

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství  
Studijní zaměření: Dopravní a manipulační technika

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Semiaktivní a aktivní tlumení vozidel

Autor: **Jiří Růžička**

Vedoucí práce: **Ing. Roman Čermák, Ph.D.**

Akademický rok 2013/2014

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří RŮŽIČKA**  
Osobní číslo: **S11B0203P**  
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Dopravní a manipulační technika**  
Název tématu: **Semiaktivní a aktivní tlumení vozidel**  
Zadávající katedra: **Katedra konstruování strojů**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Základní požadavky:

Proveďte rešerši v oblasti aktivních a semiaktivních tlumičů pro automobilové aplikace. Zpracujte tematiku z hledisek principů činnosti, srovnání jednotlivých koncepcí, vlastností, aplikací, atd. Zmapujte trendy v oboru a očekávaný budoucí vývoj. V praktické části práce proveďte měření vlastností vybraných tlumičů na laboratorním experimentu, sestavte simulační model vozidla ve vybraném softwaru a aplikujte naměřené charakteristiky - detaily viz. příloha zadání.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova bakalářské práce:

1. Rešerše v zadané oblasti
2. Sestavení simulačního modelu vozidla ve vybraném softwaru
3. Experimentální zjišťování charakteristik vybraných tlumičů

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Rozsah pracovní zprávy: **30-40 stran A4**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

**SAVARESI, S. M., POUSSOT-VASSAL, C., SPELTA, C., SENAME, O., DUGARD, L.** *Semi-active Suspension Control Design for Vehicles*. Oxford, UK: Elsevier Ltd., 2010

**DIXON, J. C.** *The Shock Absorber Handbook, Second Edition*. Chichester, England: John Wiley & Sons, 2007

**FIJALKOWSKI, B. T.** *Automotive Mechatronics: Operational and Practical Issues, Vol.II*. New York: Springer, 2011

**GUGLIELMINO, E., SIRETEANU, T., STAMMERS, C. W., GHITA G., GIUCLEA, M.** *Semi-active Suspension Control*. London: Springer, 2008

*Podkladový materiál, výkresy, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.*

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Roman Čermák, Ph.D.**

Katedra konstruování strojů

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Roman Čermák, Ph.D.**

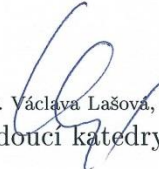
Katedra konstruování strojů

Datum zadání bakalářské práce: **23. září 2013**

Termín odevzdání bakalářské práce: **27. června 2014**

  
Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.  
děkan



  
Doc. Ing. Václava Lašova, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 23. září 2013

## **Příloha zadání bakalářské práce**

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství

Studijní zaměření: Dopravní a manipulační technika

Akademický rok: 2013/2014

Název práce: **Semiaktivní a aktivní tlumení vozidel**

Autor: **Jiří Růžička**

### Upřesnění zadání BP:

Seznamte se s modelováním dynamiky vozidel v softwaru MSC Adams/Car.

V práci stručně uveďte charakteristiku softwaru a možnosti jeho využití s ohledem na téma BP.

Sestavte model vozidla nebo využijte demo model vozidla v MSC Adams/Car a připravte několik simulačních experimentů s různými typy tlumičů.

Pro simulaci sestavte testovací trať/tratě s několika typickými překážkami v modulu Road Builder. Proveďte simulace a zhodnoťte výsledky.

Pro simulaci využijte charakteristiky tlumičů, naměřené na experimentu.

V případě, že se nepodaří experiment po rekonstrukci uvést do provozu včas, využijte pro zjištění charakteristik dostupné literární zdroje. Ty pak použijte v simulaci vozidla.

Zpracoval Ing. Roman Čermák, Ph.D., vedoucí BP

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: .....

.....  
podpis autora

## ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

|                      |  |                   |  |                         |
|----------------------|--|-------------------|--|-------------------------|
| <b>AUTOR</b>         | Příjmení<br>Růžička                            | Jméno<br>Jíří     |  |                         |
| <b>STUDIJNÍ OBOR</b> | 2301R016 „Dopravní a manipulační technika“     |                   |  |                         |
| <b>VEDOUCÍ PRÁCE</b> | Příjmení (včetně titulů)<br>Ing. Čermák, Ph.D. | Jméno<br>Roman    |  |                         |
| <b>PRACOVISŤE</b>    | ZČU - FST - KKS                                |                   |  |                         |
| <b>DRUH PRÁCE</b>    | <b>DIPLOMOVÁ</b>                               | <b>BAKALÁŘSKÁ</b> |  | Nehodící se<br>škrtněte |
| <b>NÁZEV PRÁCE</b>   | Semiaktivní a aktivní tlumení vozidel          |                   |  |                         |

|                |         |                |     |                    |      |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|
| <b>FAKULTA</b> | strojní | <b>KATEDRA</b> | KKS | <b>ROK ODEVZD.</b> | 2014 |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

|               |    |                     |    |                      |   |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|---|
| <b>CELKEM</b> | 69 | <b>TEXTOVÁ ČÁST</b> | 69 | <b>GRAFICKÁ ČÁST</b> | 0 |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|---|

|  |  |
|--|--|
| <b>STRUČNÝ POPIS<br/>(MAX 10 ŘÁDEK)</b><br><br><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL<br/>POZNATKY A PŘÍNOSY</b>           | <p>Cílem práce je zmapovat aktuální stav v oblasti automobilových tlumičů a jejich současné trendy. Pozornost je věnována především semiaktivním a aktivním tlumičům. Praktická část práce se zabývá simulací vozidla s různými tlumiči v MSC Adams/Car. Je provedeno několik simulací jízd po tratích s různými překážkami a povrchem.</p> <p>Charakteristiky tlumičů jsou převzaty z literárních zdrojů.</p> |
| <b>KLÍČOVÁ SLOVA</b><br><br><b>ZPRAVIDLA<br/>JEDNOSLOVNÉ POJMY,<br/>KTERÉ VYSTIHUJÍ<br/>PODSTATU PRÁCE</b> | <p>pasivní, semiaktivní a aktivní tlumiče, charakteristiky tlumičů, MSC Adams/Car</p>  |

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

|                          |  |                 |                            |
|--------------------------|--|-----------------|----------------------------|
| <b>AUTHOR</b>            | Surname<br>Růžička                                   | Name<br>Jiří    |                            |
| <b>FIELD OF STUDY</b>    | 2301R016 “Transport and handling machinery“          |                 |                            |
| <b>SUPERVISOR</b>        | Surname (Inclusive of Degrees)<br>Ing. Čermák, Ph.D. | Name<br>Roman   |                            |
| <b>INSTITUTION</b>       | ZČU - FST - KKS                                      |                 |                            |
| <b>TYPE OF WORK</b>      | <b>DIPLOMA</b>                                       | <b>BACHELOR</b> | Delete when not applicable |
| <b>TITLE OF THE WORK</b> | Semi-active and active damping for vehicles          |                 |                            |

|                |                        |                   |                |                     |      |
|----------------|------------------------|-------------------|----------------|---------------------|------|
| <b>FACULTY</b> | Mechanical Engineering | <b>DEPARTMENT</b> | Machine Design | <b>SUBMITTED IN</b> | 2014 |
|----------------|------------------------|-------------------|----------------|---------------------|------|

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

|                |    |                  |    |                       |   |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|---|
| <b>TOTALLY</b> | 69 | <b>TEXT PART</b> | 69 | <b>GRAPHICAL PART</b> | 0 |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|---|

|   |   |
|---|---|
| <b>BRIEF DESCRIPTION<br/>TOPIC, GOAL, RESULTS<br/>AND CONTRIBUTIONS</b> | <p>The aim is to map the current state of automotive dampers and actual trends. Attention is paid to the semi-active and active dampers. The practical part of the thesis deals with the simulation of vehicle with different dampers in MSC Adams/Car. Several analyses of rides on track were performed with various obstacles and surface. Characteristics of dampers are taken from literature sources.</p> |
| <b>KEY WORDS</b>  | <p>passive, semi-active and active dampers, dampers characteristic, MSC Adams/Car</p>   |

## **Poděkování**

Rád bych vyjádřil poděkování Ing. Romanovi Čermákovi, Ph.D. za jeho vstřícný přístup a za poskytnutí odborného dohledu nad mou bakalářskou prací. Cení si jeho rad a trpělivosti.

Také bych rád poděkoval Západočeské Univerzitě v Plzni – Fakultě strojní, že mi umožnila studium na této škole a tím uplatnění ve strojírenském oboru.

Zvláštní poděkování patří i celé mé rodině, která mě podporovala po celou dobu studia.



## Obsah

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Úvod.....  | 15 |
| 2     | Tlumič pérování .....                            | 16 |
| 2.1   | Historie .....                                   | 16 |
| 2.2   | Funkce tlumiče .....                             | 16 |
| 2.3   | Komfort jízdy .....                              | 16 |
| 2.4   | Druhy tlumení.....                               | 17 |
| 3     | Pasivní tlumení.....                             | 18 |
| 3.1   | Základní informace.....                          | 18 |
| 3.2   | Výhody a nevýhody.....                           | 18 |
| 3.3   | Pružiny.....                                     | 18 |
| 3.4   | Nejzajímavější druhy pasivních tlumičů .....     | 18 |
| 3.4.1 | Dvouplášťový tlumič.....                         | 19 |
| 3.4.2 | Jednoplášťový tlumič .....                       | 19 |
| 3.4.3 | PSD tlumič .....                                 | 20 |
| 4     | Semiaktivní tlumiče.....                         | 21 |
| 4.1   | Základní informace.....                          | 21 |
| 4.2   | Výhody a nevýhody.....                           | 21 |
| 4.3   | Nejzajímavější druhy semiaktivních tlumičů ..... | 21 |
| 4.3.1 | CDC tlumiče.....                                 | 21 |
| 4.3.2 | Magnetoreologické tlumiče.....                   | 22 |
| 4.3.3 | Semiaktivní třecí tlumiče .....                  | 23 |
| 5     | Aktivní tlumiče.....                             | 24 |
| 5.1   | Základní informace.....                          | 24 |
| 5.2   | Výhody a nevýhody.....                           | 24 |
| 5.3   | Druhy aktivních tlumičů.....                     | 24 |
| 5.4   | Aktivní pomalý systém.....                       | 25 |
| 5.4.1 | Hydropneumatické tlumiče .....                   | 25 |
| 5.5   | Aktivní rychlý systém.....                       | 26 |
| 5.5.1 | Tlumič Hydractiv III .....                       | 26 |
| 5.5.2 | ABC tlumiče.....                                 | 26 |
| 5.5.3 | BOSE tlumiče.....                                | 27 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 6      | Testování tlumičů.....                             | 29 |
| 6.1    | Provozní testování tlumičů .....                   | 29 |
| 6.2    | Laboratorní testování tlumičů.....                 | 29 |
| 6.2.1  | Elektromechanické testery .....                    | 30 |
| 6.2.2  | Hydraulické testery .....                          | 30 |
| 7      | Mechanický popis .....                             | 31 |
| 8      | Dnešní trendy a budoucí vývoj tlumičů .....        | 34 |
| 9      | Laboratorní testování automobilových tlumičů ..... | 36 |
| 9.1    | Popis zařízení.....                                | 36 |
| 9.2    | Měřicí aparatura.....                              | 36 |
| 10     | Simulační software MSC Adams .....                 | 37 |
| 10.1   | Základní informace .....                           | 37 |
| 10.2   | Moduly MSC Adams .....                             | 37 |
| 11     | MSC Adams/Car .....                                | 38 |
| 11.1   | Hierarchie softwaru.....                           | 38 |
| 11.2   | Uživatelské rozhraní .....                         | 39 |
| 11.2.1 | Standart Interface .....                           | 39 |
| 11.2.2 | Template Builder.....                              | 39 |
| 11.3   | Simulační model vozidla.....                       | 40 |
| 11.4   | Simulační prostředí MSC Adams/Car .....            | 40 |
| 11.4.1 | Analyzování nápravy vozidla.....                   | 40 |
| 11.4.2 | Analyzování celého vozidla .....                   | 42 |
| 11.5   | Překážky.....                                      | 46 |
| 11.5.1 | 2D překážky .....                                  | 46 |
| 11.5.2 | 3D překážka.....                                   | 47 |
| 12     | Vlastní simulované experimenty .....               | 48 |
| 12.1   | Simulační kritéria.....                            | 48 |
| 12.1.1 | Bezpečnost .....                                   | 48 |
| 12.1.2 | Jízdní pohodlí .....                               | 49 |
| 12.2   | Použitá silueta automobilu .....                   | 49 |
| 12.3   | Návrh překážek .....                               | 50 |
| 12.3.1 | Zpomalovací prahy.....                             | 50 |
| 12.3.2 | Obrubník.....                                      | 52 |

|        |                                       |    |
|--------|---------------------------------------|----|
| 12.4   | Návrh zkušebních tratí .....          | 53 |
| 12.4.1 | Polní cesta .....                     | 53 |
| 12.4.2 | Závodní trať .....                    | 54 |
| 12.4.3 | ISO Lane Change .....                 | 54 |
| 12.5   | Charakteristiky tlumičů .....         | 54 |
| 12.6   | Simulace jízdy .....                  | 56 |
| 12.6.1 | Simulace jízdy přes překážky .....    | 56 |
| 12.6.2 | Simulace jízdy po polní cestě .....   | 57 |
| 12.6.3 | Simulace jízdy na závodní trati ..... | 57 |
| 12.6.4 | ISO Lane Change .....                 | 58 |
| 12.7   | Hodnocení simulací .....              | 58 |
| 12.7.1 | Zpomalovací práh pro 20 km/h .....    | 59 |
| 12.7.2 | Obrubník .....                        | 60 |
| 12.7.3 | Zpomalovací práh pro 30 km/h .....    | 61 |
| 12.7.4 | Polní cesta .....                     | 62 |
| 12.7.5 | Závodní trať .....                    | 63 |
| 12.7.6 | ISO Lane Change .....                 | 64 |
| 13     | Závěr .....                           | 65 |
| 14     | Seznam použitých zdrojů .....         | 66 |

## Seznam obrázků

|  |    |
|--|----|
| Obrázek 1: Příklad tlumiče pérování (náprava McPherson) .....                          | 17 |
| Obrázek 2: Schéma dvouplášťového tlumiče.....  | 19 |
| Obrázek 3: Schéma jednoplášťového tlumiče.....   | 20 |
| Obrázek 4: Schéma dvouplášťového PSD tlumiče .....                                     | 20 |
| Obrázek 5: Schéma CDC tlumiče .....  | 22 |
| Obrázek 6: Schéma magnetoreologického tlumiče .....                                    | 23 |
| Obrázek 7: Schéma hydropneumatického tlumiče.....                                      | 25 |
| Obrázek 8: Schéma ABC tlumiče .....  | 27 |
| Obrázek 9: BOSE tlumič.....  | 28 |
| Obrázek 10: Dynamický model pasivního tlumiče .....                                    | 31 |
| Obrázek 11: Dynamický model semiaktivního tlumiče .....                                | 32 |
| Obrázek 12: Dynamický model aktivního tlumiče s pružinou.....                          | 33 |
| Obrázek 13: Dynamický model aktivního tlumiče .....                                    | 33 |
| Obrázek 14: Inteligentní tlumič CDC .....  | 34 |
| Obrázek 15: Inteligentní tlumič ze SUNY .....  | 35 |
| Obrázek 16: Porovnání jízdy se systémem MBC a bez něj .....                            | 35 |
| Obrázek 17: Fotografie zkušebního zařízení.....  | 36 |
| Obrázek 18: Simulační model tahače s návěsem .....                                     | 40 |
| Obrázek 19: Roletová nabídka analýzy zavěšení .....                                    | 41 |
| Obrázek 20: Roletová nabídka analýzy celého vozidla .....                              | 42 |
| Obrázek 21: Formulář Event Builderu .....  | 44 |
| Obrázek 22: Formulář Road Builderu .....   | 45 |
| Obrázek 23: Použitý model automobilu.....  | 49 |
| Obrázek 24: Formulář pro překážku Retardér.....  | 51 |
| Obrázek 25: Zleva simulační a skutečný zpomalovací prah .....                          | 51 |
| Obrázek 26: Formulář pro překážku Obrubník .....                                       | 52 |
| Obrázek 27: Model rampy simulující reálný obrubník .....                               | 53 |
| Obrázek 28: Zleva trať Country Road a skutečnost .....                                 | 53 |
| Obrázek 29: Schéma manévru ISO Lane Change .....                                       | 54 |
| Obrázek 30: Vykreslená charakteristika magnetoreologického tlumiče.....                | 55 |
| Obrázek 31: Zleva ideální charakteristika ER tlumiče a MR tlumiče.....                 | 55 |
| Obrázek 32: Formulář 3D Road .....   | 56 |
| Obrázek 33: Zleva schéma trati Smooth Track a její detail s optimálním průjezdem ..... | 57 |

|  |    |
|--|----|
| Obrázek 34: Formulář Smart Driver .....                                      | 58 |
| Obrázek 35: Schéma realizace analýzy .....                                   | 58 |
| Obrázek 36: Přejezd přes retardér ER tlumičem .....                          | 59 |
| Obrázek 37: Přejezd přes retardér MR tlumičem .....                          | 59 |
| Obrázek 38: Přejezd přes obrubník ER tlumičem .....                          | 60 |
| Obrázek 39: Přejezd přes obrubník MR tlumičem .....                          | 60 |
| Obrázek 40: Přejezd přes retardér ER tlumičem v různých režimech .....       | 61 |
| Obrázek 41: Přejezd přes retardér MR tlumičem v různých režimech .....       | 61 |
| Obrázek 42: Porovnání režimů ER tlumiče na nerovné silnici při 35 km/h ..... | 62 |
| Obrázek 43: Porovnání režimů MR tlumiče na nerovné silnici při 35 km/h ..... | 62 |
| Obrázek 44: Projetí závodního okruhu .....                                   | 63 |
| Obrázek 45: Porovnání ER a MR tlumiče v losím testu .....                    | 64 |

| <b>Seznam použitých fyzikálních veličin a jejich jednotek</b> |                        |                                   |                                  |
|---|------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| <b>Název veličiny</b>   | <b>Značka veličiny</b> | <b>Základní jednotka veličiny</b> | <b>Použitá jednotka veličiny</b> |
| Čas   | t                      | s                                 | ms, s                            |
| Frekvence   | f                      | Hz                                | Hz                               |
| Elektrický výkon  | P                      | W                                 | W                                |
| Rychlost  | v                      | m/s                               | km/h                             |
| Objem   | V                      | m <sup>3</sup>                    | l                                |
| Hmotnost  | m                      | kg                                | kg                               |
| Délka   | l                      | m                                 | mm, m, km                        |
| Součinitel smykového tření                                    | f                      | -                                 | -                                |
| Síla  | F                      | N                                 | N                                |
| Úhel  | $\alpha, \beta$        | rad, °, ', ''                     | °                                |
| Síla  | F                      | N                                 | N                                |
| Tíhové zrychlení  | g                      | m/s <sup>2</sup>                  | $g = 9,81 \text{ m/s}^2$         |

## 1 Úvod

Automobil má pro celý svět velký význam. A aby mohl takový automobil bezpečně a pohodlně fungovat, potřebuje jeden důležitý prvek. Tlumič pérování. Ten zajišťuje, aby pneumatiky vozidla byly v neustálém kontaktu s vozovkou. Tím je zaručena bezpečnost vozidla. Aby byl automobil a jízda v něm ještě komfortnější, záleží na dalších vlastnostech daného tlumiče.

S příchodem moderní doby se stává člověk čím dál více pohodlnější. Vymýšlí stále nové technologie a systémy, které za něho budou pracovat nebo mu alespoň částečně usnadní život. Proto se s příchodem nového tisíciletí začalo hovořit o semiaktivních a aktivních tlumičích, které zajišťují větší komfort a bezpečnost automobilu.

V posledních letech se stále častěji řeší otázka ekologie. Používá se energie z obnovitelných zdrojů. Součásti se vyrábějí z recyklovatelných materiálů. Také tlumiče tedy musejí jít s dobou a moderní konstrukce už počítají s těmito novými průmyslovými trendy.

Na počátku práce jsou kapitoly věnované rešerši samotného tlumiče pérování, jeho historii, konstrukci, rozdělení, využití, testování a budoucímu vývoji. Druhá, praktická část, se věnuje popisu laboratorního zkušebního stroje. Jeho budoucího vývoje a použití. Poslední část se zaměřuje na sestavení modelu vozidla a simulačních experimentů ve vybraném softwaru. Následně se na model aplikují ideální charakteristiky tlumičů získané z literárních zdrojů, provedou se simulace a zhodnotí získané výsledky.

## 2 Tlumič pérování

### 2.1 Historie

V časech, kdy bylo vyrobeno první kolo a později i první „vozítka“ pro převážení osob i nákladů se začalo uvažovat o tom, jak dopravit náklad celý a neporušený. Jak přepravit osoby, aniž by se po cestě nezranily. V polovině 19. století se ohromně rozrostla doprava, zejména povozy s koňmi. Ale kvalita tehdejších silnic byla celkově velmi špatná. Proto byly koňské povozy doplněny o listové pružiny, které díky svým vnitřním tlumením zlepšovaly pohodlí cestujících. S příchodem spalovacích motorů už byly tyto pružiny nedostačující. Spalovací motor tedy udal nový směr v konstrukci zavěšení, které se neustále rozvíjí. S rychle se zvyšujícím výkonem spalovacích motorů se rapidně zvýšila i rychlost. S rychlostí ovšem přichází i vyšší nároky na konstrukci i na tlumič vozidla. Zhruba do 80. let minulého století byly tlumiče pouze v pasivním provedení, tedy píst s pružinou a neměnnou charakteristikou tlumení. V 90. letech se začíná uvažovat o aktivním tlumení, zatím pouze v laboratořích a ve speciálních vozech. Začátek 21. století sebou přinesl tzv. magnetoreologické tlumiče (viz. 4.3.2). Od té doby se vývoj semiaktivních a aktivních tlumičů exponenciálně zvýšil a dnes už jsou součástí mnoha vozů. [1]

### 2.2 Funkce tlumiče

Tlumič pérování zabezpečuje stálý a nepřetržitý kontakt kola automobilu s vozovkou. Tlumí rázy a odpružení vozu. Nepřetržitý kontakt s vozovkou způsobuje i kratší brzdovou dráhu automobilu, lepší ovladatelnost a stabilitu. Jak v zatáčkách, tak i v nečekaných situacích (např. při smyku). V určité míře zajišťuje i menší opotřebení pneumatik. V neposlední řadě zvyšuje komfort jízdy, kdy tlumí nerovnosti vozovky a nepřenáší je do konstrukce a do osádek vozidla. Mezi základní funkce tlumiče pérování patří především bezpečnost cestujících, menší opotřebení součástí vozidla a jízdní komfort. [2]

### 2.3 Komfort jízdy

Ideální tlumič nesmí přenášet žádné vibrace vozovky do karosérie vozu. Mělo by být dosaženo maximálního pohodlí pro posádku. Zároveň musí zajistit nepřetržitý kontakt pneumatiky s vozovkou, aby byly zajištěny ideální jízdní vlastnosti vozu. O ideálním tlumiči se mluví jako o tzv. „sky-hook“ systému. Ovšem pojem komfort jízdy je subjektivní záležitost, každý ho vnímá jinak. Slovo „komfort“ je obtížné někam zařadit, neexistuje na něj žádná norma a jeho hodnocení je velmi sporná otázka.



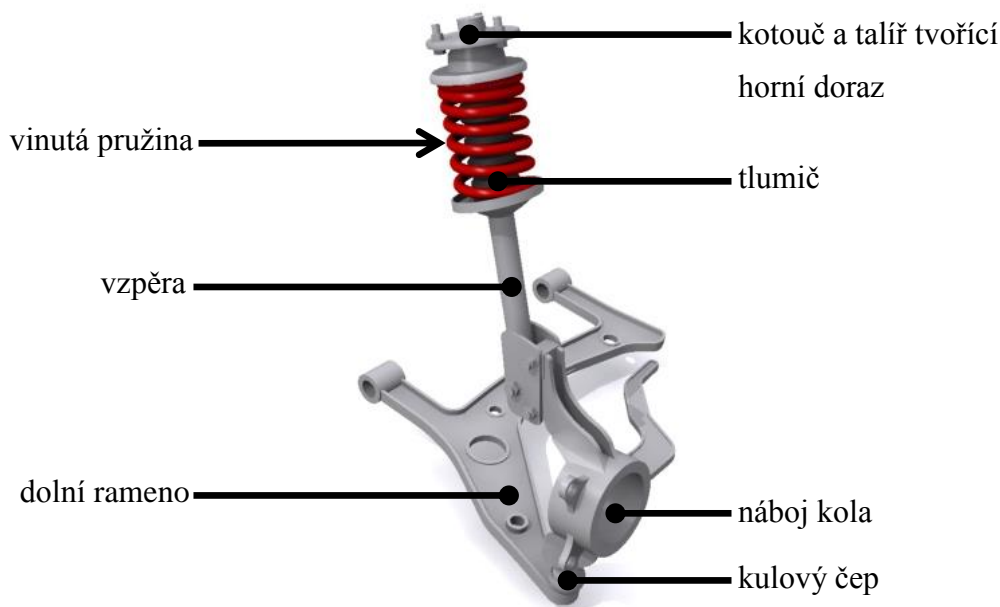
Velký rozdíl v pocitu komfortu, z globálního hlediska, je mezi Západním světem (hlavně USA) a zbytkem světa (Evropa, Asie, Japonsko aj.). Američané jsou zvyklí na houpavé zavěšení, kdy se celé auto chová jako loď na vodě. To je dáno zdejšími silnicemi, které jsou většinou rovné a bez zatáček. Proto se ještě donedávna používaly v amerických autech listové pružiny, které tuto funkci umožňují. Naopak zbytek světa, zvláště Evropa, je zvyklá na dynamičtější styl řízení. Proto je kladen důraz spíše na stabilitu vozidla, a tím i tvrdší pérování. Je to dáno silnicemi, které obsahují mnohem více zatáček a převýšení než v USA.

Existuje velké množství tlumičů, od pasivních až po plně nastavitelné, aby si každý mohl vybrat to, co mu vyhovuje.

## 2.4 Druhy tlumení

Tlumič pérování je technické zařízení složené z mechanických, elektronických a dalších částí, které mají za cíl tlumit rázy vozidla. Tlumič pérování lze z hlediska jeho chování v systému odpružení vozidla rozdělit na 3 základní druhy: [3]

- pasivní
- semiaktivní
- aktivní



Obrázek 1: Příklad tlumiče pérování (náprava McPherson) [4] - upraveno

## 3 Pasivní tlumení

### 3.1 Základní informace

U pasivního tlumení není možné měnit charakteristiku tlumení. Ta je dána mechanickou konstrukcí (výrobou). Pasivní tlumení se skládá pouze z tlumiče (píst a pracovní prostory) a pera. Existují dva základní druhy nastavení pasivního tlumení. Jedná se buď o měkké tlumení, kde je upřednostněný hlavně komfort vozidla. Nebo tvrdé tlumení, kde jsou preferovány především jízdní vlastnosti a s tím spojená vyšší stabilita vozu. Musí být tedy zvolen kompromis mezi pohodlím a jízdními vlastnostmi a to tak, aby se dosáhlo přijatelného chování v celém rozsahu pracovních frekvencí.

Váhu vozu přenášejí pružiny spojeny s tlumičem pérování tlumící vibrace, kmity a výkyvy v pružinách vozu. Jako pracovní médium slouží olej, plyn nebo jejich kombinace. Píst je upevněn ke karoserii vozu a nahromaděná energie z pružiny se v tlumiči nejčastěji přeměňuje na teplo. [2], [3]

### 3.2 Výhody a nevýhody

Velkou výhodou pasivních tlumičů je snadná a jednoduchá konstrukce. S tím je spojená i nízká cena a menší poruchovost tlumičů. Nevýhodou je pak absence nastavení tlumící charakteristiky. Z těchto důvodů se pasivní tlumiče používají u automobilů nižších a středních tříd. Malé možnosti nastavení tlumení s sebou přináší adaptivní tlumič. Ventil reguluje pomocí elektroniky množství protékajícího média, a tím umožní nastavení charakteristiky. [3], [5], [6]

### 3.3 Pružiny

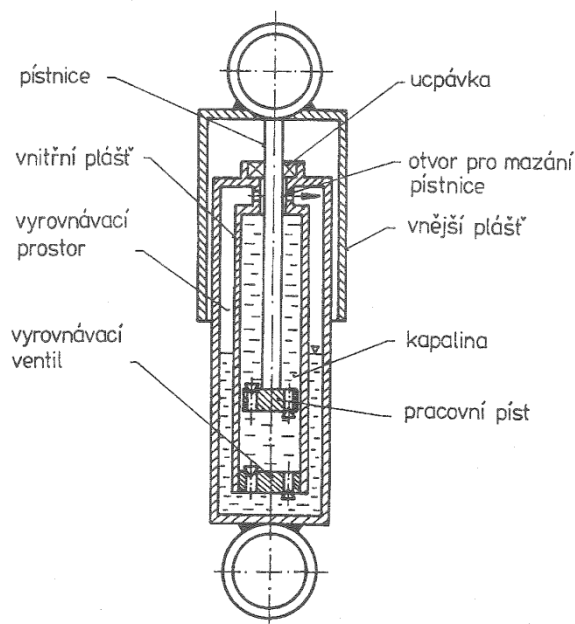
Odpružení vozu je výsledkem pružin nebo pružících elementů. Používají se hlavně tři typy pružin. Jsou to vinuté pružiny, torzní tyče a listové pružiny. Listové pružiny se hojně používaly pro americká auta, zhruba až do roku 1985. Dnes se stále využívají v nákladních automobilech. Torzní tyče se používaly např. u VW Beetle a v některých vozech Porsche. Dnes je jejich použití zcela výjimečné. Vinuté pružiny jsou dnes součástí většiny automobilů. Nejčastější uspořádání je tlumič schovaný uvnitř vinuté pružiny. [5]

### 3.4 Nejzajímavější druhy pasivních tlumičů

Mezi nejzásadnější tlumiče, které se dnes používají, patří tzv. teleskopické tlumiče. Do nich je možno zařadit tlumiče dvouplášťové a jednoplášťové. [6]

### 3.4.1 Dvouplášťový tlumič

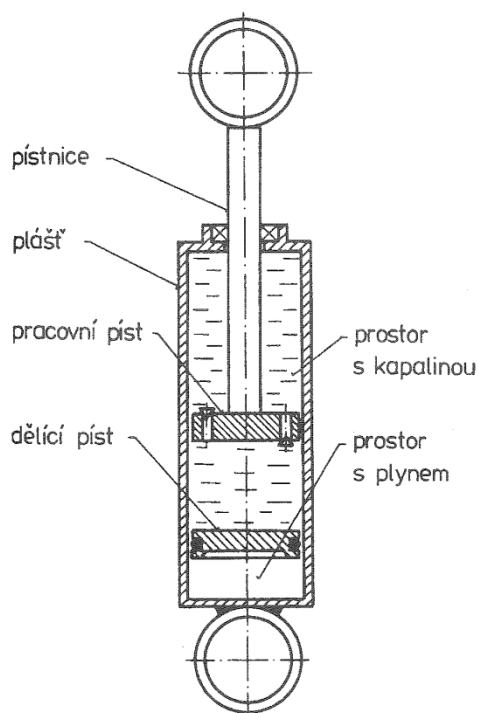
Dvouplášťový tlumič pérování je píst s pracovními prostory, ve kterých se může pohybovat. Princip činnosti spočívá v přepouštění pracovního média v pracovních prostorech při pohybu pístu. Pomocí škrtícího ventilu vzniká hydraulický odpor a tím dochází k tlumení vozidla. Dvouplášťový tlumič ještě obsahuje tzv. vyrovnávací prostor. Ten slouží k vyrovnání rozdílů objemu kapaliny v pracovním prostoru. Na principu dvouplášťového tlumiče vznikla řada variant. Např. PSD (Position Sensitive Damping) tlumič. [6]



Obrázek 2: Schéma dvouplášťového tlumiče [6] str. 176

### 3.4.2 Jednoplášťový tlumič

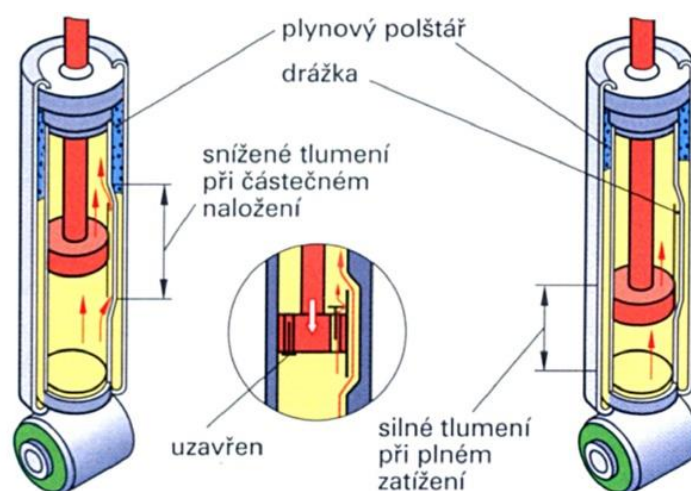
Pracuje na principu kapalinového tření. K tomu dochází škrcením kapaliny při průchodu příslušnými ventily. Při průtoku ventily ale kapalina pění a zhoršuje účinnost tlumiče. Proto se používá plynokapalinový tlumič. Ten navíc obsahuje plynový polštářek, který zachycuje pracovní kapalinu a nedovolí jí pění. Tento druh jednoplášťového tlumiče tak zvyšuje jízdní komfort a aktivní bezpečnost vozu. Dnes je tento tlumič velmi rozšířen ve většině osobních automobilů. Oproti dvouplášťovému tlumiči má několik výhod. Např. má větší průměr pracovního pístu při stejném vnějším průměru, a tak pracuje s nižšími pracovními tlaky. Dále má lepší chlazení pracovního prostoru a není citlivý na změnu objemu kapaliny při chladnutí tlumiče. Na principu jednoplášťového tlumiče vznikla celá řada různých variant. Mezi ty nejvýznamnější patří PSD tlumič (viz. 3.4.3) a DCD (Displacement Conscious Damping) tlumič, který se používá pro MPV (Multi-Purpose Vehicle) automobily, jako je např. Ford Galaxy, VW Sharan aj. Tento tlumič funguje na principu odklonu, kdy pracuje v šikmé poloze pro lepší využití prostoru v podvozku. [6]



Obrázek 3: Schéma jednoplášťového tlumiče [6] str. 179

### 3.4.3 PSD tlumič

Jednou z koncepcí teleskopického odpružení je tlumič PSD, vyvinutý firmou Monroe. Tlumič vychází z poznatku, že během klidné jízdy při malé zátěži je potřeba jen mírná tlumící síla. Ta nám zajišťuje potřebný jízdní komfort. Pokud dojde k většímu pohybu závěsu kola (větší zatížení podvozku), tlumič na ni zareaguje větší tlumící silou. Konstrukce je oproti jednoplášťovému provedení složitější. Vnější část tlumiče (trubka, ve které se pohybuje píst) obsahuje ve své střední části obtok. Díky němu může pracovní kapalina obtéci ventily v pístu. Tímto způsobem se dosahuje měkkého odpružení. Střední část PSD tlumiče se tak označuje za oblast „komfortu“. [6]



Obrázek 4: Schéma dvouplášťového PSD tlumiče [7]

## 4 Semiaktivní tlumiče

### 4.1 Základní informace

Semiaktivní nebo také poloaktivní tlumení posouvá pasivní systém ještě dále. Semiaktivní tlumení se skládá z tlumiče řízeného signálem, který umožňuje plynule měnit charakter tlumení. Tlumič se tak přizpůsobuje aktuální situaci. Volba řídicího systému je tedy velmi důležitá. Systém získává informace z jízdy (nerovnosti vozovky, změna jízdního směru, chování pneumatik, atd.) a upravuje konstantu tlumení pro zaručení vybraných vlastností. Konstrukce samotného tlumiče pak bývá různá, často velmi podobná pasivním systémům. Může se jednat např. o kapalinový tlumič s magnetickou kapalinou (magnetoreologické), tlumič řízený škrtícím ventilem (CDC) nebo tlumič fungující na principu suchého tření (FD). [3], [8]

### 4.2 Výhody a nevýhody

Semiaktivní systém je založen na principu pasivního tlumení. To znamená, že umožňuje pohyb pouze tlumit a vyrovnávat. Jeho schopnosti nastavení charakteru tlumení jsou větší než v případě adaptivního tlumiče, ale stále jsou limitovány. Na rozdíl od aktivního tlumení zde není možné generovat sílu libovolného směru (disipativní systém). Někteřím uživatelům také může vadit i větší časová prodleva, která se pohybuje většinou okolo 10 ms. Výhody převzal semiaktivní systém z pasivního. Oproti aktivnímu tlumení je i konstrukčně méně náročný, spolehlivější, má nižší energetickou náročnost a s tím vším souvisí i nižší cena tlumiče. [3], [8]

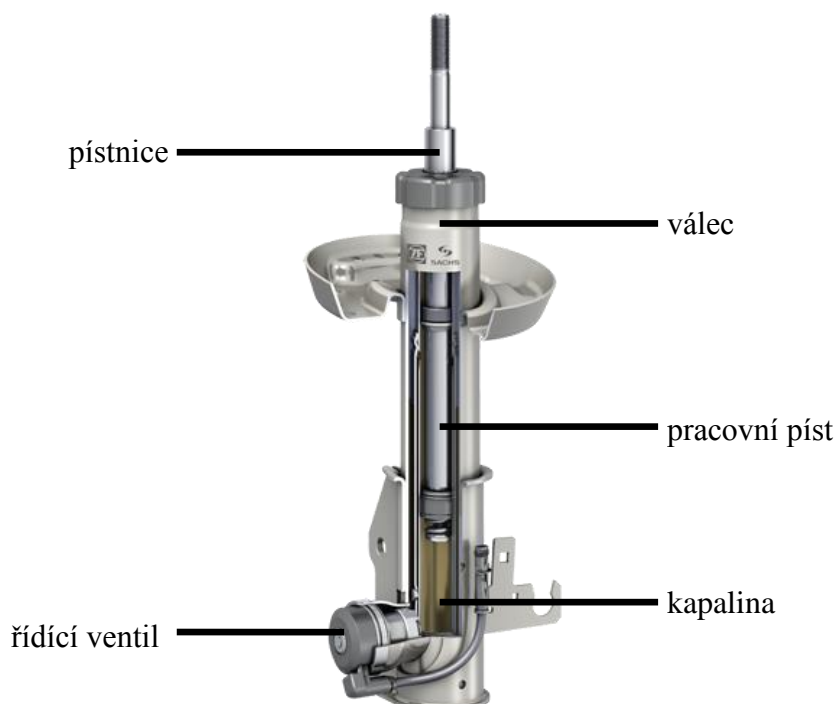
### 4.3 Nejzajímavější druhy semiaktivních tlumičů

#### 4.3.1 CDC tlumiče

Nejpoužívanějším semiaktivním tlumičem je CDC (Continuous Damping Control). Konstrukce vychází z pasivního tlumiče, konkrétně z dvouplášťového. Oproti tlumiči dvouplášťovému obsahuje řídicí ventil (elektromagneticky nastavitelný člen), který reguluje vstup kapalinou mezi pracovními komorami pístu. Průtokové kanálky jsou otevírány nebo uzavírány a tím se průtok kapalinou reguluje. Dá se tak plynule dosáhnout měkké i tvrdé charakteristiky tlumení.

Řídicí jednotka má složitý systém okruhu a senzorů. Výhodou je propojení elektronické regulace s dalšími systémy, jako např. ABS (Anti-lock Brake System), ESP (Electronic Stability Program) apod. CDC tlumiče převzaly výhody pasivních tlumičů. Jsou tedy energeticky nenáročné, konstrukčně jednoduché a spolehlivé. Jsou i relativně levné. V případě výpadku elektronického signálu ztratí systém svojí semiaktivní funkci a řídicí ventil se přesune do tvrdé polohy.

CDC tlumiče se používají především v motorsportu. Od roku 2005 se dostaly i do běžných aut. Konkrétně je začala využívat automobilka Opel pro svůj model Astra. [9], [10]



Obrázek 5: Schéma CDC tlumiče [11] - upraveno

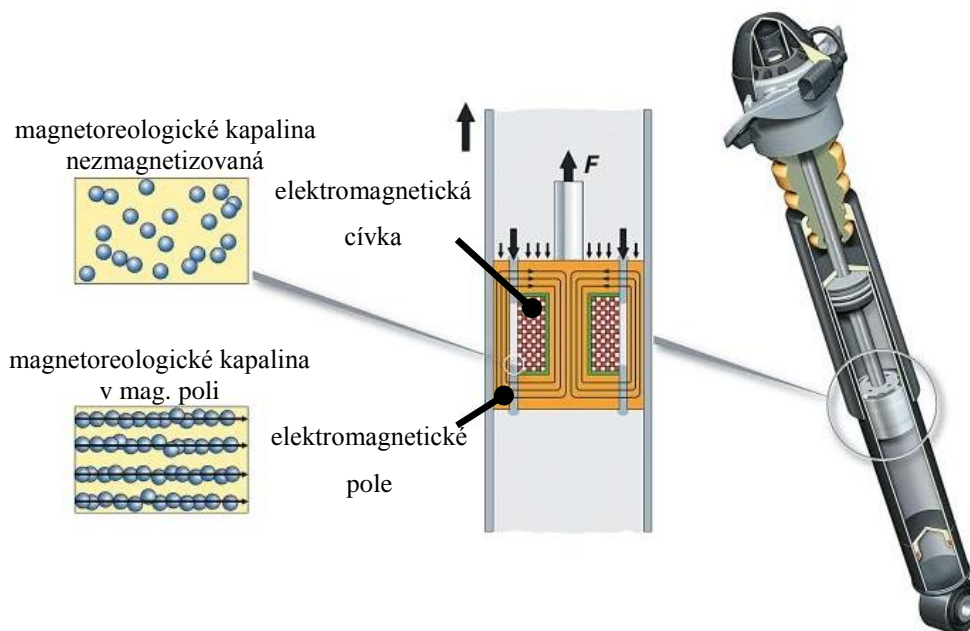
#### 4.3.2 Magnetoreologické tlumiče

Svůj nástup zaznamenaly magnetoreologické tlumiče (dále jen MR tlumič) v novém tisíciletí. V roce 2006 představila automobilka Audi model TT, který přinesl nový způsob tlumení u osobních vozů. MR tlumiče se dále rozšiřují a postupně nahrazují běžné tlumiče.

MR tlumič vychází z konstrukce pasivního tlumiče (šasi, píst a pístní tyč), který je naplněn magnetickou kapalinou. Magnetická kapalina se skládá z velmi jemných feromagnetických částic a tzv. nosné kapaliny (např. syntetický nebo minerální olej, voda atd.). Píst tlumiče je opatřen průtokovými kanály, ve kterých se pohybuje magnetická kapalina. Dále tlumič obsahuje budicí cívku, senzory a řídicí jednotku. Cívka je navinutá na průtokových kanálech a vytváří elektromagnetické pole v místě pístu tlumiče. Elektrický proud je pak na cívku přiváděn přes pístní tyč a je řízen signálem z řídicí jednotky. Nepůsobí-li na magnetickou kapalinu magnetické pole, jsou jemné částice feromagnetu volně rozptýleny v nosné kapalině. Kapalina tak nevyzařuje magnetické pole. Začne-li působit magnetické pole, tak se jemné částičky feromagnetu začnou přeskupovat a to tak, aby byly napříč tlumiče. Píst tlumiče se snaží vytlačit kapalinu do jedné z pracovních komor přes průtokové kanály a díky příčné poloze feromagnetickým částičkám vůči tlumiči umožňují klást větší odpor.

Výhodou MR tlumičů je jednodušší konstrukce převzatá z pasivních tlumičů. Díky tomu umožňují tyto tlumiče rychlé nastavení tlumícího účinku a kratší časovou odezvu pohybující se okolo 5 ms. Tlumič má také širokou možnost nastavení, protože velikost elektrického proudu do cívky není nijak omezena. Mezi nevýhody patří vyšší pořizovací cena spojená s potřebou řídicí jednotky a senzorů. Problém je i s feromagnetickými kapalinami, kde dochází vlivem přitažlivých sil (magnetické a Van der Waalsovy síly) k jejich shlukování. Řeší se to tím, že jsou jemné částice pokryty ochranným obalem, nejčastěji z polymeru.

Mimo automobilu Audi TT je možné se setkat s MR tlumiči např. ve Ferrari 458 Italia, F12 Berlinetta, v Chevroletu Corvette, Camaro ZL1 aj. [12] MR tlumiče mají dobré vyhlídky do budoucnosti, hlavně v automobilovém průmyslu. Díky jednoduššímu systému a rychlému nastavení tlumícího účinku. Hlavní problém zůstává vyšší cena, která omezuje rozšíření těchto tlumičů i do středních a nižších tříd automobilů. [5], [13]



Obrázek 6: Schéma magnetoreologického tlumiče [14] - upraveno

### 4.3.3 Semiaktivní třecí tlumiče

Tlumič tohoto typu je ve světě semiaktivních tlumičů velmi netradiční (na rozdíl od magnetoreologických a CDC tlumičů). Třecí tlumič pracuje na základě mechanického tření mezi dvěma pohybujícími částmi. Mají ovšem celou řadu nevýhod. Zásadní nevýhoda je v rychlém opotřebení, kterému snadno podléhají vlivem třecích účinků. Dále je to konstantní tlumící síla, která není závislá na charakteru pohybu. Aby bylo možné realizovat tento tlumič jako semiaktivní, musí být třecí síla kontrolována jiným způsobem. Používá se elektrohydraulický pohon, který problém regulace síly promítá do regulace tlaku. Ovšem nastává další problém. Je-li několik nezávislých tlaků, které mají být regulovány, musí existovat stejný počet čerpadel a ventilů na jejich regulaci. Tato komplikace se v současné době řeší. [8]

## 5 Aktivní tlumiče

### 5.1 Základní informace

Aktivní tlumicí systémy jsou velmi složité a sofistikované. Jsou to počítačově řízené mechatronické systémy místo klasických tlumičů a pružin. Aktivní tlumič řídí každé kolo samostatně a udržuje ho v neustálém kontaktu s vozovkou. Řídicí systém tlumiče vyhodnocuje každou nerovnost a ovládá kolo automobilu. Používá k tomu složité algoritmy, neustále zpracovává data a rozhoduje o pozici každého kola. Některé aktivní systémy mohou být opatřeny pružinami, které slouží jako pojistky při poruše systému nebo napomáhají aktivnímu systému zvládat velké tlumicí síly (např. automobil Infiniti Q45 z roku 1990) [15]. Čistě aktivní systémy pak využívají mechatronicky řízená vysokotlaká čerpadla nebo kompresory. Aktivní tlumič je poměrně nová technologie, která se neustále rozvíjí. [1], [3], [16]

### 5.2 Výhody a nevýhody

Hlavní výhodou aktivních tlumičů je, že umí vyvodit sílu libovolným směrem, proto zde nejsou žádné limity v charakteristice. Vozidlo se tak umí v mžiku vypořádat s nerovnostmi vozovky. Poskytuje jak hladkou jízdu při měkkém odpružení, tak i dostatečně bezpečnou s vynikající manipulací při tvrdém odpružení. Mezi další výhodou se může zařadit možnost nastavení světlé výšky vozidla. Zvýšení světlé výšky využívají především terénní automobily při překonávání nerovného terénu. Naopak snížením světlé výšky se zmenší aerodynamický odpor a tím i spotřeba vozidla.

Nevýhodou je vyšší energetická náročnost. Kvůli značnému množství energie se používá do velmi výkonných automobilů, u kterých nevedí, že se část vyrobené energie spotřebuje v tlumičích. Z toho vyplývá vysoká cena jak tlumičů, tak i samotných automobilů. Díky své složitosti a přítomnosti velkého množství elektrických přístrojů je i náchylnější k vyšší poruchovosti. [1], [3], [16]

### 5.3 Druhy aktivních tlumičů

Z hlediska frekvence kmitání se rozděluje aktivní tlumič na 2 základní druhy: [1]

- Aktivní pomalý systém
- Aktivní rychlý systém



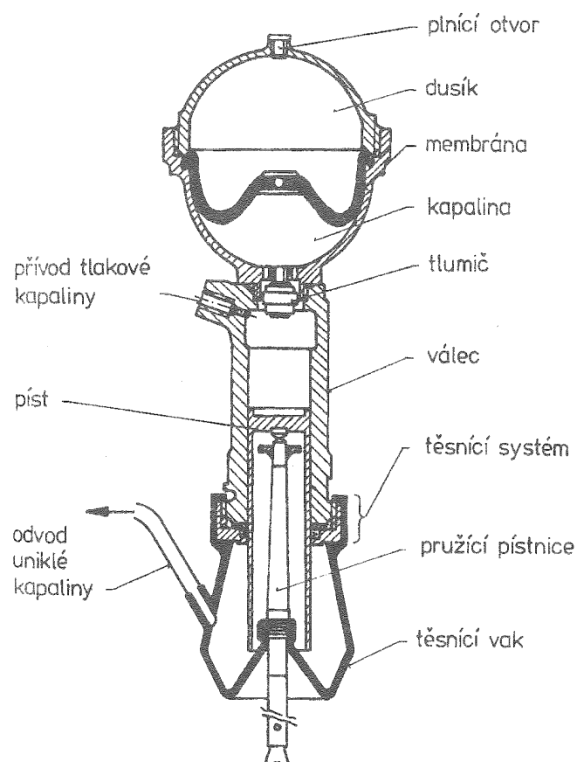
## 5.4 Aktivní pomalý systém

Jedná se o systém, který umožňuje měnit charakteristiku tlumení pomocí čerpadel, kompresoru, atd. Ty jsou řízeny za pomoci signálu z řídicího systému. Řídicí systém získává informace ze snímačů polohy kola vůči vozovce. Pracovní oblast aktivního pomalého systému je do 5 Hz, což je oblast, která zahrnuje pouze kmity karosérie. Mezi nejznámější aktivní pomalý systém patří hydropneumatické odpružení, které poprvé představila automobilka Citroën. [1], [5]

### 5.4.1 Hydropneumatické tlumiče

Od počátku 50. let se, co se týče odpružení, automobilka Citroën vydala jiným směrem a odtrhla se od zbytku automobilového průmyslu.

Jádrem hydropneumatického tlumiče je hydropneumatická pružina, která pracuje s pružícím plynem, nejčastěji dusíkem. Pružina nepotřebuje tlumič, protože účinné tlumení je zde zajištěno pružícím plynem. Základní částí je válec, ve kterém se přímočaře pohybuje píst. Horní část válce je spojena s kulovou nádobou. V té je pryžová membrána, která dělí nádobu na dvě polokoule. V horní polokouli se nachází pružící plyn a ve spodní pak hydraulická kapalina. Ve spodní polokouli, na vstupu do válce, je pak ještě umístěn dvojčinný ventil, který zde plní funkci tlumiče. Při pohybu pístu škrtí proudící kapalinu a tím zajišťuje tlumící účinek. Regulace světlé výšky automobilu se provádí přečerpáváním pracovní kapaliny mezi zásobníkem a válcem. Celý systém je poháněn velkým hydraulickým čerpadlem. Tento tlumící systém se používal např. v automobilu Citroën BX. [5], [6]



Obrázek 7: Schéma hydropneumatického tlumiče [6] str. 167

## 5.5 Aktivní rychlý systém

Jedná se o systém fungující na podobném principu jako pomalé řídicí soustavy. S tím rozdílem, že obsahuje výkonnější součástky, které umožňují mnohem rychlejší změnu tlumicího charakteru. Pracovní oblast se pohybuje až do 25 Hz. Aktivní rychlé systémy se dnes velmi rozšiřují a jsou v nabídkách předních výrobců automobilů. Následující druhy rychlých aktivních systémů patří mezi nejpoužívanější. [1], [5]

### 5.5.1 Tlumič Hydractiv III

Automobilka Citroën zavedla pro hydropneumatické tlumiče obchodní název Hydractiv. Hydractiv III je poslední generace těchto tlumičů. Tlumič umožňuje nejen změnu světlé výšky, ale nově i měnit tvrdost odpružení. Během jízdy tak řídicí jednotka nastavuje tlumič do potřebné polohy. Hydractiv III funguje na stejném principu jako hydropneumatické tlumiče. Problémové součásti jsou zde nahrazeny elektronickými jednotkami. Nově přibýly elektronické snímače povrchu vozovky. Tlumič Hydractiv III je tedy spojení hydropneumatického odpružení a řídicí jednotky BHI (Built-in Hydroelectronic Interface). Ta se skládá s hydroelektrického bloku, který je každých 10 ms informován snímači pohybu o stavu vozovky. Podle potřeby také nastavuje světlou výšku automobilu. Ovládací tlačítko umožňuje řidiči zvolit jeden z několika režimů odpružení. Tyto režimy umožňují nastavit světlou výšku vozu. Ale režimy fungují jen do určité rychlosti, jsou spíše pro lokální překážky. Při vyšších rychlostech se používá pouze jeden jízdní režim. Novinkou je systém Hydractiv III Plus používaný zejména ve vozech Citroën C5 a C6. Jedná se o zdokonalený systém obsahující 5 snímačů a 2 přídatné tlumičové ventily, které umožňují ještě širší možnost nastavení odpružení automobilu.

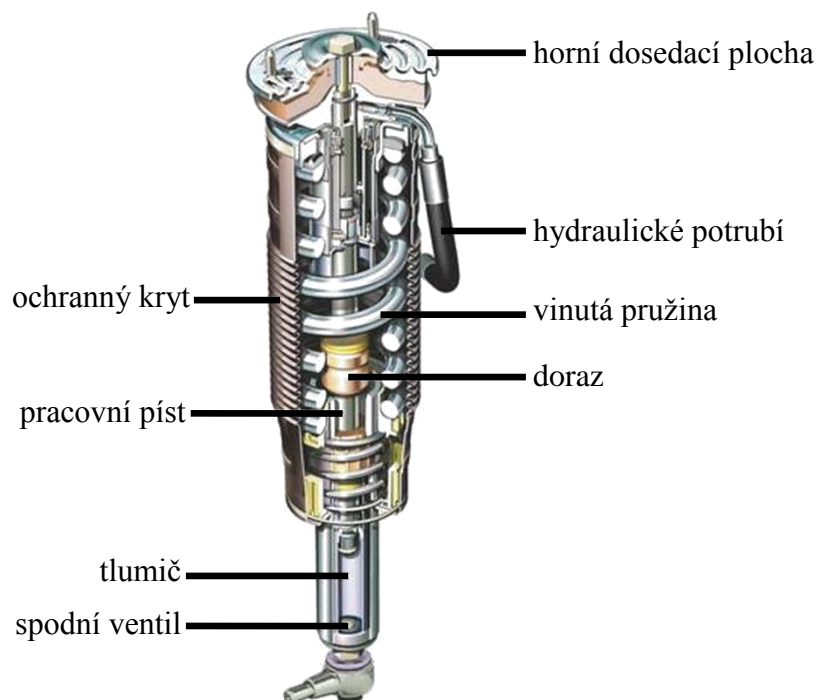
Nevýhodou těchto systémů je menší účinnost, co se týče změny charakteru tlumení a nastavení jen jednoho režimu odpružení při vyšších rychlostech. [5]

### 5.5.2 ABC tlumiče

Tlumicí systém ABC (Active Body Control) vyvinula automobilka Mercedes-Benz (dále MB). Vývoj trval přes 20 let a poprvé byl použit v automobilu MB Coupe CL v roce 1999.

Hlavní částí ABC tlumiče je elektronicky řízený hydraulický válec, ve kterém je snímač monitorující tlak hydraulické kapaliny. Tok je regulován dvěma ventily, které odebírají nebo přivádějí kapalinu do pracovního válce. To umožňuje tlumiči generovat sílu libovolným směrem a vyrovnává nepříznivé pohyby karoserie. O vlastní tlumení se stará náprava Mc-Pearson, která obsahuje vinutou pružinu a tlumič. Hydraulický válec tlumiče ABC pouze reguluje kmity karoserie do 6 Hz (např. frekvence při přejezdu nerovností, při brždění atd.) a napomáhá tlumiči v hladší jízdě. Systém ABC ještě obsahuje velké množství senzorů a výkonných počítačů. Ty neustále snímají vozovku a rychle přizpůsobují tlumič aktuální jízdní situaci. Regulace se provádí každých 10 ms.

Velkou výhodou ABC tlumiče je značný jízdní komfort spolu s bezpečnou jízdou. Oproti pasivnímu tlumiči snižuje pohyby karosérie až o 68%. Dále umožňuje manuální nastavení výšky vozu a také nastavení více jízdních režimů při jakékoliv rychlosti vozu. Mezi nevýhody patří složitější systém s velkým množstvím součástí a také menší spolehlivost, kdy při sebemenší poruše ztrácí své vlastnosti. [17]



Obrázek 8: Schéma ABC tlumiče [18] – upraveno

### 5.5.3 BOSE tlumiče

Firma BOSE přišla v roce 2004 s revoluční novinkou týkající se aktivního tlumení. Výzkum a vývoj nového systému tlumení trval bezmála 24 let.

Firma BOSE se vydala jinou cestou. Místo klasických aktivních hydraulických tlumičů zavedli lineární elektromotory. Velkou nevýhodou hydraulických aktivních tlumičů je jejich pomalá reakce změny charakteristiky kmitů, která se pohybuje okolo 10 ms. Oproti tomu lineární elektromotor dokáže změnit charakteristiku tlumení v průběhu 1 ms. Tato technologie využívá podobného principu jako technologie pro potlačení šumu v reproduktorech a sluchátkách. Nerovnosti na silnici jsou snímány a zpracovávány podobně jako zvukové vlny. Lineární elektromotory jsou pak obsluhovány velmi rychlým signálem z řídicí jednotky. Upevnění tohoto tlumiče je velice jednoduché. Celý systém vychází z nápravy McPherson. Firma BOSE tvrdí, že jejich tlumiče se mohou používat jako příplatková výbava ke klasickým tlumičům.

Další novinkou aktivního tlumiče BOSE je schopnost rekuperovat energii. To se děje pomocí elektromotoru, což je obrácený generátor. Ten při každém propružení kola vygeneruje energii, která se uloží do kondenzátorů pro další použití. Uložená energie se použije pro vyvolání dalšího vhodného tlumícího účinku.

První testování v roce 2004 proběhlo ve spolupráci s automobilkou Lexus. V roce 2009 byl systém připraven pro běžné použití. Ačkoliv se jedná o velmi chytrý systém, firma BOSE do dnešní doby nenašla výrobce automobilů, se kterým by spolupracovala. BOSE už do něj investovala přes 100 milionů dolarů a říká, že systém je velmi drahý a těžký. Na podobném principu už pracují tlumiče u automobilů Cadillac nebo Corvette. [19], [20]



Obrázek 9: BOSE tlumič [21]

## 6 Testování tlumičů

Nedílnou součástí každého dnešního automobilového výrobku je podrobit ho určité analýze, testu. Testy se provádí hlavně kvůli správné funkci výrobku. Ani tlumič pérování není ušetřen různým testům. Technický stav tlumičů je možno rozdělit na dva základní druhy:

- Provozní testování
- Laboratorní testování

### 6.1 Provozní testování tlumičů

Během běžného používání automobilu dochází k opotřebenosti tlumičů pérování. Vadné tlumiče pérování způsobují přehnané náklony karosérie, mají negativní vliv na brzdovou dráhu automobilu a také dochází k horší ovladatelnosti vozidla. Je tedy nutné tlumiče kontrolovat. Kontrolu a případný servis tlumičů zajišťují specializované firmy. Samotné testování probíhá na speciálních přístrojích. Tlumič se nedemontuje, zůstává připevněn k vozidlu. Nejčastěji se kontrolují následující body: [22], [23]

- Únik pracovní kapaliny z tlumiče
- Ochranné manžety
- Samotné uložení tlumiče
- Pružiny
- Pneumatiky
- Tuhost tlumiče

### 6.2 Laboratorní testování tlumičů

Aby byl tlumič pérování plně prověřen, musí být testován jako samostatný prvek. Tedy musí být demontován z vozidla. Laboratorní testování tlumičů se používá hlavně pro vývoj a úpravy tlumičů. Neméně důležitým záměrem použití laboratorního testování je vytvoření etalonu pro diagnostické přístroje k provoznímu testování tlumičů.

Principem zkoušky je určení velikosti tlumící síly v závislosti na rychlostech roztahování a stlačování tlumiče. Nejčastější zkušební zařízení pro testování tlumičů jsou:

- Elektromechanické testery
- Hydraulické testery

### **6.2.1 Elektromechanické testery**

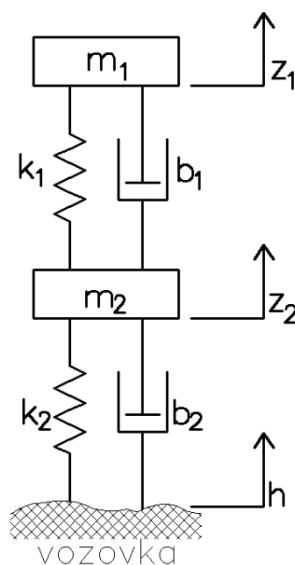
Měření probíhá za ustálených podmínek. Tester se skládá ze dvou úchytů, k nimž je připojen tlumič, horní pak ještě obsahuje měřící zařízení. Píst tlumiče se pohybuje konstantní rychlostí po omezenou dobu, než dosáhne své úvratě. Vyhodnocuje se síla v závislosti na rychlosti posuvů. V modernějších zařízeních kromě síly také teplota oleje, zdvih atd. [1], [24]

### **6.2.2 Hydraulické testery**

Tam, kde je zapotřebí flexibilního ovládání a technické vyspělosti, se používají hydraulická testovací zařízení. V těchto systémech lze plynule ovládat zatížení tlumící jednotky. Čtyři takovéto systémy se dají použít jako kompletní náhrada automobilu a poskytnou tak odpovídající frekvence povrchu vozovky. [1]

## 7 Mechanický popis

Celá tato kapitola bude vycházet z knihy Dynamika motorových vozidel od F. Vlka [25]. Jako základní model pro mechanický popis tlumení vozidla je použita kmitavá soustava s dvěma stupni volnosti. Model simuluje chování jedné nápravy složené z kol, zavěšení a hmotnosti karoserie připadající na jednu nápravu. Pohyby odpružených částí nad přední a zadní nápravou jsou zanedbány a považovány za nezávislé.



Obrázek 10: Dynamický model pasivního tlumiče, převzato z [25] str. 201 - upraveno

Popis veličin z obr. 10:

$m_1$  ... hmotnost odpružené části vozidla (připadající na jednu nápravu)

$m_2$  ... hmotnost neodpružené části vozidla (kola a části s nimi bezprostředně spojené)

$k_1$  ... tuhost pružin nápravy

$k_2$  ... tuhost pneumatik

$b_1$  ... konstanta obou tlumičů

$b_2$  ... konstanta tlumení pneumatik

Mezi tělesy  $m_1$  a  $m_2$  pracuje tlumící síla  $b_1(\dot{z}_1 - \dot{z}_2)$  a pružící síla  $k_1(z_1 - z_2)$ . Celková síla, která je přenášena pneumatikou, se skládá z tlumící síly  $b_2(\dot{z}_2 - \dot{h})$  a pružící síly  $k_2(h - z_2)$ .

Z dynamického modelu lze sestavit následující pohybové rovnice:

$$-m_1\ddot{z}_1 + b_1(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + k_1(z_1 - z_2) = 0$$

$$-m_2\ddot{z}_2 - b_1(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) - k_1(z_1 - z_2) - b_2(\dot{z}_2 - \dot{h}) - k_2(h - z_2) = 0$$

Tlumicí efekt pneumatik je mizivý, tudíž může být síla  $b_2(\dot{z}_2 - \dot{h})$  zanedbána. Na dalších dynamických modelech se již nezobrazuje. Celá soustava je tlumena pouze tlumicí silou  $b_1(\dot{z}_1 - \dot{z}_2)$ . Součtem sil přenášných na vozovku nám vznikne dynamická síla  $F_d$ . Tato dynamická síla udává vztah mezi pneumatikou a vozovkou. Je možno jí vyjádřit následujícími vztahy:

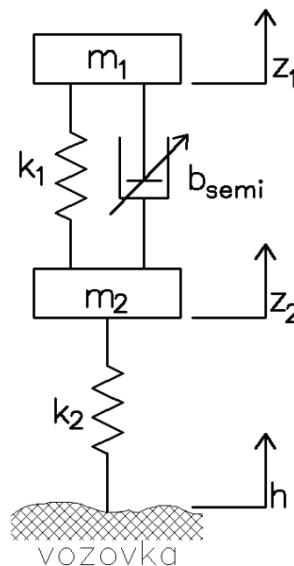
$$F_d = k_2(h - z_2) + b_2(\dot{h} - \dot{z}_2)$$

nebo

$$F_d = m_1\ddot{z}_1 + m_2\ddot{z}_2$$

Vstupem soustavy je profil vozovky  $h$ , výstupem pak poloha karosérie  $z_2$  a kola  $z_1$ .

Pro větší představu o chování všech druhů tlumičů jsou zde nastíněny i dynamické modely semiaktivního a aktivního tlumiče:

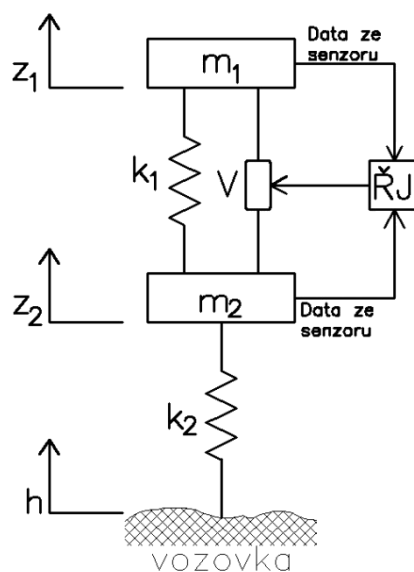


Obrázek 11: Dynamický model semiaktivního tlumiče, převzato z [16] str. 352 - upraveno

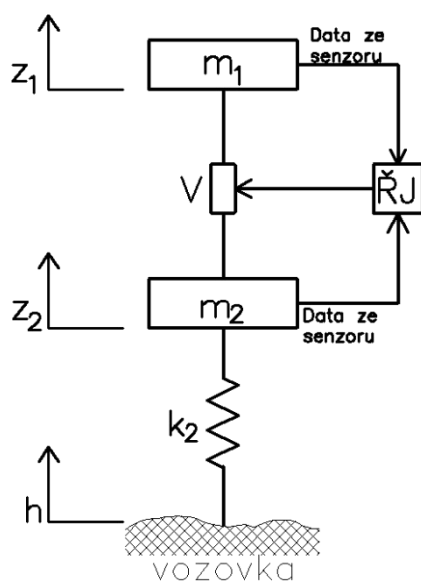
kde:

$b_{semi}$  ... tlumič s proměnnou charakteristikou tlumení





Obrázek 12: Dynamický model aktivního tlumiče s pružinou, převzato z [16] str. 351 - upraveno



Obrázek 13: Dynamický model aktivního tlumiče, převzato z [16] str. 351 - upraveno

kde:

$V$  ... aktuátor s vysokou šířkou pásma

$\check{R}J$  ... řídicí jednotka tlumiče

## 8 Dnešní trendy a budoucí vývoj tlumičů

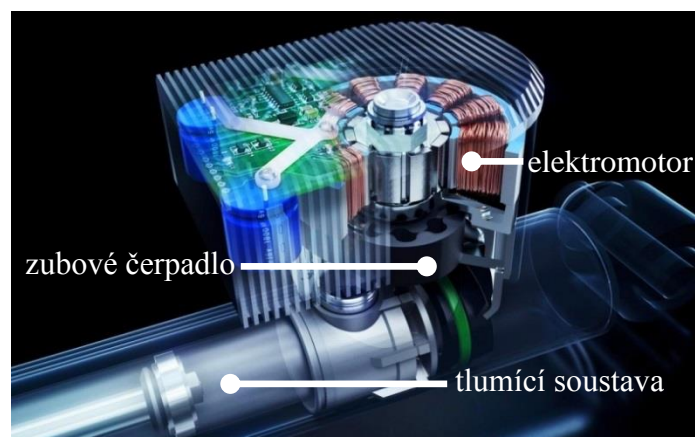
V dnešní době se v automobilech jak semiaktivní, tak i aktivní tlumiče velmi rozrůstají. To je dáno jednak zvýšenou bezpečností těchto systémů, oproti pasivním tlumičům, a hlavně vyšším komfortem.

Semiaktivní tlumiče, zejména magnetoreologické, se dnes používají spíše u rychlých automobilů, jako je Ferrari. [12] To je dáno jejich velmi rychlou změnou charakteristiky tlumení, která se pohybuje okolo 10 ms (MR tlumiče 5 ms). Semiaktivní systémy CDC se pak pomalu dostávají i do nižších a středních tříd automobilů. Příkladem je automobilka Ford, Opel nebo Volkswagen. [15]

Aktivní tlumiče se používají zvláště u automobilů, kde je kladen velký důraz na komfort. Jsou to např. automobily Mercedes-Benz, Citroën nebo Jaguar. [15] Aktivní tlumiče umožňují během jízdy (systém Hydractiv pouze do určité rychlosti) měnit režimy odpružení. I sám řidič si může zvolit režim odpružení, který mu nejvíce vyhovuje. Reakce na změnu charakteristiky tlumení se u aktivních tlumičů pohybuje okolo 10 ms.

Budoucí vývoj tlumičů bude směřovat k vylepšení již stávajících semiaktivních a aktivních systémů. Použijí se nově vyvinuté materiály. Změní se některé komponenty v konstrukci, aby se co nejvíce snížila prodleva ve změně charakteristiky tlumení. Stále více prodejců automobilů je bude zařazovat do svého sortimentu. Buď jako příplatkovou výbavu, nebo jako výbavu standardní.

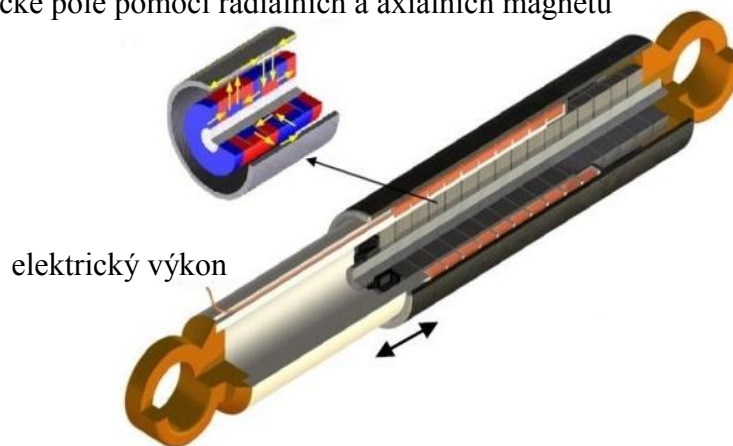
Stále více se ve světě mluví o ekologii a o plýtvání zdrojů energie. Firma ZF Friedrichshafen, která produkuje CDC systém, přišla se zajímavou myšlenkou. Ta spočívá ve výrobě aktivního tlumiče, který bude umět vyrábět i elektrickou energii. Tlumič by měl být zároveň jednoduchý, účinný s minimálními náklady na spotřebu a zároveň levný, aby ho bylo možné využít v klasickém provozu. Celý systém odpružení má být tvořen tlumičem a jednotkou obsahující elektromotor, řídicí elektroniku a zubové čerpadlo. Tato jednotka se zvnějšku připojí na tlumič a bude řídit průtok pracovní kapaliny tlumičem. Pokud ale nebudou potřeba aktivní zásahy do tlumení, systém bude vyrábět elektrický proud. Tok pracovní látky, který je vyvolán pohyby pístu, bude pohánět zubové čerpadlo a to elektromotor, který v tu chvíli bude pracovat jako generátor. Vyprodukovaná elektrická energie tak poslouží k dobíjení baterie, napájení přístrojové desky nebo pro vyvolání dalšího tlumícího účinku. [26]



Obrázek 14: Inteligentní tlumič CDC [27] – upraveno

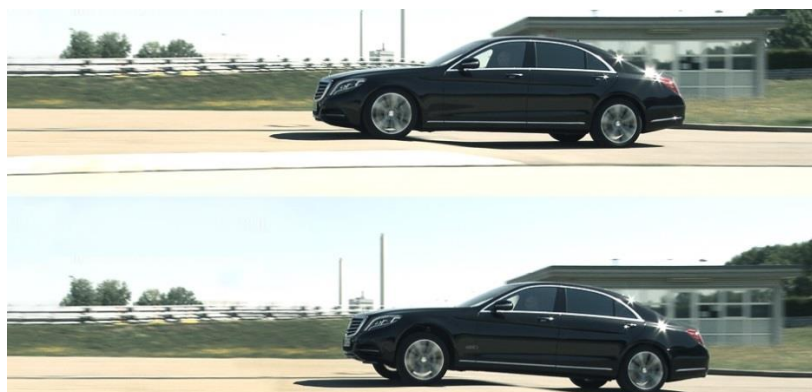
Další koncept tzv. „inteligentních tlumičů“ vznikl ve Státní univerzitě v New Yorku (SUNY). Tlumič je tvořen magnetickým válcem, na kterém je nasazena cívka. Při tlumení automobilu se magnetický válec uvnitř cívky pohybuje, a ta pak vyrábí elektrický proud. Tento systém je konstruován hlavně pro elektrické a hybridní automobily. Použit se dá ale i pro klasické spalovací automobily, a to jak pro osobní, tak i nákladní. Dokonce se uvažuje i o vlacích. Podle studií dokáže tento tlumič při instalaci na středně velký automobil vyvodit elektrický výkon pohybující se mezi 100-400 W a to při rychlosti 100 km/h. Čím horší cesty, tím se účinnost tlumiče zvyšuje. Vyrobená energie je pak použita na nabíjení akumulátorů nebo ke snížení spotřeby paliva. [28]

Magnetické pole pomocí radiálních a axiálních magnetů



Obrázek 15: Inteligentní tlumič ze SUNY [29] - upraveno

V nedávné době přišel Mercedes-Benz se systémem Magic Body Control (MBC). Tento systém je schopen nastavit tlumení v reálném čase. Slouží k tomu mimo jiné dvě kamery, umístěné za vnitřním zpětným zrcátkem. Kamery snímají povrch vozovky před automobilem. Nasnímaná data jsou posílána do počítače, který je vyhodnotí a v předstihu připraví tlumiče na nerovnosti vozovky. Kromě dvou kamer disponuje systém ještě celou řadou senzorů, které hodnotí aktuální zátěž vozidla a reguluje jak tuhost, tak i světlou výšku vozidla. Systém navíc umožňuje odstraňovat působení bočního větru, tím udržuje automobil v jízdním pruhu. Spolu se systémem ABC tvoří kombinaci zaručující téměř hladkou a komfortní jízdu. MBC se objevil jako novinka v třídě S, která je známá jako nositel určitého pokroku v automobilovém průmyslu. Podobný systém bude také k vidění u připravovaného BMW řady 7. [30], [31]



Obrázek 16: Porovnání jízdy se systémem MBC a bez něj [32]

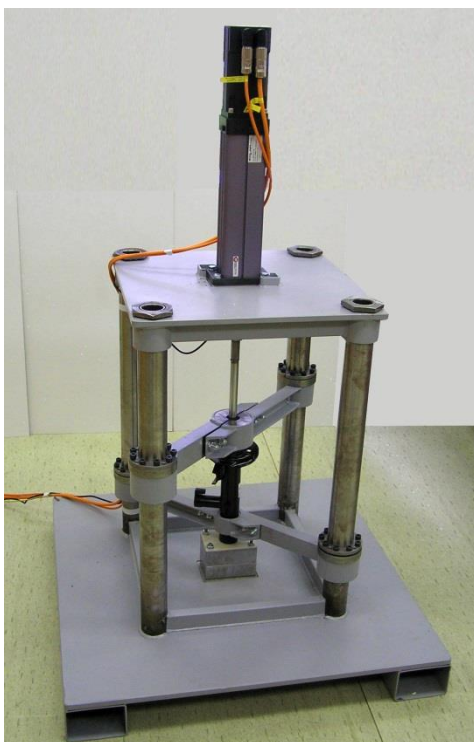
## 9 Laboratorní testování automobilových tlumičů

### 9.1 Popis zařízení

Laboratorní zařízení je určeno k měření charakteristik automobilových tlumičů, konkrétně zdvihových a rychlostních veličin.

Spodní část experimentu tvoří základová deska uzpůsobená k manipulaci. Na základové desce jsou uchyceny čtyři sloupky. Uprostřed těchto sloupků je na podložce umístěn testovaný tlumič. Za pomoci čtyř středících samosvěrných pouzder je tlumič vycentrován na střed. K horní části sloupků je rozebíratelně uchycena horní deska. Ta slouží k upevnění lineárního hnacího aktuátoru.

Díky lineárnímu aktuátoru je možné testovat široké spektrum automobilových tlumičů. Dokáže vyvodit vysoké testovací rychlosti a síly. Předností je i řízení pohybu testovaného tlumiče. [33]



Obrázek 17: Fotografie zkušebního zařízení [33] – str. 1

### 9.2 Měřící aparatura

Pro samotné testování charakteristiky tlumiče je potřeba mít k aktuátoru připojenou měřící aparaturu. Snímanými veličinami jsou síla na tlumiči a zdvih tlumiče. Aparatura tedy musí obsahovat snímač síly, konkrétně jde o silové čidlo UM – 10KN a tzv. enkodér. Ten snímá zdvih tlumiče a převádí ho na rychlost. Signály mezi vstupem a výstupem procházejí přes měřící kartu MF624, která funguje jako prostředník mezi testovacím zařízením a počítačem. Ovládání aktuátoru je realizováno pomocí softwaru MATLAB a jeho nástavby Simulink.[34]

## 10 Simulační software MSC Adams

### 10.1 Základní informace

Software ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems) je simulační program vybavený řešiči Fortran a C++. Vyvíjí ho firma MSC Software a jedná se o celosvětově nejpoužívanější systém řešící tzv. „Multibody“ dynamiku.

Multibody systém se zabývá studiem dynamického chování velkého počtu navzájem propojených tuhých a pružných těles. Každé těleso má definovanou hmotnost, těžiště, setrvačné momenty a může se pohybovat v prostoru. Pohyb tělesa je popsán pomocí kinematiky. Dynamické chování vyplývá z rovnováhy aplikovaných sil, momentů a rychlosti změny hybnosti na jednotlivá tělesa. Během simulace se generují nelineární pohybové rovnice, které řešiče vypočítají.

Software zlepšuje inženýrskou efektivitu, snižuje náklady a zkracuje dobu při navrhování a vývoji nových výrobků nebo optimalizaci stávajících produktů. [35]

### 10.2 Moduly MSC Adams

Základními moduly softwaru MSC Adams jsou ADAMS/View, ADAMS/Solver a ADAMS/PostProcessor. Modul ADAMS/View se zabývá dynamickým řešením mechanismů. ADAMS/Solver je řešič celého systému. Soubory a popisy matematických modelů slouží jako vstupní data do tohoto modulu. ADAMS/PostProcessor vyhodnocuje výsledky analýz. Pomocí tohoto modulu lze vytvářet grafy, animace a zprávy z jednotlivých úloh.

Rozšiřujícími moduly tohoto softwaru jsou především ADAMS/Car, ADAMS/Flex, ADAMS/Driveline, ADAMS/Engine, atd. Tyto moduly se detailněji zabývají příslušnými celky. [36]

## 11 MSC Adams/Car

Celá tato kapitola bude vycházet ze zkušeností s tímto softwarem a z Adams Help [34]. Modul MSC Adams/Car je specializované prostředí pro modelování a simulaci vozidel. Umožňuje vytvářet virtuální prototypy částí nebo celého vozidla a analyzovat jejich chování v různých situacích.

Pro testování tlumičů byl použit právě modul Adams/Car jako software zkoumající prostředí vozidel. Slovo „car“ neznámá, že se tento modul zaměřuje pouze na automobily a jeho části. Je zde velké množství předdefinovaných šablon různých částí vozidla, od zavěšení, kol, až po motory a řízení. Kromě těchto šablon částí vozidla jsou v softwaru i kompletní sestavy. Ve standardním modulu Adams/Car se nachází sestava automobilu, autobusu a tahače s návěsem. Tento modul se dá rozšířit o další šablony např. motocyklu, závodního speciálu apod.

Velkou výhodou celého softwaru MSC Adams je jeho spolupráce s CAD (Computer Aided Design) systémy. Je tedy možné si navrhnut a namodelovat část vozidla v těchto programech a model pak převést do MSC Adams, kde dojde k jeho analyzování.

### 11.1 Hierarchie softwaru

Program pracuje ve dvou základních režimech:

- Standart Interface (standardní rozhraní)
- Template Builder (tvorba vlastních šablon)

Předností MSC Adams/Car je rozdělení základních stavebních prvků potřebných k vytváření modelů a jejich následná úprava, změna nebo použití.

Základním prvkem je Template (šablona). Jedná se o komponentu s určitou geometrií a topologickými daty pro spojení s ostatními šablonami.

Dalším prvkem je Subsystem (podsestava), který se používá pouze ve Standart Interface a slouží k modifikaci dat šablon.

Assembly (sestava) je soubor subsystémů, prostřednictvím nichž se vytvoří celé vozidlo. Subsystémy se propojují v celek pomocí prvku Connector (konektor).

## 11.2 Uživatelské rozhraní

Uživatelský přístup do režimů Standart Interface a Template Builder závisí na jeho přidělení po instalaci programu. Existují 2 druhy přístupu:

- Standart User – standardní uživatel nemá přístup k Template Builderu a nemůže tak provést úpravu nebo tvorbu vlastních šablon. Ale může pracovat se subsystémy, zadávat parametry a vstupy do analýz.
- Expert User – tito uživatelé mají plný přístup k možnostem Template Builderu. Tento přístup je doporučen až zkušenějším profesionálům, kteří se vyvarují zbytečných chyb.

### 11.2.1 Standart Interface

Standardní rozhraní umožňuje práci se šablonami a jednotlivými sestavami. Hlavním úkolem rozhraní jsou analýzy komponentů a celého vozidla.

Základní nabídka Standart Interface se skládá z:

- File (soubor) – obsahuje otevření/zavření a správu sestav nebo šablon. Jsou zde i příkazy na import/export souborů, tisk a uložení analýz.
- Edit (editace) – zahrnuje výběr určitých komponentů a databázi šablon
- View (pohled) – pozice/orientace, náhledy sestav a příkazový řádek
- Adjust (upravit) – informace a modifikace parametrů jednotlivých subsystémů
- Simulate (simulace) – nejdůležitější část softwaru, umožňuje analýzu vozidla
- Review (znázornění výsledků) – příkazy pro animaci výsledků a PostProcessor
- Settings (nastavení) – přizpůsobení programu uživateli. Změna barev, světel, jednotek, ikon apod.
- Tools (nástroje) – správce systému ADAMS, přepínání mezi jednotlivými moduly
- Help (nápověda) – uživatelské příručky a informace o programu

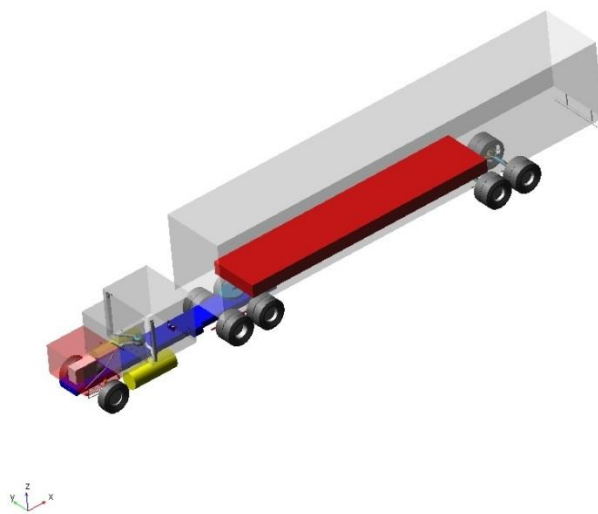
### 11.2.2 Template Builder

Template Builder slouží k vytváření nových šablon nebo úpravě stávajících. Vždy je nutné si předem rozmyslet, jak bude nová šablona vypadat a jak bude připojena k ostatním částem vozidla. Lepší a rychlejší způsob je úprava stávajících šablon, protože je zde menší riziko vzniku chyb.

Základní nabídka neobsahuje Adjust, Simulate a Review. Ovšem je zde sekce Build (Návrh). Ta slouží k vytváření komponentů vozidla. Modelování těchto komponentů se dělá parametricky (hodnotou). Nejdříve je nutné si navolit záchytné body (Hardpoints). Pak už nastává samotná stavba části vozidla.

### 11.3 Simulační model vozidla

Jako model vozidla může uživatel použít již předpřipravený model, nebo si model nejdříve navrhnout. Vozidlo se může složit z jednotlivých podsestav (Subsystem), což je pracnější. Nabízí však více možností, jak bude automobil vypadat a z jakých částí bude složen. Nebo je zde možnost vybrat celou sestavu vozidla najednou (Assembly). Předpřipravené modely se v programu nachází v několika verzích pro různá použití.



Obrázek 18: Simulační model tahače s návěsem

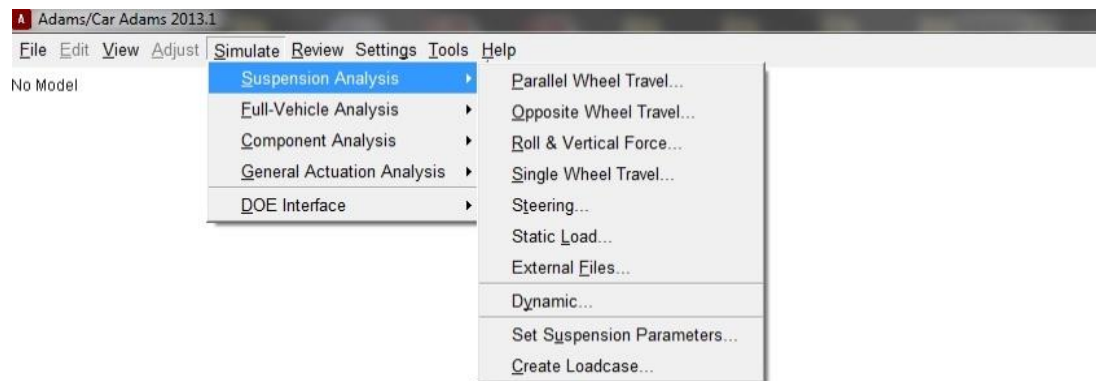
### 11.4 Simulační prostředí MSC Adams/Car

Simulate (simulační prostředí programu) nabízí spoustu možností a variant simulací vozidla nebo jen jeho částí.

#### 11.4.1 Analyzování nápravy vozidla

První možnost je Suspension Analysis (analýza nápravy vozidla). Po otevření se zobrazí nabídka dalších prvků simulování nebo nastavení nápravy vozidla. K analyzování samotné nápravy je třeba si předem připravit vlastní sestavu v Template Builderu nebo použít již předpřipravenou sestavu MDI\_Front\_vehicle. Tato sestava obsahuje nápravu vozidla složenou ze zavěšení McPherson, tlumičů a pružin. Na nápravu jsou připojena kola s pneumatikami a systém řízení kol s volantem. Kola jsou postavena na plošinách simulujících zkušební zařízení. Během analýzy se pracuje v určeném počtu kroků a s hodnotami, které uživatel zadá. V každém kroku software počítá přes 38 charakteristik odpružení. Na základě získaných výsledků může uživatel změnit tuhost pružin, geometrii zavěšení a opakovat simulaci s novými parametry.





Obrázek 19: Roletová nabídka analýzy zavěšení

Parallel Wheel Travel (současné zvedání kol) dovoluje uživateli namáhat nápravu jako celek. Obě kola nápravy se chovají, jako kdyby byla položena na plošinu, která je zvedá stejnou rychlostí a do stejné výšky.

Opposite Wheel Travel (opačná práce kol) simuluje pohyb kol nápravy při zatáčení. Umožňuje sledovat náklon a změny geometrie nápravy. Při této simulaci je jedno kolo zvedáno a druhé kolo naopak spouštěno.

Roll and Vertical Force (klopná a svislá síla) poskytuje uživateli zadat úhel naklonění nápravy a svislou sílu působící na kola.

Single Wheel Travel (práce jednoho kola) znamená, že jedno kolo nápravy je blokováno a druhé se může pohybovat v libovolném směru.

Steering (řízení) je analýza určená výhradně k simulaci řízení. Nastaví se horní a dolní mez zatočení kol a jejich pevná výška. Poté se analyzuje geometrie kol při zatáčení.

Static Load (statické zatížení) umožňuje statické řešení sestavy zavěšení. Je zde možnost zadat velké množství vstupních parametrů na jednotlivá kola vozidla, např. brzdící a trakční sílu.

External Files (externí soubory) poskytují uživateli zadat požadavek na simulaci, který se nachází v externích souborech na disku. Existují dva typy External Files analýz a to Loadcase Analysis (analýza zatěžovacího stavu) a Wheel-Envelope Analysis (analýza kola s pneumatikou). **Loadcase Analysis** čte vstupní informace z jednoho nebo více existujících souborů a provádí simulaci, ke které potřebuje subsystém zavěšení. **Wheel-Envelope Analysis** generuje balení souborů kola s pneumatikou, rozvrhne pozici a orientaci kol, následně se provede analýza, která může být exportována do CAD systémů.

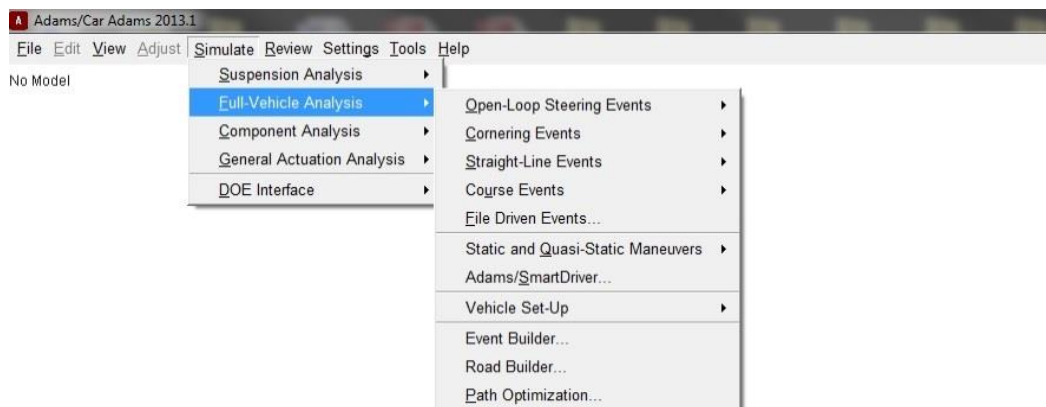
Dynamic (dynamická analýza) umožňuje provádět pohybovou simulaci. Parametry se tedy mohou měnit v závislosti na čase, což je rozdíl oproti Static Load. Dynamic analýza umožňuje reálnější chování zavěšení vozidla než výše zmíněné simulace. Jako ve Static Load se zde zadávají různé parametry řízení, brzdění, trakce apod. Funkce Vertical Input Function (vstupní funkce) dává možnost zvolit veličinu v závislosti na jiné a tím sledovat její průběh. Tato analýza má možnost pracovat s poddajnými prvky jako náhradami za některé komponenty zavěšení, aby byl výsledný efekt ještě reálnější.

Set Suspension Parameters (parametry odpružení) je záložka určená k nastavení zavěšení. Má za úkol nastavit parametry, jako jsou hmotnost kola, tuhost pneumatik a pružin, rozvor atd. Ty pak používá při výpočtu v systému analýz odpružení.

Create Loadcase (vytvoření zatěžovacího stavu) se používá v Loadcase Analysis. Nadefinuje zatěžovací stav, který se uloží do externího souboru na disku a je připraven k pozdějšímu použití.

### 11.4.2 Analyzování celého vozidla

Full-Vehicle Analysis (analýza celého vozidla) využívá kompletně sestavený model vozidla (viz. 11.3). Po otevření se opět zobrazí další nabídka prvků pro simulaci celého vozidla. Celá záložka Full-Vehicle Analysis funguje na principu definování určité trasy, na kterou se mohou přidat i překážky a po které je vozidlo zkoušeno.



Obrázek 20: Roletová nabídka analýzy celého vozidla

Open-Loop Steering Events (analýzy řízení otevřenou smyčkou) je široké spektrum různých simulací, zaměřených na chování řízení v průběhu času. První možností v této nabídce je **Drift** (odklon). V analýze Drift vozidlo dosáhne ustáleného stavu v prvních 10 s. Ustáleným stavem se rozumí stav, ve kterém má vozidlo požadovaný úhel řízení, počáteční hodnotu rychlosti, převodový stupeň atd. Pomocí analýzy **Fish-Hook** (převrácení) je možné vyhodnotit dynamickou stabilitu proti převrácení vozidla. Tato simulace se skládá ze dvou fází (dvou minimanévrů). První kvazi – statická fáze nastaví vozidlo dle požadovaných počátečních podmínek. Druhá fáze spustí výpočet analýzy uvolněním spojky vozu. Nejdůležitějšími faktory pro hodnocení simulace jsou úhel natočení volantu, příčné zrychlení, rychlost stáčení a úhel náklonu vozidla. **Impulse Steer** (impuls řízení) umožňuje charakterizovat stržení volantu řidičem při neočekávané situaci. Důležitými vstupními parametry jsou rychlost vozu a způsob zacházení s volantem. Výstupem je pak příčné zrychlení a rychlost stáčení vozidla. **Single Lane Change** (změna jízdního pruhu) je simulace, ve které vozidlo provede manévr a změní dosavadní jízdní pruh. Hodnotí se příčné zrychlení a náklon vozidla. Běžně vozidlo změní jízdní pruh, např. při předjíždění nebo vyhnutí se překážce. Proto je tato simulace velmi užitečná. Dále se v sekci Open-Loop Steering Events nacházejí simulace **Ramp Steer** (povolné natáčení volantu), **Step Steer** (natáčení volantu v krocích) a **Swept-Sine Steer** (kroucení volantu nejdříve na jednu a poté na druhou stranu).

Cornering Events (analýzy průjezdu zatáčkou) slouží k vyhodnocení jízdních vlastností a dynamických reakcí vozidla při průjezdu různými zatáčkami. Zejména se zde zkoumá nedotáčivost, přetáčivost a přenos hmotnosti. **Braking in turn** (brzdňný účinek v zatáčce) je jedna z velmi důležitých analýz Cornering Events. Principem je prudké brzdění dopravního prostředku v zatáčce vyvolaném např. rychlým najetím do zatáčky nebo překážkou na silnici. Zkoumá reakce vozu, směrové odchyly, boční zrychlení, změny v poloměru otáčení a úhel stáčení jako funkci podélného zpomalení. **Constant-Radius Cornering** (rovnorné zatáčení) určuje nedotáčivost nebo přetáčivost vozu. Nejprve vozidlo jede konstantní rychlostí rovnou silnici, následuje zatáčení vozidla s konstantním poloměrem, poté se postupně zvyšuje rychlost v zatáčce a měří se příčné zrychlení. Dalšími simulacemi jsou **Cornering with Steer Release Analysis** (dynamický manévř s konstantním poloměrem otáčení), **Lift-off Turn-in** (náhlé zrychlení vozu v zatáčce) a **Power-off Cornering** (zatáčení bez použití akceleračního pedálu).

Straight-Line Events (události rovné jízdy) jsou zaměřeny na podélnou dynamiku vozidla. **Acceleration Analysis** (analýza zrychlení) zrychluje vozidlo z klidu až do rychlosti, která byla zadána. Tato analýza pomáhá studovat chování automobilu při akceleraci, tedy pokles zádi a zvednutí přední části vozidla. **Braking Analysis** (analýza brzdění) je opakem předchozí analýzy. Vstupem je počáteční rychlost a brzdňný účinek vozidla. Výsledkem je studium chování při brzdění – náklon vozu dopředu. Dále je zde **Braking on Split  $\mu$  Analysis** (rozšířené možnosti analýzy brzdění), **Maintain Analysis** (udržování konstantní rychlosti) a **Power-off Straight Line Analysis** (jízda po rovině bez použití akceleračního pedálu).

Course Events (analýzy po tratích) jsou založeny na řízení stroje buď po nějaké dráze (3D Road) nebo na změně jízdního pruhu (ISO Lane Change). Oproti výše zmíněným simulacím umožňuje Course Events mnohem komplexnější využití s větším množstvím nastavení. **ISO Lane Change** (normovaná změna jízdního pruhu) je provedení manévř za účelem změny dosavadního jízdního pruhu pro plně zobrazené vozidlo. Vychází se zde z normy ISO 3888: Double Lane Change, v ČR známa jako „Losí test“. Uživatel má možnost určit převodový stupeň a rychlost, s jakou se provede změna jízdního pruhu. **3D Road** (3D silnice) zkouší sestavu vozidla na trojrozměrné silnici. Může se použít velkého množství silnic z externí databáze softwaru nebo si uživatel nadefinuje svoji testovací trasu. Trasy mohou být uzavřené (např. závodní dráha) nebo otevřené (např. rovný, nekonečný úsek silnice). Opět jako počáteční podmínky se zde zadají rychlost vozidla a převodový poměr, nebo si pomocí minimanévřů sám uživatel určí, jak má vozidlo jet.

File Drive Events (soubor jízdních událostí) funguje obdobně jako External Files. Příkaz nutí uživatele vybrat trať, po které má vůz jet, a řídicí soubory vozidla z externí databáze na disku.

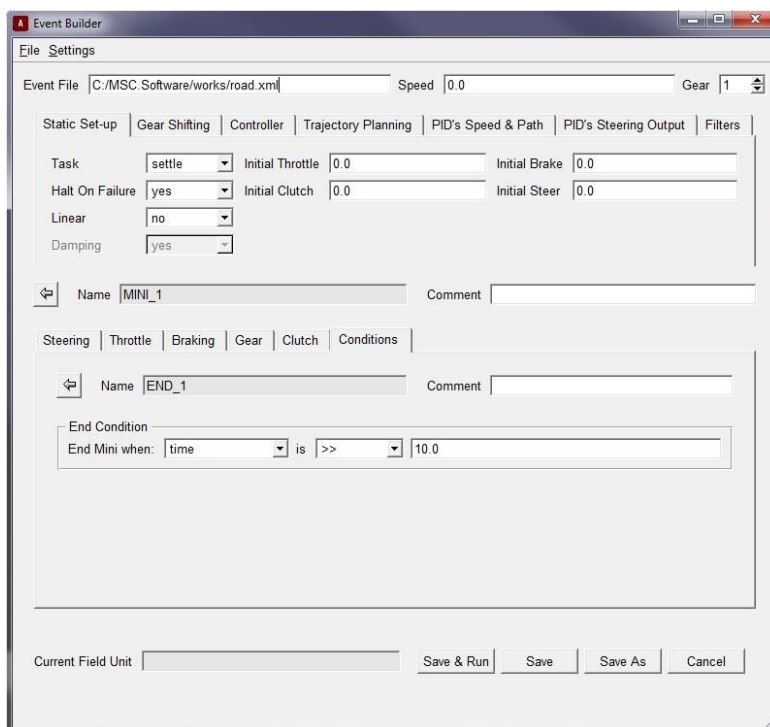
Static and Quasi – Static Maneuvers (statické a kvazi-statické manévřy) jsou dynamická rovnovážná řešení pro zkoumané vozidlo. Zjišťuje se hlavně podélné a příčné zrychlení. Na rozdíl od jiných analýz nezahrnují přechodové efekty, jako je například řazení rychlostí a řešení simulace je tak velmi rychlé.

Smart Driver (inteligentní řidič) je pokročilý jezdec, který přináší vozidlu realistické chování. Umožňuje lepší manipulaci a jízdní výkon modelu vozidla, přičemž vyžaduje minimální počáteční nastavení. Hlavní vstupy, které uživatel zadává, jsou trasa a limity vozidla. SmartDriver pak sám vypočítá rychlostní profil tratě pomocí vestavěného kvazi – statického řešiče. Tento řešič bere v úvahu limity pneumatik, motoru, brzdového systému a aerodynamiku. Provádí následující kroky:

- Vypočítá rychlostní profil přes referenční cestu
- Kontroluje rychlostní profil z hlediska modelu vozidla a bere v úvahu přechodovou dynamiku
- Vyhledává místa cesty, která nelze jet zvolenou rychlostí a upraví ji

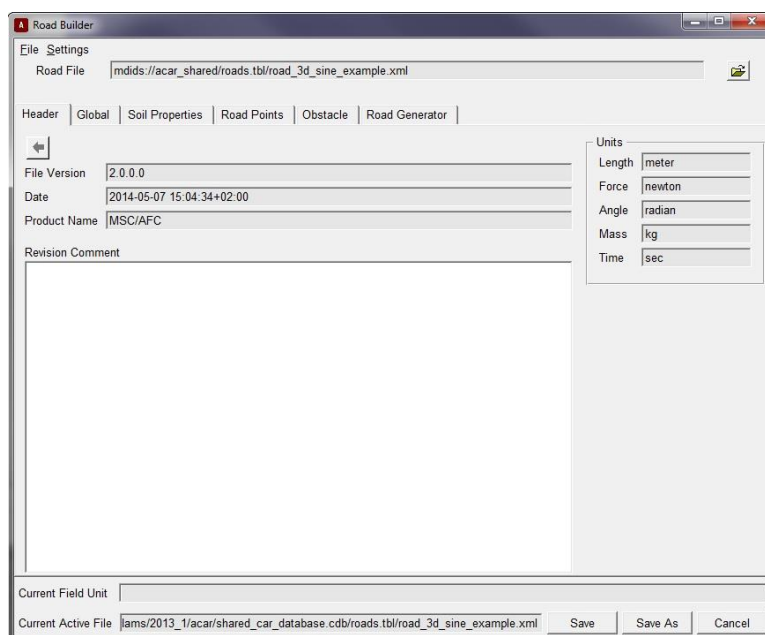
Vehicle Set-Up (nastavení vozidla) je záložka s různými nastaveními. Nabízí možnost změnit hmotnost vozu (Adjust Mass), parametry převodovky, motoru a spojky (Set Powertrain Parameters) nebo řízení a brzd (Set Full Vehicle Parameters). Navíc obsahuje **Static Vehicle Set-Up** (statické nastavení vozidla), které umožňuje nastavit realistické zavěšení, jako je sklon/odklon kola, rozložení hmotnosti a nastavení výšky vozu.

Event Builder (tvůrce událostí) je ovladač, pomocí něhož se dají vytvořit minimanévry. S těmito minimanévry se poté dá pracovat ve SmartDriveru nebo ve 3D Road. Uživatel může vytvořit nový sled minimanévrů nebo upravit stávající. Minimanévry závisí na trati. Nejdříve se vytvoří minimanévr (na obrázku MINI\_1), vyhradí se mu čas působení a k němu se přiřadí určitá funkce. Minimanévry se týkají řízení (Steering), akcelerace (Throttle), brzdění (Braking), převodů (Gear), spojky (Clutch) a podmínek (Conditions), při kterých má minimanévr skončit.



Obrázek 21: Formulář Event Builderu

Road Builder (stavba silnic) slouží k vytváření nové nebo úpravě stávající tratě. Hlavička (Header) obsahuje základní informace o trati, použité jednotky, popřípadě přidání vlastního komentáře. Komplexní nastavení (Global) umožňuje zadat základní údaje o silnici, jako je umístění tratě, její šířka, směr apod. Půdní vlastnosti (Soil Properties) poskytují možnost zadání dat o povrchu silnice, např. součinitel tření a tuhost půdy. Silniční body (Road Points) umožňují vytvářet silnice - tedy zatáčky, zákruty, rovné úseky pomocí souřadnic x, y, z. Překážka (Obstacle) má za úkol definovat zábranu na trati (více 11.5.2). Generátor cesty (Road Generator) se používá ke generování a exportování vytvořené silnice.



Obrázek 22: Formulář Road Builderu

Path Optimization (optimalizace cesty) je nástroj, který vytváří optimální nebo nejrychlejší cestu pro vozidlo. Jako vstup se zadává trať a základní údaje o vozidle, trati (např. šířka) a počet iterací pro výpočet. Výsledkem je vykreslení červené křivky na trati jako optimální trasy.

Kromě výše uvedeného obsahuje software **Component Analysis** (analýza komponentu), což je speciální sada nástrojů na modelování pneumatik, dále **DOE** (Design of Experiments) **Interface** (plánování experimentů) a **General Actuation Analysis** (obecná analýza ovládání).

## 11.5 Překážky

Jsou kromě simulací a modelů jedny z nejdůležitějších prvků MSC Adams/Car. Žádná reálná silnice není úplně rovná a hladká, proto nám překážky představují nerovnosti vozovky, výmoly apod. V softwaru MSC Adams/Car jsou dva druhy překážek:

- 2D překážky
- 3D překážky

### 11.5.1 2D překážky

U těchto překážek se jako hlavní a jediný parametr zadává výška. Kromě překážek existuje i model 2D silnice (Model 2D Road), který umožňuje namodelovat rovnou silnici i dvourozměrné silniční buzení.

2D překážky jsou:

- Drum (buben) – používá se pouze u Component Analysis pro zkoušení pneumatik
- Flat (hladký) – rovný povrch silnice
- Plank (prkno) – překážka ve tvaru prkna, kolmo nebo šikmo vzhledem k podélné ose silnice se zkosenými hranami
- Polyline (množina přímek) – lineární popis profilu silnice
- Pothole (výmol) – jednoduchá překážka obdélníkového tvaru
- Ramp (rampa) – jednoduchá rampa rostoucí nebo klesající
- Roof (střecha) – jednoplášťová střecha ve tvaru trojúhelníku
- Sine (sinus) – sinusové vlny s konstantní vlnovou délkou
- Sine-Sweep (vlna) – sinusové vlny s klesající vlnovou délkou
- Stochastic-Uneven (stochastický jev) – nepravidelný silniční profil jako realnost typické vozovky

### 11.5.2 3D překážka

Na rozdíl od 2D překážek musí uživatel definovat všechny rozměry. Tyto překážky se používají v Road Builderu, kde dochází k jejich definování, a v simulaci 3D Road.

Překážky jsou následující:

- Crown (klenba) – vypuklá překážka v podélné ose silnice
- Curb (obrubník) – krajnice lemující obě strany silnice
- Plank (prkno) – obdélníková překážka napříč silnicí se zaoblenými hranami
- Polyline (množina přímek) – překážka tvořená množinou bodů spojující přímkami
- Pothole (výmol) – díra obdélníkového tvaru
- Ramp (rampa) – rostoucí nebo klesající překážka
- Roof (střecha) – bariéra trojúhelníkového tvaru
- Roughness (hrbolatost) – nepravidelný silniční profil
- Sine (sinus) – funkce sinus s konstantní amplitudou a vlnovou délkou
- Sweep (vlna) – funkce sinus s proměnnou amplitudou a vlnovou délkou
- Grid (vypuklá síť) – výška sítě je definovaná pomocí maticí bodů

## 12 Vlastní simulované experimenty

Jedním bodem praktické části bakalářské práce je sestavení simulačního modelu vozidla ve vybraném softwaru a analýza chování tlumičů. Jako nejvhodnější software byl zvolen MSC Adams/Car z výše uvedených důvodů.

Vlastní práce v softwaru spočívá v simulaci jízdy vozidla po upravených tratích. Hlavními simulačními prostředky, které se budou využívat, jsou trojrozměrná silnice uzavřená nebo otevřená s překážkami a vybrané druhy analýz.

Hlavním bodem hodnocení je různorodé chování jednotlivých charakteristik tlumičů během jízdy po tratích a různých překážkách. Z poznatků během simulací se zjistí míra použitelnosti tlumičů, která závisí na bezpečnosti a kvalitě jízdy. Tím se rozumí ovladatelnost vozidla a jízdní pohodlí.

### 12.1 Simulační kritéria

Tato část vychází z poznatků získaných během psaní bakalářské práce a z knihy Dynamika motorových vozidel od F. Vlka [25]. Je zde návaznost na kapitulu 7 - Mechanický popis.

Tlumiče automobilu tlumí kmity přenášené z povrchu vozovky. Kmity vznikají ve třech směrech. Ve svislém směru se hovoří o tzv. nadnášení, v podélném o houpání a v příčném směru o kolébání. Kmity vznikají na nerovném terénu vozovky. Často se pro zjednodušení a vysvětlení kmitání využívá harmonického průběhu nerovností daného funkcí sinus, jako závislost výšky na čase (překážky Sine). Software MSC Adams/Car využívá hlavně náhodných nerovností, jako jsou tratě Country Road a Belgian Block nebo vytvořených z různých překážek.

Kmitání automobilu se dá posoudit podle dvou základních měřítek:

- Bezpečnosti
- Jízdního pohodlí

#### 12.1.1 Bezpečnost

Bezpečnost jízdy, zejména pak ovladatelnost vozidla, závisí na dynamické svislé síle mezi kolem (pneumatikou) a vozovkou. Pokud se vozidlo pohybuje po vozovce s nahodilými nerovnostmi, je časový průběh svislé síly náhodný. Pro jízdní bezpečnost je důležitá velikost svislé síly. Svislá síla určuje velikost obvodové síly, kterou kolo může přenášet. To je důležité z hlediska brzdění. Pro říditelnost je důležitá závislost boční síly na svislé. Pokud je svislé zatížení kola nulové, znamená to odskočení kola od vozovky, snížení přilnavosti a u přední nápravy ztrátu kontroly nad vozidlem.



### 12.1.2 Jízdní pohodlí

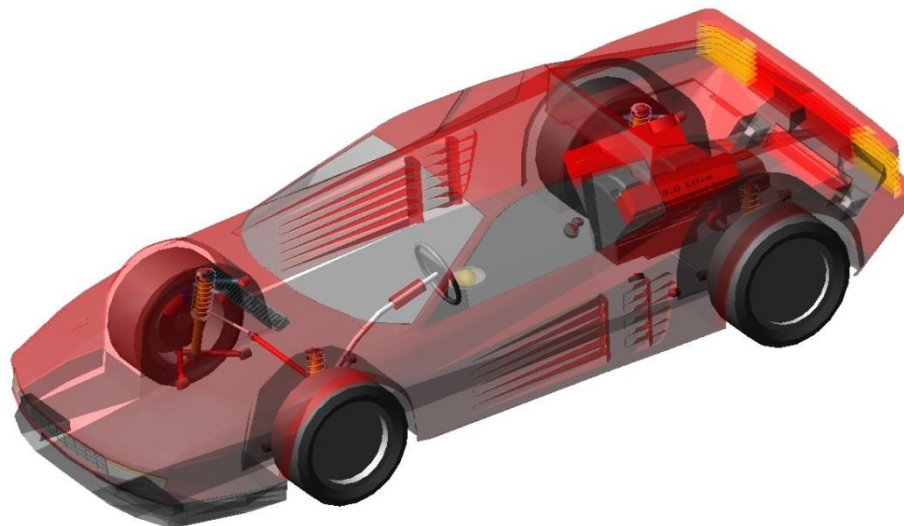
Bezpečnost jízdy se preferuje více než pohodlí. Ovšem není dobré ho podceňovat. Kromě komfortního svezení má vliv i na schopnosti řidiče.

Vibrace a otřesy, které s sebou přináší kmitání, mohou negativním způsobem ovlivňovat tělesné funkce člověka sedícího v dopravním prostředku. Mohou také způsobit únavu, zhoršení reakčních schopností, a tedy zvýšení rizika dopravní nehody. V neposlední řadě vznikají rušivé zvuky. Při působení vibrací a otřesů dochází k rozkmitání lidského organismu. Nebezpečné jsou určité frekvence, které vedou až k rezonanci horní části těla. Rozhodující jsou především svislé a podélné kmity. Lidské tělo snese svislé kmity od 4 do 6 Hz a podélné od 1 do 3 Hz.

Pro jízdní pohodlí je důležité svislé zrychlení působící na cestující a řidiče ve vozidle.

## 12.2 Použitá silueta automobilu

K účelům bakalářské práce, která se zabývá výhradně automobilovými tlumiči, je velmi výhodné použít již předdefinovaný model automobilu a není nutné vytvářet nové šablony a sestavy. Dá se tak vyhnout mnoha chybám při modelování vozidla. Použitý model má název MDI\_Demo\_Vehicle.



Obrázek 23: Použitý model automobilu

Model automobilu je složen z podsestav:

- Body (tělo)
- Front Suspension (přední náprava)
- Rear Suspension (zadní náprava)
- Front Wheels (přední kola)
- Rear Wheels (zadní kola)
- Powertrain (hnací ústrojí)
- Steering (řízení)
- Brakes (brzdová soustava)

Tělo modelu zdánlivě představuje siluetu automobilu Ferrari F348 z let 1989 až 1995. Ostatní informace o podsestavách jsou získány z programu MSC Adams/Car. Motor je umístěn uprostřed, před zadní nápravou. Jedná se o motor V12 se zdvihovým objemem 5 l a váhou 300 kg. Převodové ústrojí je umístěno nad zadní nápravou. Rozložení motoru, převodovky a pohon zadních kol naznačují, že se jedná o klasickou koncepci pro sportovní a závodní automobily. Přední a zadní náprava je tvořena dvojicí lichoběžníkového zavěšení (Double Wishbone). Brzdová soustava se skládá z kotoučových brzd, které jsou na přední i zadní nápravě. Celková hmotnost vozu je 995 kg.

## 12.3 Návrh překážek

Pro zjištění chování tlumičů a celého vozidla během jízdy je nutné mít nejen zkušební model automobilu, ale znát i trasy, po kterých se bude pohybovat. Dynamické účinky vozidla na vozovku se nezjistí projetím pouze po rovných cestách, ale po silnicích tvořených nerovnostmi a překážkami.

Software MSC Adams/Car nabízí velké množství překážek a v této práci jsou vybrány a upraveny ty překážky, se kterými se řidiči setkávají na skutečných silnicích.

### 12.3.1 Zpomalovací prahy

Zpomalovací práh (retardér, příčný práh) je stavba na dopravní komunikaci, která slouží ke zpomalení vozidla. Snížení rychlosti docílí zvýšením vozovky. V České republice se zpomalovací prahy vyrábějí v různých provedeních. Používají se v obytných zástavbách, blízko přechodů a nákupních centrech.

Testovací retardéry vycházejí z rozměrů firmy BREVA Servis s.r.o. – Deskové podlahy, která je vyrábí. Používají se na běžných komunikacích. [37]

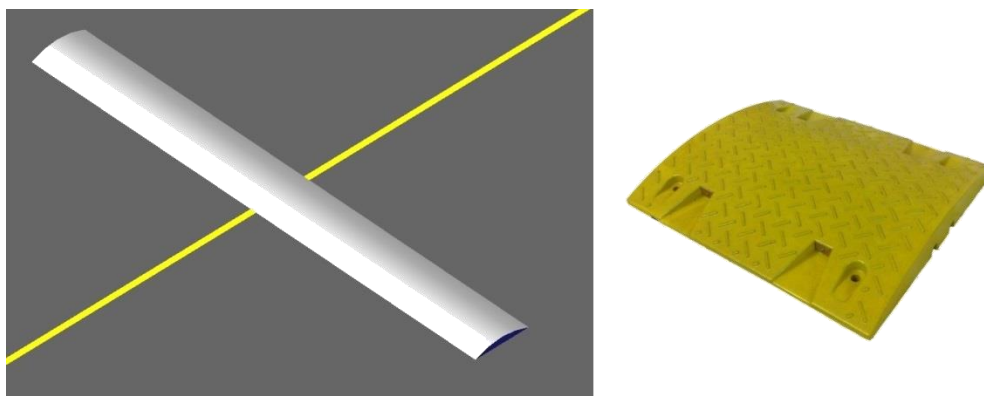
Pro tvorbu překážek zvolen Road Builder a jeho příkaz Obstacle. Použitá je 3D překážka typu Plank. Překážka se nachází na rovné silnici. Navolí se základní rozměry překážky, tření, umístění překážky na silnici (Start/Stop Location) a zaoblení hran (Bevel Edge Length). Zaoblení hran je mnohem větší, než je jedna ze stran, která má být zaoblena. V klasickém CAD programu by toto zaoblení nešlo provést. Software MSC Adams/Car to dovolí a umožní, aby překážka co nejvíce odpovídala skutečnosti.

The screenshot shows the 'Road Builder' software window. The 'Road File' is set to 'file://C:/MSC.Software/works/private.cdb/roads.tbl/3d\_road\_obstacle\_plank\_20kmh.xml'. The 'Name' field contains 'PLANK'. Under 'Common Parameters', 'Obstacle Type' is 'plank', 'Width' is '4.0', 'Length' is '0.43', and 'Friction' is '0.9'. The 'Coordinate System' is set to 'Local'. The 'Start Location' is (-20.0, 0.0, 0.0) and the 'Stop Location' is (-30.0, 0.0, 0.0). Under 'Obstacle Specific Parameters', 'Height' is '0.05' and 'Bevel Edge Length' is '0.12'. The 'Current Field Unit' is 'length (meter)' and the 'Current Active File' is the same as the 'Road File'. Buttons for 'Save', 'Save As', and 'Cancel' are visible at the bottom right.

Obrázek 24: Formulář pro překážku Retardér

Pro testování chování automobilu byly vybrány dva nejběžnější zpomalovací prahy. Prvním z nich je retardér pro rychlost 20 km/h. Má následující technické parametry:

- Délka (osa x) = 430 mm
- Šířka (osa y) = 4000 mm
- Výška (osa z) = 50 mm
- Zaoblení hran = 120 mm
- Tření = 0,9
- Nachází se 20 m od začátku silnice



Obrázek 25: Zleva simulační a skutečný zpomalovací prah [37]

Druhý je retardér pro rychlost 30 km/h. Technické parametry:

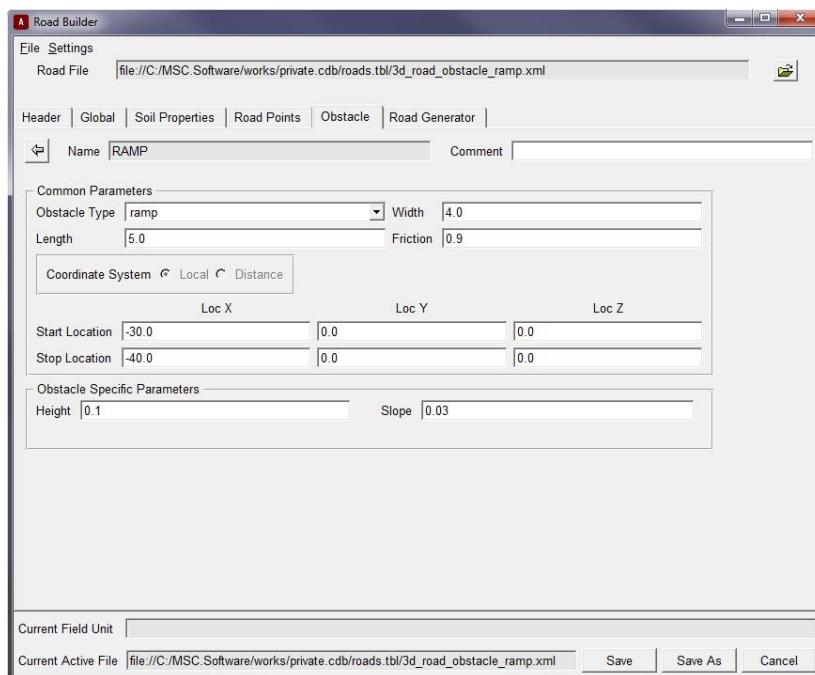
- Délka (osa x) = 800 mm
- Šířka (osa y) = 4000 mm
- Výška (osa z) = 52 mm
- Zaoblení hran = 220 mm
- Tření = 0,9
- Nachází se 20 m od začátku silnice

### 12.3.2 Obrubník

Silniční obrubník odděluje motoristickou a pěší komunikaci. Opět existuje celá řada výrobců a druhů obrubníků.

Při této simulaci je možné provést tzv. Orientační zkoušku tlumiče, kdy se některé kolo automobilu silou stlačí a následně uvolní. Sleduje se, zda se vozidlo rozkmitá a za jakou dobu se vrátí do původní polohy. Každý si tuto zkoušku může provést sám a bez speciálního zařízení. Popřípadě může s vozidlem sjet z obrubníku dolů rozumnou rychlostí, jako v této simulaci.

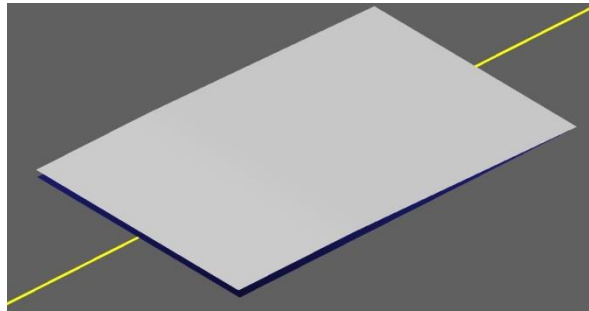
Pro tvorbu překážky v softwaru MSC Adams/Car zvolen opět Road Builder a jeho příkaz Obstacle. Použitá 3D překážka je typu Ramp. Rampa je zde proto, aby se docílilo reálného provedení zkoušky. Nejdříve automobil pozvolna najede na rampu a poté na konci skokem sjede dolů na vozovku. Překážka se nachází na rovné silnici. Navolí se základní rozměry překážky, tření, umístění překážky na silnici (Start/Stop Location) a stoupání (Slope).



Obrázek 26: Formulář pro překážku Obrubník

Překážka obrubník má následující technické parametry:

- Délka (osa x) = 5000 mm
- Šířka (osa y) = 4000 mm
- Výška (osa z) = 100 mm
- Stoupání = 0,03 (odpovídá  $1,35^\circ$ )
- Tření = 0,9
- Nachází se 30 m od začátku silnice



Obrázek 27: Model rampy simulující reálný obrubník

## 12.4 Návrh zkušebních tratí

Kromě překážek na rovných silnicích je třeba, aby zavěšení vozidla a hlavně tlumič byly vyzkoušeny také v zatáčkách na klikatých uzavřených tratích, tedy testovacích okruzích. Software MSC Adams/Car nabízí databázi zkušebních tratí. Dokonce i závodní okruh Imola. V práci jsou zástupci silnic, se kterými se člověk setkává v běžném životě.

Silnice jsou zobrazeny ve 3D a slouží jako jeden z parametrů v simulaci 3D Road nebo Smart Driver.

### 12.4.1 Polní cesta

Polní cesta nebo-li Country Road je typický představitel nebezpečné, klikaté a nerovné vozovky. I dnes ještě existují tyto tzv. off-road cesty, protože výstavba silnice v určitých místech nemá smysl nebo není možná. Silnice jsou často jen vyjeté koleje v prašném nebo travnatém terénu. Country Road je v MSC Adams/Car dvojího typu. První je tvořena velkým množstvím zatáček a výkrutů. Druhá je rovná trať s profilem různých nerovností, která je použita v simulaci.



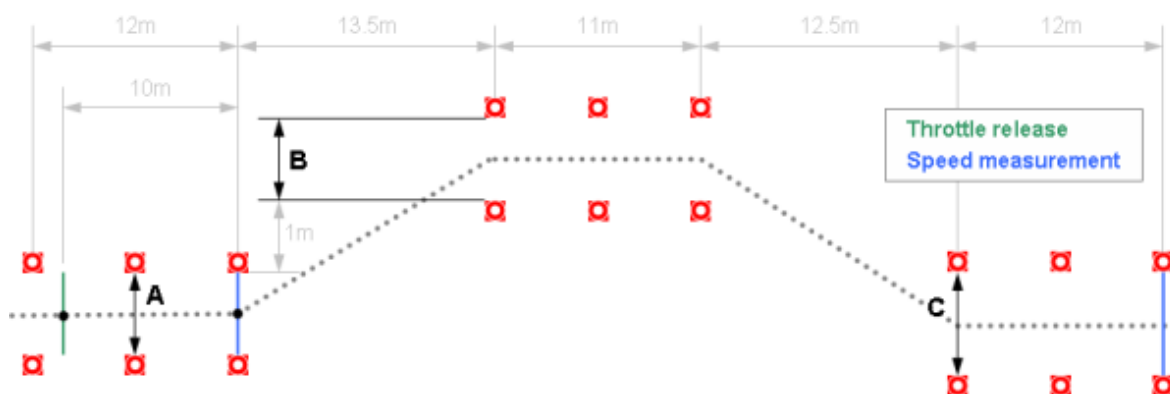
Obrázek 28: Zleva trať Country Road a skutečnost [38]

### 12.4.2 Závodní trať

Jako závodní okruh je použit Smooth Track (hladká dráha). Jedná se o uzavřenou trať simulující běžnou silnici. Nachází se zde rovné úseky, ale i pozvolné a ostré zatáčky.

### 12.4.3 ISO Lane Change

Automobil provede dvojitou změnu jízdního pruhu, jako reakci na nepředvídatelnou překážku na silnici. Zkouška se skládá ze vstupního, výstupního pruhu délky 12 m a bočního pruhu délky 11 m. Šířka vstupního a bočního pruhu je závislá na šířce vozidla, šířka výstupního je 3 m. Boční pruh je na vstupní straně posunut příčně o 1 m a podélně o 13,5 m. Na výstupu je podélná délka 12,5 m. [39] Jako dráha v MSC Adams/Car je stanovena rovná silnice s délkou 250 m. [36]



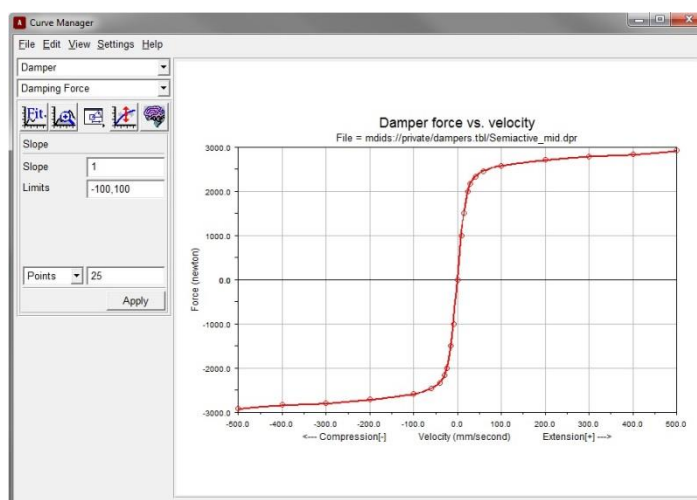
Obrázek 29: Schéma manévru ISO Lane Change [39]

## 12.5 Charakteristiky tlumičů

Další silnou stránkou MSC Adams/Car je snadná modifikace jednotlivých komponentů. Každá šablona má svůj datový soubor uložený na disku. Tento soubor obsahuje důležitá data, jako jsou rozměry, hmotnosti a v případě tlumiče také jeho charakteristiku – závislost tlumicí síly na rychlosti.

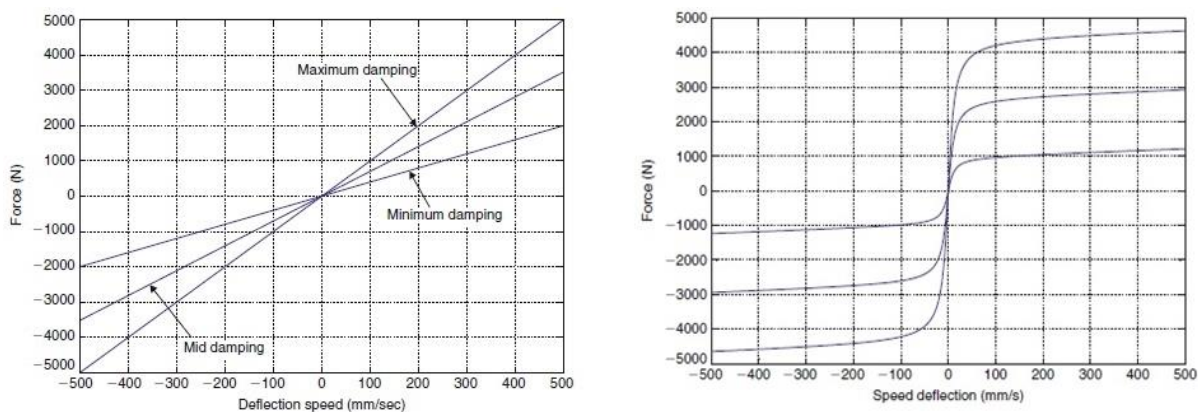
Existují 2 způsoby, jak tlumiče modifikovat. Prvním z nich je použití Curve Manager (správce křivek). Jedná se o jednoduchý program, prostřednictvím něhož se vytvoří body charakteristiky tlumiče a následně se tyto body proloží křivkou. Druhý způsob je manuální zápis bodů charakteristiky do datového souboru tlumiče. V práci je použit tento způsob s ověřením výsledné křivky v Curve Manageru.

Následná modifikace je pak velmi snadná. V programu se vybere tlumič, který se má upravit, zvolí se možnost Modify (modifikace) a stávající datový soubor se nahradí novým.



Obrázek 30: Vykreslená charakteristika magnetoreologického tlumiče

Pro zjištění chování tlumičů v různých situacích zvoleno celkově 6 ideálních charakteristik tlumení pro 2 tlumiče. Tlumiče jsou vybrány podobné, jaké by byly použity k získání charakteristik v případě uvedení laboratorního experimentu do provozu. Prvním je tlumič elektrohydraulický (dále ER), simulující charakteristiku pasivního tlumiče. Je nastavitelný do 3 režimů a proto se jedná o adaptivní systém. Druhý je magnetoreologický semiaktivní tlumič (dále MR). Jelikož je opět nastavitelný do 3 režimů a jeho hodnoty charakteristiky se nebudou během procesu jízdy měnit, bude se chovat jako adaptivní systém.



Obrázek 31: Zleva ideální charakteristika ER tlumiče a MR tlumiče [40] – str. 28, 30

Tyto režimy mohou mít různý název, v práci jsou nazvány Sport (sportovní), Normal (normální) a Comfort (komfortní). Panel těchto režimů je umístěn na přístrojové desce. Řidič si sám volí nastavení tlumičů. Režim Sport je charakteristický tvrdším odpružením, pracující s vyššími silami. Naopak režim Comfort se hodí pro pohodlnou jízdu s co největším možným komfortem a pracuje s nižšími silami. Režim Normal je pak výchozí režim tlumení nastavený od výrobce.

## 12.6 Simulace jízdy

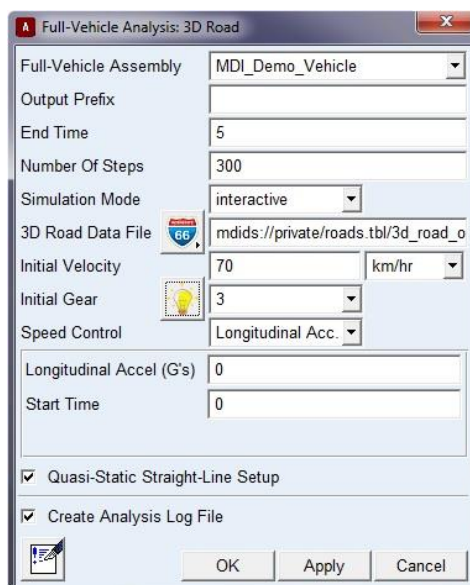
V této části je podrobněji popsán postup vytvoření samotných simulací. Jako jeden z nástrojů pro tvorbu simulací byl vybrán příkaz 3D Road. Použit je pro všechny připravené překážky. Tratě nejsou rovné úseky, obsahují zatáčky, které sice zvládne i 3D Road, ale pouze konstantní rychlostí. Ta v drtivém množství případů bude malá, aby auto zvládlo projet všechny zatáčky, aniž by došlo k vyjetí z dráhy. Pro tratě je proto velmi vhodné použít chytrého řidiče (Smart Driver).

### 12.6.1 Simulace jízdy přes překážky

Analýza jízdy přes zpomalovací prahy je na začátku rychlostí, na kterou jsou doporučeny retardéry používat. Poté se pozvolna zvětšuje rychlost přejetí překážky. Hodnotí se reakce vozidla na přejetí překážky a vliv rychlosti na tlumiče.

Simulace jízdy přes obrubník probíhá stejným způsobem. Ovšem v reálném prostředí automobil přejede překážku velmi nízkou rychlostí. U MSC Adams/Car je ale problém s nízkými rychlostmi. Pokud je rychlost menší než 5 km/h, tak analýza hned na začátku upozorní, že navolená rychlost je pro vozidlo příliš nízká. Jestliže se zvolí rychlost od 5 km/h do 10 km/h, nastává chyba při výpočtu a program tzv. „zamrzne“. 10 km/h a výše už není pro software žádný problém.

V zadávacím formuláři se sestupně vyplňuje sestava vozidla (Full-Vehicle Assembly), název analýzy (Output Prefix), čas (End Time), počet kroků (Number of Steps), simulační mód (Simulation Mode), testovací trať (3D Road Data File), rychlost (Initial Velocity), převodový stupeň (Initial Gear), který se v nových verzích může spočítat automaticky, a kontrola rychlosti (Speed Control), kde se buď vybere externí soubor spočítané rychlosti z Path Optimization, nebo se podélné zrychlení a startovací čas zadá ručně. Zadané vstupní údaje jsou znázorněny na obr. 32. Čas simulace je nastaven na 10 s do rychlosti 50 km/h. Nad tuto rychlost se čas simulace zkrátil na 5 s. Počet kroků je zvoleno 300.



Obrázek 32: Formulář 3D Road



### 12.6.2 Simulace jízdy po polní cestě

Simulace jízdy na polní, nezpevněné trati je provedena rychlostí 35 km/h oběma typy tlumičů a v různých režimech nastavení.

Použita je analýza 3D Road. Čas simulace je 10 s a počet kroků je nastaven na 300. Ručně zadávaná kontrola rychlosti, kde Longitudinal Accel (podélné zrychlení), je stanoven na 0 – vozidlo nezrychluje a Start Time (startovací čas) rovněž na 0.

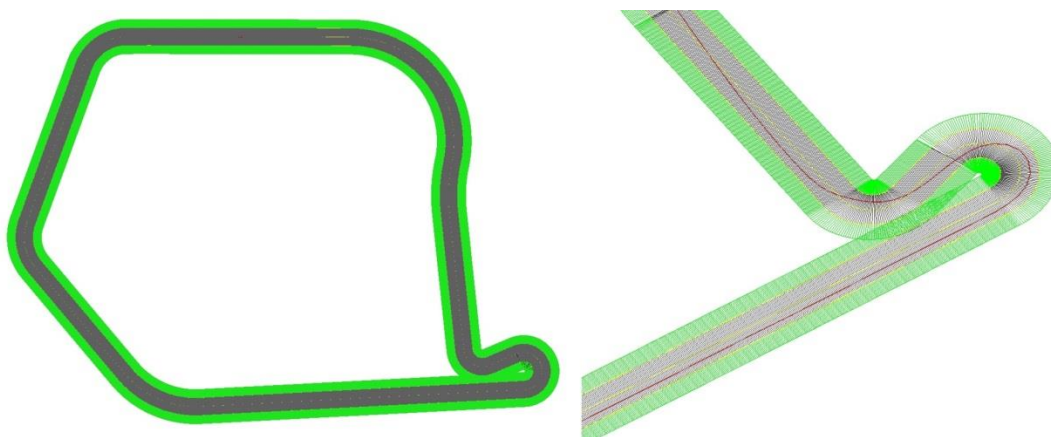
### 12.6.3 Simulace jízdy na závodní trati

Jak již bylo zmíněno, simulace jízdy po složitějších silnicích je prostřednictvím příkazu Smart Driver.

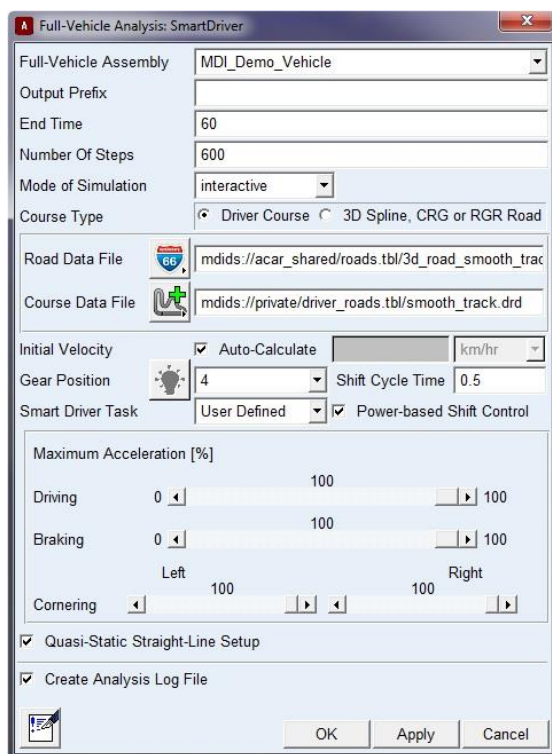
Pro zjištění optimální jízdní stopy je použit příkaz Path Optimization. Obsahuje následující pole k vyplnění:

- Input Road Data File (cesta, která má být optimalizována)
- Output Path File Name (název výstupu)
- Vehicle Width (šířka vozidla) – zvolena šířka 2 m
- Maximum Iterations (počet iteračních kroků) – nadefinováno 500 kroků
- Path Calculation Precision (přesnost výpočtu) – 0,001
- Track/Path Width (šířka tratě) – 10 m
- Path Point Spacing (rozteč bodů cesty) – zvolena vzdálenost po 5 m

Začátek zadávacího formuláře Smart Driver je podobný 3D Road - vyplňuje se sestava vozidla (Full-Vehicle Assembly), název analýzy (Output Prefix), čas (End Time), počet kroků (Number of Steps), simulační mód (Simulation Mode). Následuje část specifická pro Smart Driver. Zde se zadává typ analýzy (Course Type), v níž se vybere možnost s optimalizací cesty (Driver Course) nebo bez ní (3D Spline, CRG or RGR Road), poté rychlost (Initial Velocity), zadávána ručně nebo automaticky vzhledem k trati a možností automobilu (Auto-Calculate), převodový stupeň (Initial Gear). Poslední část je zaměřena na úkol chytrého řidiče (Smart Driver Task). Úkol je buď třeba definovat, zadává se procentuálně agresivita řidiče v akceleraci, brzdění a zatáčení, nebo řidiče limitují schopnosti vozidla. Zadané vstupní údaje jsou znázorněny na obr. 34.



Obrázek 33: Zleva schéma trati Smooth Track a její detail s optimálním průjezdem



Obrázek 34: Formulář Smart Driver

### 12.6.4 ISO Lane Change

Tento test slouží k vyhodnocení ovladatelnosti vozidla. Zadávací formulář je stejný jako u 3D Road, ovšem neobsahuje End Time, protože každý test skončí po projetí dráhy dlouhé 250 m. Velikost kroku je zvolen 0,05. Rychlost 90 km/h na 4. převodový stupeň.

## 12.7 Hodnocení simulací

Ve výše uvedených bodech kapitoly 11 - Vlastní simulované experimenty, jsou popsány všechny požadavky pro simulace a provedení samotných analýz. Jako kritéria jsou brány zejména bezpečnost a jízdní pohodlí, které se odrážejí ve vlastnostech tlumiče. Vstupem je nerovná vozovka, popřípadě překážky. Ty jsou důvodem vzniku svislých dynamických kmitů působících na kmitavou soustavu, tedy vozidlo. Následuje provedení simulací, které zjistí, jak se vůz chová. To jsou příčné síly, rychlosti, zrychlení a relativní odchylky jako výstup ze softwaru.

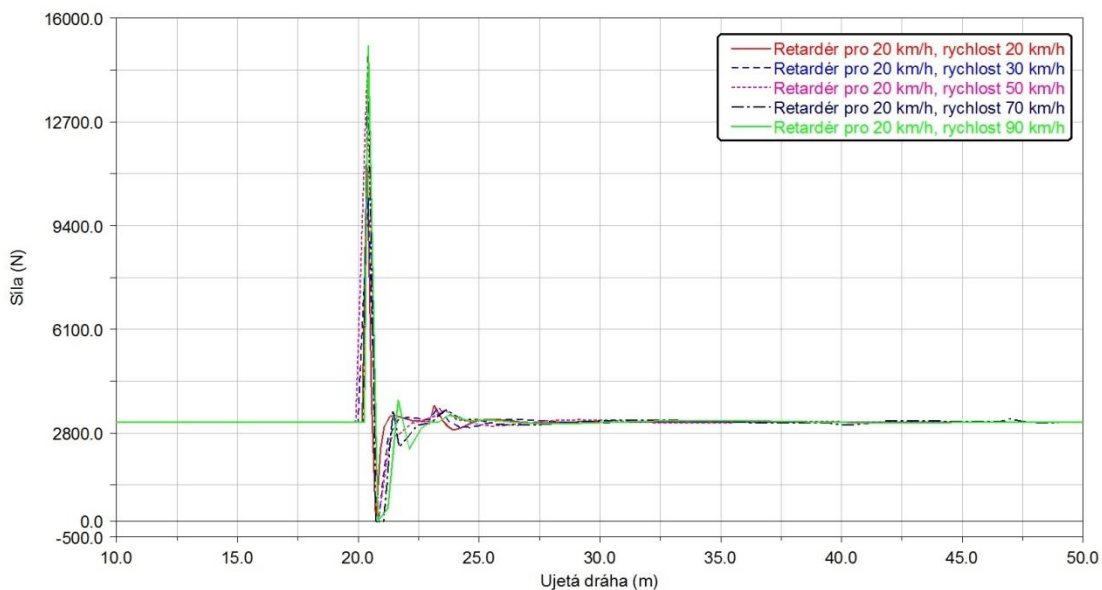


Obrázek 35: Schéma realizace analýzy

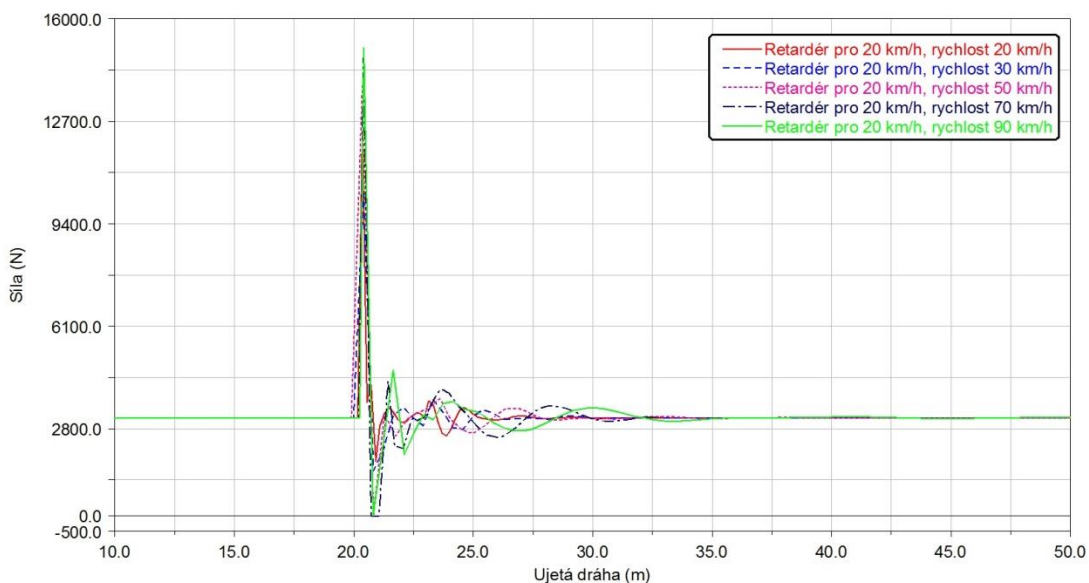
### 12.7.1 Zpomalovací práh pro 20 km/h

Na definovaném retardéru pro 20 km/h je zkoušeno chování ER a MR tlumiče. Oba tlumiče jsou v normálním režimu. Vozidlo projelo několikrát překážku různou rychlostí. Výsledkem jsou grafy chování automobilu při překonávání překážky.

Hodnotí se síla mezi pneumatikou a vozovkou v závislosti na ujeté vzdálenosti. Se vzrůstající rychlostí se příčná síla zvětšuje. Síla 0 N se projevila nejvíce v rychlostech 70 km/h a 90 km/h, kde má nejdelší trvání. Při této síle ztrácí testovaná přední náprava přilnavost a vozidlo se stává neovladatelným. V těchto rychlostech také dochází k delšímu uklidnění tlumičů. Z obou grafů je patrné, že MR tlumič má vyšší hodnoty dokmitání, ale celkové ustálení je kratší než u ER tlumiče.



Obrázek 36: Přejezd přes retardér ER tlumičem

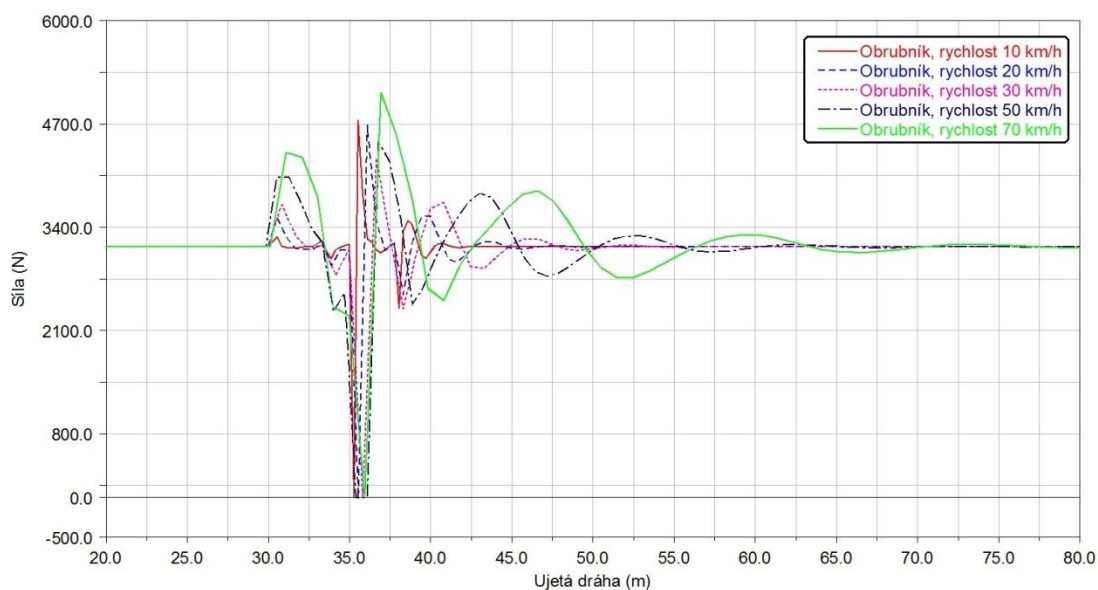


Obrázek 37: Přejezd přes retardér MR tlumičem

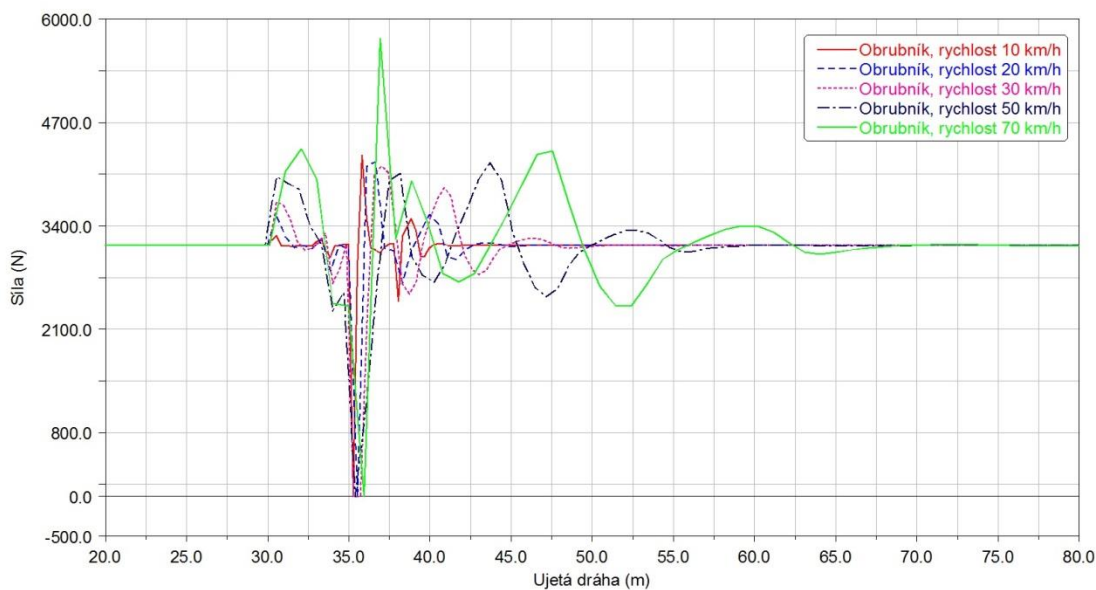
### 12.7.2 Obrubník

Stejně jako v případě zpomalovacího prahu pro 20 km/h je sledována dynamická síla mezi kolem a vozovkou. V nejvyšším bodě se překážka nachází 10 cm nad úrovní vozovky. Oba tlumiče jsou v normálním režimu.

Překážka je situována jako rampa, proto jsou záchvěvy i před samotným sjetím z obrubníku. Tyto záchvěvy ve 30 m jsou způsobeny najetím na rampu. Následuje prudké snížení a následný vzrůst síly způsobený sjetím z překážky. Se zvyšující rychlostí se příčná síla zvětšuje a opět se v jednom okamžiku přibližují nulové hodnotě. V poslední fázi se tlumič snaží uklidnit a vrátit do výchozího stavu. ER tlumič pracuje s nižšími silami, ale ustálení tlumiče probíhá delší dobu.



Obrázek 38: Přejezd přes obrubník ER tlumičem

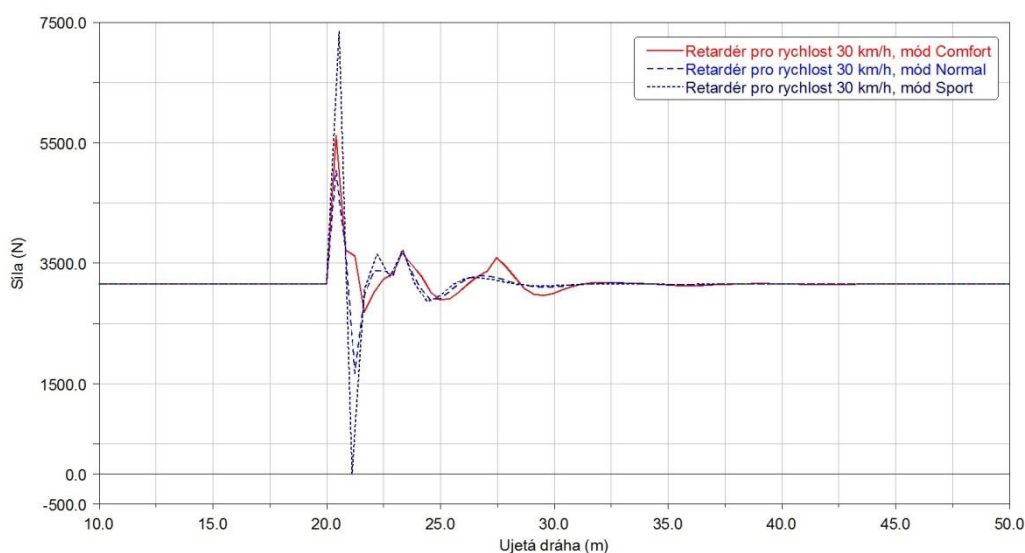


Obrázek 39: Přejezd přes obrubník MR tlumičem

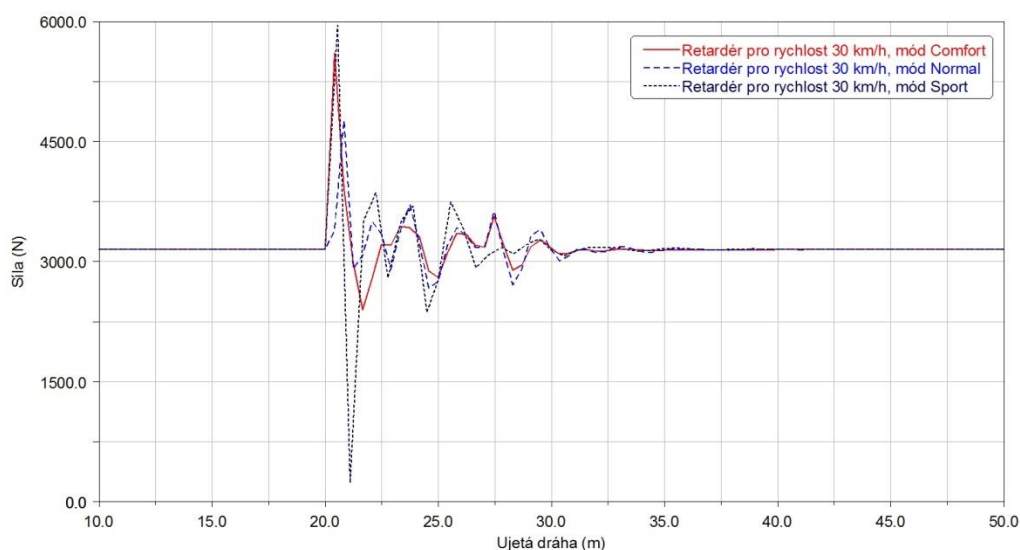
### 12.7.3 Zpomalovací práh pro 30 km/h

Na vytvořeném retardéru je zkoušeno chování obou tlumičů. Vozidlo projelo několikrát překážku stejnou rychlostí, ale pokaždé v jiném režimu jízdy (Comfort, Normal a Sport). Výsledkem jsou grafy chování automobilu v různých módech nastavení tlumiče.

Hodnotí se síla mezi pneumatikou a vozovkou v závislosti na ujeté vzdálenosti. Komfortní nastavení způsobí rozhoupání automobilu a uklidnění přijde až za delší dobu, než v případě režimů Normal a Sport. Hlavně režim Sport pohltí síly již v počátcích a tlumič se rychleji vrátí do výchozí pozice. Automobil se v tomto režimu jeví řidiči jako tvrdší. Křivka sportovního režimu ER tlumiče se dotýká hodnoty 0N, tzn., že by v tomto okamžiku ztratil řidič kontrolu nad vozidlem. Jelikož je simulace prováděna rychlostí, pro kterou je retardér určen a kladná síla je také rapidně vyšší, než u ostatních režimů, jedná se nejspíše o nepřesnost při výpočtu.



Obrázek 40: Přejezd přes retardér ER tlumičem v různých režimech

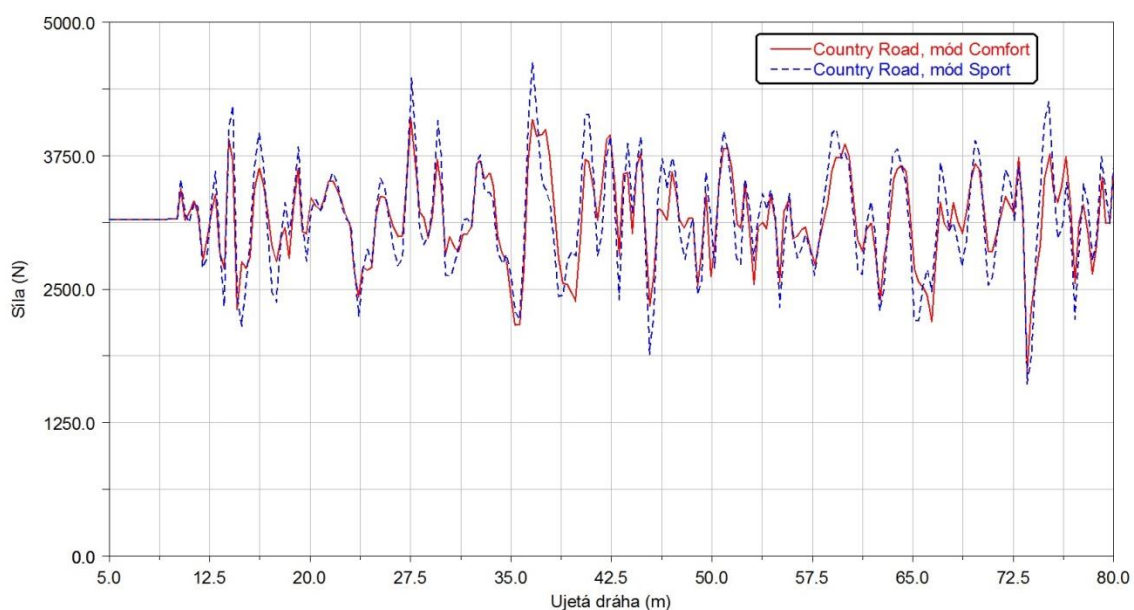


Obrázek 41: Přejezd přes retardér MR tlumičem v různých režimech

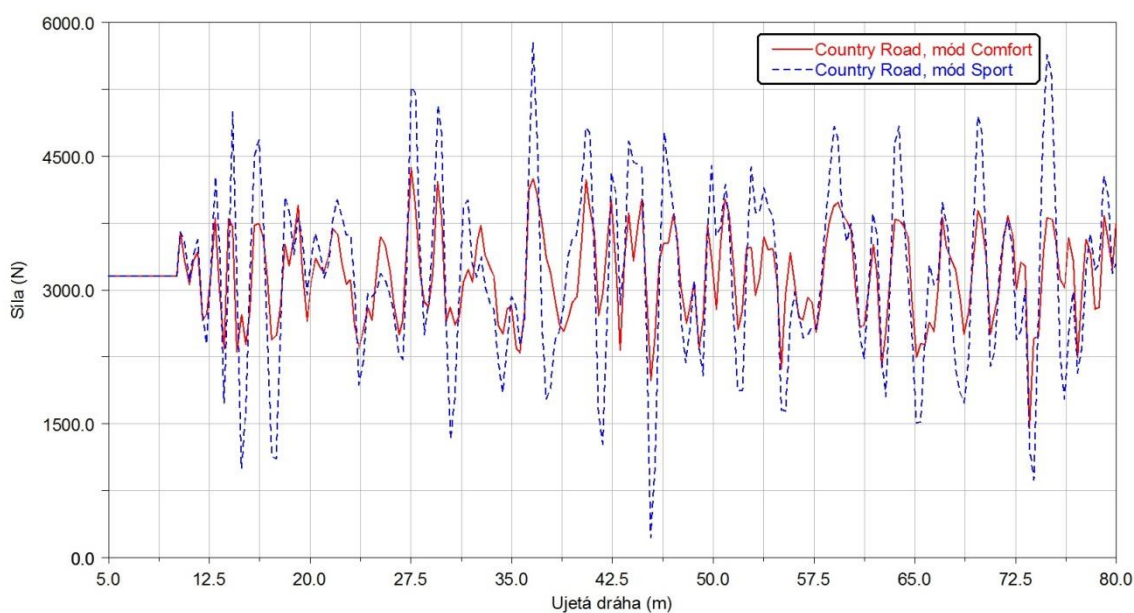
### 12.7.4 Polní cesta

Na zmíněné polní cestě je uvedena rozdílnost režimů Sport a Comfort obou tlumičů. Automobil jel po trati rychlostí 35 km/h.

Hodnotí se síla mezi pneumatikou a vozovkou v závislosti na ujeté vzdálenosti. Síla 0 N se při dané rychlosti na této trati neprojevila. U MR tlumiče je na první pohled vidět větší rozdílnost obou módů. U sportovního režimu dochází k rychlejšímu uklidnění, ale pracuje s vyššími silami. U módu Comfort je tomu naopak.



Obrázek 42: Porovnání režimů ER tlumiče na nerovné silnici při 35 km/h

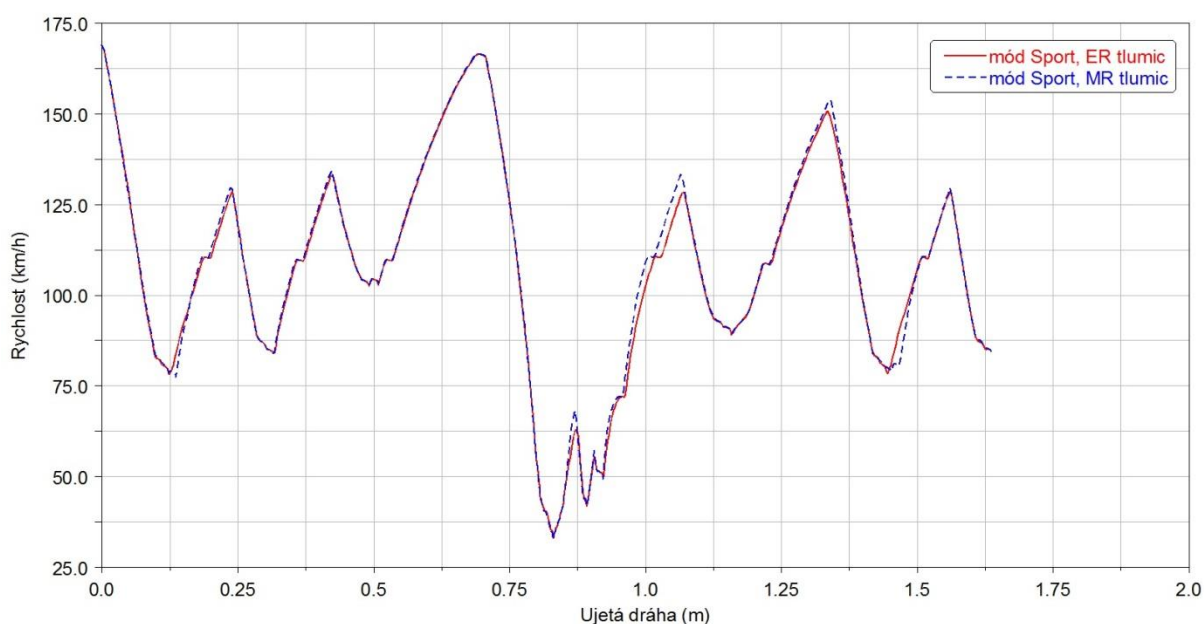


Obrázek 43: Porovnání režimů MR tlumiče na nerovné silnici při 35 km/h

### 12.7.5 Závodní trať

Tato simulace na Smooth Track je zde uvedena pro představení dalších možností softwaru. Analýza probíhala 60 s, různou rychlostí docílenou pomocí Smart Driveru, v němž se nastaví sportovní chování automobilu reakcemi řidiče na maximum (viz. Obrázek 34). Ujetá dráha při tomto čase je cca 1,6 km. Křivky grafu se začínají lišit při vjetí do zatáčky zvané „vracečka“ (viz. Obrázek 33).

Znázorněna je rychlost automobilu v závislosti na ujeté vzdálenosti. Jelikož odlišnost křivek může být způsobena, kromě tlumičů, dalšími vlivy, nebude se tento graf dále hodnotit.

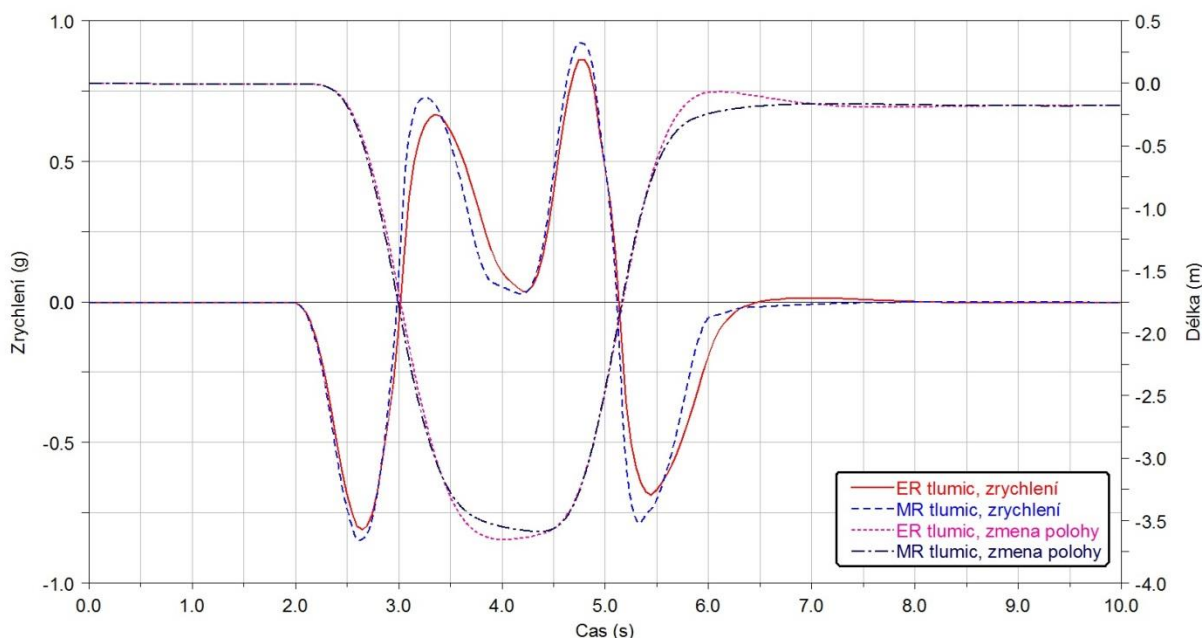


Obrázek 44: Projetí závodního okruhu

### 12.7.6 ISO Lane Change

Graf popisuje rozdílnost „losího“ testu ve sportovních režimech obou tlumičů při rychlosti 90 km/h. Zároveň odlišnost polohy vozidla během manévru. Řidič vozidla si při vyšších rychlostech pravděpodobně zvolí sportovní režim jízdy, proto byl záměrně použit i v této simulaci. V simulaci je použito příčné zrychlení s tíhovým účinkem, tzn. hodnota zrychlení je udávána v „g“, které je cca  $9,81 \text{ m/s}^2$ .

U MR tlumiče jsou větší hodnoty příčného zrychlení, ale do rovnovážného stavu se dostane dříve. Stejně je to i u polohy vozidla. Automobil s ER tlumiči se mezi 5 a 6 sekundou zakymácí na druhou stranu vozovky oproti vozidlu s MR tlumiči, které se pozvolna vrátí do původního směru. Protože má automobil těžiště velmi nízko (jedná se o sportovní vůz), celkové hodnoty zrychlení nejsou tak velké. Vozidlo má výbornou stabilitu.



Obrázek 45: Porovnání ER a MR tlumiče v losím testu



## 13 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo provést rešerši v oblasti semiaktivních a aktivních automobilových tlumičů se zaměřením na jejich současný stav a budoucí vývoj. Zjištěním bylo, že semiaktivní tlumiče nabízejí spolehlivost srovnatelnou s pasivními systémy a zároveň zachovávají všestrannost a přizpůsobivost plně aktivních systémů, aniž by potřebovaly velké zdroje energie. Semiaktivní a aktivní tlumiče umožňují změnit během jízdy charakteristiku tlumení, aktivní pak i vyvodit sílu v libovolném směru, bez ohledu na směr budící síly, což je jejich velkou předností. Budoucí vývoj semiaktivních tlumičů spočívá ve zrychlení změny charakteristiky tlumení, která je dnes okolo 10 ms. U magnetoreologického tlumiče se dosahuje už 5 ms. Další vývoj aktivních tlumičů se více zaměřuje na elektrickou soběstačnost a počítá se s nimi jako s hlavními tlumícími systémy v elektrických a hybridních automobilech.

Praktická část se měla zaměřit na měření charakteristik tlumičů a jejich následné použití v simulačních experimentech. Bohužel se nepodařilo toto testovací zařízení po rekonstrukci uvést do provozu, a proto se místo naměřených charakteristik musely vzít ideální charakteristiky tlumičů z literatury. Laboratorní testovací zařízení se zde pouze popsalo. V budoucnosti se s ním ale počítá pro testování magnetoreologického a pasivního tlumiče, které má Katedra konstruování strojů Západočeské univerzity k dispozici.

Poslední část práce se orientovala na modelování dynamiky vozidel v Softwaru MSC Adams/Car. Byly zde popsány jednotlivé funkce softwaru, jeho přednosti a silné stránky. Následně byl sestaven model automobilu, na kterém se simulovaly vlastnosti dvou tlumičů. Byly vybrány ideální charakteristiky pasivního a semiaktivního tlumiče, dále provedeno přepracování těchto charakteristik do programu MSC Adams/Car. Poté vytvořeny zkušební překážky a tratě, na kterých se realizovalo testování těchto tlumičů. Výsledky simulačních experimentů byly diskutovány v práci.

## 14 Seznam použitých zdrojů

- [1] DIXON, John C. *The shock absorber handbook*. 2nd ed. Chichester, England: John Wiley, © 2007, xi, 415 p. ISBN 04-705-1700-X.
- [2] Co je tlumič pérování automobilu. *Tlumiče pérování, pružiny, sady - Tlumiče PEMA* [online]. © 2010 - 2013 [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: <http://www.tlumice-pema.cz/cs/co-je-tlumic-perovani.html>
- [3] Aktivní tlumení: s lineárním motorem a možnosti jeho řízení. In: *Aktivní tlumení s lineárním motorem a možnosti jeho řízení* [online]. 2009 [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: [http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2009/2009\\_020\\_01.pdf](http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2009/2009_020_01.pdf)
- [4] The Car Suspension Bible page 1 of 5. *Car Bibles* [online]. © 1994 - 2013 [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: [http://www.carbibles.com/suspension\\_bible.html](http://www.carbibles.com/suspension_bible.html). Obrázek ve formátu JPG. Dostupné z: <http://www.carbibles.com/images/macphersonstrut.jpg>.
- [5] The Car Suspension Bible page 1 of 5. *Car Bibles* [online]. © 1994 - 2013 [cit. 2013-12-09]. Dostupné z: [http://www.carbibles.com/suspension\\_bible.html](http://www.carbibles.com/suspension_bible.html)
- [6] VLK, František. *Podvozky motorových vozidel: pneumatiky a kola, zavěšení kol, nápravy, odpružení, řídicí ústrojí, brzdové soustavy*. 1. vyd. Brno: Nakladatelství a vydavatelství Vlk, 2000, 392 s. ISBN 80-238-5274-4.
- [7] AutoPROFITEAM. *Podvozkové centrum APM Bilstein - 9. díl: Tlumiče* [online]. © 2004 [cit. 2013-12-09]. Dostupné z: <http://www.autoprofiteam.cz/article.php?artid=670>. Obrázek ve formátu jpg. Dostupné z: <http://www.autoprofiteam.cz/podvozky/9/03.jpg>.
- [8] GUGLIELMINO, Emanuele. *Semi-active suspension control: improved vehicle ride and road friendliness*. London: Springer, © 2008, xvi, 294 p. ISBN 978-184-8002-319.
- [9] Podvozky vozidel a jejich vliv na bezpečnost. In: *Bezpečnost vozidel silničního provozu* [online]. © 2013 [cit. 2013-12-10]. Dostupné z: <http://www.vutbr.cz/usi/dokumenty/dokumenty-ke-stazeni-f23776/bezpecnost-vozidel-silnicniho-provozu-materialy-k-predmetu-d75943/01-podvozky-pdf-p67167>
- [10] LÁNÍK, Ondřej. CDC: aktivní tlumiče letos našly cestu do běžných aut!. *Auto.cz* [online]. 2004 [cit. 2013-12-10]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/cdc-aktivni-tlumice-letos-nasly-cestu-do-beznych-aut-16717>

- [11] CarsCDC® - The System for Both Axles. *ZF Friedrichshafen AG* [online]. © 2000-2009 [cit. 2013-12-10]. Dostupné z: [http://www.zf.com/corporate/en/products/product\\_range/cars/cars\\_cdc.shtml](http://www.zf.com/corporate/en/products/product_range/cars/cars_cdc.shtml). Obrázek ve formátu png. Dostupné z: [http://www.zf.com/media/media/productfinder\\_media/cars/cars\\_suspension\\_technology\\_cdc/img\\_18/CDC-Daempfer\\_mit\\_externem\\_Ventil\\_IMG\\_360x270.png](http://www.zf.com/media/media/productfinder_media/cars/cars_suspension_technology_cdc/img_18/CDC-Daempfer_mit_externem_Ventil_IMG_360x270.png).
- [12] Magnetorheological damper. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-02-12]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetorheological\\_damper](http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetorheological_damper)
- [13] Automotive - autopriemysel /autoprumysl, strojárstvo/strojrenství. *Magnetoreologický tlumič – novinka v dopravních systémech* [online]. © 2005-2007 [cit. 2013-12-10]. Dostupné z: [http://www.autopriemysel.sk/index.php?option=com\\_content&task=view&id=5919&Itemid=118](http://www.autopriemysel.sk/index.php?option=com_content&task=view&id=5919&Itemid=118)
- [14] Завтра туриста. *Авторевю, автомобили, краш-тесты, ресурсные тесты, сравнительные тесты* [online]. © 1990-2013 [cit. 2013-12-10]. Dostupné z: <http://www.autoreview.ru/archive/2006/13-14/auditt/>
- [15] Active suspension. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-02-12]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Active\\_suspension](http://en.wikipedia.org/wiki/Active_suspension)
- [16] FIJALKOWSKI, B T. *Automotive mechatronics: operational and practical issues*. New York: Springer, 2011, p. cm. ISBN 978-940-0711-822.
- [17] Mercedes-Benz SL: Jak funguje Active Body Control (video). *Auto.cz* [online]. 2012 [cit. 2013-12-10]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/mercedes-benz-active-body-control-video-68378>
- [18] AutoHex diagnostic scanner and information about Mercedes benz 216 Suspension system. *MicroTronik* [online]. © 2000 [cit. 2013-12-10]. Dostupné z: [http://www.microtronik.com/mercedes\\_benz\\_216\\_suspension\\_233.html](http://www.microtronik.com/mercedes_benz_216_suspension_233.html)
- [19] Bose: aktivní podvozek nové generace. *AUTO.CZ* [online]. 2004 [cit. 2013-12-10]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/bose-aktivni-podvozek-nove-generace-16657>
- [20] Bose: magnetické tlumiče pro dokonalou jízdu. *AutoRevue.cz* [online]. 2005 [cit. 2013-12-10]. Dostupné z: [http://www.autorevue.cz/bose-magneticke-tlumice-pro-dokonalou-jizdu\\_2](http://www.autorevue.cz/bose-magneticke-tlumice-pro-dokonalou-jizdu_2)
- [21] *Bose Worldwide - Contacts* [online]. © 2006 - 2013 [cit. 2013-12-10]. Dostupné z: <http://www.bose.com/>. Obrázek ve formátu jpg. Dostupné z: [http://www.bose.com/images/learning/lc\\_susp\\_frontcorner.jpg](http://www.bose.com/images/learning/lc_susp_frontcorner.jpg).
- [22] Test tlumičů. *Autodíly MJauto* [online]. 2013 [cit. 2013-12-10]. Dostupné z: <http://www.mjauto.cz/html/test-tlumicu.html>

- [23] Test tlumičů. *ContiTrade, BestDrive* [online]. © 2013 [cit. 2013-12-10]. Dostupné z: <http://www.bestdrive.cz/sluzby/test-tlumicu.html>
- [24] Systém kontroly účinku tlumičů pérování v STK. In: *Infobanka MDCR - InfoBanka výzkumu Ministerstva dopravy* [online]. 2010 [cit. 2013-12-10]. Dostupné z: [www.mdcr-vyzkum.infobanka.cz/DownloadFile/12899.aspx](http://www.mdcr-vyzkum.infobanka.cz/DownloadFile/12899.aspx)
- [25] VLK, František. *Dynamika motorových vozidel: jízdní odpory, hnací charakteristika, brzdění, odpružení, říditelnost, ovladatelnost, stabilita*. 1. vyd. Brno: VLK, 2000, 434 s. ISBN 80-238-5273-6.
- [26] Budou tlumiče pérování nabíjet akumulátory automobilů?. *Autoforum.cz* [online]. 2013 [cit. 2013-12-10]. Dostupné z: <http://www.autoforum.cz/technika/budou-tlumice-perovani-nabijet-akumulatory-automobilu/>
- [27] Budou tlumiče pérování nabíjet akumulátory automobilů?. *Autoforum.cz* [online]. 2013 [cit. 2014-02-12]. Dostupné z: <http://www.autoforum.cz/technika/budou-tlumice-perovani-nabijet-akumulatory-automobilu/>. Obrázek ve formátu jpg. Dostupné z: [http://www.autoforum.cz/tmp/magazin/zi/ZF\\_Levante\\_tlumic\\_dobijeci\\_Perex\\_503\\_0.jpg](http://www.autoforum.cz/tmp/magazin/zi/ZF_Levante_tlumic_dobijeci_Perex_503_0.jpg).
- [28] Inteligentní tlumiče vyrábějící elektrickou energii. *Hybrid.cz* [online]. 2011 [cit. 2013-12-10]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/inteligentni-tlumice-vyrabejici-elektrickou-energii>
- [29] Inteligentní tlumiče vyrábějící elektrickou energii. *Hybrid.cz* [online]. 2011 [cit. 2014-02-12]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/inteligentni-tlumice-vyrabejici-elektrickou-energii>. Obrázek ve formátu jpg. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/img/tlumic.jpg>.
- [30] Mercedes-Benz Magic Body Control. *Auta.cz* [online]. © 2011 [cit. 2014-03-03]. Dostupné z: <http://www.auta.cz/clanek/mercedes-benz-magic-body-control#.UxTVGfI5NSI>
- [31] Je nový Mercedes třídy S chytrý jako slepice?. *Autoweb.cz* [online]. © 2013 [cit. 2014-03-03]. Dostupné z: <http://www.autoweb.cz/je-novy-mercedes-tridy-s-chytry-jako-slepice/>
- [32] MAGIC BODY CONTROL. *Mercedes-Benz.com* [online]. 2013 [cit. 2014-03-03]. Dostupné z: <http://www5.mercedes-benz.com/en/innovation/magic-body-control-s-class-suspension/>. Obrázek ve formátu jpg. Dostupné z: [http://asset8.www5.mercedes-benz.com/media/image/gallery/Artikelstill-MAGIC-BODY-CONTROL\\_02\\_1230x454.jpg](http://asset8.www5.mercedes-benz.com/media/image/gallery/Artikelstill-MAGIC-BODY-CONTROL_02_1230x454.jpg).
- [33] *Zařízení pro testování automobilových tlumičů*. Plzeň, 2013.
- [34] *Aktivní systémy podvozků vozidel*. Plzeň, 2012. Diplomová. Západočeská univerzita v Plzni.

- [35] *Adams* [online]. Copyright 2014 [cit. 2014-06-01]. Dostupné z: <http://www.mscsoftware.com/product/adams>
- [36] *Adams 2013.1*. Quadralay Corporation, Copyright 2000-2006.
- [37] Zpomalovací práh průběžný - 20 km/h ( 230B ). *BREVA Servis s.r.o. - Deskové Podlahy* [online]. 2011 [cit. 2014-06-07]. Dostupné z: <http://www.deskovepodlahy.cz>. Obrázek ve formátu jpg. Dostupné z: <http://www.deskovepodlahy.cz/retardery-zpomalovaci-prahy-zpomalovaci-polstare/495-zpomalovaci-prah-prubezny-230b.html>.
- [38] Take Me Home, Country Road. *Ndneighborhood* [online]. Copyright 2014 [cit. 2014-06-07]. Dostupné z: <http://www.ndneighborhood.com>. Obrázek ve formátu jpg. Dostupné z: <http://www.ndneighborhood.com/blog/ndhutchlax03/sep-23-2013/take-me-home-country-road-or-i-55-and-i-80>.
- [39] ISO Lane Change Test. *VEHICO* [online]. © 2014 [cit. 2014-06-21]. Dostupné z: <http://www.vehico.com/index.php/en/applications/iso-lane-change-test>
- [40] AL., S.M. Savaresi ... [et]. *Semi-active suspension control design for vehicles*. 1e éd. Amsterdam: Butterworth-Heinemann/Elsevier, 2010. ISBN 978-008-0966-786.