



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

SEMIAKTIVNÍ SYSTÉM ODPRUŽENÍ VOZIDLA

VEHICLE SEMI-ACTIVE SUSPENSION SYSTEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Salcburger

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Blaťák, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Bc. Martin Salcburger
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Automobilní a dopravní inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Ondřej Blaťák, Ph.D.
Akademický rok:	2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Semiaktivní systém odpružení vozidla

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Systém odpružení (tlumení) vozidla je často kompromisem mezi jízdním pohodlím a jízdní bezpečností. Je tak výhodné, aby systém odpružení za jízdy měnil své parametry a na základě elektronického řízení rychle automaticky reagoval na vzniklé jízdní situace a přizpůsobil jim své nastavení.

Cíle diplomové práce:

1. Sestavte čtvrtinový model vozidla v programu Matlab/Simulink.
2. Sestavte základní algoritmy pro řízení semi-aktivního systému odpružení vozidla - sky hook, ground hook, apod.
3. Na čtvrtinovém modelu vozidla porovnejte tyto základní algoritmy řízení ve vztahu k jízdnímu komfortu a jízdní bezpečnosti vozidla.
4. Sestavte vhodný řídicí algoritmus semi-aktivního systému vozidla s cílem dosáhnout dobrého jízdního komfortu.
5. Prověřte možnost využití sestavených řídicích algoritmů pro použití v programu Adams/Car.

Seznam literatury:

- Milliken, W. F. (1995): Race car vehicle dynamics. SAE International, Warrendale.
- Reimpell, J. (2001): The Automotive Chassiss. Butterworth - Heinemann, Oxford.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty



ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je sestavit algoritmy řízení semi-aktivního systému odpružení pro čtvrtinový model vozidla, porovnat jejich funkci vzhledem k jízděmu komfortu a jízděmu bezpečnosti. Následně prověřit sestavené řídicí algoritmy pro použití v programu Adams. Výsledkem práce je studie vlivu semi-aktivního řízení systému odpružení na chování vozidla.

KLÍČOVÁ SLOVA

Tlumič, semi-aktivní, tlumící síla, algoritmus řízení, Matlab, Adams

ABSTRACT

The aim of this diploma thesis is to design algorithms of semi-active suspension system for a quarter car model, compare their function with respect to ride comfort and drive safety. Consequently, setup control algorithms for using in the Adams software. The result of this thesis should be to determine the effect of semi-active suspension control system on vehicle behavior.

KEYWORDS

Damper, semi-active, damping force, control algorithm, Matlab, Adams





BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SALCBURGER, M. *Semiaktivní systém odpružení vozidla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 73 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Blaťák, Ph.D.





ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Ondřeje Blatáka, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 27. května 2016

.....

Martin Salcburger





PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Ondřeji Blaťákovi, Ph.D. a panu Ing. Janu Fojtáškoví za cenné připomínky a rady při vypracování této diplomové práce. Také bych rád poděkoval celé své rodině za podporu při studiu.





OBSAH

Úvod	11
Cíle práce	11
1 Tlumiče	12
1.1 Typy tlumičů	13
1.1.1 Dvouplášťový teleskopický tlumič	13
1.1.2 Jednoplášťový teleskopický tlumič	14
1.1.3 PSD tlumiče	16
1.1.4 CDC tlumiče	17
1.1.5 Magnetoreologické tlumiče	18
1.1.6 Tlumiče s lineárním elektromotorem (Bose)	19
1.2 Dělení dle způsobu řízení	20
1.2.1 Pasivní	20
1.2.2 Semi-aktivní	21
1.2.3 Aktivní	21
2 Čtvrtinový model vozidla	22
2.1 Výpočet čtvrtinového modelu	22
2.2 Výpočet síly pod pneumatikou	25
2.3 Výpočet optimálního tlumení a tuhosti	25
2.4 Algoritmy řízení	26
2.4.1 Skyhook Method	26
2.4.2 Limited Relative Displacement Control Method	27
2.4.3 Skyhook Control Method	27
2.4.4 Modified Skyhook Control Method	28
2.4.5 Další algoritmy řízení	28
3 Model v programu MATLAB/Simulink	29
3.1 Postup modelování	30
4 Model v programu ADAMS	36
4.1 Postup modelování	37
5 Komunikace mezi Matlab/Simulink – Adams/View	39
5.1 Discrete Co-simulation	39
5.2 External Function Evaluation (XFE)	46
6 Simulace	49
6.1 Validace výsledků	51
6.2 Prověření řídicích algoritmů vzhledem k jízdnímu komfortu a jízdní bezpečnosti	52
6.2.1 Metodika měření	52



6.2.2	Výsledky	53
6.2.3	Zhodnocení výsledků	57
6.3	Vliv změny poměru mezi minimální a maximální konstantou tlumení	59
6.3.1	Metodika měření	59
6.3.2	Výsledky	59
6.4	Vliv změny maximální a minimální konstanty tlumení při zachování poměru	63
6.4.1	Metodika měření	63
6.4.2	Výsledky	63
6.5	Zhodnocení výsledků z kapitol 6.3 a 6.4.....	66
Závěr		68
Seznam použitých zkratk a symbolů		71
Seznam příloh		73



ÚVOD

Automobil byl od počátku brán v potaz jako dopravní prostředek určený pro přepravu osob a materiálů. Samotnému automobilu však předcházela vývoj a konstrukce spalovacího motoru, který by byl dostatečně výkonný, aby mohl být použit pro pohon vozidla, měl rozměry odpovídající zástavbovým rozměrům v karoserii a v neposlední řadě aby byl bezpečný z hlediska konstrukce a používaných provozních kapalin. Automobil se stal významným objevem a pokrokem v historii lidstva, který do současné doby prodělal mnoho změn, které se týkaly především konstrukce, designu, bezpečnosti a jízdních vlastností.

Ve většině zemí světa se stal automobil nepostradatelnou součástí života obyvatel. Uživatelé při koupi nového automobilu mohou vybírat ze široké nabídky výrobců a také z široké nabídky výbavy. Nabídka se liší jednotlivými typy karoserie (hatchback, SUV, combi, užitková vozidla a další), typy tříd (nižší střední třída, střední třída, luxusní automobily a jiné), prvky volitelné a povinné výbavy, bezpečností, a taky designem, který se v čím dál větším měřítku ukazuje jako hlavní důvod ke koupi nového automobilu.

Bezpečnost v automobilech se dělí na aktivní a pasivní. Aktivní bezpečnost je taková, která působí ještě před vznikem nehody. Je to tedy ta část výbavy automobilu, která dokáže předcházet, zmírnit nebo zcela zamezit vzniku nehody. Mezi prvky aktivní bezpečnosti se řadí velká část elektronických pomocných systémů, jako je ABS, ESP, aktivní radar, předepínače bezpečnostních pásů a další. Pasivní bezpečnost je takový druh bezpečnosti, která působí až během nárazu a po nehodě. Pasivní bezpečnost tedy nedokáže předejít nehodě, ale má významný vliv na následky nehody, zejména potom na účastníky nehody. Mezi prvky pasivní bezpečnosti se řadí systémy, jako jsou bezpečnostní pásy, airbagy a jiné.

Tlumiče společně se zavěšením mají významný vliv na chování automobilu, stabilitu jízdy, změnu směru jízdy, odezvu na volant a pohodlí posádky. Proto se tlumiče společně se zavěšením automobilu řadí mezi prvky aktivní bezpečnosti, protože zajištění trvalého styku pneumatiky s vozovkou a změna parametrů zavěšení v závislosti na propružení mají významný vliv na bezpečnost a stabilitu vozidla při jízdě. Tlumičům a zavěšení je proto věnována velká část výzkumných prací. Tlumiče přichází s novějšími a sofistikovanějšími systémy zaměřenými na pohodlí a bezpečnost.

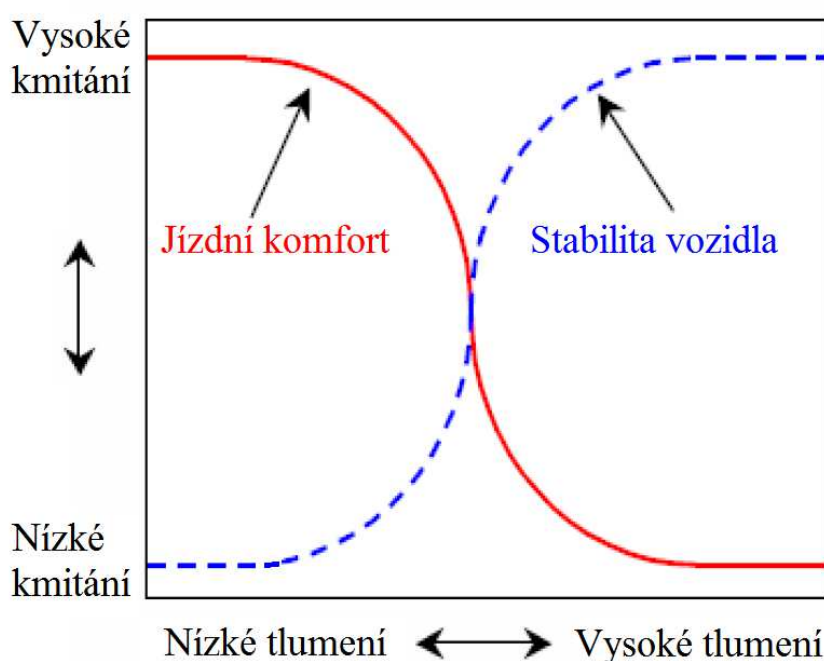
Jízdou po nerovné nebo nezpevněné vozovce se do interiéru přenášejí odezvy na buzení pneumatiky. Tyto otřesy jsou pro lidské tělo nepříjemné a současné systémy zavěšení a tlumení se je snaží minimalizovat a vytvářet komfortní pocit z jízdy. Na druhou stranu musí zajišťovat určitou míru bezpečnosti, tedy schopnosti vozidla manévrovat v nebezpečných situacích. Pro lidské tělo je příjemná frekvence kmitů 1 až 1,3 Hz, která odpovídá frekvenci chůze. Při nižších frekvencích se může u některých lidí projevit tzv. mořská nemoc a vyšší frekvence jsou lidským tělem vnímány jako nepříjemné rychlé kmitání. [5]

CÍLE PRÁCE

Cílem této diplomové práce je zjistit a simulovat chování zavěšení automobilu v případě použití semi-aktivního tlumiče. V první řadě je nutné sestavit čtvrtinový model automobilu a řídicí algoritmy pro řízení semi-aktivního tlumiče. Dále je nutné jednotlivé řídicí systémy otestovat při různých podmínkách jízdy a zjistit který z řídicích algoritmů je nejvhodnější pro použití v automobilu s cílem dosáhnout dobrého jízdního komfortu a jízdní bezpečnost.

1 TLUMIČE

Tlumič je nedílnou součástí dnešních automobilů. Vedle pružin (torzní tyče, válcové, kuželové, soudečkové a jiné), prvků zavěšení, brzd a disků s pneumatikami, popřípadě poloosami (v případě poháněné nápravy) je tlumič hlavním prvkem celého mechanismu zajišťujícím trvalý styk pneumatiky s vozovkou. Tlumič při stlačení nebo naopak při roztahování odebírá ze systému energii a mění ji na jinou formu energie, nejčastěji teplo. [4] Zavěšení bez tlumiče by při přejezdu nerovností způsobilo, že se automobil bude neustále pohupovat nahoru a dolů. Na tlumení systému bez tlumiče se bude podílet pouze materiálové tlumení, tlumení ve vazbách a taky odpor prostředí (nejčastěji odpor vzduchu). I tak ale tlumič zůstává nejvýznamnějším prvkem, který energii odebírá a jeho nastavení a charakteristiky určují chování a ovládání automobilu.



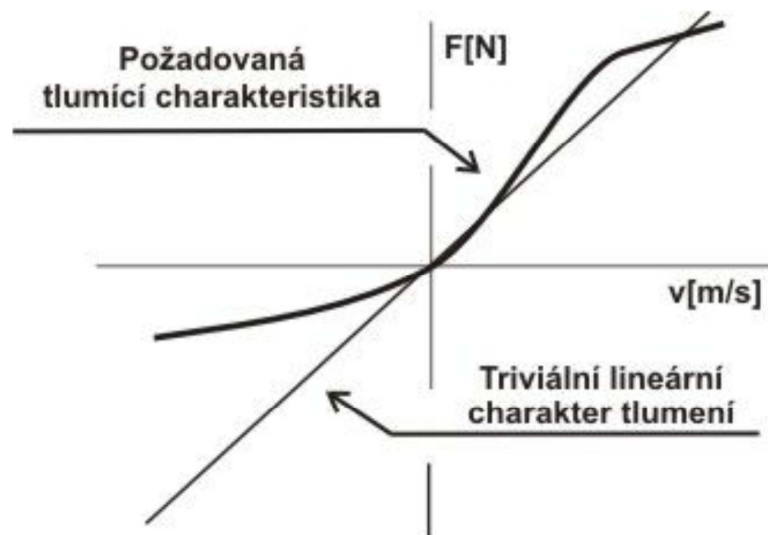
Obr. 1 Jízdní komfort a stabilita vozidla v závislosti na velikosti kmitání [1]

Optimální nastavení tlumičů je velice obtížnou záležitostí. Dnešní moderní tlumiče umožňují nastavení v širokém rozmezí. V současnosti se také uplatňují tzv. adaptivní tlumiče (popřípadě adaptivní podvozek). To jsou tlumiče, které umožňují během jízdy změnu vlastností. Jak je vidět na obrázku 1. při nastavení tlumičů zaměřených na jízdní komfort je potřeba nastavit tlumiče na nižší tlumení při vyšších kmitech způsobených profilem vozovky. Naopak při nastavení vozidla na stabilitu jízdy se vyžaduje vyšší tlumení pro vyšší hodnoty kmitání. Ve středu mezi těmito nastavení je rozmezí, kde tlumič poskytuje určitý jízdní komfort a stabilitu vozidla, není to však optimální nastavení, protože tlumič není schopen zaručit maximální jízdní komfort a stabilitu vozidla současně za všech situací.

Řešením by byla spolupráce s dalšími asistenčními a bezpečnostními prvky vozidla. To by znamenalo, že by vozidlo bylo nastaveno na maximální jízdní komfort a v případě, že by vozidlo na základě získaných informací vyhodnotilo situaci jako kritickou nebo jinak nebezpečnou, pak by jednoduchým přenastavením upravilo konstantu tlumení tlumiče a tím by bylo dosaženo zvýšení stability jízdy.



Funkčnost a chování tlumiče se posuzuje na základě komfortu jízdy posádky. Hlavním parametrem měření je zrychlení, které působí na posádku během přejezdu nerovností. Komfortní jízda automobilu závisí na vhodném tlumení kmitajícího pohybu karoserie. Naopak stabilita jízdy a bezpečnost je závislá na kmitání neodpružených hmot. [2]



Obr. 2 Charakteristika tlumení znázorněná v $F - v$ diagramu [2]

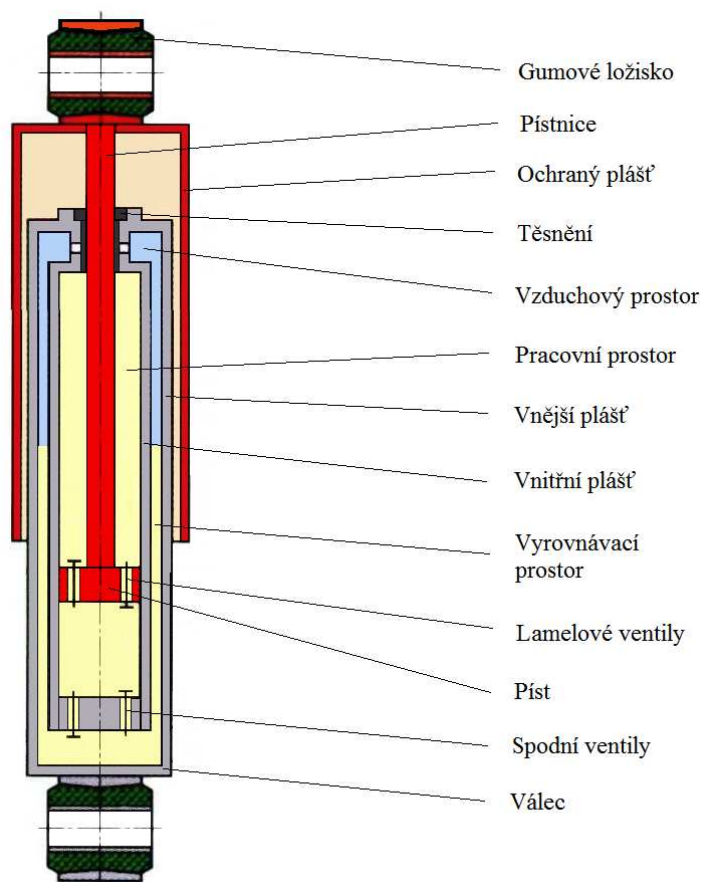
Jednou z předních charakteristik tlumiče je závislost síly na rychlosti zdvihu kola. Dnešní tlumiče jsou konstruovány jako nelineární. Nejčastěji se objevují „progresivní“ nebo „regresivní“ charakteristiky, protože tlumicí síla by měla být co nejmenší při stlačení tlumiče, na druhou stranu musí mít dostatečný tlumicí účinek při roztahování závěsu kola. [2] Jak je vidět na obrázku 2. $F - v$ charakteristika se liší v oblasti zdvihu kola (3. kvadrant) a v oblasti roztahování závěsu kola (1. kvadrant).

1.1 TYPY TLUMIČŮ

1.1.1 DVOUPLÁŠŤOVÝ TELESKOPICKÝ TLUMIČ

Dvouplášťový teleskopický tlumič (nazývaný také dvouplášťový plyno-kapalinový tlumič) má z konstrukčního hlediska, jak sám název napovídá jeden vnitřní a jeden vnější plášť. Vnitřní plášť odděluje pracovní prostor s pístem od vyrovnávacího prostoru, který je naplněn pracovní kapalinou (olejem) i vzduchem. Tlumič se plní vzduchem na požadovaný přetlak. Při pohybu pístu proudí olej přes lamelové ventily umístěné v pístu z jednoho pracovního prostoru do druhého. Vyrovnávací ventily umístěné v dolní části teleskopického tlumiče udržují v pracovních prostorech mírný přetlak a spojují pracovní prostor a vyrovnávacím prostorem. Vyrovnávací prostor má za úkol vyrovnávat skutečné objemové změny v pracovním prostoru. Vzduch ve vyrovnávacím prostoru má dvě funkce. První funkcí je že jeho stlačitelnost vyrovnává tlakové poměry při pohybu pístu a druhou funkcí je vyrovnávání tlaku při změně teploty náplně a stěn teleskopického tlumiče. Schéma dvouplášťového teleskopického tlumiče je na obrázku 3. [4]

Správná funkce dvouplášťového teleskopického tlumiče vyžaduje, aby pracovní prostor byl vyplněn pouze olejem a neobsahoval vzduchový polštář. V takovém případě by tlumič vlivem stlačitelnosti vzduchového polštáře nepracoval správně. Proto se dvouplášťové teleskopické tlumiče montují do vozidel pod úhlem menším než 45° , měřeném mezi osou tlumiče a svislicí rovnoběžnou s příčnou rovinou vozidla. Pokud by tento úhel byl větší než 45° mohlo by dojít k přesunu části vzduchu z vyrovnávacího prostoru do pracovního prostoru. [4]



Obr. 3 Schéma teleskopického dvouplášťového tlumiče [3]

Hlavním problémem dvouplášťového teleskopického tlumiče je tzv. zpěnění oleje. K tomu dochází, když olej není oddělen od vzduchové náplně. Při pracovním cyklu a za zvýšené teploty dochází ke smísení vzduchu a oleje za následným vznikem pěny, která se může dostat až přes spodní okraj a ventily do pracovního prostoru. Pro zmenšení pěnivosti se tlumič plní na požadovaný přetlak. [4]

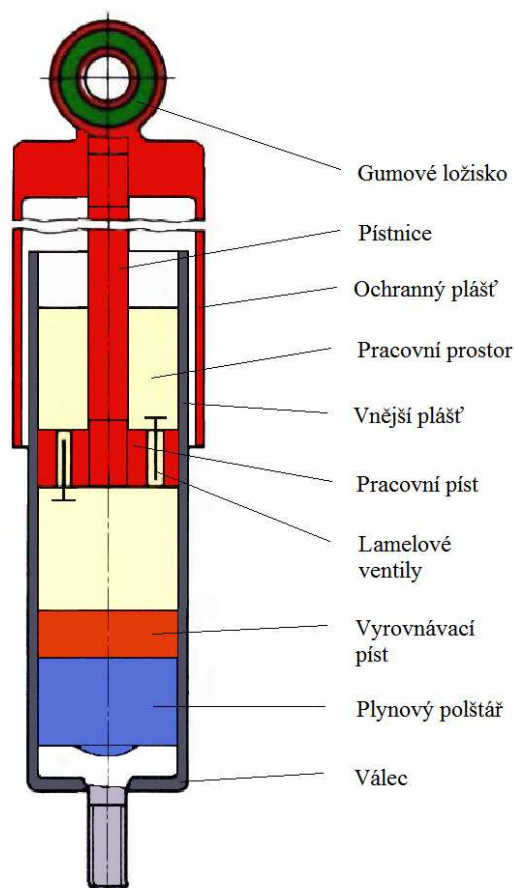
1.1.2 JEDNOPLÁŠŤOVÝ TELESKOPICKÝ TLUMIČ

Tento druh plyno-kapalinového tlumiče se vyznačuje tím, že jeho konstrukce má pouze jeden vnější plášť. Uvnitř pláště je pracovní prostor s pístem a prostor s plynem, který je od zbytku oddělen volně plovoucím pístem. Píst je vybaven lamelovými ventily. Při pohybu pístu proudí kapalina z prostoru nad pístem do prostoru pod ním a obráceně. Prouděním přes ventily v pístu vzniká hydraulický odpor a dochází k tlumení kmitání závěsu kola. Pružná plynová



náplň je plněna přetlakem 0,3 až 0,6 MPa. Přetlak zajišťuje lepší funkci tlumiče a snižuje riziko tvoření vzduchových bublin v kapalině. Píst při pohybu vykazuje změnu poměru tlaku mezi prostorem nad pístem a pod ním, ale tato hodnota poměru nikdy nepřesáhne kritickou hodnotu. [4]

Jednoplášťové teleskopické tlumiče se vyrábějí ve více konstrukčních variantách, mohou být jednoplášťové s odrazovou stěnou, s uklidňovacím pístem nebo varianta s plovoucím pístem, která je zobrazena na obrázku 3. [4]

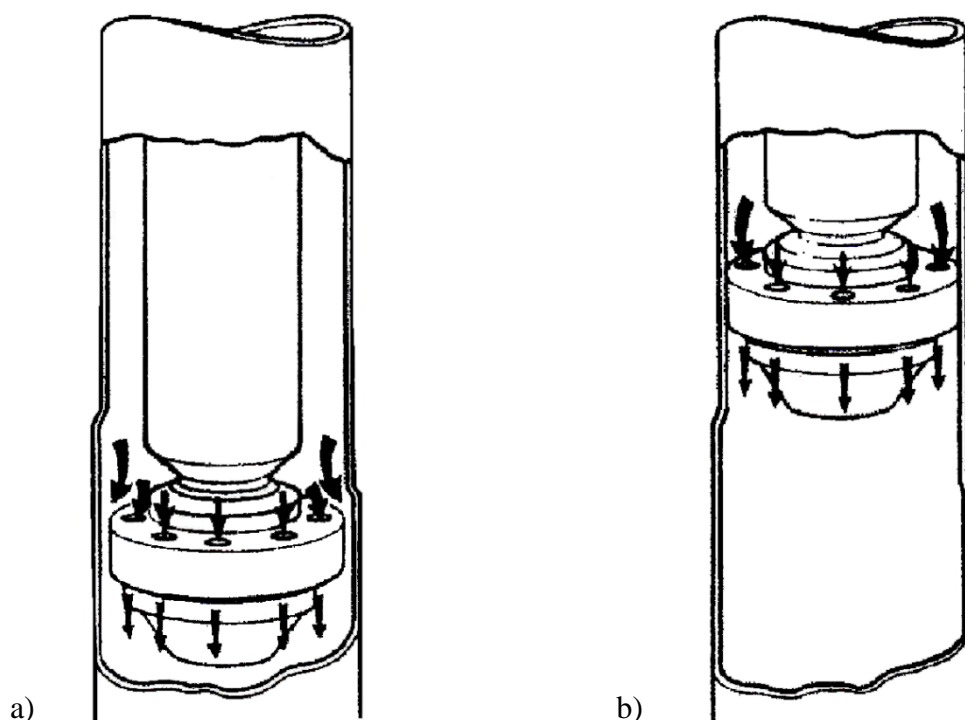


Obr. 4 Schéma teleskopického jednoplášťového tlumiče [3]

Mezi výhody těchto tlumičů patří menší vnější průměr, s touto výhodou souvisí menší pracovní tlaky v kapalině oproti dvouplášťovému teleskopickému tlumiči. Lepší funkce a charakteristika při tlumení kmitů s vyššími frekvencemi a menšími amplitudami, lepší chlazení díky použití jednoho pláště. Naopak mezi nevýhody patří bezesporu problém s utěsněním a třením v místě kontaktu pístnice s jejím axiálním vedením. Ve zmiňovaném místě působí velké boční síly na malou plochu danou konstrukcí tlumiče. Tyto plochy jsou opracovány náročnými a nákladnými výrobními procesy, z toho důvodu je pořizovací cena vyšší. Snížení bočních sil se částečně snižuje otočení tlumiče vertikálně dolů, tím se zlepší vedení, a jelikož je pracovní kapalina oddělena plovoucím pístem, pak toto uspořádání není limitováno montáží pod určitým úhlem. Poslední nevýhodou je vyšší zástavbová délka vlivem použití pracovní kapaliny a vzduchového polštáře nad sebou. [4]

1.1.3 PSD TLUMIČE

Zkratka PSD znamená **Position Sensitive Damping**, tento druh tlumiče vyvinula firma Monroe pod názvem SENSE-TRAC. [5] Princip fungování tohoto tlumiče je založen na jednoduchém principu. Během malého zatížení a malém zdvihu závěsu kola pracuje tlumič v komfortním režimu, tlumicí síla je malá. Pokud dojde k většímu zatížení a jízdě po nezpevněné vozovce, která bude mít za následek velké zdvihy zavěšení, přejde tlumič do režimu kontrolní oblasti. V této oblasti je tlumicí síla vyšší a tlumič je nastaven na zvýšenou bezpečnost a stabilitu při jízdě. Tlumení tedy závisí na tom, ve které oblasti se pohybuje píst ve válci. [4][5]



Obr. 5 PSD tlumič s pístem v a) komfortním režimu b) kontrolním režimu [4]

Z konstrukčního hlediska je změna charakteristiky tlumiče umožněna díky drážkám ve stěně válce, kterými je umožněn průchod kapaliny. Tyto drážky jsou umístěny v místě, kde se pohybuje píst při nižším zatížení vozidla. Drážky ve stěně válce napomáhají většímu proudění kapaliny při pohybu pístu a tím je dosaženo menšího tlumicího účinku. Pokud se píst během pracovního zdvihu dostane nad nebo pod vyústění zmíněných drážek, pak píst přechází do kontrolované oblasti, kde kapalina prochází pouze přes lamelové ventily umístěné v pracovním pístu. Později byly lamely nahrazeny kombinací lamel s pružinou, tato úprava měla za následek snížení hmotnosti a zlepšení reakce na malé zdvihy závěsu vozidla. Později došlo ke konstrukční úpravě profilu drážek, které mají větší zaoblení mezi přechody a tím dochází k menšímu škrncení kapaliny. [4]

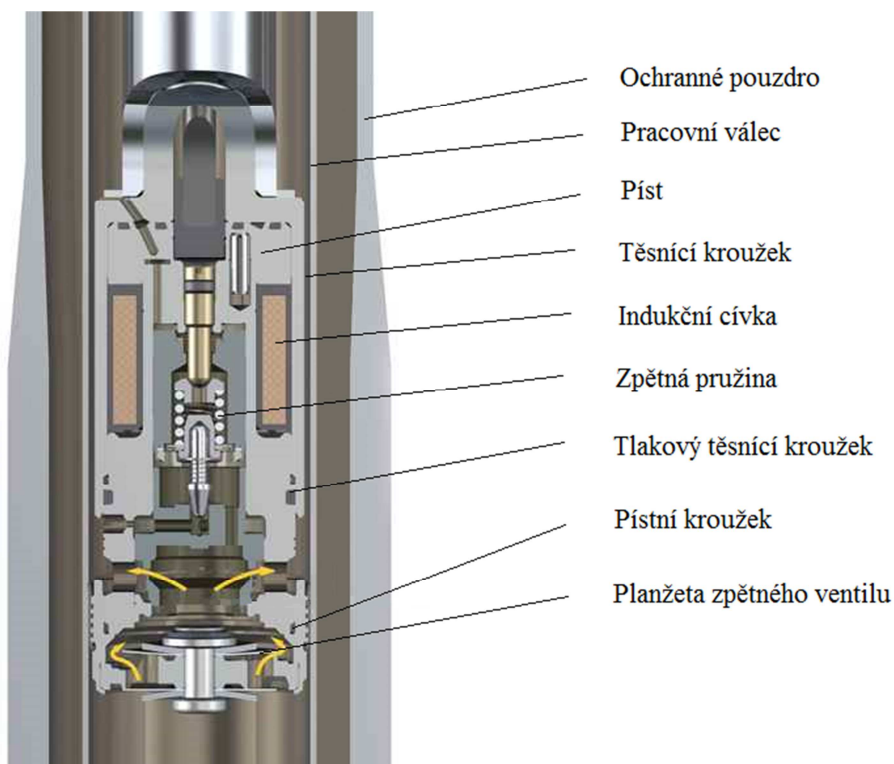


Obr. 6 Řez PSD tlumičem [7]

1.1.4 CDC TLUMIČE

CDC (**C**ontinuous **D**amping **C**ontrol) tlumiče jsou novou generací tlumičů s elektromagneticky řízeným ventilem. [6] Do elektromagnetického ventilu je přiváděn elektrický proud, který otevírá a uzavírá obtokové drážky. Pomocí snímačů (zrychlení odpružené a neodpružené hmoty, rychlosti vozidla a dalších) a řídicí jednotky, která vyhodnocuje stav situace je umožněno změnit průtok obtokovými kanálky. Změny je dosaženo velice rychle a systém je schopný reagovat i na malý zdvih zavěšení. Reakční doba na změnu vlastností je okolo 10 μ s. Systém mimo aktuálního stavu vozovky reaguje také na nastavení jízdního režimu. [4][5]

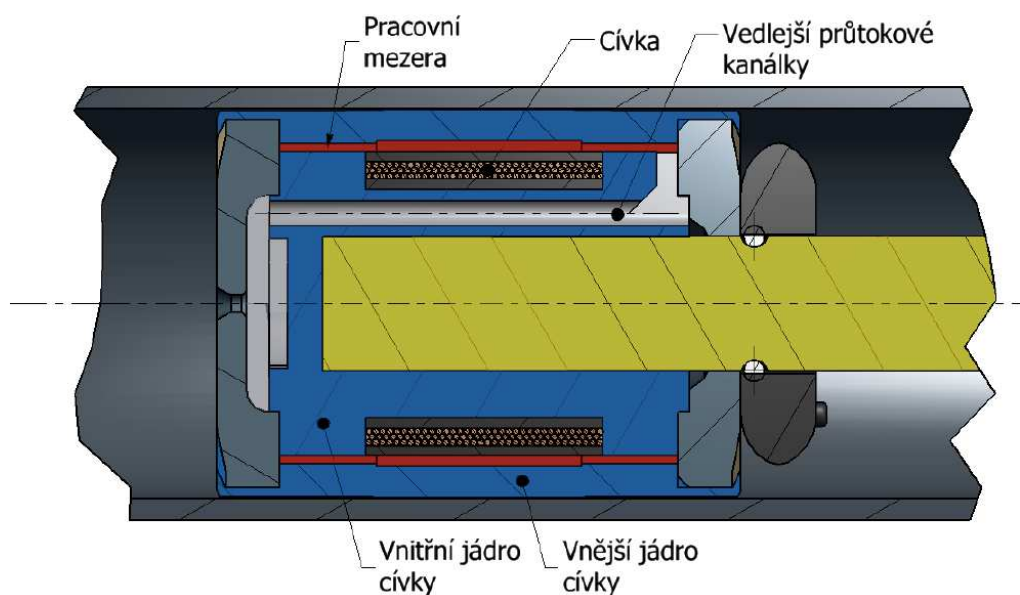
Tlumení s CDC tlumiči je v současné době velmi rozšířenou možností jak efektivně tlumit kmity karoserie. Systém je velice rychlý a schopný reagovat na sebemenší nerovnosti na vozovce. Na druhou stranu je energeticky náročnější na elektrickou palubní síť a pochopitelně i dražší, jelikož jeho součástí je větší počet snímačů a dražší řídicí jednotka, která je schopná vyhodnocovat údaje ze snímačů v aktuálním čase.



Obr. 7 Ovládací ventil CDC tlumiče [6]

1.1.5 MAGNETOREOLOGICKÉ TLUMIČE

Tyto tlumiče využívají jako tlumící médium magnetoreologickou kapalinu. Tato kapalina se skládá z nosné kapaliny, železných částic a aditiv, které zlepšují vlastnosti nosné kapaliny. Velikost železných částic se pohybuje v rozmezí 3 až 8 μm a jako nosná kapalina se ve většině případů používá olej. [5][7]



Obr. 8 Řez pístem magnetoreologického tlumiče [11]



Princip funkce tohoto typu tlumiče spočívá ve vlastnostech magnetoreologické kapaliny. Z konstrukčního hlediska je tlumič velice podobný teleskopickému jednoplášťovému tlumiči. Magnetoreologický tlumič navíc obsahuje speciální ventil tvořený cívkou. Cívkou protéká elektrický proud a při průchodu kapaliny přes tento otvor se železné částice obsažené v kapalině v závislosti na velikosti ovládacího proudu vhodně orientují a dochází k tzv. magnetoreologickému efektu (mění se viskozita kapaliny), tím umožňují měnit tlumící sílu. V praxi je změna vlastností tlumiče provedena během 5 až 10 μs , [4] protože je potřeba čas na vyhodnocení informací, vytvoření magnetického pole a změnu orientace částic v kapalině. [5][7]

1.1.6 TLUMIČE S LINEÁRNÍM ELEKTROMOTOREM (BOSE)

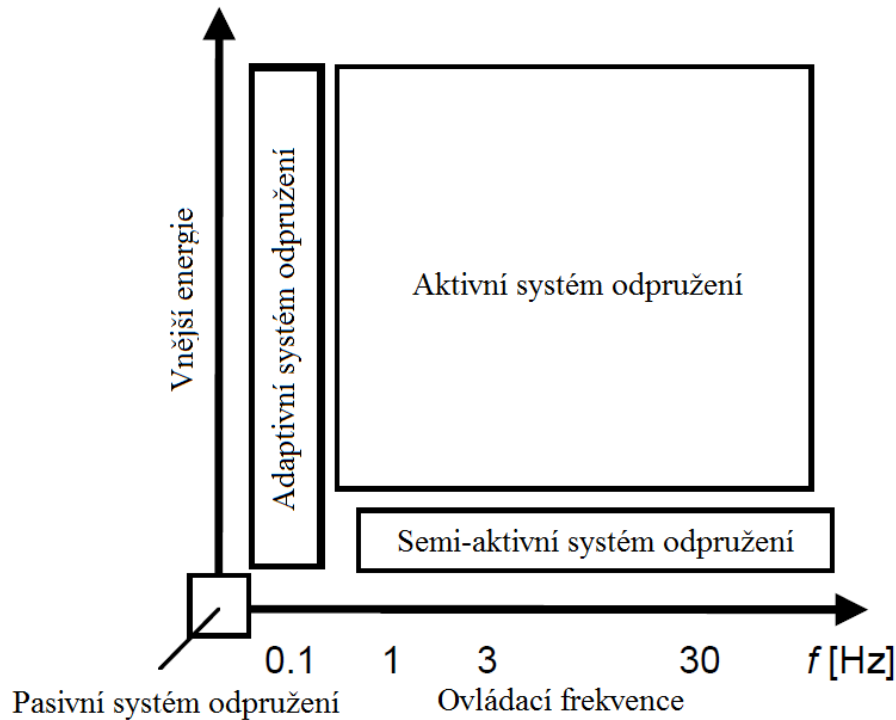
Tlumiče s lineárním elektromotorem mají úplně odlišnou koncepci. Především tlumiče byly kapalinové nebo plyno-kapalinové. Systém BOSE využívá k tlumení elektromagnetismus. Nevýhoda předchozích možností tlumení spočívá v systému řízení, mohou být pouze pasivní nebo semi-aktivní. Systém BOSE se však vyznačuje tím, že je plně aktivní. To znamená, že umožňuje nejenom změnu jeho vlastností, tedy omezení maximální tlumící síly, ale dokáže také sílu generovat ve stejném nebo opačném směru vůči pohybu kola vzhledem ke karoserii. Rychlost změny charakteristiky tlumení je umožněna během 1 μs . [4]



Obr. 9 Náprava s tlumiči typu BOSE [8]

Při jízdě po nebezpečné vozovce je prakticky systém schopný odfiltrout veškeré buzení kmitů karoserie, reaguje také na klopení karoserie v zatáčkách a klonění při rozjezdu nebo brzdění. Nevýhodou takového systému je jeho velká energetická náročnost na elektrickou soustavu ve vozidle. Samotný systém pracuje s napětím okolo 300V. Částečné snížení energetické náročnosti lze dosáhnout uchováním energie generované při přejíždění nerovnosti v lineárním elektromotoru do vysokovýkonných kondenzátorů. V případě potřeby je uchovaná energie z kondenzátorů použita pro tlumení elektromotorem. [4]

1.2 DĚLENÍ DLE ZPŮSOBU ŘÍZENÍ



Obr. 10 Oblast použití jednotlivých systémů odpružení v závislosti ovládací frekvence na vnější dodávané energii [9]

Tlumiče se dle způsobu řízení rozdělují do tří základních skupin podle způsobu řízení. Na obrázku 1. je vidět oblast použití jednotlivých systémů používaných v zavěšení automobilu s ohledem na vnější dodanou energii a ovládací frekvenci. Z obrázku 10 je patrné, že pasivní systém odpružení není z hlediska ovládací frekvence možné regulovat, proto je použitelný ve velice malé míře a pouze s vlastnosti, které mu byly přednastaveny. Adaptivní systémy odpružení jsou v současné době velice rozšířeny, avšak mají malou ovládací frekvenci a jsou náročnější na přísun vnější energie. Semi-aktivní systémy mají velké možnosti z hlediska ovládací frekvence a malou vnější energii což je předurčuje pro použití v současných automobilech, protože není potřeba většího množství energie. Největší část zaujímají plně aktivní systémy odpružení. Tyto systémy tlumení mají výhodu v ovládací frekvenci, ale jsou velice náročné na množství vnější energie, která je potřeba pro jejich řízení.

1.2.1 PASIVNÍ

Pasivní tlumiče nebo tlumení je takové, které neumožňuje změnu konstanty tlumení. Tyto tlumiče obsahují většinou hydraulický element, který snižuje potenciální energii soustavy a není schopný energii do systému dodat. Z výroby jsou nastaveny na jistou míru tlumení a změna je umožněna pouze v případě, kdy vozidlo zastaví a provede se výměna lamel ventilů nebo se provede změna přetlaku vzduchového polštáře. Do této skupiny se řadí teleskopický jednoplášťový a dvouplášťový tlumič. U takového tlumení je nutno předem spočítat nebo optimálně zvolit vhodné nastavení, z čehož vyplývá nevýhoda těchto systémů. Výhodou je jednoduchá konstrukce, menší počet dílů a senzorů a také nižší cena. [9] [10]



1.2.2 SEMI-AKTIVNÍ

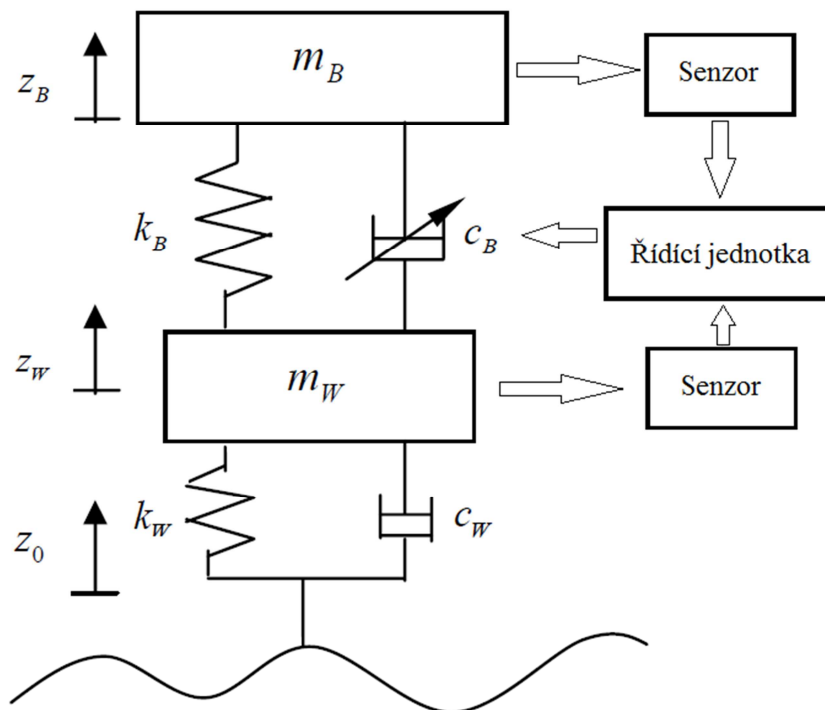
Semi-aktivní (nebo také poloaktivní) systémy se vyznačují změnou konstanty tlumení během jízdy, jsou jistým kompromisem mezi pasivním a aktivním systémem řízení tlumení. Jsou schopné vyhodnocovat aktuální situaci a také v provozu přizpůsobovat charakteristiku tlumiče. Takovéto systémy jsou vybaveny vhodnou řídicí jednotkou a algoritmem, který je schopný na základě informací ze senzorů upravovat konstantu tlumení. Mezi výhody těchto systémů se řadí rychlá změna vlastností, tato reakční doba se pohybuje okolo 5 až 10 μ s. Dále zaručují lepší komfort pro posádku a lepší ovladatelnost vozidla. Nevýhodou je vyšší nárok na elektrickou soustavu vozidla. Mezi systémy semi-aktivního řízení se řadí CDC tlumiče nebo tlumiče s magnetoreologickou kapalinou. Semi-aktivnímu tlumení je v současné době věnována největší pozornost při vývoji zavěšení vozidla. [9] [10]

1.2.3 AKTIVNÍ

Aktivní systémy tlumení jsou takové, které umožňují v aktuálním čase nejenom změnu tlumící síly v případě stlačení tlumiče, ale jsou schopné sílu i vytvářet a působit v opačném směru jako akční člen. Jedná se o nejvyspělejší systém, který je schopný reagovat na změnu rychleji než semi-aktivní systém. Mezi další výhody patří vysoký komfort posádky, stabilita jízdy a bezpečnost. Nevýhodou je vysoká energetická náročnost. Systém, který pracuje jako aktivní je například tlumič s lineárním elektromotorem. [9] [10]

2 ČTVRTINOVÝ MODEL VOZIDLA

Čtvrtinový model automobilu (v angličtině quarter car model) představuje základní model vhodný pro simulaci odpružení automobilu. Jedná se o model s dvěma stupni volnosti, jeden stupeň volnosti umožňuje odpružená hmota (karoserie) a druhý neodpružená hmota (závěs kola s pneumatikou). [12] [13] Fyzikální modely určené pro vývoj zavěšení automobilu jsou z pravidla vyvíjeny pomocí matematických, dynamických, čtvrtinových modelů automobilu. [9] Na obrázku 11 je znázorněn čtvrtinový model automobilu s dvěma stupni volnosti.



Obr. 11 Schéma čtvrtinového modelu vozidla [12]

Kde: Z_0 [m] je profil vozovky, Z_W [m] je výchylka neodpružené hmoty, Z_B [m] je výchylka odpružené hmoty. Dále m_W [kg] odpovídá hmotnosti neodpružené hmoty, m_B [kg] odpovídá hmotnosti jedné-čtvrtiny odpružené hmoty, k_W [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$] je radiální tuhost pneumatiky, k_B [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$] je tuhost pružiny v zavěšení, c_W [$\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$] odpovídá tlumení pneumatiky a c_B [$\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$] je tlumení tlumiče v zavěšení vozidla.

2.1 VÝPOČET ČTVRTINOVÉHO MODELU

Pro výpočet čtvrtinového modelu můžeme vyjádřit síly působící na odpruženou hmotu (rovnice 1.) a neodpruženou hmotu (rovnice 2.), které vyházejí z obrázku 11.

$$\mathbf{m}_B \cdot \ddot{\mathbf{z}}_B = -\mathbf{c}_B(\dot{\mathbf{z}}_B - \dot{\mathbf{z}}_W) - \mathbf{k}_B(\mathbf{z}_B - \mathbf{z}_W) \quad (1)$$

$$\mathbf{m}_W \cdot \ddot{\mathbf{z}}_W = \mathbf{c}_B(\dot{\mathbf{z}}_B - \dot{\mathbf{z}}_W) - \mathbf{c}_W(\dot{\mathbf{z}}_W - \dot{\mathbf{z}}_0) + \mathbf{k}_B(\mathbf{z}_B - \mathbf{z}_W) - \mathbf{k}_W(\mathbf{z}_W - \mathbf{z}_0) \quad (2)$$



- Kde: \dot{z}_B [$m \cdot s^{-1}$] - rychlost odpružené hmoty
 \dot{z}_W [$m \cdot s^{-1}$] - rychlost neodpružené hmoty
 \dot{z}_0 [$m \cdot s^{-1}$] - rychlost radiální polohy vozovky
 \ddot{z}_B [$m \cdot s^{-2}$] - zrychlení odpružené hmoty
 \ddot{z}_W [$m \cdot s^{-2}$] - zrychlení neodpružené hmoty

Po rozepsání jednotlivých členů v závorkách lze psát:

$$\ddot{z}_B = -\frac{c_B \cdot \dot{z}_B}{m_B} + \frac{c_B \cdot \dot{z}_W}{m_B} - \frac{k_B \cdot z_B}{m_B} + \frac{k_B \cdot z_W}{m_B} \quad (3)$$

$$\ddot{z}_W = \frac{c_B \cdot \dot{z}_B}{m_W} - \frac{c_B \cdot \dot{z}_W}{m_W} - \frac{c_W \cdot \dot{z}_W}{m_W} + \frac{c_W \cdot \dot{z}_0}{m_W} + \frac{k_B \cdot z_B}{m_W} - \frac{k_B \cdot z_W}{m_W} - \frac{k_W \cdot z_W}{m_W} + \frac{k_W \cdot z_0}{m_W} \quad (4)$$

Tento typ rovnic lze použít pro výpočet čtvrtinového modelu automobilu s jedním maximálně dvěma stupni volnosti. Při více stupních volnosti a náročnějších úlohách je vhodnější použít maticový zápis rovnic. Maticový zápis využívá taktéž většina numerických řešičů včetně programu Matlab/Simulink.

Jako vstup do výpočtu si zvolíme proměnnou U s parametry profilu vozovky Z_0 a rychlosti \dot{Z}_0 , jednotlivé proměnné si označíme jako X s parametry Z_B , Z_W , \dot{Z}_B a \dot{Z}_W . Jako výstup z výpočtu nás zajímá poloha odpružené Z_B a neodpružené hmoty Z_W .

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_B \\ Z_W \\ \dot{Z}_B \\ \dot{Z}_W \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_B \\ Z_W \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$U = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_0 \\ \dot{Z}_0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Z pravidla o derivacích a po dosazení z rovnice 5 a 7 do rovnice 3 a 4 lze dále psát:

$$\dot{x}_1 = \dot{Z}_B = x_3 \quad (8)$$

$$\dot{x}_2 = \dot{Z}_W = x_4 \quad (9)$$

$$\dot{x}_3 = -\frac{k_B}{m_B} x_1 + \frac{k_B}{m_B} x_2 - \frac{c_B}{m_B} x_3 + \frac{c_B}{m_B} x_4 \quad (10)$$



$$\dot{x}_4 = \frac{k_B}{m_W} x_1 - \frac{k_B + k_W}{m_W} x_2 + \frac{c_B}{m_W} x_3 - \frac{c_B + c_W}{m_W} x_4 + \frac{k_W}{m_W} u_1 + \frac{c_W}{m_W} u_2 \quad (11)$$

Základní stavové rovnice, ze kterých vychází maticový výpočet:

$$\dot{X} = AX + BU \quad (12)$$

$$Y = CX + DU \quad (13)$$

Parametry neznámých proměnných A, B, C a D ve stavových rovnicích lze vyjádřit z rovnic 8, 9, 10 a 11.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_B}{m_B} & \frac{k_B}{m_B} & -\frac{c_B}{m_B} & \frac{c_B}{m_B} \\ \frac{k_B}{m_W} & -\frac{k_B + k_W}{m_W} & \frac{c_B}{m_W} & -\frac{c_B + c_W}{m_W} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{k_W}{m_W} & \frac{c_W}{m_W} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$C = (1 \quad 1 \quad 0 \quad 0) \quad (16)$$

$$D = (0 \quad 0) \quad (17)$$

Po dosazení proměnných do stavových rovnic dostaneme výsledný maticový zápis pro výpočet čtvrtinového modelu vozidla:

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_B}{m_B} & \frac{k_B}{m_B} & -\frac{c_B}{m_B} & \frac{c_B}{m_B} \\ \frac{k_B}{m_W} & -\frac{k_B + k_W}{m_W} & \frac{c_B}{m_W} & -\frac{c_B + c_W}{m_W} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_B \\ Z_W \\ \dot{Z}_B \\ \dot{Z}_W \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{k_W}{m_W} & \frac{c_W}{m_W} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_0 \\ \dot{Z}_0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$Y = (1 \quad 1 \quad 0 \quad 0) \cdot \begin{bmatrix} Z_B \\ Z_W \\ \dot{Z}_B \\ \dot{Z}_W \end{bmatrix} + (0 \quad 0) \cdot \begin{bmatrix} Z_0 \\ \dot{Z}_0 \end{bmatrix} \quad (19)$$



2.2 VÝPOČET SÍLY POD PNEUMATIKOU

Výpočet síly pod pneumatikou je u čtvrtinového modelu pro potřeby zjištění jízdní bezpečnosti nejdůležitějším faktorem. Podle síly pod pneumatikou lze totiž vyhodnotit, jakou příčnou a podélnou sílu je pneumatika schopna přenést na vozovku. V případě čtvrtinového modelu lze sílu pod pneumatikou vypočítat více způsoby. Nejvhodnější jsou však dva, které jsou uvedeny v rovnicích 20 a 21.

$$F_W = c_W \cdot \dot{z}_W + k_W \cdot z_W \quad (20)$$

$$F_W = G \cdot (m_W + m_B) + m_W \cdot \ddot{z}_W + m_B \cdot \ddot{z}_B \quad (21)$$

První výpočet vychází ze získaných informací o poloze a rychlosti neodpružené hmoty. Vztah lze odvodit po uvolnění neodpružené hmoty a nahrazení jednotlivých prvků silovými účinky. Druhý ze vztahů vychází ze známého zrychlení odpružené a neodpružené hmoty. Tento vztah lze opět získat pomocí uvolnění tělesa tentokrát odpružené hmoty a dosažení za neznámé z rovnic při uvolnění neodpružené hmoty.

2.3 VÝPOČET OPTIMÁLNÍHO TLUMENÍ A TUHOSTI

Optimální hodnota tuhosti odpružení se volí s ohledem na maximální zatížení vozidla. Ve výpočtu se zohledňuje dynamická tuhost pneumatiky a hmotnosti odpružené i neodpružené části vozidla. S rostoucí tuhostí pružiny roste i hodnota maximálního zrychlení, která má vliv na pohodlí posádky ve vozidle. Vzorec pro výpočet optimální tuhosti je uveden ve vztahu 22. [15]

$$k_B = \frac{k_W \cdot m_B \cdot m_W}{(m_B + m_W)^2} \quad (22)$$

Optimální tlumení se volí s ohledem na dva faktory. Prvním je zvolení tlumení tak, aby docházelo k nejmenší změně zrychlení odpružené hmoty (rovnice 23), a druhé je voleno s přihlédnutím k minimálním dynamickým silám působících na pneumatiku (rovnice 24). [16]

$$c_B(\text{pro } \ddot{z}_B \rightarrow 0) = k_B \cdot \sqrt{\frac{m_B + m_W}{k_W}} \quad (23)$$

$$c_B(\text{pro } F_{dyn} \rightarrow 0) = \sqrt{\frac{(m_B + m_W) \cdot k_B^2}{k_W} - \frac{2 \cdot k_B \cdot m_B \cdot m_W}{m_B + m_W} + \frac{k_W \cdot m_W \cdot m_B^2}{(m_B + m_W)^2}} \quad (24)$$

Parametr, který vyjadřuje poměr mezi tlumením, tuhostí a hmotností vozidla je poměrný útlum v rovnici 25. [16] Typické hodnoty poměrného útlumu se pohybují v rozmezí 0,1 až 0,9. Nižší hodnoty poměrného útlumu v rozmezí 0,14 až 0,22 odpovídají optimálnímu naladění zavěšení pro jízdní komfort, naopak hodnoty v rozmezí 0,36 až 0,46 odpovídají naladění zavěšení na jízdní bezpečnost.



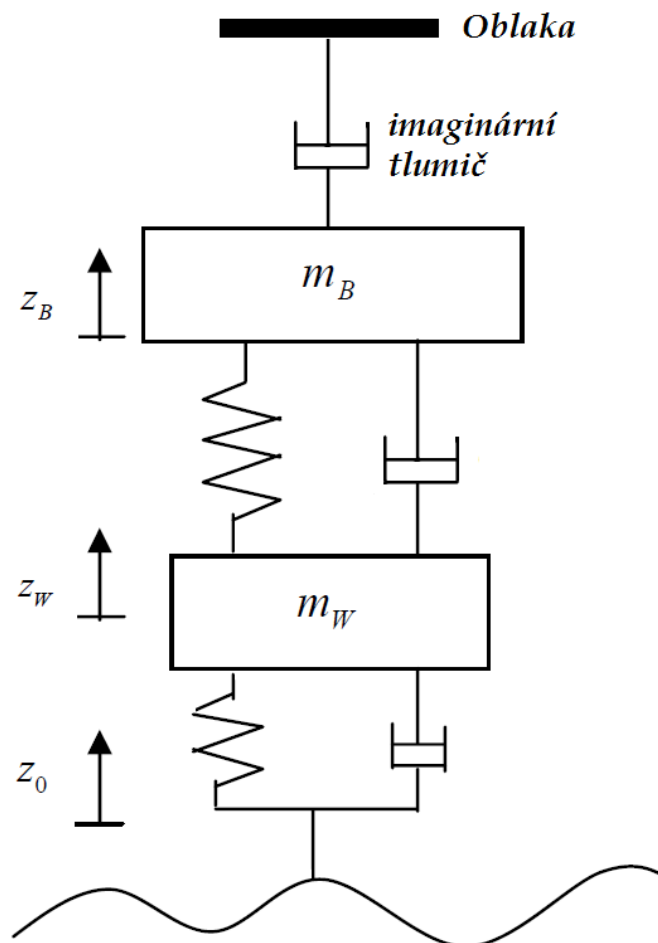
$$D_B = \frac{c_B}{2 \cdot \sqrt{k_B \cdot m_B}} \quad (25)$$

2.4 ALGORITMY ŘÍZENÍ

Samotný tlumič se schopností plynule měnit konstantu tlumení by nepředstavoval význam bez řídicího algoritmu, který by zajišťoval optimální naladění tlumiče za provozních podmínek. Existuje několik kritérií, podle kterých se současné semi-aktivní tlumiče řídí a tím se upravují jejich vlastnosti.

2.4.1 SKYHOOK METHOD

Náhradní schéma zavěšení typu skyhook je zobrazeno na obrázku 12. Odpružená hmota je spojena pomocí imaginárního tlumiče s oblaky tak, aby ve výsledku u odpružené hmoty vznikalo nejmenší možné zrychlení při buzení od nerovností vozovky. Ve skutečnosti tento typ zavěšení není možný, ale vytváří jednoduchou představu o tom, jak lze eliminovat zrychlení odpružených hmot vozidla.



Obr. 12 Náhradní schéma Skyhook Method [13]



2.4.2 LIMITED RELATIVE DISPLACEMENT CONTROL METHOD

Pro zajištění komfortu pro posádku vozidla je vhodné minimalizovat změnu polohy karoserie a tím i její zrychlení. Nicméně, tato dvě kritéria nejsou slučitelná, protože v případě malého a rychlého relativního posunu se generuje velké zrychlení. [9]

Metoda Limited relative displacement control method je založená na sledování výchylky kola a karoserie. Z rozdílů těchto dvou výchylek se určuje tlumící konstanta z rovnice 27, dle popisu v rovnici 26. V případě že rozdíl relativního posunu neodpružené hmoty vůči hmotě odpružené je menší jak nula je vhodné mít tlumící konstantu co nejmenší, v ideálním případě nulovou. To však nelze ve skutečnosti zajistit, protože v tlumiči vždy dochází k nějakému škrcení proudící kapaliny. Matematické vyjádření algoritmu řízení je uvedeno v rovnici 26.

$$\zeta = \begin{cases} \zeta_{max} & (Z_B - Z_W) \geq 0 \\ \zeta_{min} \rightarrow 0 & (Z_B - Z_W) < 0 \end{cases} \quad (26)$$

Kde ζ je poměr příslušného tlumení pro daný systém zavěšení vozidla a vypočítá se dle vztahu:

$$\zeta = \frac{c_B}{\sqrt{k_B \cdot m_B}} \quad (27)$$

Tabulka 1. znázorňuje jednotlivé možné stavy, které mohou nastat v závěsu kola. Pro lepší pochopení stavu, kdy je použita maximální konstanta tlumení a naopak minimální je sledován pohyb odpružené a neodpružené hmoty. Následující použití konstanty tlumení vyplývá z této tabulky. Pokud se od sebe tyto hmoty vzdalují (odpovídá kladné výsledné hodnotě), pak je použita maximální hodnota konstanty tlumení, to odpovídá stavu, kdy se závěs kola roztahuje, v případě že se hmoty vzájemně přibližují (při stlačení závěsu) je vhodné, aby konstanta tlumení byla minimální z důvodu přenosu zrychlení z neodpružené hmoty na hmotu odpruženou (odpovídá záporné výsledné hodnotě).

Tab. 1 Možné stavy, které mohou nastat v závěsu kola

Odpružená hmot	Z_B	+↑	-↓	+↑	+↑	+↑	-↓	-↓	-↓
Neodpružená hmot	Z_W	+↑	-↓	-↓	-↓	+↑	-↓	-↑	+↑
Výsledná hodnota ($Z_B - Z_W$)		+	+	+	+	-	-	-	-

2.4.3 SKYHOOK CONTROL METHOD

Skyhook control metod využívá k určení konstanty tlumení rozdíl rychlostí odpružené a neodpružené hmoty. Výhoda tohoto řízení spočívá z matematického hlediska v přesnějším řízení konstanty tlumení. Zrychlení, které se snažíme eliminovat, je derivací rychlosti. V takovém případě je možné tlumící konstantu regulovat lépe v porovnání s algoritmem



Limited Relative Displacement Control Metod, kde se k určení tlumící konstanty používá rozdíl polohy karoserie a pneumatiky.

Určení tlumící konstanty je uvedeno v rovnici 22, ze které plyne následující. Pokud od absolutní rychlosti odpružené hmoty odečteme absolutní rychlost neodpružené hmoty a tuto hodnotu zesílíme rychlostí hmoty odpružené, dostaneme hodnotu, která v případě že je větší nebo rovna nule bude tlumící konstanta maximální, v opačném případě bude minimální.

$$\zeta = \begin{cases} \zeta_{max} & \dot{Z}_B(\dot{Z}_B - \dot{Z}_W) \geq 0 \\ \zeta_{min} \rightarrow 0 & \dot{Z}_B(\dot{Z}_B - \dot{Z}_W) < 0 \end{cases} \quad (28)$$

2.4.4 MODIFIED SKYHOOK CONTROL METOD

Principiálně je tato metoda shodná s metodou skyhook control. Rozdíl aktuální rychlosti odpružené a neodpružené hmoty je v tomto případě zesílen derivací zrychlení odpružené hmoty. Použití maximální a minimální konstanty tlumení je shodné jako v předešlém případě. Matematické vyjádření je uvedeno v rovnici 29.

$$\zeta = \begin{cases} \zeta_{max} & \ddot{Z}_B(\dot{Z}_B - \dot{Z}_W) \geq 0 \\ \zeta_{min} \rightarrow 0 & \ddot{Z}_B(\dot{Z}_B - \dot{Z}_W) < 0 \end{cases} \quad (29)$$

2.4.5 DALŠÍ ALGORITMY ŘÍZENÍ

Na tomto místě jsou uvedeny ostatní algoritmy řízení včetně jejich rozhodovacích funkcí, které byly sestaveny při vypracování této diplomové práce.

Tab. 2 Algoritmy řízení konstanty tlumení

Algoritmus řízení	Zesílení	Rozhodovací funkce
Limited relative displacement	Velocity	$\zeta = \begin{cases} \zeta_{max} & \dot{Z}_B(\dot{Z}_B - \dot{Z}_W) \geq 0 \\ \zeta_{min} \rightarrow 0 & \dot{Z}_B(\dot{Z}_B - \dot{Z}_W) < 0 \end{cases} \quad (30)$
Limited relative displacement	Displacement	$\zeta = \begin{cases} \zeta_{max} & Z_B(Z_B - Z_W) \geq 0 \\ \zeta_{min} \rightarrow 0 & Z_B(Z_B - Z_W) < 0 \end{cases} \quad (31)$
Limited relative velocity	-	$\zeta = \begin{cases} \zeta_{max} & (\dot{Z}_B - \dot{Z}_W) \geq 0 \\ \zeta_{min} \rightarrow 0 & (\dot{Z}_B - \dot{Z}_W) < 0 \end{cases} \quad (32)$
Limited relative velocity	Displacement	$\zeta = \begin{cases} \zeta_{max} & Z_B(\dot{Z}_B - \dot{Z}_W) \geq 0 \\ \zeta_{min} \rightarrow 0 & Z_B(\dot{Z}_B - \dot{Z}_W) < 0 \end{cases} \quad (33)$
Acceleration	-	$\zeta = \begin{cases} \zeta_{max} & \ddot{Z}_B \geq 0 \\ \zeta_{min} \rightarrow 0 & \ddot{Z}_B < 0 \end{cases} \quad (34)$

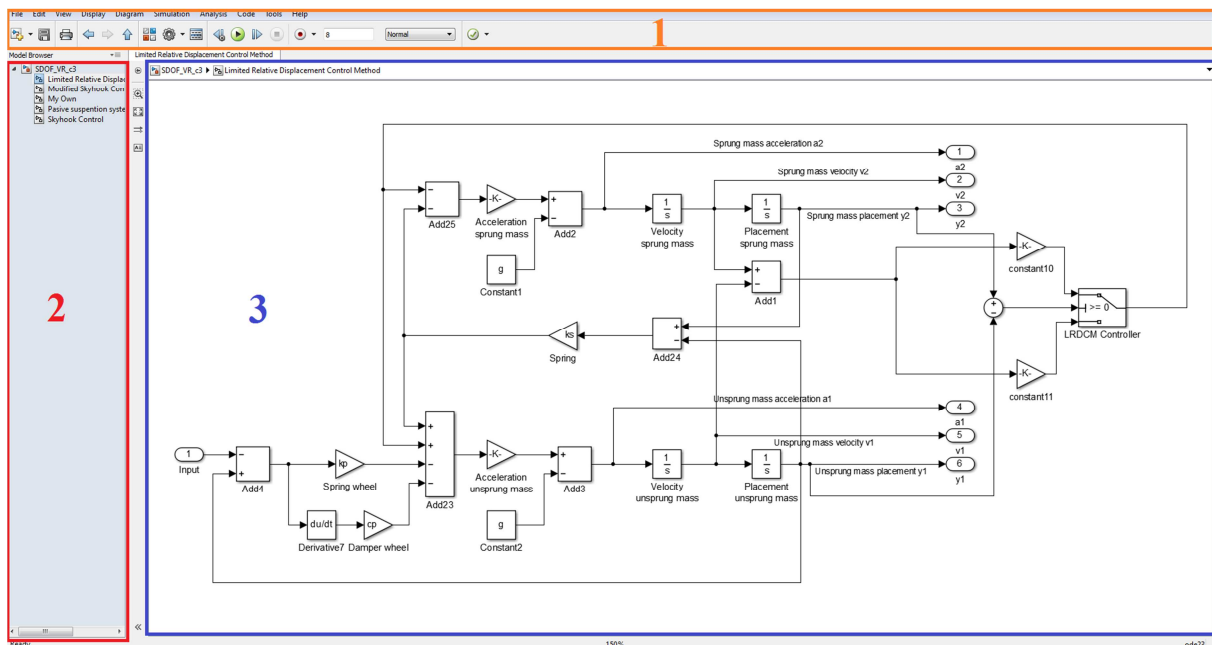


3 MODEL V PROGRAMU MATLAB/SIMULINK

V dnešní době je kladen velký důraz na snížení nákladů na výrobu ale také na vývoj nových produktů. V souvislosti s vývojem se jedná především o snížení času potřebného na vývoj. Užitečným pomocníkem při plnění snižování nákladů bývá často použití důmyslných výpočtových a modelovacích programů, které dokáží výrazně tento čas snížit namísto dlouhého a náročného testování prototypů a prvních předprodejních produktů. Takovým užitečným nástrojem pro testování nových výrobků může být i Matlab/Simulink.

Matlab je univerzální výpočtový program určený pro modelování, analyzování a také optimalizování dat a vizualizaci prostředí od společnosti MathWorks. Simulink je prostředí určené pro více prvkové simulace dynamických systémů založených na blokových schématech. Umožňuje nejenom simulaci, ale také automatické generování kódů a pokročilé testování a ověřování vložených systémů.

Simulink je tvořen grafickým editorem do kterého se vkládají jednotlivé bloky z uživatelské knihovny do podoby výsledného modelu. Dále obsahuje jednotlivé typy řešičů pro simulaci dynamických systémů. Je vložen do Matlabu jako jeho součást podporující funkce a algoritmy Matlabu a exportování získaných dat pro pozdější využití nebo analýzu. Jedná se o program, který umožňuje uživatelům realizovat nápady a prověřit jejich funkci, jako je například vývoj bezpečnostních softwarů, automobilových softwarů řídicích jednotek, vytváření bezdrátových technologií a mnoho dalších.



Obr. 13 Prostředí Matlab/Simulink

Prostředí v Simulinku se rozděluje do tří základních oblastí:

- 1 – Panely nástrojů (obsahují mimo importování a exportování modelů také veškerá nastavení, jako je například typ řešiče, výpočtový čas, spouštění a zastavení simulace nebo vstup do knihovny s blokovými schématy)
- 2 – Strom modelu (základní rozdělení modelu a jeho subsystémů)



- 3 – Pracovní okno (zde se vytváří samotný model pomocí jednotlivých bloků a propojení mezi nimi)

3.1 POSTUP MODELOVÁNÍ

Kompletní model se skládá z několika částí. První částí je program napsaný v prostředí Matlabu známý jako tzv. m.file. Tento soubor obsahuje základní informace o parametrech modelu, jako je hmotnost jednotlivých částí, tuhostí, tlumení nebo hodnotu gravitačního zrychlení. Tyto hodnoty jsou uloženy pod názvy jednotlivých proměnných, které se po spuštění souboru načtou do paměti a v další fázi s nimi program Simulink pracuje při simulacích. Seznam proměnných včetně hodnot lze po spuštění m.file najít v okně „Workspace“ zpravidla umístěného v pravé horní části programu.

Tab. 3 Vstupní hodnoty do modelu (parametry vozidla)

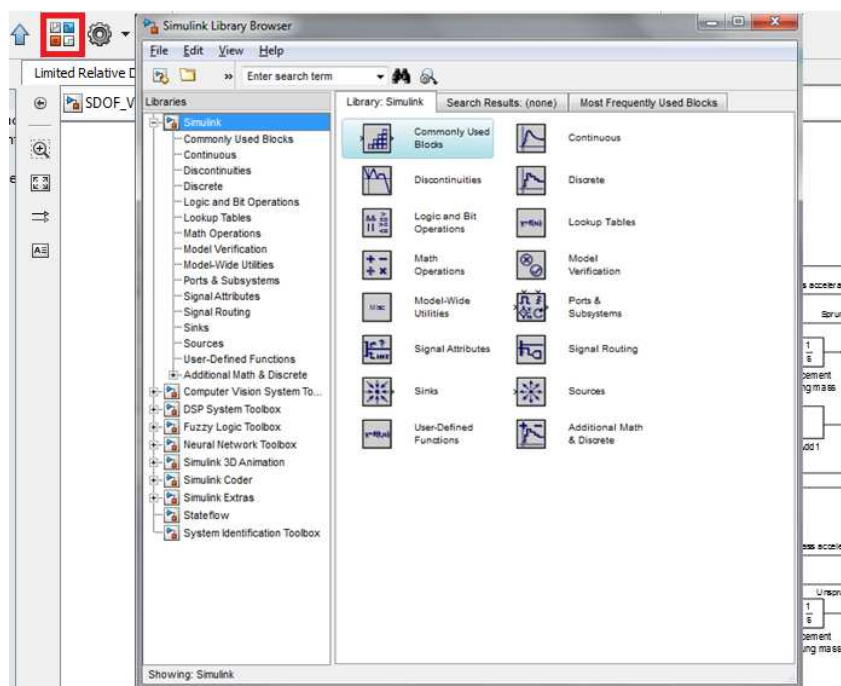
Popis	Zkratka a jednotka	Hodnota
Hmotnost čtvrtiny odpružené hmoty	m_B [kg]	412,5
Hmotnost neodpružené hmoty	m_W [kg]	50
Tuhost odpružení	k_B [$N \cdot m^{-1}$]	36600
Radiální tuhost pneumatiky	k_W [$N \cdot m^{-1}$]	380000
Konstanta tlumení tlumiče	c_B [$N \cdot s \cdot m^{-1}$]	3671
Maximální konstanta tlumení	c_{Bmax} [$N \cdot s \cdot m^{-1}$]	3671
Minimální konstanta tlumení	c_{Bmin} [$N \cdot s \cdot m^{-1}$]	776
Tlumící konstanta pneumatiky	c_W [$N \cdot s \cdot m^{-1}$]	400
Gravitační zrychlení	g [$m \cdot s^{-2}$]	9,81

Name	Value	Min
cB	3671	3671
cBmax	3671	3671
cBmin	776	776
cW	400	400
g	9.8100	9.8100
kB	36600	36600
kW	380000	380000
mB	412.5000	412.5000
mW	50	50

Obr. 14 Okno workspace s proměnnými uloženými v paměti

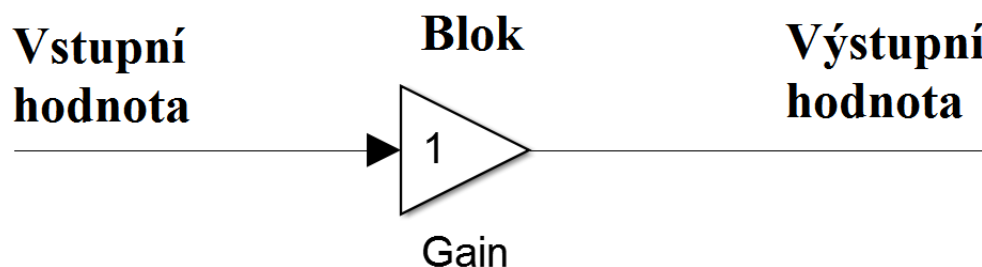


Dalším souborem je model vytvořený v prostředí Matlab/Simulink, který se ukládá jako soubor s koncovkou .slx. Tento soubor obsahuje základní strukturu bloků, které mají své vlastnosti a parametry a na základě propojení jednotlivých bloků tvoří model. Pro výběr bloků obsahuje Simulink uživatelskou knihovnu kde má každý blok svůj vzhled, název a funkci. Pro přístup do knihovny se použije ikona zobrazená na obrázku 15., která je umístěna v panelech nástrojů.



Obr. 15 Uživatelská knihovna a její spuštění

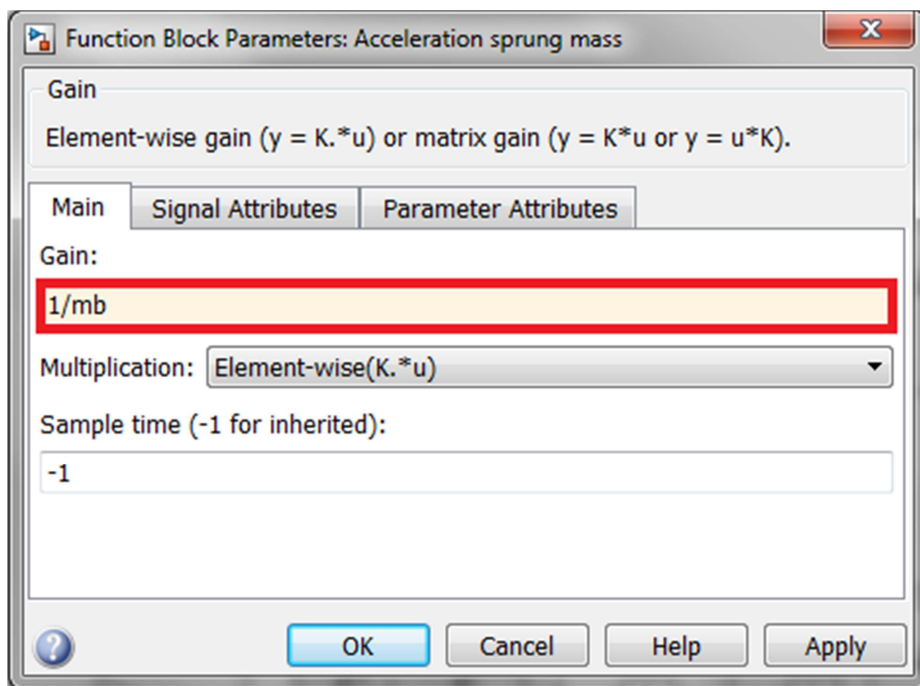
Jak je uvedeno výše má každý blok svou funkci a lze do něj vložit parametr, který mu určuje jeho hodnotu nebo matematickou funkci. Parametr lze zapsat přímo číselnou hodnotou do příslušného pole nebo lze použít proměnnou, kterou Simulink načte ze souboru m.file. Výhodou načtení souboru z m.file je snadná úprava všech vstupních hodnot parametrů a přehledný zápis veličin vstupujících do modelu.



Obr. 16 Blok Gain

Po tzv. otevření bloku, se zobrazí jeho nastavení, kde lze upravovat vlastnosti. V případě bloku „Gain“ lze upravit vzorkovací čas a přiřadit funkční hodnotu pro tento blok






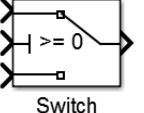

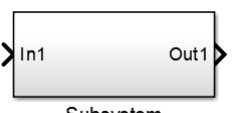




tak jak je uvedeno na obrázku 17. Další nastavení je možné provést v záložkách „signal attributes“ a „parameter attributes“.



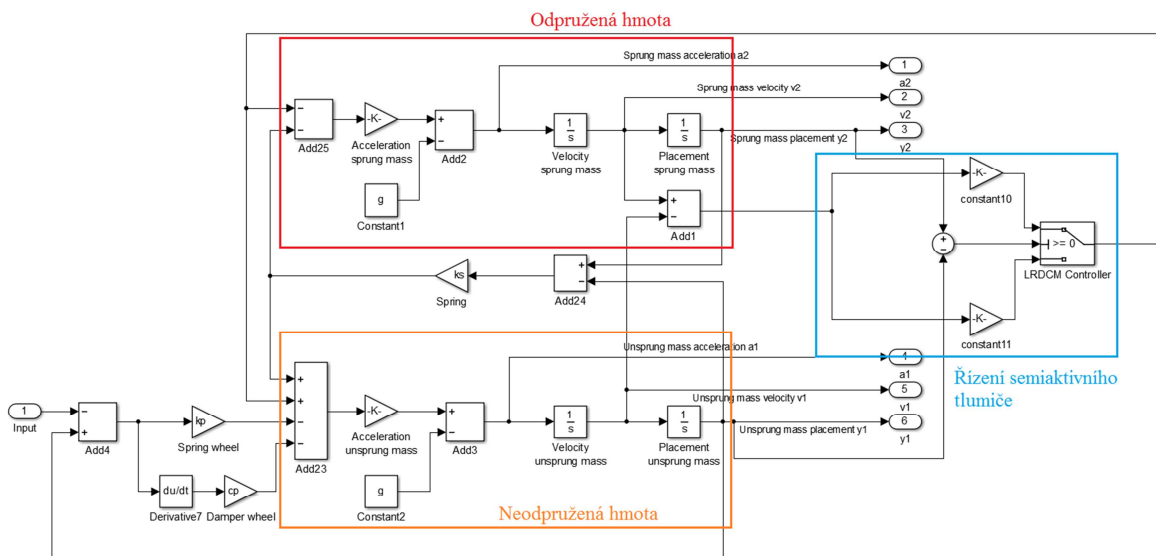
Obr. 17 Přiřazení funkční hodnoty bloku „Gain“



Tab. 4 Nejčastěji používané bloky v modelu a popis jejich funkce

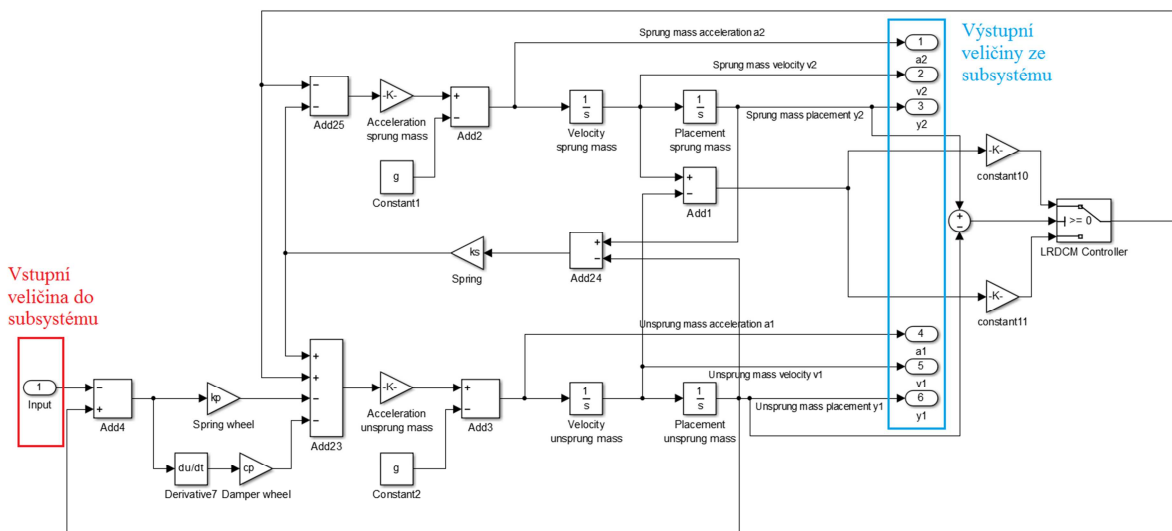
Název bloku	Zobrazení	Popis funkce
Constant	 Constant	Používá se jako vstupní hodnota do modelu. Hodnota může být zapsána číselně nebo načtená jako parametr.
Gain	 Gain	Představuje násobení, neboli zvětšení vstupní hodnoty o násobek hodnoty v bloku „Gain“.
Scope	 Scope	Slouží jako zobrazení výstupního signálu. Před spuštěním je scope prázdný, po spuštění simulace zaznamenává signál.
Add	 Add	Používá se jako sčítání nebo odčítání dvou a více vstupních hodnot.
Mux		Obdoba sčítání, spojuje dva a více signálů do jednoho vlákna bez jejich vzájemného sečtení.
Switch	 Switch	Jednoduchý přepínač, horní a spodní vstup na levé straně slouží jako vstupní hodnoty, střední vstup slouží jako řídicí signál.
To workspace	 To Workspace	Tento blok slouží k zaznamenávání vstupních hodnot a ukládání na paměti pro pozdější zpracování a vyhodnocení.
Subsystem	 Subsystem	Subsystem pomáhá zmenšit a zjednodušit velké a složité modely. Může mít jeden a více vstupů nebo výstupů.
Derivative	 Derivative	Derivace vstupního signálu v časové doméně.
Integrator	 Integrator	Integrace vstupního signálu v časové doméně.
In1	 In1	Vstupní signál pro subsystem.
Out1	 Out1	Výstupní signál pro subsystem.

Výsledný model sestavený pomocí blokového schéma je zobrazen na obrázku 18. Tento model představuje čtvrtinový model vozidla se systémem řízení konstanty tlumení podle metody „Limited Relative Displacement Control Method“. Pro lepší zorientování v modelu jsou jednotlivé části popsány. Ve spodní části je soubor bloků, které společně představují neodpruženou hmotu, v horní části je umístěna odpružená hmotu a na pravé straně je samotné řízení tlumící konstanty pomocí bloku „Switch“, který na základě vstupního signálu přepíná mezi maximální a minimální konstantou tlumení.



Obr. 18 Model s algoritmem řízení konstanty tlumení

Pro přehlednější zobrazení velkých modelů je vhodné použít tzv. subsystému, který výrazně zjednoduší a zmenší model, tím se dosáhne lepší přehlednosti. Pro vytvoření subsystému je potřeba vytvoření vstupních a výstupních veličin, se kterými se dále pracuje. Po vytvoření vstupního nebo výstupního bloku se na bloku subsystému zobrazí příslušný vstup nebo výstup. Na obrázku 19. je zobrazen subsystém čtvrtinového modelu vozidla s algoritmem řízení konstanty tlumení a označeny vstupy a výstupy ze subsystému.



Obr. 19 Vstupní a výstupní veličiny ze subsystému



Pro lepší práci s výslednými daty je vhodné hodnoty z modelu načíst pomocí bloku „To Workspace“ do paměti Matlabu. Tyto data se dají pomocí programovacího jazyka a souboru `m.file` dále jednoduše analyzovat a porovnávat. Hodnoty takto načtené do paměti lze nalézt v okně „Workspace“ jako hodnoty načtené ze souboru `m.file`, jak je uvedeno na začátku této kapitoly.

Nakonec je potřeba hodnoty získané simulací analyzovat. K tomuto kroku byl vytvořen script, tedy soubor s příponou `m.file`. Tento script automaticky načte všechny potřebné hodnoty pro analýzu dat z modelu. Vypočítá průměrnou hodnotu zrychlení a síly pod pneumatikou pomocí integrálního přístupu (jako plochu pod křivkou). Dále vypočítá rozptyl (variaci) a směrodatnou odchylku (RMS), které lépe vypovídají o naměřených datech. V poslední řadě script nalezne minimální hodnotu síly pod pneumatikou, a všechny hodnoty zobrazí do grafů. Součástí scriptu je i zápis hodnot do textového souboru s příponou `.gaf` nebo do excelu s příponou `.xlsx`.

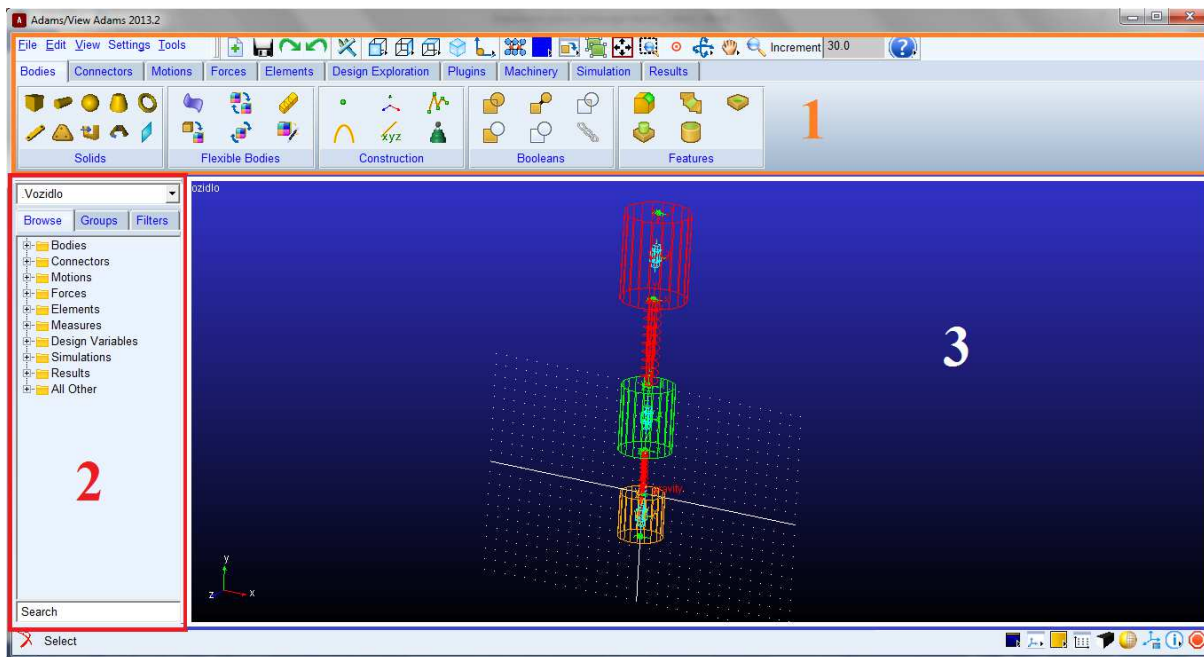


4 MODEL V PROGRAMU ADAMS

ADAMS v angličtině znamená „The Multibody Dynamics Simulation Solution“, v češtině se v souvislosti s tímto programem mluví o Multibody systému. Je produktem společnosti MSC Software pocházející z USA. Tento multibody systém je užitečným nástrojem pro zjišťování a poznávání dynamiky pohybujících se částí nebo těles, statické a kinematické analýzy modelů. Dále je užitečným nástrojem pro výpočet zatížení a sil uvnitř mechanických systémů.

V zadání diplomové práce je „prověřit možnost využití sestavených řídicích algoritmů pro použití v programu Adams/Car“. Po několika neúspěšných pokusech spustit simulaci v tomto programu a po konzultaci tohoto problému s vedoucím diplomové práce panem Ing. Ondřejem Blaťákem, Ph.D. a panem Ing. Janem Fojtáškem bylo v mé diplomové práci povoleno použít pro tento bod zadání program Adams/View. Adams/Car totiž obsahuje několik přednastavených možností simulace různých částí automobilu, jako je řízení, zavěšení náprav a dalších. Pro řešení čtvrtinového modelu v tomto programu by bylo zapotřebí vytvořit vlastní simulační template (Major role), která by byla nad rámec této diplomové práce.

Adams používá na rozdíl od Matlab/Simulink jinou tvorbu modelu. Nejedná se tedy o matematický model tvořený na základě bloků a propojení mezi jednotlivými bloky navzájem. Adams používá pro vytvoření modelu částí tzv. „part“, což jsou jednotlivé části modelu. Jako propojení mezi jednotlivými částmi modelu se používají vazby nebo další komponenty, jako jsou tlumiče nebo pružiny.



Obr. 20 Prostředí Adams/View

Prostředí Adams/View je rozděleno jako Matlab/Simulink do tří částí:

- 1 – Panely nástrojů (obsahují karty, ve kterých jsou jednotlivé příkazy pro vytvoření, částí modelu, vazeb, zatížení nebo také třeba nastavení simulace)



- 2 – Strom modelu (informace a možnost snadného vyhledání částí modelu, vazeb, silového zatížení, měření a jiných)
- 3 – Pracovní okno (pro zobrazení a práci s modelem)

4.1 POSTUP MODELOVÁNÍ

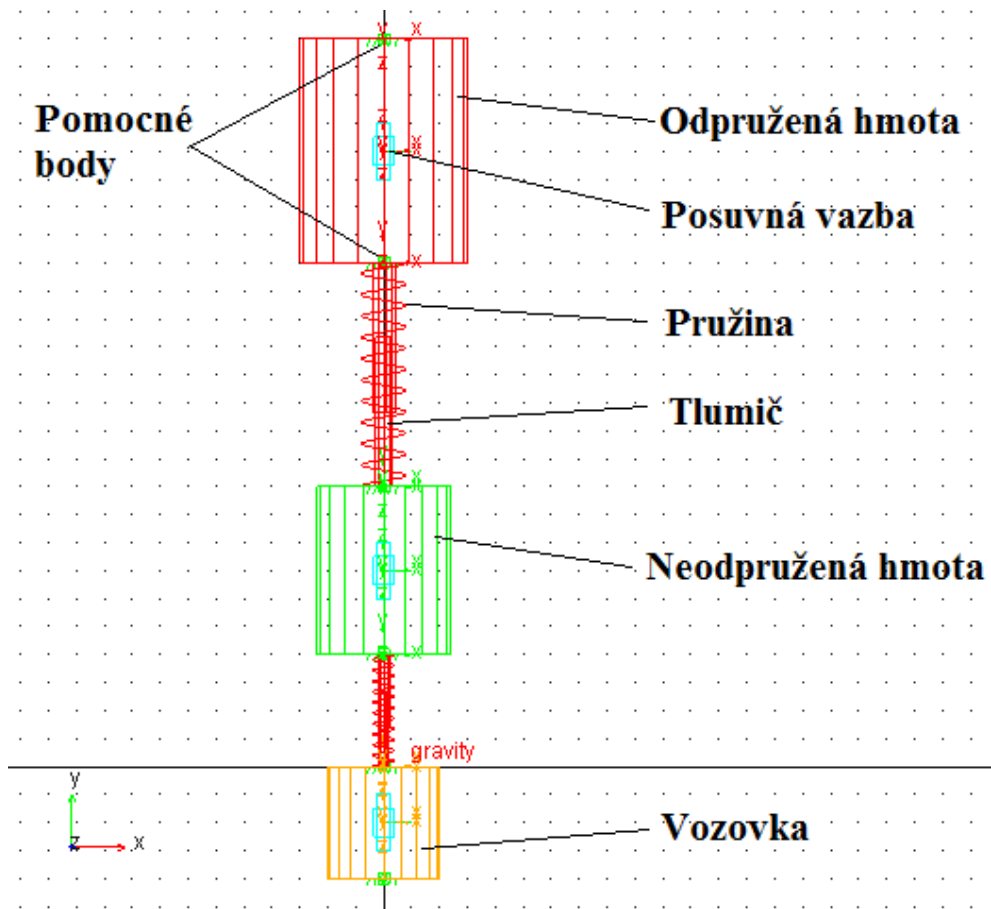
Model vytvořený v multibody systému Adams je koncipovaný pro použití se systémem Matlab. V případě otevření takového modelu v prostředí programu Adams a spuštění simulace se model nebude pohybovat. V modelu není nastavena tlumící síla mezi odpruženou a neodpruženou hmotou ani budící signál vyvolaný profilem vozovky. Tyto parametry jsou modelu dodány ze systému Matlab. Propojení těchto dvou programů a komunikace mezi nimi je popsána v kapitole 5.

Pro vymezení rozměrů modelu byly vytvořeny pomocné body s polohou uvedenou v tabulce 5. Pro vytvoření bodů slouží tzv. „Construction Geometry: Point“, cesta k vytvoření bodů: *Bodies/Construction/Construction Geometry:Point*. Jako tělesa představující odpruženou hmotu, neodpruženou hmotu a vozovku, byly zvoleny tuhá válcová tělesa. Pro vytvoření tuhých válcových těles v Adams/View: *Bodies/Solids/RigidBody:Cylinder*.

Tab. 5 Souřadnice pomocných bodů

Název bodu	Souřadnice X	Souřadnice Y	Souřadnice Z
	[mm]	[mm]	[mm]
S_up	0	1300	0
S_down	0	900	0
U_up	0	500	0
U_down	0	200	0
Road_1	0	0	0
Road_2	0	-200	0

Pro vytvoření pružiny zavěšení a dále pružiny a tlumení představující vlastnosti pneumatiky byly použity tělesa s odpovídajícími vlastnostmi těchto prvků: *Forces/Flexible Connections/Create Translational Spring - Damper*. Tlumič umístěný mezi odpruženou a neodpruženou hmotou byl z důvodu semi-aktivního řízení nahrazen silou působící mezi těmito dvěma tělesy: *Forces/Applied Forces/Create a Force (Single – Component) Applied Force*. Vysvětlení proč je použita síla namísto tlumiče je vysvětlena v kapitole 5. Jako buzení je nejvhodnější použít pohybový vektor působící v ose y: *Motion/General Motions*. K zajištění pohybu čtvrtinového modelu pouze v ose y byl použit typ posuvných vazeb: *Connectors/Joints/Create a Translational joint*, s omezením pohybu ve všech osách mim osu y. Taktéž byl zamezen rotační pohyb kolem všech tří os. Na obrázku 21. je zobrazen model sestavený v programu Adams/View a popsány jednotlivé části.



Obr. 21 Čtvrtinový model vozidla v programu Adams/View



5 KOMUNIKACE MEZI MATLAB/SIMULINK – ADAMS/VIEW

Součástí Adamsu je „control system“, který je jednoduchým nástrojem, který kontroluje vstupy a výstupy modelu. Díky tomu jsou ostatní programy schopny komunikace s Adams/View a ostatními podprogramy Adams. Celkem se pro komunikaci mezi Matlab/Simulink a Adams/View dají použít tři způsoby [14]:

- Discrete Co-simulation
 - Nejčastěji používaná metoda, typicky nejrobustnější
 - Adams řeší část modelu vytvořeného v Adamsu a Matlab řeší druhou část modelu vytvořenou v Matlabu
- Function Evaluation
 - Matlab integruje všechny rovnice
 - Méně robustní, vhodná pro komplexní systémy
- External Function Evaluation (XFE)
 - Adams integruje všechny rovnice
 - Matlab vytvoří soubor s příponou .dll který funguje jako tzv. „black box“

Každá z jednotlivých možností komunikace má své výhody a nevýhody. Pro prověření možností využití sestavených řídicích algoritmů ze softwaru Matlab implementovaných do programu Adams/View a opačně, byla v této diplomové práci použita metoda discrete co-simulation a external function evaluation.



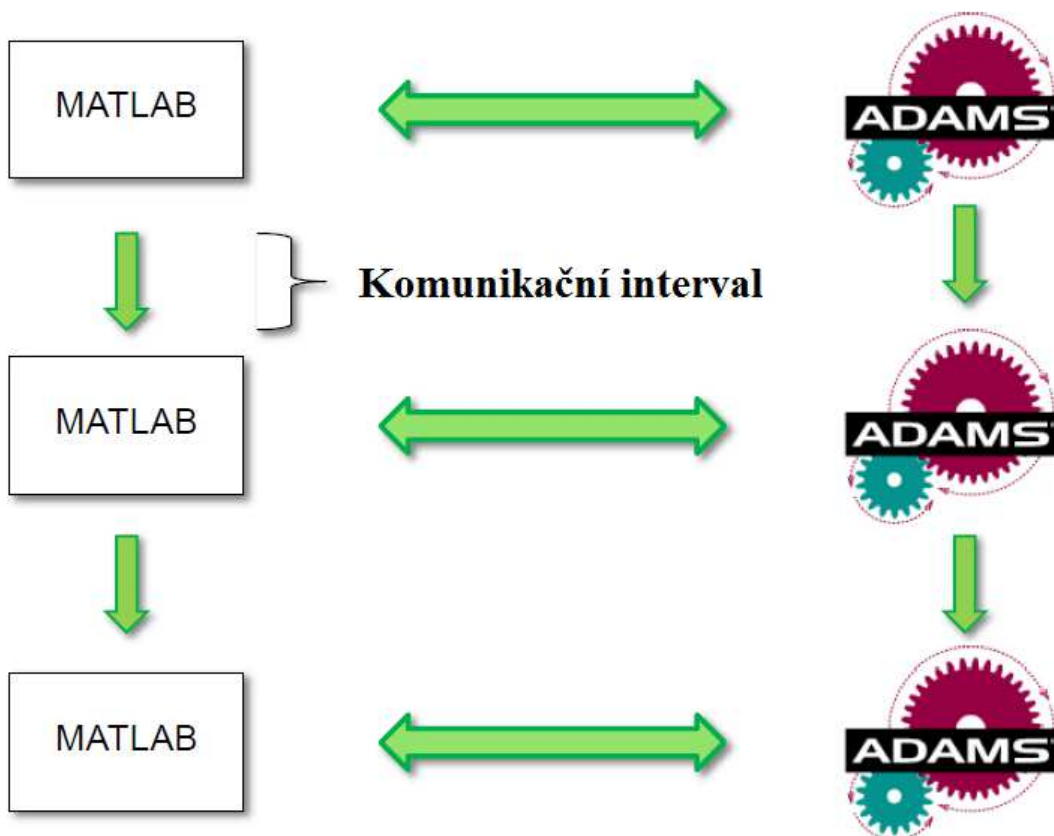
Obr. 22 Vstupy a výstupy z programu Adams [14]

5.1 DISCRETE CO-SIMULATION

Tato metoda je považována za nejjednodušší a nejrychlejší propojení mezi programy Matlab a Adams. Současně nevyžaduje žádnou instalaci volitelných doplňků nebo rozšíření obou programů. Tento způsob spočívá ve vytvoření vstupních a výstupních hodnot z modelu a následnou importaci vytvořeného modelu z programu Adams přes obsažený control system. Oba programy mezi sebou komunikují v reálném čase, jak je znázorněno na obrázku 23. Systém Matlab v tomto případě do modelu dodává informace o profilu povrchu vozovky a řídí konstantu tlumení na základě získaných informací o poloze, rychlosti a zrychlení

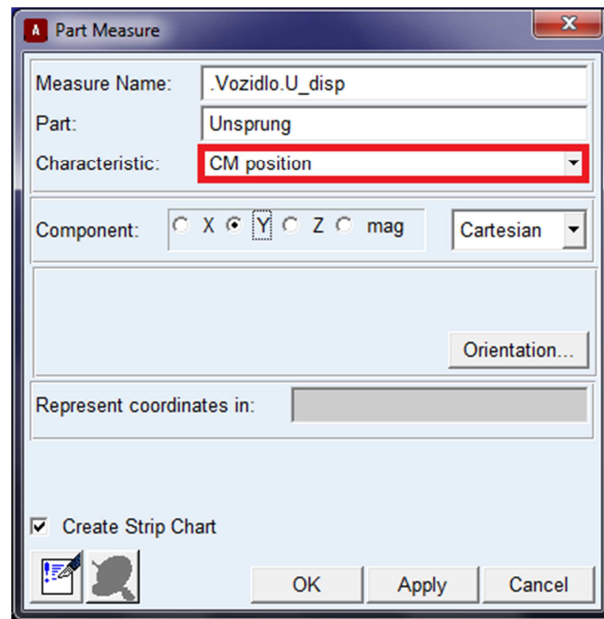


odpružené i neodpružené hmoty. Adams má potom za úkol vypočítat vzájemné působení mezi jednotlivými tělesy a dodat Matlabu informace o již zmíněných kinematických veličinách.



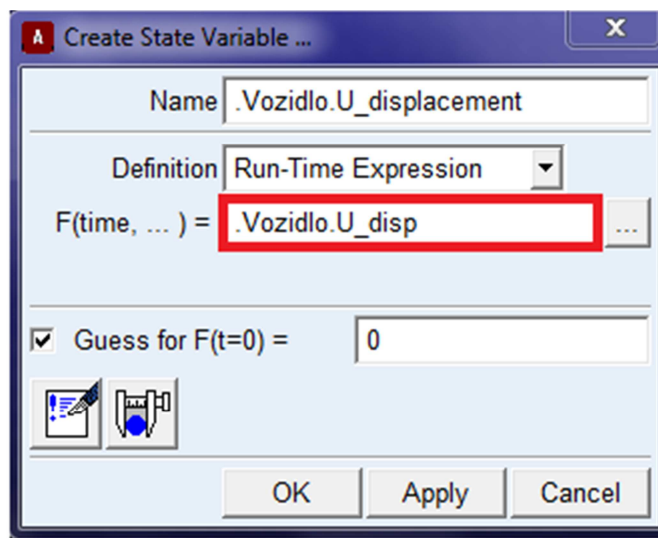
Obr. 23 Komunikace mezi programy Matlab/Simulink a Adams/View [14]

Aby modely z obou programů bylo možné propojit, musel být stávající model v Adamsu upraven a doplněn. V první řadě musely být vytvořeny jednotlivá měřící zařízení na odpružené i neodpružené hmotě, které snímají aktuální polohu, rychlost a zrychlení. To se provede pomocí vytvoření nového měření: *Design Exploration/Measures/Create a new Measure*. Pro měřící zařízení je nutné přiřadit název měřícího zařízení, zvolit těleso, na kterém měření bude probíhat, zvolit charakter měření a osu ve které má měření probíhat. Nastavení měření pro zjištění polohy neodpružené hmoty je uvedeno na obrázku 24, kde je měřící zařízení umístěno na neodpružené hmotě, měří polohu těžiště příslušného „partu“ a měří v ose rovnoběžné s osou y.



Obr. 24 Vytvoření měřícího zařízení

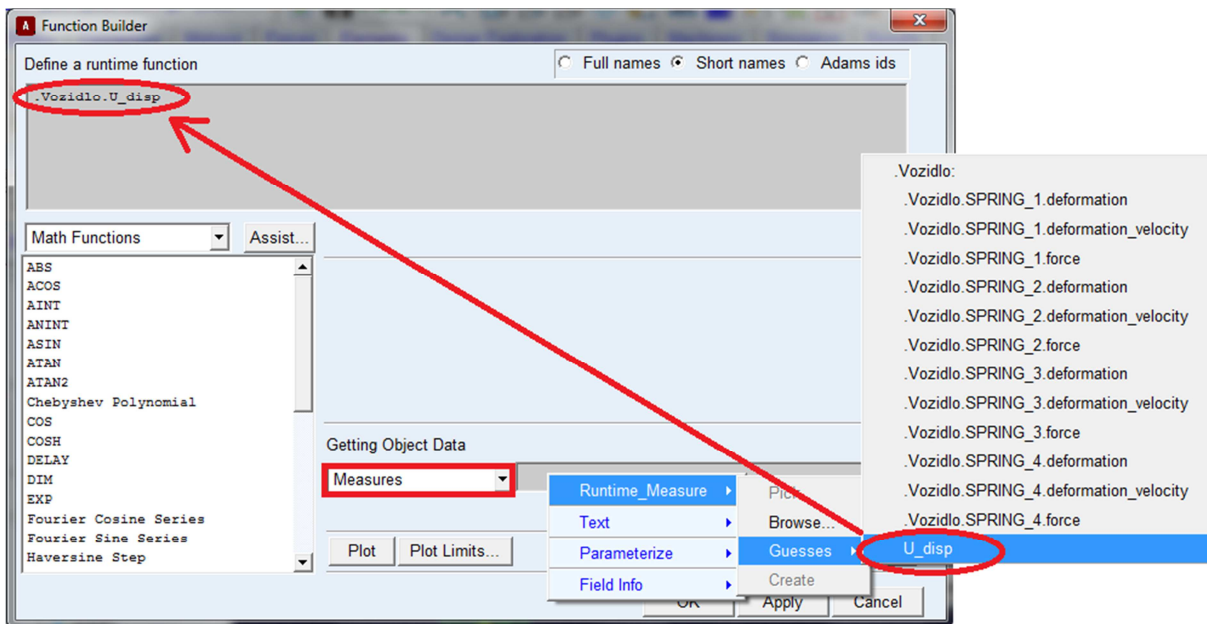
Dalším bodem úprav stávajícího modelu bylo vytvoření tzv. „variables“. To jsou proměnné, které později budou vstupovat nebo vystupovat z modelu a zadají se pomocí: *Elements/System Elements/Create a State Variable defined by an Algebraic Equation*. Celkem bylo zapotřebí vytvořit šest výstupních a dvě vstupní proměnné. Vstupními proměnnými jsou profil vozovky a tlumičí síla, která působí mezi odpruženou a neodpruženou hmotou a nahrazuje v modelu funkci tlumiče. Výstupními proměnnými jsou potom poloha, rychlost a zrychlení odpružené i neodpružené hmoty.



Obr. 25 Vytvoření proměnné „variable“

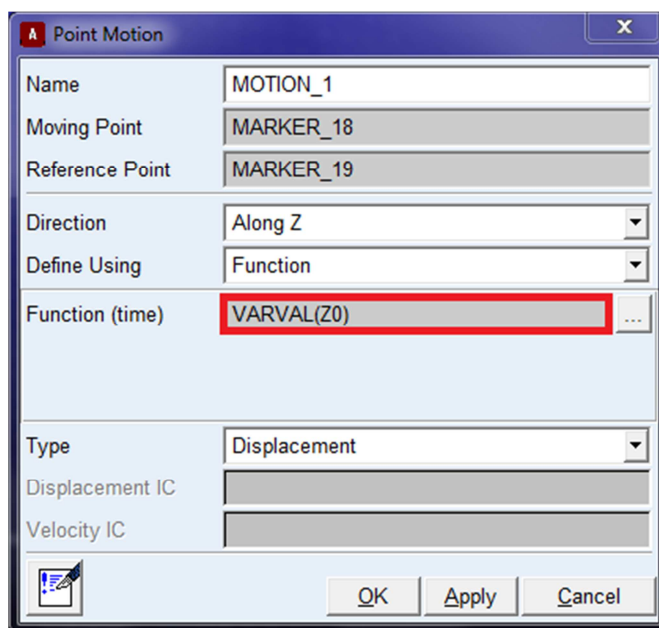
Pro vytvoření proměnné je potřeba zadat název, definici a funkci. Přiřazení funkce proměnné je znázorněna na obrázku 26. Z okna „Getting Object Data“ je potřeba zvolit „Measure“ a do okna vedle vložit měření, které odpovídá právě vytvářenému vstupu nebo výstupu z modelu. Po zvolení příslušného měření se v okně „Define a runtime function“ zobrazí příslušný název zvoleného měření. Tento postup je potřeba opakovat pro všechny

výstupy z modelu. Pro vstupní proměnné se pole s funkční hodnotou ($F(\text{time}, \dots)=$) nastaví na hodnotu nulovou.



Obr. 26 Nastavení funkční proměnné „variable“

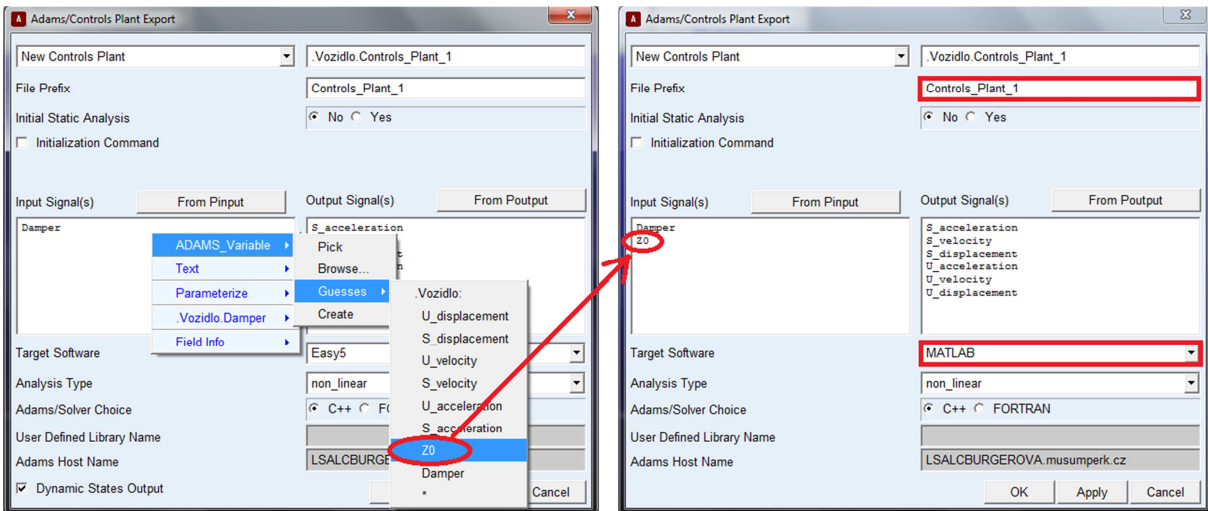
Kvůli možnosti měnit v průběhu konstantu tlumení dle řídicího algoritmu musel být v modelu semi-aktivní tlumič nahrazen silou mezi odpruženou a neodpruženou hmotou. Síla totiž umožňuje na rozdíl od prvku tlumiče vkládat jako vstupní funkce variabilní proměnnou. Variabilní proměnná se vloží namísto předpisu funkce daného prvku (motion nebo force) ve tvaru „ $\text{VARVAL}(\text{Název proměnné})$ “, tak jak je uvedeno na obrázku 27 pro pohyb, který vyvolává profil vozovky je předepsaná variabilní proměnná Z0. Hodnoty proměnné Z0 jsou dodány modelu z programu Matlab.



Obr. 27 Přiřazení funkční hodnoty „VARVAL“



Pokud jsou všechny proměnné přiřazeny jednotlivým vstupům a výstupům z modelu, lze přejít k exportování modelu z programu Adams/View do programu Matlab. To provedeme pomocí příkazu: Plugins/Controls/Plant Export. Zde je potřeba nastavit název souboru, nastavit vstupní a výstupní proměnné a v poli „Target Software“ změnit cílový software na Matlab, do kterého export chceme provést. Nastavení modelu pro exportování je uvedeno na obrázku 28.



Obr. 28 Nastavení modelu při exportování do programu Matlab

Pro otevření modelu v programu Matlab je potřeba nastavit výchozí složku (Working directory) do složky s modelem exportovaným z programu Adams/View. Dále je potřeba načíst model pomocí příkazu, který odpovídá názvu exportovaného modelu, například „Controls_Plant_1“, zobrazí se seznam názvů vstupních a výstupních bodů modelu. Dalším příkazem je potřeba vygenerovat model pro požití v programu Matlab. Generace modelu jako blokové schéma se provede pomocí příkazu „adams_sys“. Na obrázku 29 je pracovní okno z programu Matlab. Po načtení modelu se vypíše informace o vstupních a výstupních veličinách potřebných pro model. Na obrázku 30 je potom zobrazen blokový model po vygenerování příkazem „adams_sys“. Tento model je možné dále upravovat a doplnit o algoritmus řízení konstanty tlumení.

```

Command Window

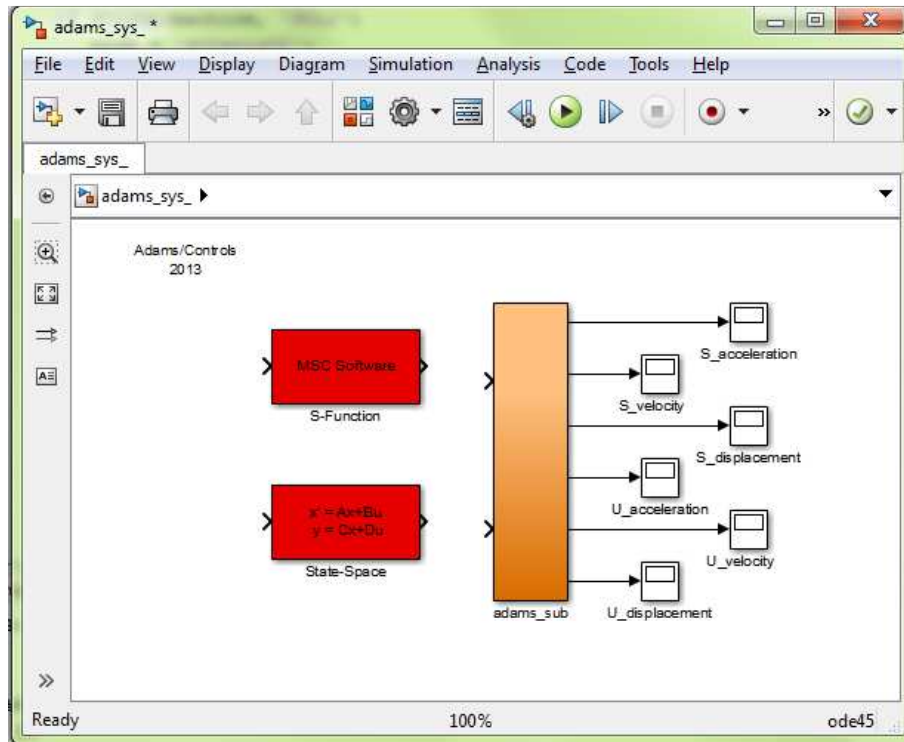
ans =

14-Apr-2016 12:16:13

### INFO : ADAMS plant actuators names :
1 Z0
2 damper
### INFO : ADAMS plant sensors names :
1 S_acceleration
2 S_velocity
3 S_displacement
4 U_acceleration
5 U_velocity
6 U_displacement

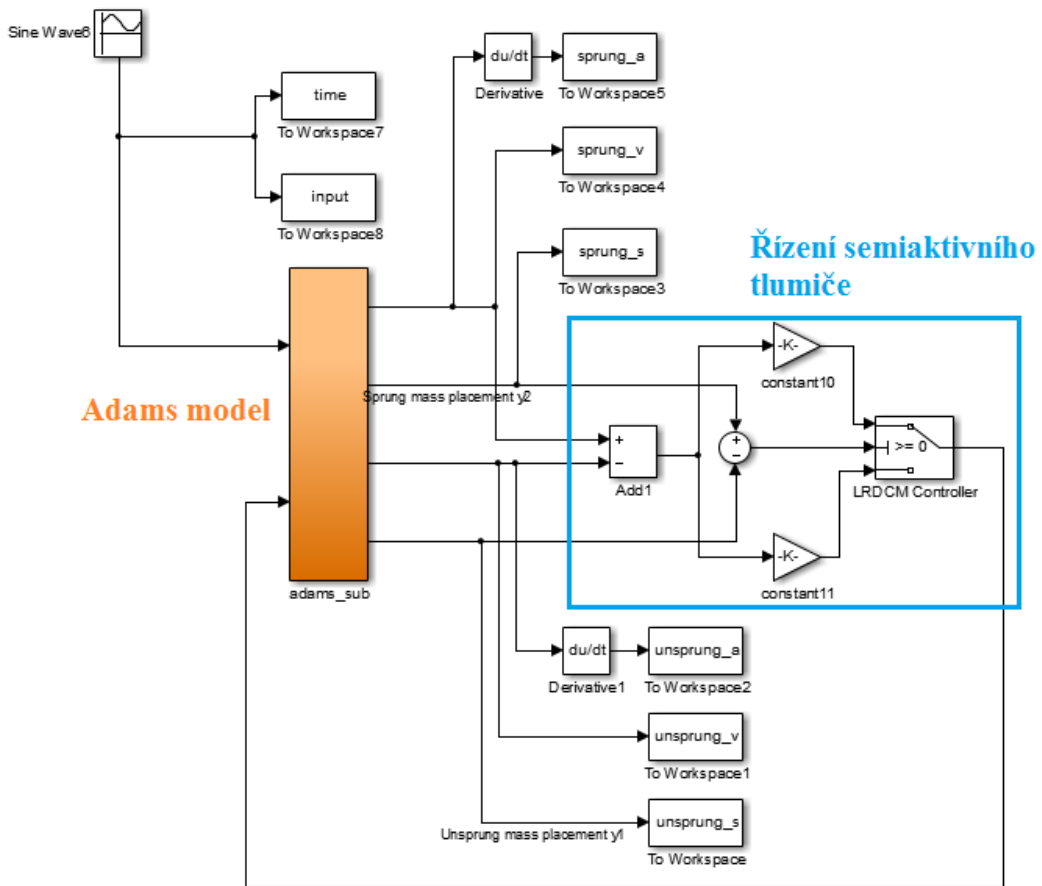
```

Obr. 29 Vyvolání příkazu pro načtení modelu z programu Adams do programu Matlab



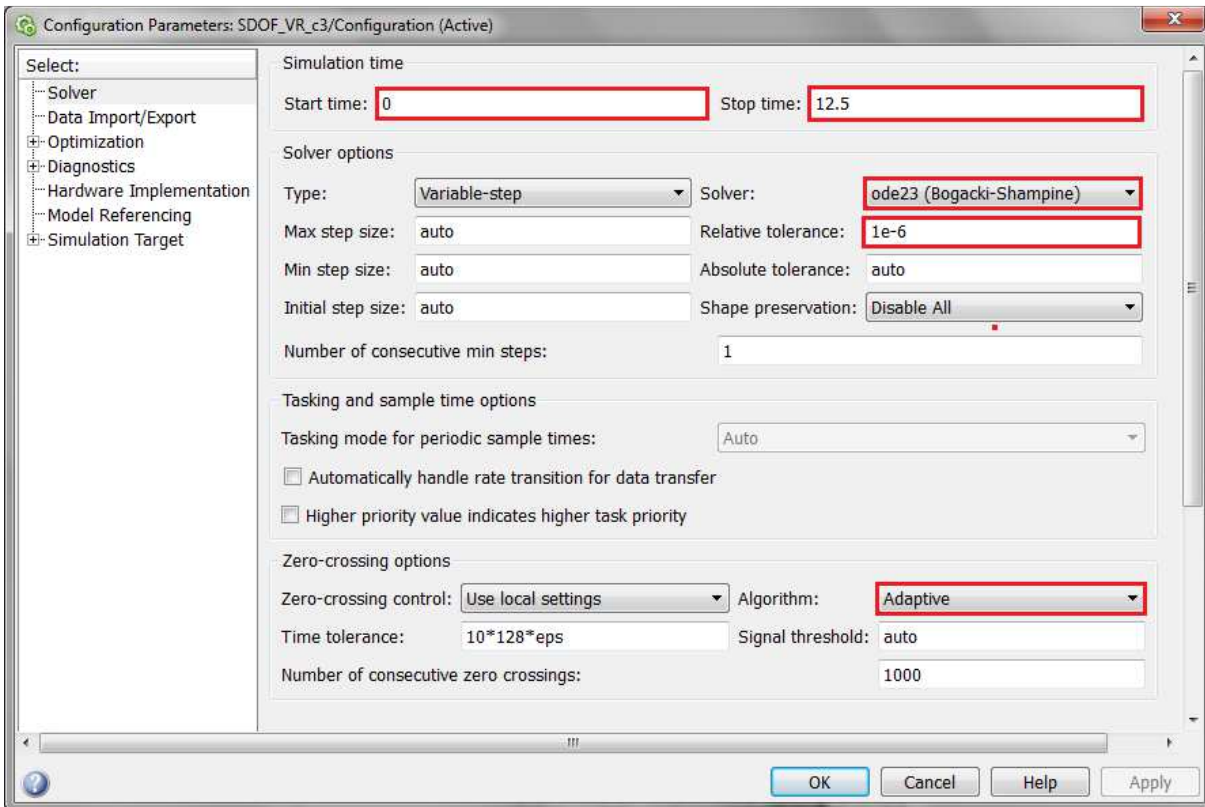
Obr. 30 Vygenerované blokové schéma v programu Matlab

Na obrázku 31 je potom vidět upravený model v programu Matlab, který obsahuje model z programu Adams, řídicí algoritmus konstanty tlumení a vstupní signál do modelu. Řízení semi-aktivního tlumiče používá pro svou funkci hodnoty vycházející z modelu a na základě rozhodovací funkce určí tlumící sílu, kterou posílá zpět jako vstup do modelu. Oba programy proto spolu musí komunikovat v aktuálním čase, jelikož jak už bylo řečeno na začátku, program Matlab řídí konstantu tlumení a program Adams počítá vzájemné silové působení mezi jednotlivými hmotami čtvrtinového modelu vozidla.



Obr. 31 Řízení semi-aktivního tlumiče v programu Matlab s modelem vozidla z programu Adams

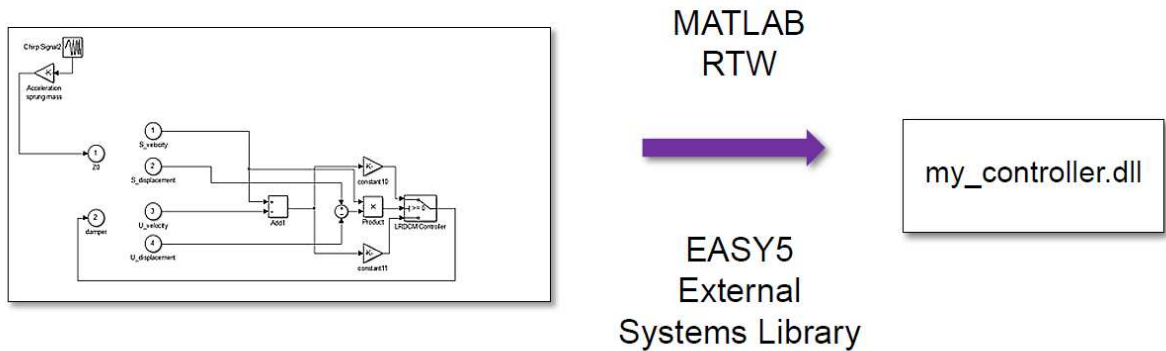
Před samotným spuštěním je potřeba modelu nastavit počáteční čas simulace, koncový čas ukončení simulace, zvolit typ řešiče a nastavit přesnost simulace. V případě že nastavení těchto hodnot nenastane, pak při spuštění simulace je potřeba nastavit pouze koncový čas simulace a ostatní parametry nastaví program samostatně. Pro zvýšení přesnosti výpočtu je však vhodné zvolit alespoň metodu řešení a přesnost řešení. Jako dostatečná přesnost měření byla zvolena relativní tolerance 10^{-6} a jako vhodná metoda výpočtu byla vybrána metoda *ode23 (Bogacki-Shampine)*. Nastavení řešiče je zobrazeno na obrázku 32.



Obr. 32 Nastavení řešiče v programu Matlab

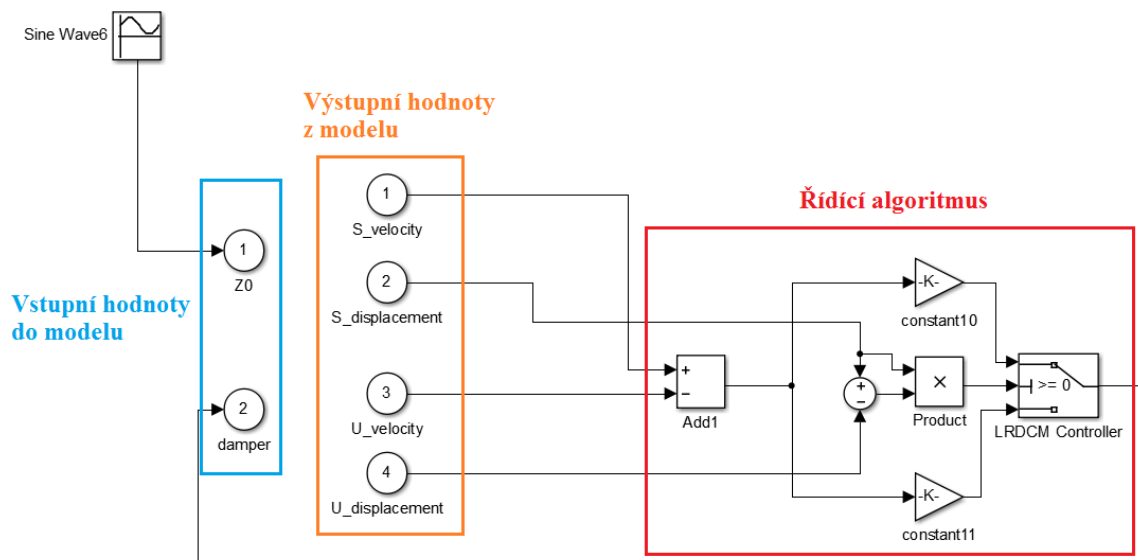
5.2 EXTERNAL FUNCTION EVALUATION (XFE)

Tato metoda komunikace mezi programy Matlab/Simulink a Adams/View je známá pod pojmem „external function evaluation“ nebo „external system library“. Spočívá ve vytvoření souboru s příponou .dll z modelu vytvořeného v prostředí Matlab/Simulink. Tento soubor obsahuje informace o profilu vozovky a řídicí algoritmus pro řízení tlumící síly. Soubor se generuje přímo z modelu v programu Matlab/Simulink pomocí podpory doplňkového compileru od společnosti Microsoft, který pracuje v prostředí programovacího jazyka C++. Tato metoda je složitější na vytvoření funkčních vazeb mezi programy a v případě změny nastavení v algoritmu řízení je potřeba znovu generovat soubor s příponou .dll, avšak je užitečnější při opakovaném užívání již vytvořených algoritmů řízení.



Obr. 33 Vytvoření souboru s příponou .dll pro použití metody external system library [14]

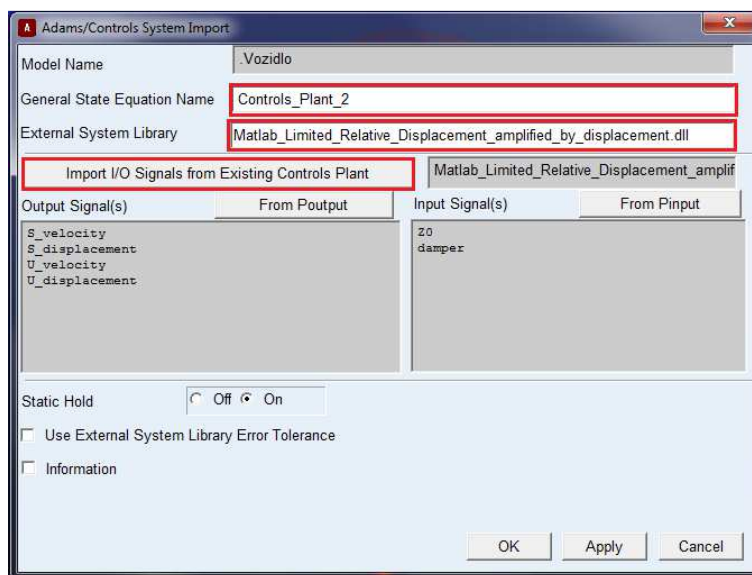
Model řídicího algoritmu (vytvořeného v prostředí programu Matlab/Simulink) exportovaného do souboru .dll je zobrazen na obrázku 34. Mimo samotný řídicí algoritmus tlumící konstanty obsahuje model i vstupy a výstupy potřebné pro odeslání a získání informací. Nastavení modelu v programu Adams je shodné s nastavením modelu při exportování pro použití v programu Matlab/Simulink (discreate co-simulation) popsané v předešlé kapitole 5.1 a to až do bodu exportování modelu pomocí *Plugins/Controls/Plant Export*. Pro správnou komunikaci souborů je potřeba, aby vstupní a výstupní body modelu měly stejný název v souboru s řídicím algoritmem (s koncovkou .dll) i v souboru obsahující model čtvrtinového vozidla. V opačném případě by program nenašel vstupní bod do modelu a pracoval by s nulovými hodnotami.



Obr. 34 Model řídicího algoritmu pro použití metody external system library [14]

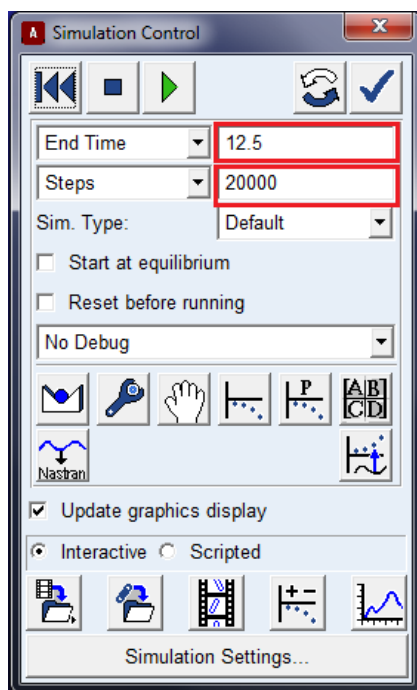
Pro další postup je potřeba otevřít již existující model v programu Adams/View a zvolit funkci pro import kontrolního systému: *Plugins/Controls/Control System/Import*. Zobrazí se okno jako na obrázku 35. V kolonce s názvem „General State Equation Name“ je potřeba uvést název měření do kterého se budou v simulaci ukládat výsledky. Po stisku

tláčítka s názvem „Import I/O Signals from Existing Controls Plant“ je potřeba zvolit již existující kontrolní systém, tedy ten co byl vytvořen v předchozí kapitole 5.1. V kolonce s názvem „External System Library“ je potřeba vybrat cestu k souboru s příslušným algoritmem řízení, tedy soubor s koncovkou .dll. Vstupní a výstupní signály modelu jsou automaticky načteny z existujícího kontrolního systému a propojeny se vstupy z řídicího algoritmu.



Obr. 35 Import kontrolního systému

Následně byla spuštěna simulace v programu Adams/View pomocí *Simulation/Simulate/Run an Interactive Simulation*, nastavena hodnota ukončení simulace v čase 12,5 s a vzorkovací frekvence na 20 000 kroků v průběhu celého simulačního času.

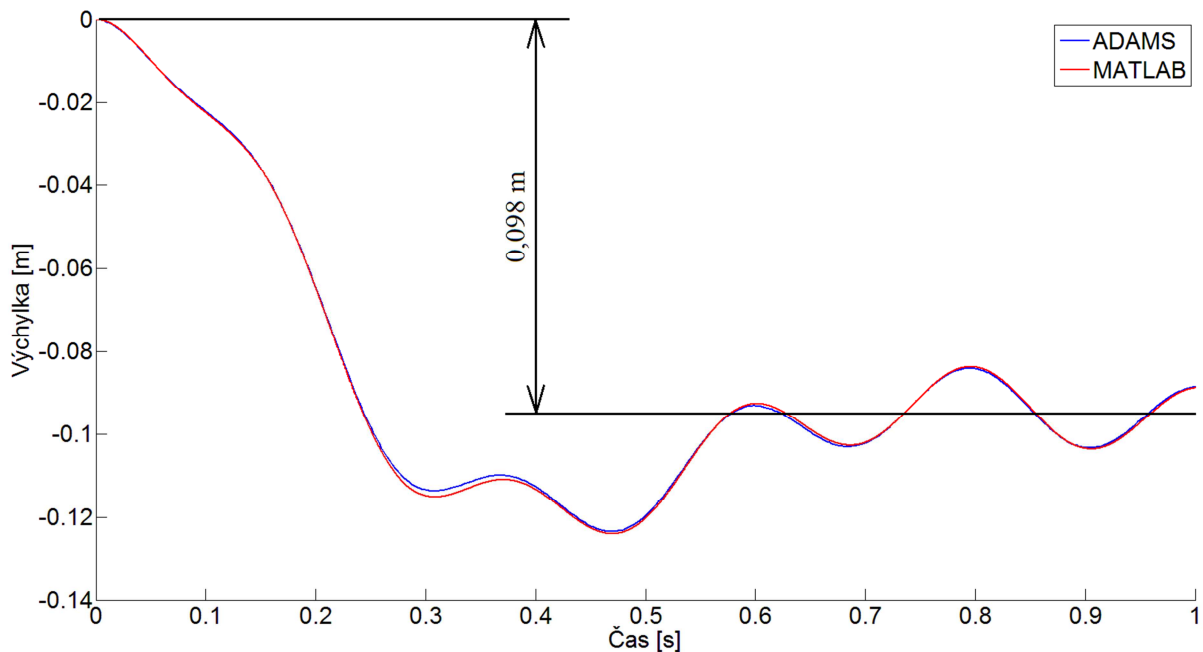


Obr. 36 Nastavení simulace v programu Adams/View



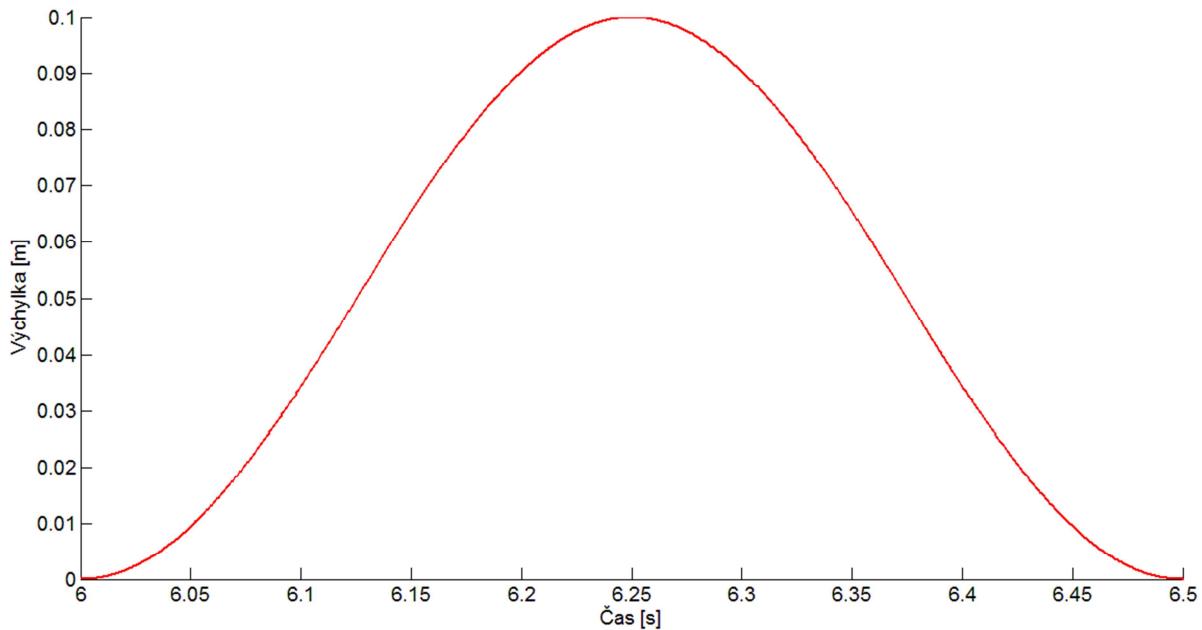
6 SIMULACE

Simulace probíhala po dobu 12,5 s z důvodu dostatečného ustálení modelu, jelikož matematické modely mají tendenci se po spuštění a náběhu na první hodnoty rozkmitat. Rozkmitání bylo také způsobeno tím, že model byl modelován jako uvolněný, tedy že na zavěšení nepůsobilo žádné předepnutí od gravitačního zrychlení. To se projevilo až po spuštění simulace poklesem odpružené a neodpružené hmoty vozidla, kdy začalo působit gravitační zrychlení a došlo ke stlačení pružiny a pneumatiky vlivem hmotnosti vozidla. Pro vyhodnocení byly použity hodnoty až po dostatečném ustálení modelu, které se lišilo v závislosti na typu použitého algoritmu řízení. Jako dostatečný interval, od kterého byly výsledky považovány za dostatečně přesné, byl zvolen časový interval od 6 do 12,5 s. Tento interval se dá považovat jako dostatečně neovlivněný počátečním rozkmitáním u všech modelovaných algoritmů řízení. Rozkmitání modelu na začátku simulačního času je zobrazeno v grafu 1.



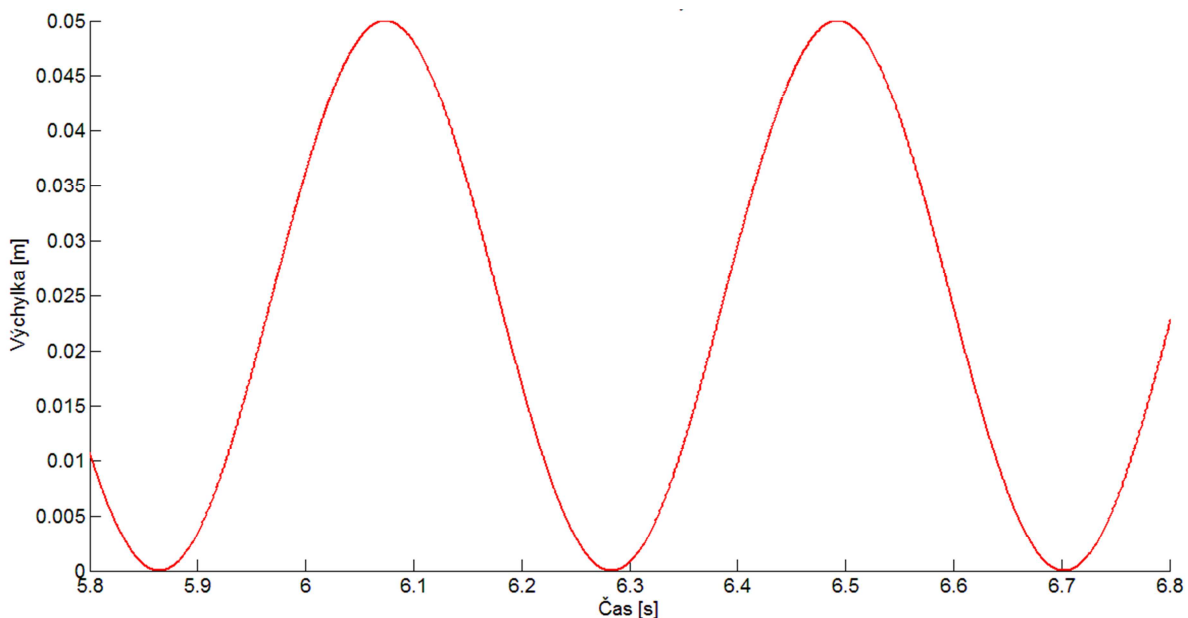
Graf. 1 Rozkmitání odpružené hmoty na začátku simulačního času.

Jako vstupní profil vozovky byly vymodelovány dva druhy signálů. První signál je zobrazen v grafu 2. Jedná se o jednu vlnu sinusového signálu začínající v čase 6 s a ukončený v čase 6,5 s, amplituda budícího signálu odpovídá velikosti 0,1 m. Před touto vlnou je konstantní signál s funkční hodnotou 0 m z důvodu již zmíněného ustálení modelu. Stejnou hodnotu má signál za tímto sinusovým signálem z důvodu sledování chování vozidla po přejetí nerovnosti. Signál svým tvarem neodpovídá žádné předepsané konstantní rychlosti. Model s tímto signálem pracuje bez rychlosti vozidla, protože vstupní signál je zadán v závislosti amplitudy povrchu vozovky na čase. V případě že by byl signál znázorněn v závislosti amplitudy povrchu vozovky na ujeté vzdálenosti, pak by tento signál odpovídal jedné konkrétní hodnotě rychlosti vozidla, ale bylo by potřeba do modelu dodávat další proměnnou a tím by byl čas, podle kterého by mohly probíhat derivace a integrály hodnot. Oba signály tedy v případě použitím v modelu odpovídají libovolné rychlosti vozidla, ale profil vozovky se této rychlosti vozidla musí přizpůsobit. Jednoduše řečeno, musí odpovídat časovému intervalu, za který vozidlo přejede nerovnost vozovky s danou amplitudou.



Graf. 2 Profil vozovky – jedna vlna tvaru sinusovky (profil vozovky A)

Druhý ze signálů sloužil k zjištění jak se vozidlo, neboli odpružená hmota chová vzhledem k neodpružené hmotě při přejezdu periodicky opakující se nerovnosti na vozovce. Pro tento účel byl vymodelován signál v podobě periodického sinusového signálu s amplitudou 0,025 m, část tohoto signálu je zobrazena v grafu 3. Počátek signálu byl záměrně posunut na hodnotu nula, z důvodu hladkého náběhu modelu na profil vozovky. V případě že by hodnota na počátku simulace nebyla nulová, docházelo by v tomto místě k velkému zrychlení a ovlivnění nebo prodloužení doby potřebné pro ustálení modelu.



Graf. 3 Profil vozovky – opakovaný sinusový signál (profil vozovky B)

Hodnoty simulací které probíhaly v programu Matlab, byly načteny do paměti programu pomocí bloku „To workspace“ a byl vytvořen m.script pro práci s naměřenými

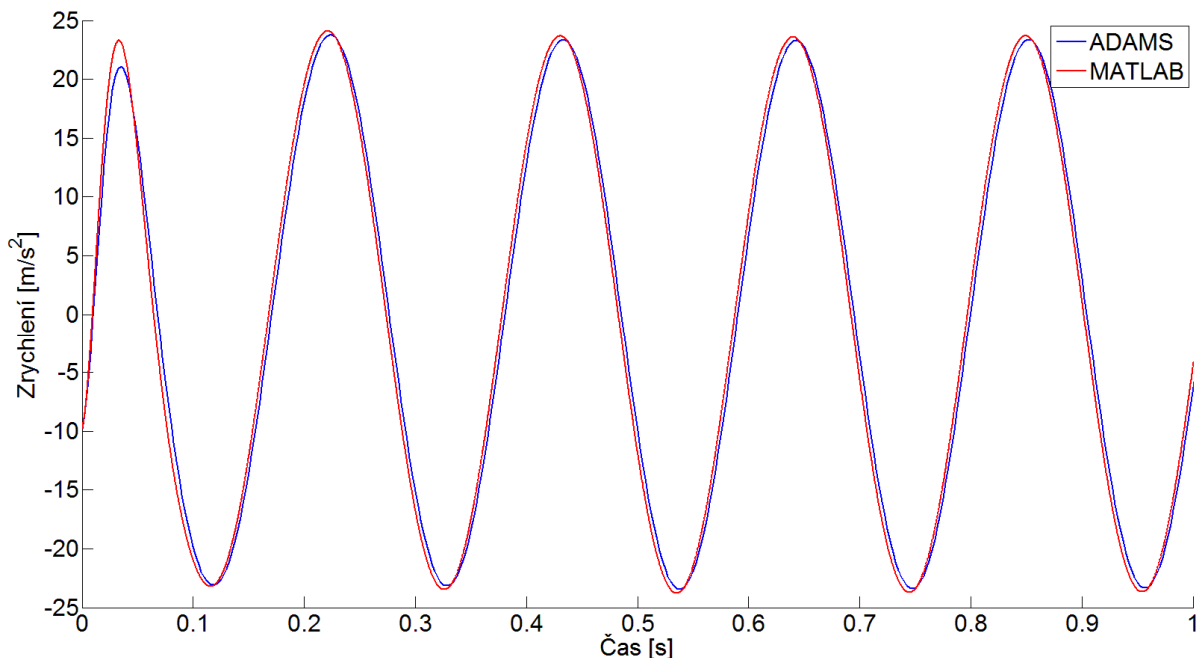


hodnotami. Script obsahoval uložení naměřených hodnot do textového souboru .gaf, aby bylo možné s hodnotami později pracovat bez nutnosti spuštění nové simulace. Dále obsahoval výpočet minimální síly pod pneumatikou, průměrnou hodnotu, rozptyl a směrodatnou odchylku zrychlení odpružené i neodpružené hmoty a síly pod pneumatikou. Pro výpočet průměrné síly pod pneumatikou a zrychlení odpružené i neodpružené hmoty byla použita metoda centrálních diferencí.

Výsledky pro jejichž získání bylo potřeba simulace v programu Adams byly zpracovány v Adams/PostProcessor, zde byly exportovány pomocí File/Export/Table do souboru .tab. Výpočty byly provedeny jako v předchozím případě v programu Matlab pomocí m.scripu stejnou metodikou.

6.1 VALIDACE VÝSLEDKŮ

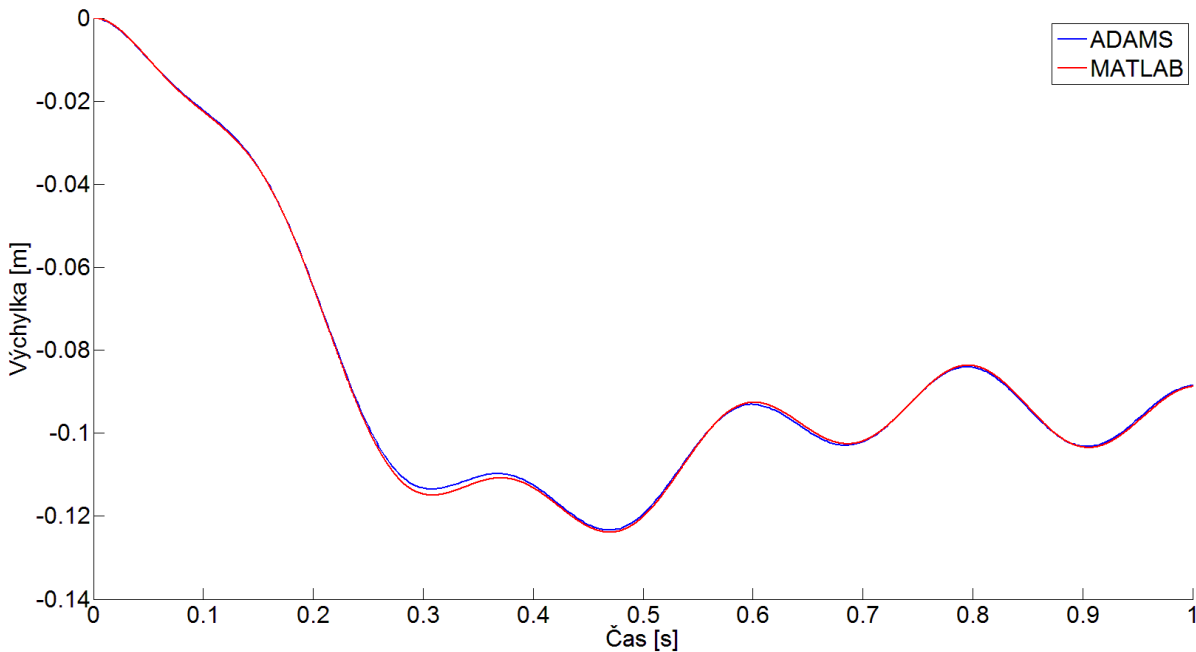
Pro validaci neboli ověření správné funkce modelů byly porovnávány navzájem výsledky simulací z programu Matlab a propojení mezi programy pomocí metody „external function evaluation“ popsané v kapitole 5.2, kde většinu modelu a simulaci řeší program Adams. Pro porovnání byl zvolen typ budícího signálu (profilu vozovky) s periodicky opakující se sinusovkou. K porovnání výsledků bylo zapotřebí vložit naměřené hodnoty do společných grafů. Validace výsledků byla provedena pro všechny algoritmy řízení uvedené v této diplomové práci. Po prověření že modely v obou programech pracují s minimálními rozdíly shodně byly všechny následující simulace prováděny pouze v programu Matlab/Simulink, z důvodu kratšího výpočetního času.



Graf. 4 Skyhook control method – zrychlení neodpružené hmoty

Rozdíly mezi vypočítanými výsledky měření obou programů byly minimální. Největší odchylky mezi hodnotami obou programů se modely dopouštěli na zrychlení neodpružené hmoty na samotném počátku simulace (graf 4), kdy dochází k ustálení modelu a zatížení gravitačním zrychlením. Naopak nejmenší odchylka byla zjištěna na relativní poloze

odpružené hmoty (graf 5). Logickým vysvětlením je, že se zvyšující se derivací polohy obou hmot roste odchylka. Výsledky z programu Matlab vykazovaly ve všech sledovaných případech vždy vyšší hodnoty v lokálních maximech a nižší hodnoty v lokálních minimech na křivkách jednotlivých sledovaných veličin.



Graf. 5 Skyhook control method – poloha odpružené hmoty

Zde v hlavní části práce uvádím pouze část ze sledovaných veličin, a to ty, které vykazovali největší rozdíly. Ostatní naměřené hodnoty s porovnáním výsledků z obou programů pro metody *skyhook control method* a *limited relative displacement control method* jsou vedeny v příloze číslo 8 umístěné na konci této práce.

6.2 PROVĚŘENÍ ŘÍDÍCÍCH ALGORITMŮ VZHLEDEM K JÍZDNÍMU KOMFORTU A JÍZDNÍ BEZPEČNOSTI

6.2.1 METODIKA MĚŘENÍ

Simulace probíhala v programu Matlab/Simulink. Postupně byly provedeny simulace u všech algoritmů řízení pro oba druhy budících signálů a při nastavení zavěšení (tlumící konstanty) na maximální jízdní komfort i maximální jízdní bezpečnost. Charakteristika tlumení byla vypočítána dle vztahu 23 pro maximální jízdní komfort a dle vztahu 24 pro maximální jízdní bezpečnost. Vztahy jsou uvedeny v kapitole 2.3. Hodnoty minimální konstanty tlumení byly vytvořeny s ohledem na konstrukční možnosti tlumičů se semi-aktivním řízením. Použité hodnoty konstant tlumení jsou uvedeny v tabulce 6. Hodnoty jako hmotnosti odpružených a neodpružených hmot, a ostatní hodnoty použité v simulaci jsou uvedeny v tabulce 3, v kapitole 3.1.



Při vyhodnocování vlivu jednotlivých algoritmů řízení byl použit následující postup. Pokud byly algoritmy řízení a jejich funkce sledovány v závislosti nastavení vozidla na maximální jízdní komfort, byly sledovány a porovnávány hodnoty a průběhy zrychlení odpružené hmoty, která má přímý vliv na pohodlí posádky při jízdě. Byla sledována zejména průměrná hodnota, rozptyl a směrodatná odchylka zrychlení odpružené hmoty vozidla při přejezdu nerovností. Všechny tyto parametry byly sledovány až po uběhnutí časového intervalu 6 s kvůli minimalizaci vlivu počátečního rozkmitání na výsledné hodnoty. Při sledování funkce algoritmů řízení vzhledem k maximální jízdní bezpečnosti byla nejdůležitějším sledovaným parametrem síla pod pneumatikou. Ta byla vypočítána z naměřených hodnot dle vztahu 21, který je uveden v kapitole 2.2. Také pro sílu pod pneumatikou byla zjištěna průměrná hodnota, minimální hodnota, rozptyl a směrodatná odchylka. Síla pod pneumatikou má největší vliv na bezpečnost jízdy, protože přímo vypovídá o kontaktu pneumatiky s vozovkou.

Tab. 6 Hodnoty minimální a maximální konstanty tlumení

Jízdní komfort		
Popis	Zkratka a jednotka	Hodnota
Maximální konstanta tlumení	$c_{Bmax}(z_B=min)$ [N·s·m ⁻¹]	1276,866
Minimální konstanta tlumení	$c_{Bmin}(z_B=min)$ [N·s·m ⁻¹]	776,866
Poměrný útlum maximální konstanty tlumení	$D_{Bmax}(z_B=min)$ [-]	0,164
Poměrný útlum minimální konstanty tlumení	$D_{Bmin}(z_B=min)$ [-]	0,100
Jízdní bezpečnost		
Popis	Zkratka a jednotka	Hodnota
Maximální konstanta tlumení pro	$c_{Bmax}(F=min)$ [N·s·m ⁻¹]	3671,514
Minimální konstanta tlumení pro	$c_{Bmin}(F=min)$ [N·s·m ⁻¹]	971,514
Poměrný útlum maximální konstanty tlumení	$D_{Bmax}(F=min)$ [-]	0,472
Poměrný útlum minimální konstanty tlumení	$D_{Bmin}(F=min)$ [-]	0,125

6.2.2 VÝSLEDKY

Zde v hlavní části práce uvádím pouze část grafických výsledků, ostatní průběhy všech sledovaných parametrů jsou uvedeny:

- V příloze 2 pro jízdní bezpečnost a budící signál s profilem vozovky A
- V příloze 3 pro jízdní komfort a budící signál s profilem vozovky A
- V příloze 4 pro jízdní bezpečnost a budící signál s profilem vozovky B
- V příloze 5 pro jízdní komfort a budící signál s profilem vozovky B



Tab. 7 Výsledné hodnoty pro jízdní bezpečnost, typ profilu vozovky A

Algoritmus řízení	Zesílení	Síla pod pneumatikou [N]		
		Minimální síla	Rozptyl	Směrodatná odchylka
Limited Relative Displacement	-	689	2037612	1427
Limited Relative Displacement	velocity	-514	2529848	1591
Limited Relative Displacement	displacement	689	2037612	1427
Limited Relative Velocity	-	812	2143393	1464
Passive	-	689	2037612	1427
Skyhook Control method	-	812	1614954	1271
Limited Relative Velocity	displacement	-997	2827858	1682
Modified Skyhook Control method	-	798	2145401	1465
Acceleration	-	699	2038651	1428

Tab. 8 Výsledné hodnoty pro jízdní komfort, typ profilu vozovky A

Algoritmus řízení	Zesílení	Odpružená hmota [$m \cdot s^{-2}$]		
		Průměr	Rozptyl	Směrodatná odchylka
Limited Relative Displacement	-	-0,158	11,066	3,327
Limited Relative Displacement	velocity	-0,200	13,318	3,649
Limited Relative Displacement	displacement	-0,166	11,124	3,335
Limited Relative Velocity	-	-0,158	11,066	3,327
Passive	-	-0,153	12,916	3,594
Skyhook Control method	-	-0,157	10,789	3,285
Limited Relative Velocity	displacement	-0,191	13,244	3,639
Modified Skyhook Control method	-	-0,158	12,926	3,595
Acceleration	-	-0,130	11,078	3,328

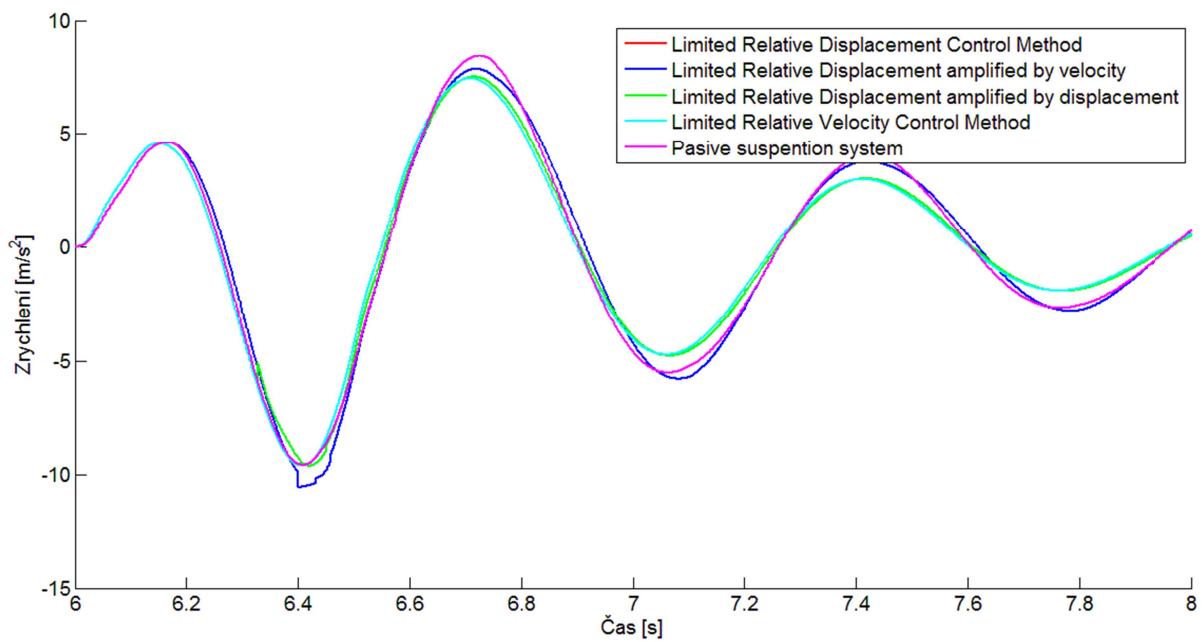


Tab. 9 Výsledné hodnoty pro jízdní bezpečnost, typ profilu vozovky B

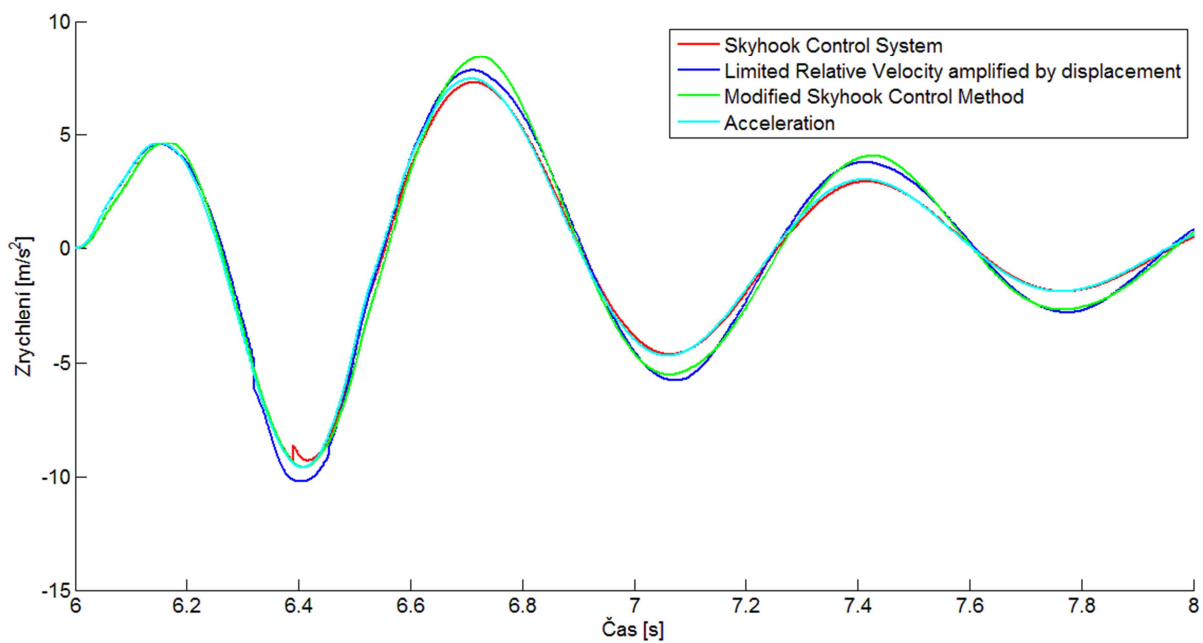
Algoritmus řízení	Zesílení	Síla pod pneumatikou [N]		
		Minimální síla	Rozptyl	Směrodatná odchylka
Limited Relative Displacement	-	2225	2133212	1461
Limited Relative Displacement	velocity	2047	1427056	1195
Limited Relative Displacement	displacement	2225	2133212	1461
Limited Relative Velocity	-	2079	1564109	1251
Passive	-	2225	2133212	1461
Skyhook Control method	-	2441	1352364	1163
Limited Relative Velocity	displacement	2235	1532946	1238
Modified Skyhook Control method	-	2071	1576088	1255
Acceleration	-	2230	2137449	1462

Tab. 10 Výsledné hodnoty pro jízdní komfort, typ profilu vozovky B

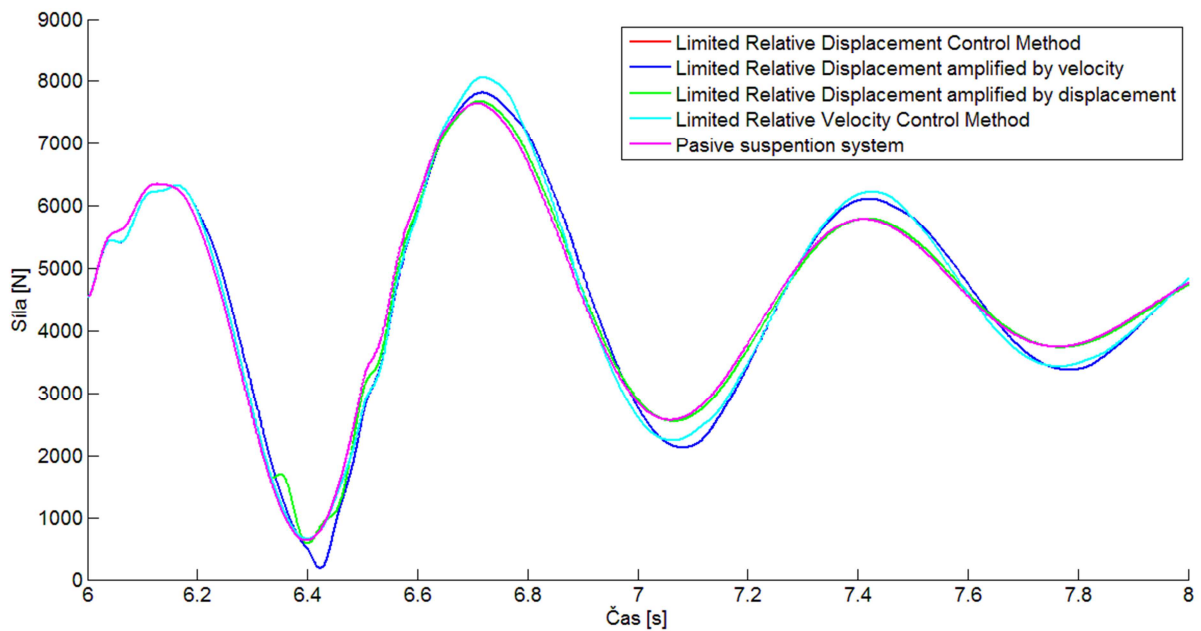
Algoritmus řízení	Zesílení	Odpružená hmota [$m \cdot s^{-2}$]		
		Průměrné zrychlení	Rozptyl	Směrodatná odchylka
Limited Relative Displacement	-	0,047	7,739	2,782
Limited Relative Displacement	velocity	0,016	7,444	2,728
Limited Relative Displacement	displacement	0,047	7,739	2,782
Limited Relative Velocity	-	0,047	7,739	2,782
Passive	-	0,085	7,626	2,761
Skyhook Control method	-	0,045	7,416	2,723
Limited Relative Velocity	displacement	0,018	7,471	2,733
Modified Skyhook Control method	-	-0,013	7,644	2,765
Acceleration	-	0,056	7,753	2,784



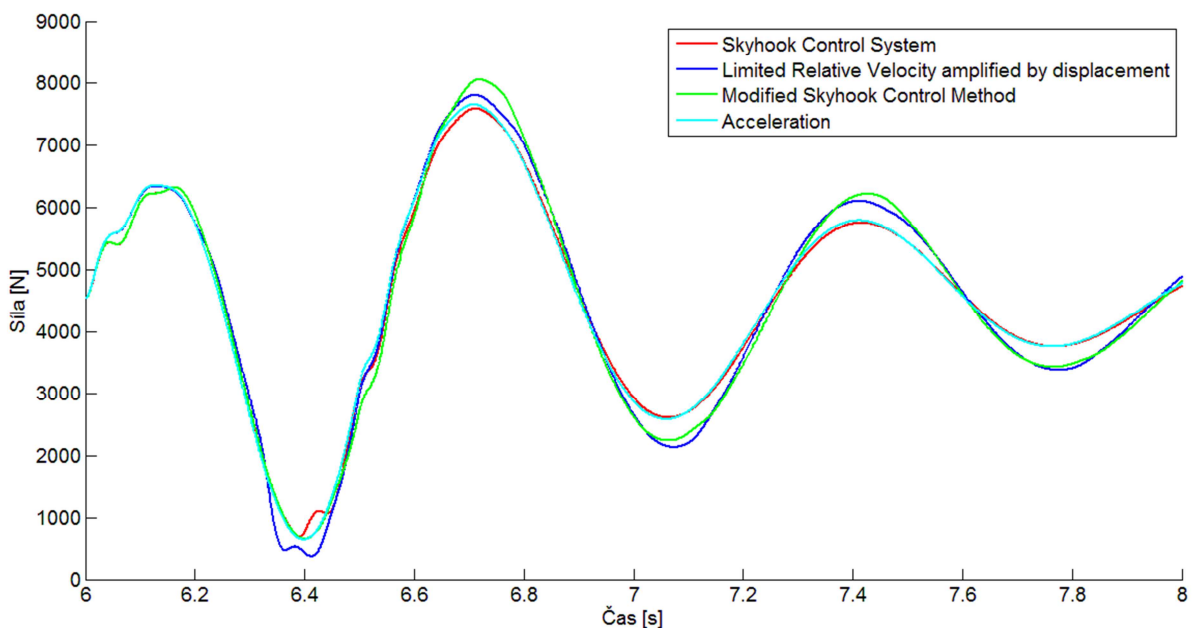
Graf. 6 Zrychlení odpružené hmoty pro jízdní komfort, typ profilu vozovky A (1. část)



Graf. 7 Zrychlení odpružené hmoty pro jízdní komfort, typ profilu vozovky A (2. část)



Graf. 8 Síla pod pneumatikou pro jízdní komfort, typ profilu vozovky A (1. část)



Graf. 9 Síla pod pneumatikou pro jízdní komfort, typ profilu vozovky A (2. část)

6.2.3 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Výsledkem simulací za účelem prověření řídicích algoritmů vzhledem k jízdnímu komfortu a jízdní bezpečnosti je zjištění jak se jednotlivé algoritmy řízení chovají a jak jsou schopné reagovat na nerovnosti na vozovce. Ukázalo se, že algoritmy řízení s názvem „Limited Relative Displacement amplified by velocity“ a „Limited Relative Velocity amplified by



displacement“ nejsou vhodnými algoritmy řízení konstanty tlumení. Špatných výsledků dosáhly zejména při simulaci zaměřené na jízdní bezpečnost a profilem vozovky A, kde jejich minimální síla dosahuje záporných hodnot a pneumatika tak ztrácí kontakt s vozovkou. Tyto algoritmy řízení používají k řízení konstanty tlumení informace o relativní poloze a rychlosti odpružené a neodpružené hmoty. Rozhodovací funkce těchto algoritimů řízení jsou uvedeny v kapitole 2.4.5.

Z hlediska jízdní bezpečnosti se jako nejlépe pracující algoritmus semi-aktivního řízení jeví „Skyhook Control Method“ který jako rozhodovací funkci využívá rozdíl rychlostí odpružené a neodpružené hmoty zesílené o rychlost hmoty odpružené. Z hlediska jízdního komfortu a tedy nejnižšího zrychlení odpružené hmoty, je jako řídicí algoritmus dobré použít „Modified Skyhook Control method“ nebo „Acceleration“, který pro rozhodovací funkci používá přímo zrychlení odpružené hmoty vozidla.



6.3 VLIV ZMĚNY POMĚRU MEZI MINIMÁLNÍ A MAXIMÁLNÍ KONSTANTOU TLUMENÍ

Cílem této části simulace bylo zjistit, jak se chová zavěšení, u kterého dochází ke změně poměru mezi maximální a minimální konstantou tlumení.

6.3.1 METODIKA MĚŘENÍ

Simulace byla provedena v programu Matlab/Simulink. Bylo provedeno celkem deset měření s různými poměry mezi maximální a minimální konstantou tlumení. Maximální hodnota byla pro všechna měření stejná, byla upravována pouze hodnota minimální konstanty, která se pohybovala od hodnoty $777 \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ do $2127 \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$. Poměr mezi maximální a minimální konstantou klesal z hodnoty 1,64 na hodnotu 1,14. Minimální a maximální konstanty tlumení použité při simulaci jsou uvedeny v tabulce 11. Hodnoty jako hmotnosti odpružených a neodpružených hmot, a ostatní použité hodnoty v simulaci jsou uvedeny v tabulce 3, v kapitole 3.1.

Tab. 11 Hodnoty minimální a maximální konstanty tlumení použité v simulaci

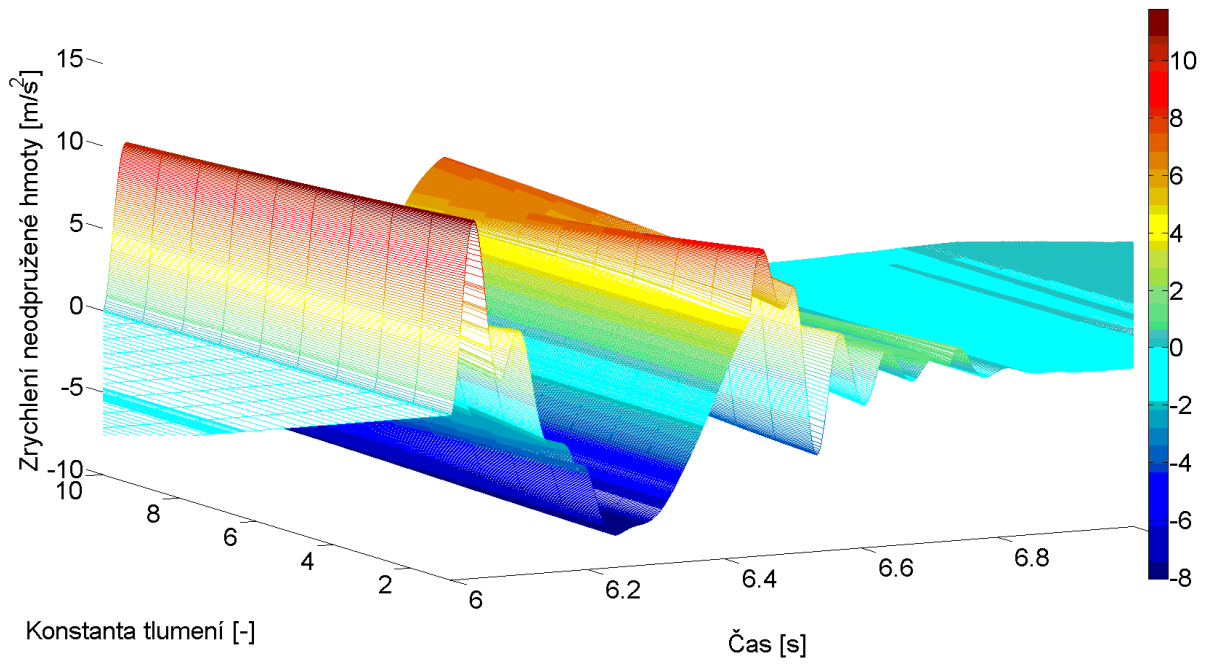
Název	Zkratka	Jednotka	Číslo měření											
			1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.		
Maximální konstanta tlumení	$C_{B\max}$	$[\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}]$	2201	2201	2201	2201	2201	2201	2201	2201	2201	2201	2201	2201
Minimální konstanta tlumení	$C_{B\min}$	$[\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}]$	777	927	1077	1227	1377	1527	1677	1827	1977	2127	2127	2127
Poměr maximální a minimální konstanty tlumení	[-]	[-]	1,64	1,46	1,36	1,29	1,25	1,22	1,19	1,17	1,15	1,14	1,14	1,14
Poměrný útlum maximální konstanty tlumení	$D_{B\max}$	[-]	0,164	0,164	0,164	0,164	0,164	0,164	0,164	0,164	0,164	0,164	0,164	0,164
Poměrný útlum minimální konstanty tlumení	$D_{B\min}$	[-]	0,100	0,112	0,121	0,127	0,131	0,135	0,138	0,140	0,142	0,144	0,144	0,144

6.3.2 VÝSLEDKY

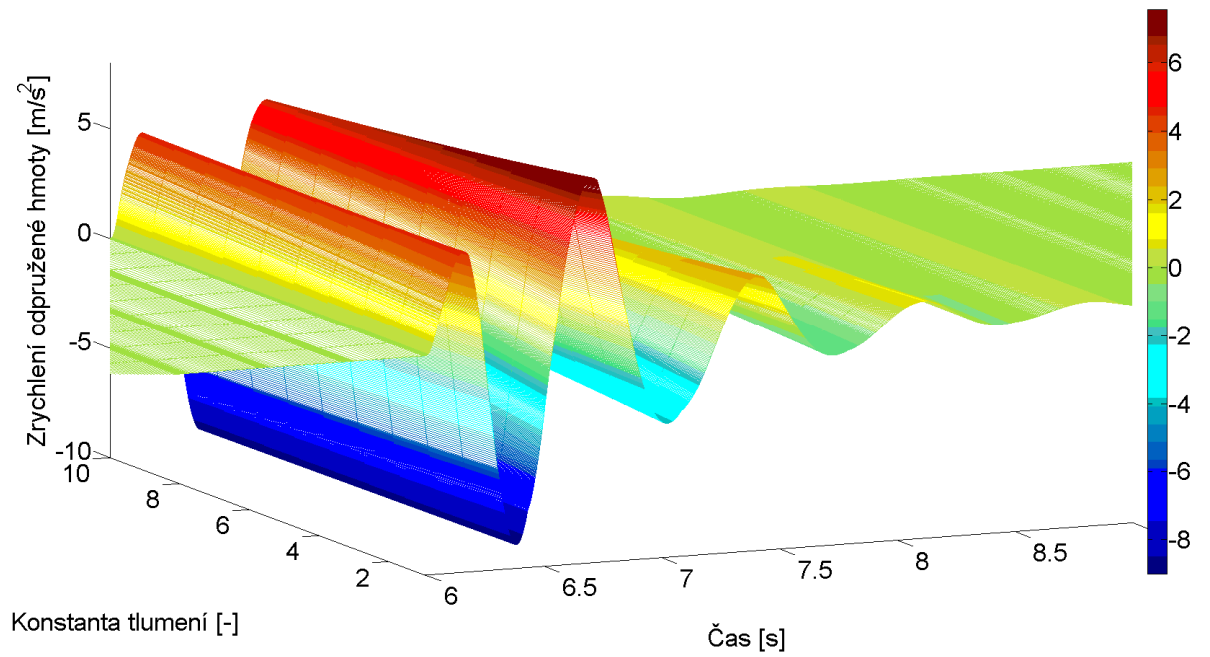
Zde v hlavní části práce uvádím pouze část grafických výsledků, ostatní průběhy všech sledovaných parametrů jsou uvedeny v příloze 6.

Tab. 12 Výsledné hodnoty pro Modified Skyhook Control systém

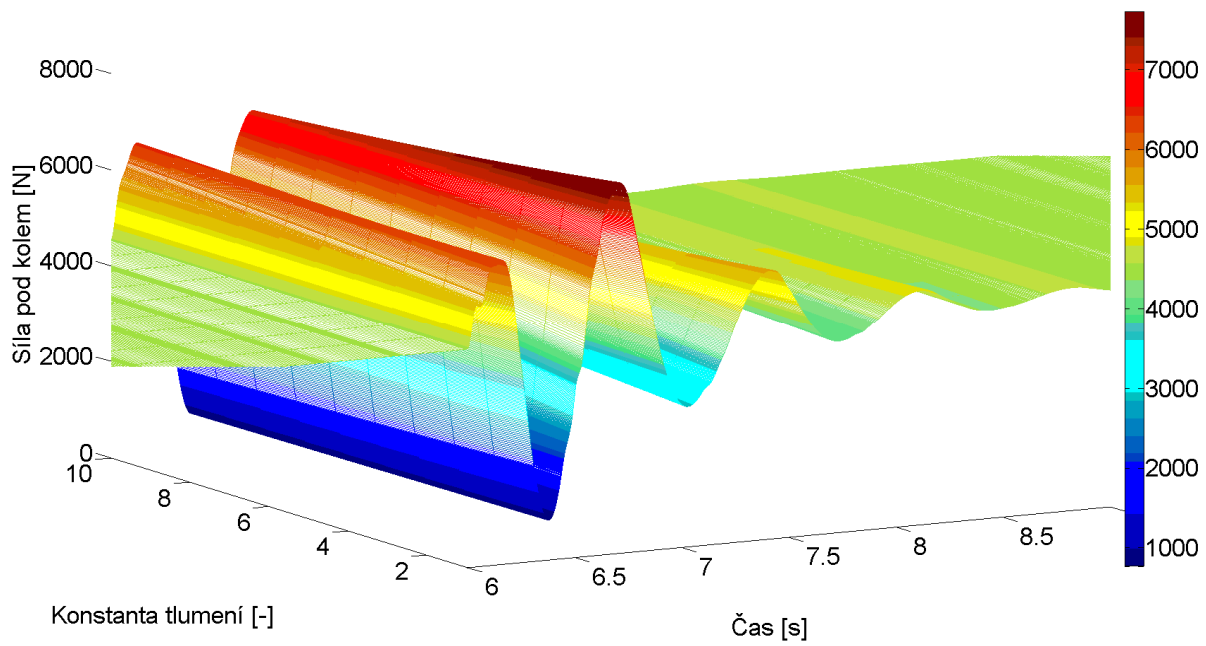
Algoritmus řízení	Zesílení	Sledovaná veličina a jednotka								Číslo měření	
		Síla pod pneumatikou [N]			Odpružená hmota [$m \cdot s^{-2}$]			Neodpružená hmota [$m \cdot s^{-2}$]			
		Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Rozptyl	Průměrná hodnota	Rozptyl	Směrodatná odchylka	Průměrné hodnota	Rozptyl	Směrodatná odchylka	
Modified Skyhook Control method	-	4485	825	1638385	1280	9,809	3,132	0,072	4,522	2,127	1.
		4485	819	1576437	1256	9,440	3,072	0,066	4,494	2,120	2.
		4484	813	1520387	1233	9,104	3,017	0,062	4,469	2,114	3.
		4483	806	1469611	1212	8,799	2,966	0,059	4,449	2,109	4.
		4482	800	1423586	1193	8,521	2,919	0,056	4,431	2,105	5.
		4482	794	1381850	1176	8,268	2,875	0,052	4,417	2,102	6.
		4481	788	1344018	1159	8,037	2,835	0,049	4,405	2,099	7.
		4480	781	1309722	1144	7,827	2,798	0,044	4,395	2,096	8.
		4479	775	1278654	1131	7,634	2,763	0,039	4,387	2,095	9.
		4478	769	1250528	1118	7,458	2,731	0,034	4,382	2,093	10.



Graf. 10 Modified skyhook control method – zrychlení neodpružené hmoty



Graf. 11 Modified skyhook control method – zrychlení odpružené hmoty



Graf. 12 Modified skyhook control method – síla pod pneumatikou



6.4 VLIV ZMĚNY MAXIMÁLNÍ A MINIMÁLNÍ KONSTANTY TLUMENÍ PŘI ZACHOVÁNÍ POMĚRU

Cílem této části simulace bylo zjistit, jak se chová zavěšení, u kterého dochází ke změně maximální a minimální konstanty tlumení při zachování poměru mezi maximální a minimální konstantou.

6.4.1 METODIKA MĚŘENÍ

Tab. 13 Hodnoty minimální a maximální konstanty tlumení použité v simulaci

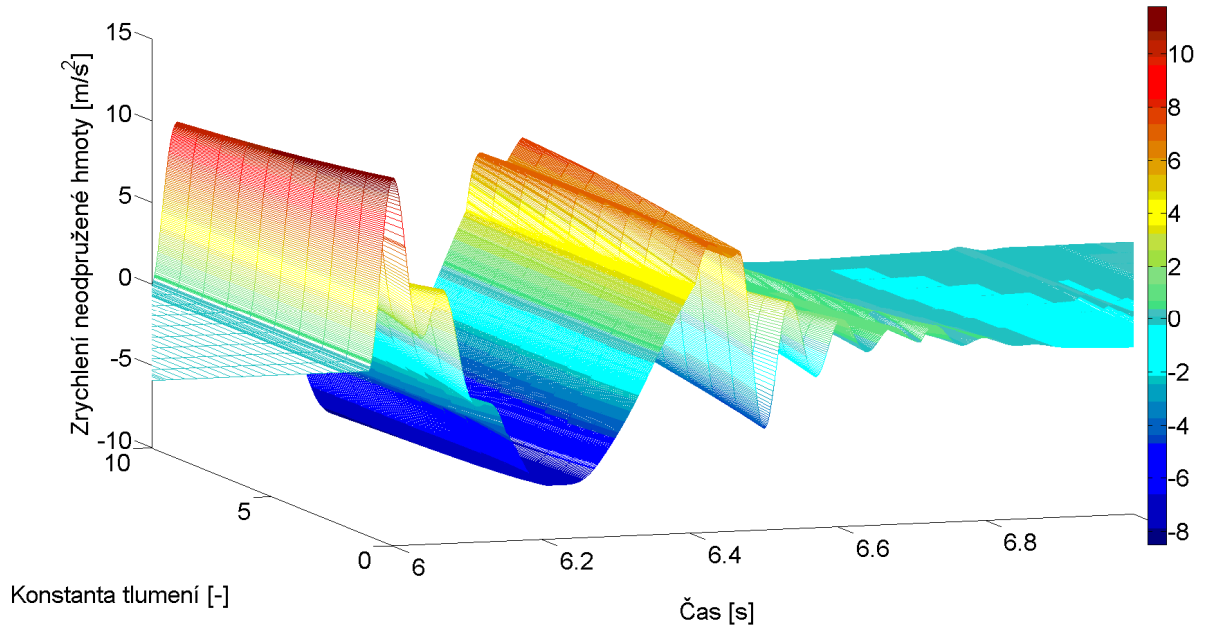
Název	Zkratka	Jednotka	Číslo měření									
			1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
Maximální konstanta tlumení	C_{Bmax}	$[N \cdot s \cdot m^{-1}]$	1276	1576	1876	2176	2476	2776	3076	3376	3676	3976
Minimální konstanta tlumení	C_{Bmin}	$[N \cdot s \cdot m^{-1}]$	776	959	1141	1324	1506	1689	1872	2054	2237	2419
Poměr maximální a minimální konstanty tlumení	[-]	[-]	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64
Poměrný útlum maximální konstanty tlumení	D_{Bmax}	[-]	0,164	0,203	0,242	0,280	0,319	0,357	0,396	0,435	0,473	0,512
Poměrný útlum minimální konstanty tlumení	D_{Bmin}	[-]	0,100	0,123	0,147	0,170	0,194	0,217	0,241	0,264	0,288	0,311

6.4.2 VÝSLEDKY

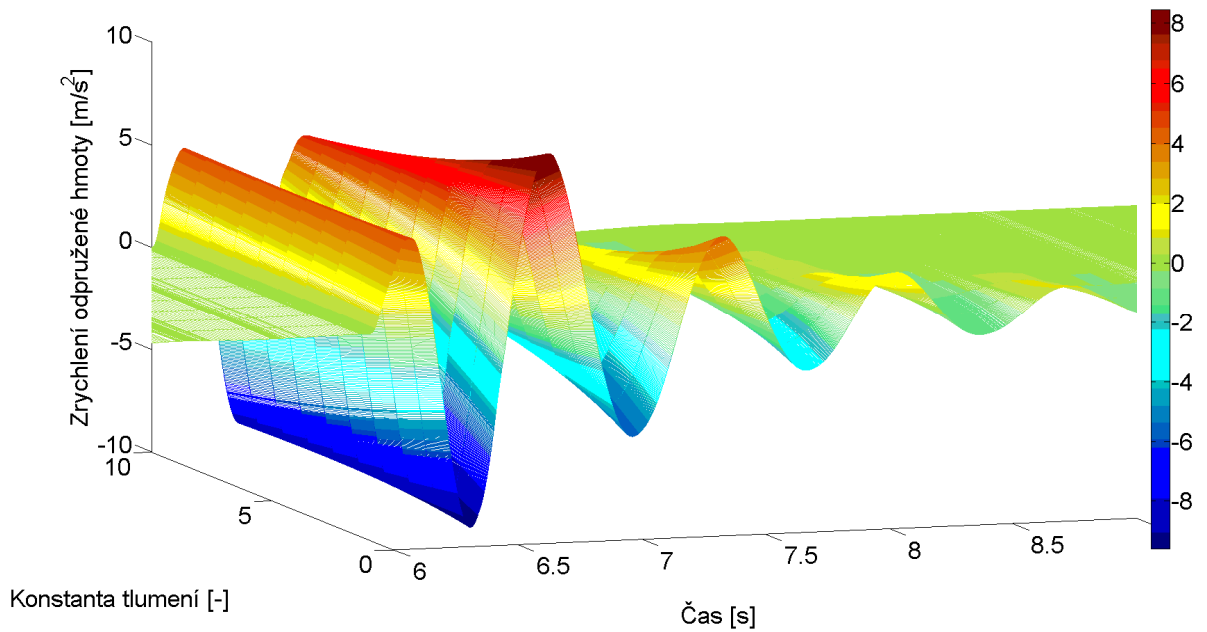
Zde v hlavní části práce uvádím pouze část grafických výsledků, ostatní průběhy všech sledovaných parametrů jsou uvedeny v příloze 7.

Tab. 14 Výsledné hodnoty pro Modified Skyhook Control systém

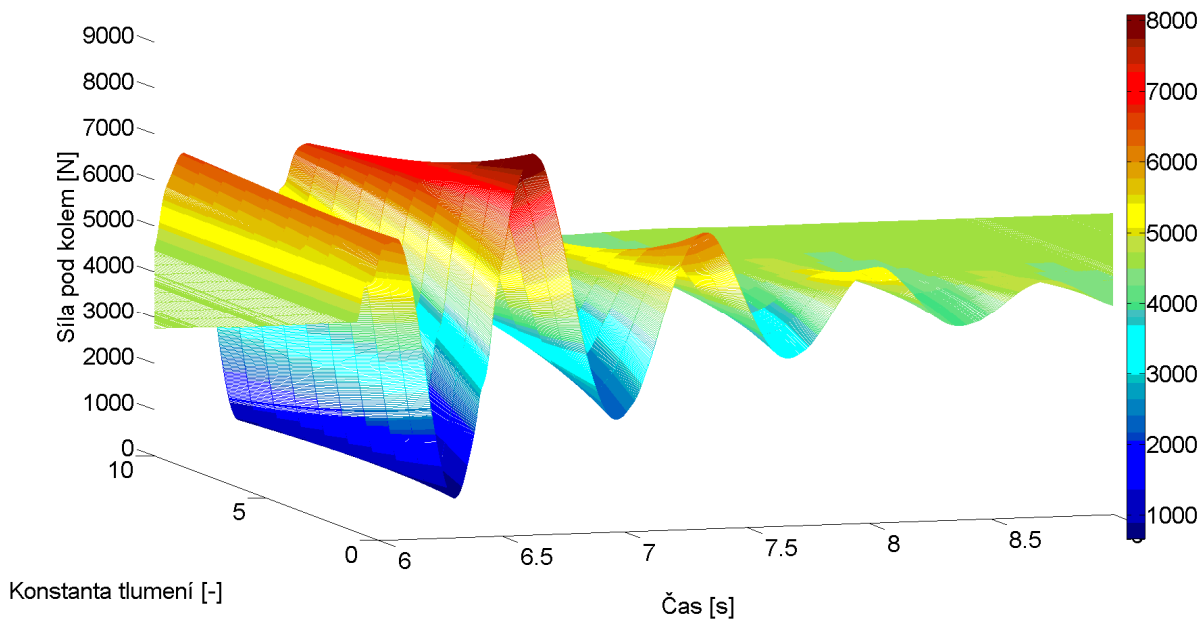
Algoritmus řízení	Zesílení	Sledovaná veličina a jednotka								Číslo měření	
		Síla pod pneumatikou [N]			Odpružená hmota [m·s ⁻²]			Neodpružená hmota [m·s ⁻²]			
		Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Rozptyl	Průměrná hodnota	Rozptyl	Směrodatná odchylka	Průměrné hodnota	Rozptyl	Směrodatná odchylka	
Modified Skyhook Control method	-	4452	660	2377221	-0,218	14,226	1542	3,772	0,099	4,338	2,083
		4461	733	1982437	-0,197	11,887	1408	3,448	0,102	4,365	2,089
		4469	777	1706491	-0,178	10,232	1306	3,199	0,108	4,422	2,103
		4476	800	1503202	-0,163	8,999	1226	3,000	0,116	4,499	2,121
		4481	808	1348340	-0,150	8,047	1161	2,837	0,123	4,585	2,141
		4486	803	1227787	-0,139	7,296	1108	2,701	0,129	4,684	2,164
		4490	790	1132730	-0,130	6,695	1064	2,588	0,136	4,790	2,189
		4494	769	1057226	-0,122	6,208	1028	2,492	0,143	4,902	2,214
		4497	744	997112	-0,116	5,810	999	2,410	0,150	5,015	2,239
		4500	716	949357	-0,109	5,485	974	2,342	0,157	5,125	2,264



Graf. 13 Modified skyhook control method – zrychlení neodpružené hmoty



Graf. 14 Modified skyhook control method – zrychlení odpružené hmoty



Graf. 15 Modified skyhook control method – síla pod pneumatikou

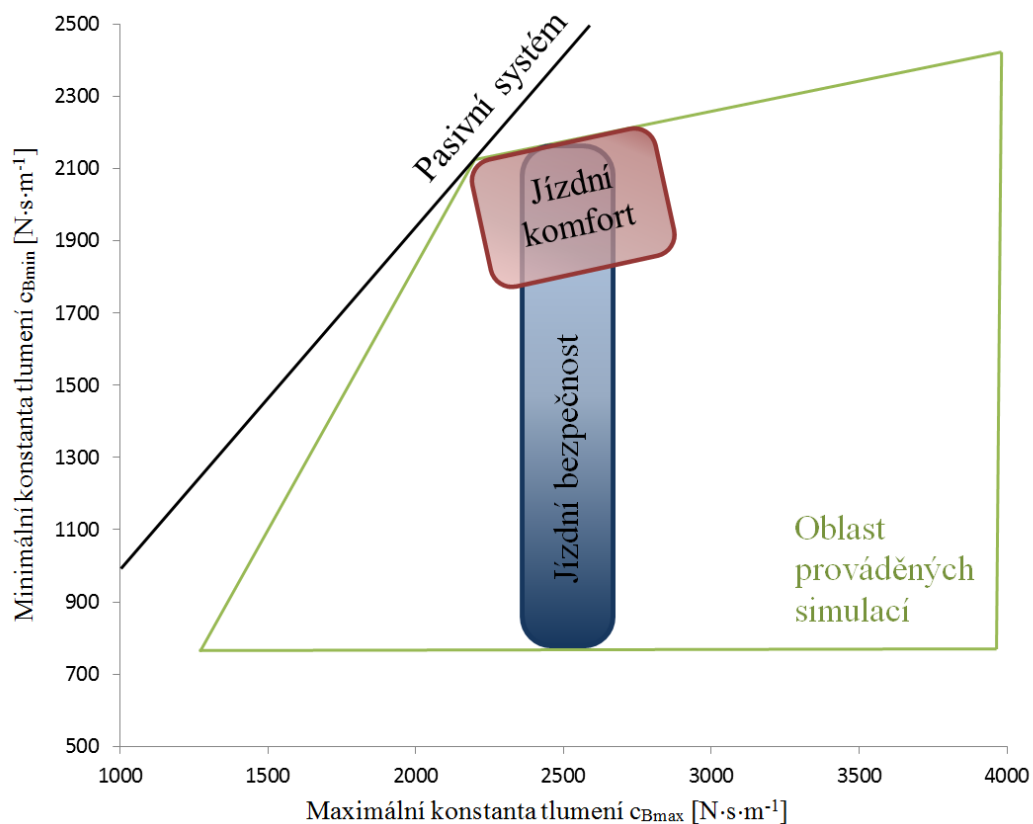
6.5 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ Z KAPITOL 6.3 A 6.4

Výsledky simulací ukazují, jak se systém společně se semi-aktivním řízením konstanty tlumení chová v závěsu kola za různých podmínek budícího signálu a různém nastavení maximální a minimální konstanty tlumení. Semi-aktivním řízením lze dosáhnout do určité míry zlepšení průběhu síly pod pneumatikou a tím zvýšení jízdní bezpečnosti. Pokud bude poměr mezi maximální a minimální konstantou tlumení větší, bude i průběh síly pod pneumatikou výhodnější. Pneumatika bude více přitlačována k povrchu vozovky a vlivem toho bude schopna přenášet větší příčné a podélné síly na vozovku. Simulace probíhala v určitém rozmezí vstupních hodnot, proto je toto tvrzení pravdivé do situace kdy se poměr maximální a minimální konstanty tlumení bude pohybovat mezi hodnotami 1,14 až 1,64. Pokud se bude dále snižovat hodnota minimální konstanty tlumení při zachování maximální konstanty tlumení, pak dojde k okamžiku, kdy síla pod kolem začne nabývat příliš nízkých nebo naopak vysokých hodnot. Především se jedná o minimální hodnotu síly pod pneumatikou. Pokud by maximální síla nabývala příliš vysokých hodnot, pak by docházelo k problémům s příliš vysokými silami v zavěšení vozidla a zavěšení by muselo být robustnější kvůli dostatečnému dimenzování na únosnost silového zatížení. Minimální síla by dosahovala příliš nízkých až záporných hodnot, to by ve výsledku znamenalo příliš nízkou jízdní bezpečnost, protože pneumatika by nabyla schopná přenášet požadované síly na vozovku. Pokud by byla síla pod pneumatikou záporná, pak by docházelo ke ztrátě kontaktu pneumatiky s vozovkou a docházelo by k odsakování pneumatiky.

Z hlediska jízdního komfortu je situace odlišná. Výsledky prokazují, že semi-aktivní řízení konstanty tlumení není vhodným nástrojem jak zlepšit jízdní komfort. Se zvyšujícím se poměrem mezi maximální a minimální konstantou tlumení dochází ke zhoršení jízdního komfortu vlivem zvyšujícího se zrychlení odpružené hmoty. Domnívám se, že toto zhoršení jízdního komfortu, na místě kde by se očekávalo jeho zvýšení, je způsoben tím, že u semi-aktivního řízení je možné upravovat pouze tlumící sílu. V případě kdy dojde k řízení



pouze konstanty tlumení, začínají se tím více projevovat účinky odpružení, u kterého není nijak upravována charakteristika. Když dojde k relativnímu pohybu odpružené a neodpružené hmoty směrem k sobě, dochází u semi-aktivního řízení ke snížení konstanty tlumení, tím se začne v pružině akumulovat větší část energie, protože není vytvářen dostatečný odpor tlumiče proti stlačení pružiny. Tuto akumulovanou energii je následně obtížnější zmařit v tlumiči a je potřeba delšího časového úseku. To se projevuje i při sledování průběhu zrychlení v závislosti na nastavení maximální a minimální konstanty, pokud je poměr mezi těmito hodnotami větší, pak jsou vrcholy maximálního a minimálního zrychlení posunuty po časové ose dál a dosahují vyšších hodnot. Vlivem těchto faktorů vzniká větší zrychlení neodpružené hmoty a dochází k snížení jízdního komfortu. Pro zlepšení jízdního komfortu se nejlépe hodí plně aktivní systém zavěšení vozidla, který by byl schopný řídit odpružení a současně tlumení v optimální míře tak, aby bylo dosaženo maximálního jízdního komfortu.



Obr. 37 Nastavení maximální a minimální konstanty tlumení

Na obrázku 37 je zobrazena závislost maximální konstanty tlumení na minimální a zvýrazněna oblast, v níž byly simulace prováděny a jsou prezentovány výsledky této práce. Pro porovnání se systémem pasivním je zde zobrazena přímka reprezentující tento systém tlumení, a je skloněna pod úhlem 45° vzhledem k hlavním osám. Na základě simulací bylo prokázáno, že semi-aktivní systém tlumení je z hlediska jízdní bezpečnosti vhodné provozovat v oblasti (pro hodnoty hmotnosti vozidla a nastavení ostatních parametrů vozidla dle tabulky 3 v kapitole 3.1), kde se maximální konstanta tlumení bude pohybovat v blízkosti $c_{Bmax} = 2500 \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ a hodnota minimální konstanty tlumení bude nižší než $c_{Bmin} = 2100 \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$, nejlépe však $776 \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$. Při snaze dosáhnout dobrého jízdního komfortu by bylo vhodné konstanty semi-aktivního systému tlumení nastavit podobně jako systém pasivního tlumení.



ZÁVĚR

V dnešní době je pohodlí a bezpečnost vozidla nejdůležitějším parametrem moderních aut. Semi-aktivní systém se jeví jako vhodný nástroj, jak zvýšit pohodlí a bezpečnost pasažérů. Současně se tento systém rozvíjí a s novými a vyspělými technologiemi bude v následujících letech pronikat do automobilů kategorie střední a nižší střední třídy. Zatím se vyskytuje pouze u automobilů vyšších tříd z důvodu vyšších nákladů. Je také určitým kompromisem mezi pasivním systémem, který je na hranici vyčerpání jeho možného potenciálu a mezi plně aktivním systémem, který v současné době neproniká do automobilového světa a neexistují zatím spolehlivé a cenově dostupné varianty jak tento systém aplikovat pro použití v automobilovém průmyslu.

Diplomová práce byla zaměřena na studii semi-aktivního řízení tlumení s využitím matematického modelování a multibody softwaru. Hlavním přínosem práce je poznání chování semi-aktivního řízení tlumení umístěného na vozidle za různých provozních podmínek, sestavení řídicích algoritmů konstanty tlumení a prověření možnosti spolupráce mezi programy Matlab a Adams při simulaci a sledování chování zavěšení s tímto systémem řízení tlumící síly. Případně použití semi-aktivního řízení konstanty tlumení v programu Adams k testování jízdních vlastností na vozidle.

V rámci práce byl sestaven čtvrtinový model vozidla a k němu vhodné řídicí algoritmy konstanty tlumení v programu Matlab/Simulink. Čtvrtinový model byl vytvořen rovněž v programu Adams, aby mohlo dojít k prověření sestavených řídicích algoritmů a jejich funkce pomocí metody co-simulation, která je uvedena v kapitole 5.1. Pro použití komunikace mezi programy Matlab a Adams byla prověřena i druhá z celkových tří možností propojení nejčastěji nazývána „external function evaluation“ nebo také „external system library“, která je uvedena v kapitole 5.2. Výsledky získané simulací pomocí této metody byly následně použity pro validaci výsledků získaných pomocí simulací v programu Matlab. Poslední část práce se zabývá vlivem nastavení maximální a minimální konstanty tlumení vzhledem k jízdnímu komfortu a jízdní bezpečnosti. Pro buzení modelů a sledování chování zavěšení v závislosti na typu použitého řídicího algoritmu byly použity relativně jednoduché signály. Důvodem použití jednoduchého signálu byla možnost sledování průběhu měřených hodnot a chování zavěšení. Při použití složitějšího budícího signálu by se výsledky mohly lišit od těch, které jsou uvedeny v této práci.

Vytvoření a správné fungování řídicích algoritmů společně se čtvrtinovým modelem vozidla lze chápat jako hlavní přínos této diplomové práce, které lze využít pro ostatní studie zabývající se semi-aktivním řízením konstanty tlumení. Rovněž přínosnými jsou získané poznatky při studiu vlivu semi-aktivního řízení konstanty tlumení vzhledem k jízdnímu komfortu a jízdní bezpečnosti.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] AYMAN, Aly. *Car Suspension Control Systems: Basic Principles* [online]. 2012, 1.1.2012 [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: databáze ScienceDirect.
- [2] PRAŽÁK, F. *Tlumič odpružení jako prvek ovlivňující jízdní vlastnosti automobilu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 22 s. Školitel Doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc., Dr. Ing. Petr Porteš.
- [3] TOCHÁČEK, Jiří. *Tlumiče* [Integrovaná střední škola technická, Vysoké Mýto]. Vysoké Mýto: Inovace vzdělávacích metod EU - OP VK, 2013, 12.3.2013, 6 s. [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: http://www.istvm.cz/sites/default/files/stranka/190/vy_32_inovace_aut_1u_to_21_12_tlumice.docx
- [4] VLK, František. *Podvozky motorových vozidel*. 3. přepracované, rozšířené a aktualizované vydání. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, 2006. ISBN 80-239-6464-X.
- [5] JAN, Zdeněk, Bronislav ŽDÁNSKÝ a Jiří ČUPERA. *Automobily*. 2., aktualiz. vyd. Brno: Avid, 2009, 245 s. ISBN 978-80-87143-11-7.
- [6] LÁNÍK, Ondřej. CDC: aktivní tlumiče letos našly cestu do běžných aut!. *www.auto.cz* [online]. 2004, 2004-08-19 [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/cdc-aktivni-tlumice-letos-nasly-cestu-do-beznych-aut-16717>
- [7] PATRASCU, Daniel. How Magnetorheological Suspension Works. *www.autoevolution.cz* [online]. 2009 [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: <http://www.autoevolution.com/news/how-magnetorheological-suspension-works-8947.html>
- [8] LÁNÍK, Ondřej. Bose: aktivní podvozek nové generace. *www.auto.cz* [online]. 2004, 2009-09-09 [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/bose-aktivni-podvozek-nove-generace-16657>
- [9] RAO, T, G RAO, S RAO a A PURUSHOTTAM. *ANALYSIS OF PASSIVE AND SEMI ACTIVE CONTROLLED SUSPENSION SYSTEMS FOR RIDE COMFORT IN AN OMNIBUS PASSING OVER A SPEED BUMP* [online]. 2010, **5**(1), 7 - 17 [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: databáze ScienceDirect
- [10] QAZI, A, A KHAN, M KHAN a S NOOR. *A Parametric Study on Performance of Semi-Active Suspension System with Variable Damping Coefficient Limit* [online]. 2013, **2013**(4), 154 - 159 [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: databáze ScienceDirect
- [11] ROUPEC, J. *Mezní a degradační procesy magnetoreologických tlumičů odpružení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 140 s. Vedoucí disertační práce Doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc



- [12] ZHANG, H, H WINNER a W LI. *Comparison between Skyhook and Minimax Control Strategies for Semi-active Suspension System* [online]. 2009, 3(7), 845 - 848 [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: databáze ScienceDirect
- [13] HASAN, A. *Modelling and simulation of modified skyhook control for semi-active suspension*. Pahang: Universiti Malaysia Pahang, Bachelor thesis, 2010. 34 s.
- [14] WEST, K. *Integrating Control Systems from MATLAB and EASY5 in ADAMS*. MSC Technical Support, 2011, [cit. 2016-05-16].
- [15] HEJTMÁNEK, P. *Tlumení a odpružení: QMV - Motorová vozidla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství, 2015.
- [16] BLAŽÁK, O. *Tlumení a odpružení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství, 2009.



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A	[-]	Maticový parametr A z parametrické rovnice
B	[-]	Maticový parametr B z parametrické rovnice
C	[-]	Maticový parametr C z parametrické rovnice
c_B	$[N \cdot s \cdot m^{-1}]$	Tlumící síla tlumiče
c_{Bmax}	$[N \cdot s \cdot m^{-1}]$	Maximální tlumící konstanta
c_{Bmin}	$[N \cdot s \cdot m^{-1}]$	Minimální tlumící konstanta
c_W	$[N \cdot s \cdot m^{-1}]$	Tlumící síla pneumatiky
D	[-]	Maticový parametr D z parametrické rovnice
D_B	[-]	Poměrný útlum
D_{Bmax}	[-]	Maximální poměrný útlum
D_{Bmin}	[-]	Minimální poměrný útlum
k_B	$[N \cdot s \cdot m^{-1}]$	Tuhost pružiny
k_W	$[N \cdot s \cdot m^{-1}]$	Radiální tuhost pneumatiky
m_B	[kg]	Hmotnost odpružené hmoty
m_W	[kg]	Hmotnost neodpružené hmoty
RMS	[-]	Směrodatná odchylka
U	[-]	Vektor proměnných U
u_1	[-]	Parametr vektoru U
u_2	[-]	Parametr vektoru U
X	[-]	Vektor proměnných X
\dot{X}	[-]	Derivace vektoru proměnných X
x_1	[-]	Parametr vektoru X
\dot{x}_1	[-]	Derivace parametru proměnné X
x_2	[-]	Parametr vektoru X
\dot{x}_2	[-]	Derivace parametru proměnné X
x_3	[-]	Parametr vektoru X
\dot{x}_3	[-]	Derivace parametru proměnné X
x_4	[-]	Parametr vektoru X
\dot{x}_4	[-]	Derivace parametru proměnné X
Y	[-]	Vektor proměnných Y
y_1	[-]	Parametr vektoru Y
y_2	[-]	Parametr vektoru Y
Z_B	[m]	Změna polohy odpružené hmoty



\dot{Z}_B	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	Změna rychlosti odpružené hmoty
\ddot{Z}_B	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$	Změna zrychlení odpružené hmoty
\dddot{Z}_B	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-3}]$	Změna derivace zrychlení odpružené hmoty
Z_W	$[\text{m}]$	Změna polohy neodpružené hmoty
\dot{Z}_W	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	Změna rychlosti neodpružené hmoty
\ddot{Z}_W	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$	Změna zrychlení neodpružené hmoty
Z_0	$[\text{m}]$	Změna polohy budícího signálu (profilu vozovky)
\dot{Z}_0	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	Změna rychlosti budícího signálu (profilu vozovky)
ζ	$[-]$	Tlumící konstanta
ζ_{max}	$[-]$	Maximální tlumící konstanta
ζ_{min}	$[-]$	Minimální tlumící konstanta



SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 – Profil vozovky
- Příloha 2 – Jízdní bezpečnost (profil vozovky A)
- Příloha 3 – Jízdní komfort (profil vozovky A)
- Příloha 4 – Jízdní bezpečnost (profil vozovky B)
- Příloha 5 – Jízdní komfort (profil vozovky B)
- Příloha 6 – Vliv změny poměru mezi minimální a maximální konstantou tlumení (profil vozovky A)
- Příloha 7 – Vliv změny maximální a minimální konstanty tlumení při zachování poměru (profil vozovky A)
- Příloha 8 – Validace výsledků