém stupni, dostatek výkonu a točivého momentu pro překonání definovaných jízdních odporů. Následně jsou vykresleny grafy s vychýlením, rychlostí a zrychlením odpružené a neodpružené hmoty nově navrženého i původního vozidla, společně s velikostí síly a propérování kola do karoserie obou vozidel.

Kinematický model nápravy slouží ke zjištění průběhu odklonu kola a sbíhavosti kol při vertikálním pohybu kola. Pomocí těchto údajů se náprava zoptimalizovala tak, aby byly tyto průběhy co nejvíce totožné s ideálními průběhy.

Poslední částí je *3D CAD* model, na kterém je znázorněna navržená náprava od kola až po nápravnici.

Na tuto diplomovou práci je možné navázat detailní pevnostní optimalizací jednotlivých dílů a návrhem zástavby do konkrétního vozidla.

## 6 Seznam použitých zkratek a symbolů

Parametr	Jednotka	Popis
$a$	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Zrychlení vozidla
$a_s$	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Zrychlení odpružené hmoty
$a_{sorig}$	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Zrychlení odpružené hmoty původního vozidla
$a_u$	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Zrychlení neodpružené hmoty
$a_{uorig}$	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Zrychlení neodpružené hmoty původního vozidla
$A_x$	$[m^2]$	Čelní plocha vozidla
$c_s$	$\left[\frac{N \cdot s}{m}\right]$	Tlumení tlumiče
$c_x$	$[-]$	Součinitel vzdušného odporu
$d_{tire}$	$[m]$	Průměr pneumatiky
$f_r$	$[-]$	Součinitel odporu valení
$f_s$	$[Hz]$	Vlastní frekvence pružiny
$f_u$	$[Hz]$	Vlastní frekvence pneumatiky
$F_{us}$	$[N]$	Síla působící do karoserie od neodpružené hmoty
$F_{usorig}$	$[N]$	Síla působící do karoserie od neodpružené hmoty původního vozidla
$F_{spring}$	$[N]$	Předpětí pružiny
$H_1$	$[m]$	Výška překážky na začátku
$H_2$	$[m]$	Výška překážky na konci
$i_{final}$	$[-]$	Převodový poměr stálého převodu

$i_{trans}$	$[-]$	Převodový poměr převodovky
$k_s$	$\left[\frac{N}{m}\right]$	Tuhost pružiny
$k_u$	$\left[\frac{N}{m}\right]$	Radiální tuhost pneumatiky
$L$	$[m]$	Délka překážky
$m_{add}$	$[kg]$	Hmotnost cestujících a zavazadel
$m_{rrear}$	$[\%]$	Poměrné zatížení zadní nápravy
$m_s$	$[kg]$	Odpružená hmotnost čtvrtiny vozidla
$m_{stotal}$	$[kg]$	Odpružená hmotnost vozidla
$m_u$	$[kg]$	Neodpružená hmotnost čtvrtiny vozidla
$m_{umotor}$	$[kg]$	Hmotnost elektromotoru
$m_{ususp}$	$[kg]$	Neodpružená hmotnost nápravy
$MR_{damper}$	$[-]$	Poměr pohybu tlumiče
$MR_{spring}$	$[-]$	Poměr pohybu pružiny
$P_{cmotor}$	$[W]$	Maximální dlouhodobý výkon elektromotoru
$P_{engine}$	$[W]$	Maximální výkon spalovacího motoru
$P_{pmotor}$	$[W]$	Maximální krátkodobý výkon elektromotoru
$R$	$[m]$	Poloměr překážky
$T_{cmotor}$	$[Nm]$	Maximální dlouhodobý točivý moment elektromotoru
$T_{engine}$	$[Nm]$	Maximální točivý moment spalovacího motoru
$T_{pmotor}$	$[Nm]$	Maximální krátkodobý točivý moment elektromotoru



$v$	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Rychlost vozidla
$v_s$	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Rychlost odpružené hmoty
$v_{sorig}$	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Rychlost odpružené hmoty původního vozidla
$v_u$	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Rychlost neodpružené hmoty
$v_{uorig}$	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Rychlost neodpružené hmoty původního vozidla
$x_{in}$	$[m]$	Stlačení pružiny
$x_{inorig}$	$[m]$	Stlačení pružiny původního vozidla
$x_s$	$[m]$	Vychýlení odpružené hmoty
$x_{sorig}$	$[m]$	Vychýlení odpružené hmoty původního vozidla
$x_u$	$[m]$	Vychýlení neodpružené hmoty
$x_{uorig}$	$[m]$	Vychýlení neodpružené hmoty původního vozidla
$y$	$[m]$	Vychýlení vozovky
$\alpha$	$[^\circ]$	Úhel stoupání vozovky
$\eta$	$[\%]$	Účinnost hnacího ústrojí
$\vartheta_{car}$	$[-]$	Součinitel rotačních hmot vozidla
$\vartheta_{motor}$	$[-]$	Součinitel rotačních hmot elektromotoru
$\vartheta_{trans}$	$[-]$	Součinitel rotačních hmot převodovky
$\rho$	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	Hustota vzduchu
$\zeta$	$[-]$	Poměrné tlumení tlumiče

## 7 Seznam obrázků

---

Obrázek 1: Schéma vozidla s elektromotory v nábojích zadních kol.....	7
Obrázek 2: Porovnání závislého a nezávislého zavěšení kol [15] .....	8
Obrázek 3: Čtvrtinový model automobilu [12] .....	9
Obrázek 4: Tuhá náprava [13].....	10
Obrázek 5: Vlečená náprava s torzním prvkem [13].....	11
Obrázek 6: Lichoběžníková náprava [13] .....	12
Obrázek 7: Víceprvková náprava [13].....	13
Obrázek 8: Síla způsobená neodpruženou hmotou vozidla [14].....	16
Obrázek 9: Odklon kola [14] .....	17
Obrázek 10: Sbíhavost/rozbíhavost kol [14].....	17
Obrázek 11: Elektromotor s diferencíalem mezi koly [23] .....	20
Obrázek 12: Elektromotor v náboji kola [16].....	21
Obrázek 13: Výstupní parametry vozidla.....	26
Obrázek 14: Volba pohonu vozidla .....	26
Obrázek 15: Volba hodnot pomocí rozbalovacího seznamu .....	26
Obrázek 16: Volba počátečních hodnot .....	27
Obrázek 17: Kontrola dostatku výkonu a točivého momentu.....	27
Obrázek 18: Zařazení příliš nízkého převodového stupně.....	27
Obrázek 19: Zařazení příliš vysokého převodového stupně.....	27
Obrázek 20: Nedostatek výkonu a točivého momentu .....	28
Obrázek 21: Nedostatek dlouhodobě udržitelného výkonu a točivého momentu.....	28
Obrázek 22: Definování překážky .....	28
Obrázek 23: Rozměry hranaté překážky .....	28
Obrázek 24: Rozměry oblé překážky.....	29
Obrázek 25: Rozměry použité překážky .....	29
Obrázek 26: Výchylka neodpružené hmoty .....	30
Obrázek 27: Výchylka odpružené hmoty .....	30
Obrázek 28: Rychlost neodpružené hmoty.....	31
Obrázek 29: Rychlost odpružené hmoty.....	31
Obrázek 30: Zrychlení neodpružené hmoty .....	32
Obrázek 31: Zrychlení odpružené hmoty .....	32
Obrázek 32: Síla působící do karoserie od neodpružené hmoty .....	33
Obrázek 33: Propérování kola do karoserie .....	33
Obrázek 34: Šablona kinematického modelu nápravy .....	34
Obrázek 35: Podsestava kinematického modelu nápravy.....	35
Obrázek 36: Sestava kinematického modelu nápravy ve statické poloze.....	36
Obrázek 37: Sestava kinematického modelu nápravy v dolní poloze .....	37
Obrázek 38: Sestava kinematického modelu nápravy v horní poloze.....	37
Obrázek 39: Odklon kola v závislosti na vertikální poloze kola .....	38
Obrázek 40: Sbíhavost kol v závislosti na vertikální poloze kola .....	38
Obrázek 41: Porovnání průběhu odklonu kola navržené nápravy s ideálním průběhem .....	39

Obrázek 42: Porovnání průběhu sbíhavosti kol navržené nápravy s ideálním průběhem.....	39
Obrázek 43: Izometrický přední pohled na CAD model nápravy.....	41
Obrázek 44: Izometrický zadní pohled na CAD model nápravy.....	42
Obrázek 45: Detailní pohled na CAD model kola.....	43
Obrázek 46: Detailní přední pohled na CAD model zavěšení kola .....	44
Obrázek 47: Detailní zadní pohled na CAD model zavěšení kola .....	45

## 8 Seznam tabulek

---

Tabulka 1: Typy zadních náprav v jednotlivých automobilech nižší střední třídy .....	14
Tabulka 2: Četnost jednotlivých typů zadních náprav v automobilech nižší střední třídy .....	15
Tabulka 3: Typy zadních náprav v jednotlivých automobilech s asistovaným pohonem zadních kol .....	15
Tabulka 4: Četnost jednotlivých typů zadních náprav v automobilech s asistovaným pohonem zadních kol .....	16
Tabulka 5: Porovnání kombinované spotřeby paliva mezi 2WD a AWD verzemi jednotlivých vozidel .....	19
Tabulka 6: Typy asistovaných pohonů v jednotlivých automobilech s asistovaným pohonem zadních kol .....	22
Tabulka 7: Četnost jednotlivých typů asistovaných pohonů v automobilech s asistovaným pohonem zadních kol.....	22
Tabulka 8: Vstupní parametry vozidla .....	24
Tabulka 9: Výstupní parametry vozidla .....	25
Tabulka 10: Seznam dílů CAD modelu .....	40

## 9 Seznam použité literatury

---

- [1] JAIN, K. K. a R. B. ASTHANA. *Automobile Engineering*. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 2002. ISBN 0-07-044529-X.
- [2] BARTON, David C. a John FIELDHOUSE. *Automotive Chassis Engineering*. Cham: Springer, 2018. ISBN 978-3-319-72436-2.
- [3] HALDERMAN, James D. *Automotive Chassis Systems*. Boston: Prentice Hall, 2010. ISBN 0-13-508503-9.
- [4] KNOWLES, Don. *Automotive Suspension & Steering Systems*. Clifton Park: Delmar, Cengage learning, 2011. ISBN 978-1-4354-8115-2.
- [5] MI, Chris a M. Abul MASRUR. *Hybrid Electric Vehicles: Principles and Applications with Practical Perspectives*. Hoboken: Wiley, 2018. ISBN 9781118970539.
- [6] VLK František. *Podvozky motorových vozidel*. Brno: František Vlk, 2006. ISBN 80-239-6464-X.
- [7] VLK František. *Dynamika motorových vozidel*. Brno: František Vlk, 2003. ISBN 80-239-0024-2.
- [8] CROLLA, David A. *Automotive Engineering: Powertrain, Chassis System and Vehicle Body*. Amsterdam: Elsevier, 2009. ISBN 978-1-85617-577-7.
- [9] GENTA, Giancarlo a Lorenzo MORELLO. *The Automotive Chassis: Volume 1: Components Design*. Cham: Springer, 2020. ISBN 978-3-030-35634-7.
- [10] GENTA, Giancarlo a Lorenzo MORELLO. *The Automotive Chassis: Volume 2: System Design*. Cham: Springer, 2020. ISBN 978-3-030-35708-5.
- [11] DOUDA, Pavel, Tomáš HEPTNER a Josef KOLÁŘ. *Pozemní dopravní prostředky*. Praha: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04308-0.
- [12] JAZAR, Reza N. *Vehicle Dynamics: Theory and Application*. Cham: Springer, 2017. ISBN 978-3-319-53440-4.
- [13] Explained: The Five Most Common Automotive Suspensions. *Car and Driver* [online]. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.caranddriver.com/news/a15340751/explained-the-five-most-common-automotive-suspensions>
- [14] Car Suspension Basics, How-To & Design Tips. *Build Your Own Race Car!* [online]. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.buildyourownracecar.com/race-car-suspension-basics-and-design>
- [15] Types of Suspension System. *Mechanical Booster* [online]. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.mechanicalbooster.com/2017/12/suspension-system.html/types-of-suspension-system>
- [16] *Protean Electric* [online]. [cit. 2021-4-27]. Dostupné z: <https://www.proteanelectric.com>
- [17] Protean Electric's In-Wheel Motors Could Make EVs More Efficient. *IEEE Spectrum* [online]. [cit. 2021-4-27]. Dostupné z: <https://spectrum.ieee.org/transportation/advanced-cars/protean-electrics-inwheel-motors-could-make-evs-more-efficient>
- [18] *Elaphe* [online]. [cit. 2021-4-27]. Dostupné z: <https://in-wheel.com>
- [19] In-wheel motor. *Nissan Motor Corporation* [online]. [cit. 2021-4-27]. Dostupné z: [https://www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/in\\_wheel\\_motor.html](https://www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/in_wheel_motor.html)

- [20] In-Wheel Motor Systems Will Propel EV Performance. *Power Electronics* [online]. [cit. 2021-4-27]. Dostupné z: <https://www.powerelectronics.com/markets/automotive/article/21864197/inwheel-motor-systems-will-propel-ev-performance>
- [21] In-wheel motors: Beyond torque vectoring, the benefits of independent wheel torque control in non-performance applications. *E-mobility Technology International* [online]. [cit. 2021-4-27]. Dostupné z: <https://www.e-motec.net/in-wheel-motors-beyond-torque-vectoring>
- [22] *EncyCARpedia* [online]. [cit. 2021-7-2]. Dostupné z: <https://www.encycarpedia.com/>
- [23] Engadget | Technology News & Reviews. *Pinterest* [online]. [cit. 2021-7-30]. Dostupné z: <https://pinterest.com/pin/72057662758053605/>
- [24] KLINE, David E. *Geometric Design of Independent Suspension Linkages*. Ann Arbor, 2018. Disertační práce. University of Michigan.