

Anotace

Práce je zaměřena na problematiku chování závěsu kola automobilu při zhoršeném technickém stavu tlumiče odpružení. Dalším zájmem této práce je monitorování zavěšení kola při rozdílném nastavení podvozku automobilu. K řešení těchto úloh bylo použito matematického modelování. Pro analýzu chování nápravy je vhodnou modelovou situací čtvrtinový model automobilu. Vlastnosti závěsu jsou zhodnoceny na matematických modelech soudobých testerech určených pro bezdemontážní diagnostiku tlumičů odpružení – impulsní dokmitový test, rezonanční adhezní a rezonanční amplitudový test. Z výsledků modelování je možné porovnat jednotlivé testery a získat závěr o vhodnosti jejich použití. Tato práce zároveň prezentuje novou metodiku hodnocení tlumičů – přejezdový test. Výhodnost tohoto nového testu rozšiřuje nabýdku servisní techniky o testování tlumičů pro motocykly a nákladní automobily. Práce se dále zabývá ověřením výsledků získaných modelováním pomocí reálných testů na testerech určených pro bezdemontážní diagnostiku tlumičů. K těmto účelům byl navržen a vyroben Experimentální vozík, jenž je fyzickým modelem čtvrtinového modelu automobilu. Díky úspěchům i neúspěchům při zkouškách s tímto experimentálním vozidlem se získali cenné informace o chování závěsu kola, měření a zpracování dat, které jsou zde rovněž prezentovány.

Klíčová slova

tlumič odpružení, závěs kola, radiální tuhost pneumatiky, matematické modelování, bezdemontážní diagnostika, získávání dat, zpracování signálů, jízdní vlastnosti

Key words

shock absorber, wheel suspension, radial stiffness of tyre, mathematical modelling, on-car diagnostics, data acquisition, signal processing, riding qualities

Místo uložení práce

Oddělení pro vědu a výzkum FSI VUT v Brně

© František Pražák, 2006

Obsah:

| | |
|---|----|
| 1. Úvod | 4 |
| 1.1 Přehled o současném stavu problematiky | 4 |
| 1.2 Cíle disertační práce | 6 |
| 2. Rychlostní charakteristika tlumiče odpružení – F-v charakteristika | 6 |
| 2.1 Získání čisté tlumící síly s využitím globální charakteristiky | 8 |
| 2.2 Diagnostický matematický model tlumiče odpružení | 9 |
| 2.3 Typické závady tlumiče odpružení | 11 |
| 3. Čtvrtinový model s podmodelem hydraulického tlumiče | 12 |
| 3.1 Výpočtová metoda Runge-Kutta | 13 |
| 3.2 Programové prostředí pro simulace | 14 |
| 4. Počítačové simulace testerů tlumičů | 17 |
| 4.1 Současná diagnostika bezdemontážní diagnostiky tlumičů | 17 |
| 4.1.1 Test impulsní dokmitový | 19 |
| 4.1.2 Rezonanční adhezní test | 23 |
| 4.1.3 Rezonanční amplitudový test | 25 |
| 4.2 Nová metodika hodnocení zavěšení kola - Přejezdový test | 28 |
| 4.3 Zhodnocení testerů tlumičů | 32 |
| 5. Ověření závěrů modelování s použitím Experimentálního vozíku | 33 |
| 5.1 Identifikace parametrů vozíku | 35 |
| 5.1.1 Identifikace odpružené a neodpružené hmoty | 35 |
| 5.1.1.1 Další hmoty ovlivňující váhu vozíku | 35 |
| 5.1.2 Tuhost odpružení | 37 |
| 5.1.3 Charakteristika tlumiče | 37 |
| 5.1.4 Radiální tuhost pneumatiky | 38 |
| 5.2 Odhad frekvenčního naladění vozíku | 40 |
| 5.3 Prostředky pro měření | 41 |
| 5.4 Testovací metodiky | 42 |
| 5.4.1 Rezonanční adhezní test | 42 |
| 5.4.2 Test impulsní dokmitový | 43 |
| 5.4.3 Přejezdový test | 44 |
| 5.5 Shrnutí experimentálních testů | 48 |
| 6. Závěr | 48 |
| Literatura a elektronické zdroje | 50 |

Seznam použitých jednotek a veličin

| | | |
|-----------|---|-----------|
| a_1 | zrychlení neodpružené hmoty | $[m/s^2]$ |
| a_2 | zrychlení odpružené hmoty | $[m/s^2]$ |
| a_3 | zrychlení hmoty tlumiče | $[m/s^2]$ |
| B | matice popisující tlumení soustavy | $[Ns/m]$ |
| b | tlumení tlumiče odpružení | $[Ns/m]$ |
| c_1 | radiální tuhost pneumatiky | $[N/m]$ |
| c_2 | tuhost vozidlové pružiny | $[N/m]$ |
| $F(t)$ | impulsní síla | $[N]$ |
| F_b | charakteristika čisté tlumící síly | $[N]$ |
| F_{k0} | charakteristika pomocné pružiny testeru | $[N]$ |
| F_{k1} | charakteristika radiální tuhosti pneumatiky | $[N]$ |
| F_{k2} | charakteristika vozidlové pružiny | $[N]$ |
| F_{k3} | charakteristika pružného uchycení tlumiče | $[N]$ |
| F_{k4} | charakteristika vnitřní pružnosti tlumiče odpružení | $[N]$ |
| f_1 | vlastní frekvence neodpružené hmoty | $[Hz]$ |
| f_2 | vlastní frekvence odpružené hmoty | $[Hz]$ |
| f_{max} | maximální vlastní frekvence | $[Hz]$ |
| H | výška přeježděné překážky | $[m]$ |
| h | vzorkovací perioda pro výpočet | $[s]$ |
| $h(t)$ | kinematické buzení | $[m]$ |
| I | moment setrvačnosti tělesa | $[kgm^2]$ |
| k_1 | radiální tlumení pneumatiky | $[Ns/m]$ |
| k_2 | tuhost vozidlové pružiny | $[Ns/m]$ |
| k_3 | tuhost pružného uložení tlumiče | $[Ns/m]$ |
| m_0 | přídavná hmota rezonančního amplitudového testeru | $[kg]$ |
| m_1 | redukovaná hmotnost závěsu kola | $[kg]$ |
| m_2 | hmotnost karosérie | $[kg]$ |
| m_3 | posuvná hmotnost tlumiče | $[kg]$ |
| q | poloha hmoty | $[m]$ |
| \dot{q} | rychlost hmoty | $[m/s]$ |
| R | poloměr překážky | $[m]$ |
| s_1 | poloha neodpružené hmoty | $[m]$ |
| s_2 | poloha odpružené hmoty | $[m]$ |
| s_3 | poloha hmoty tlumiče | $[m]$ |
| T | doba kyvu tělesa | $[kg]$ |
| v_1 | rychlost neodpružené hmoty | $[m/s]$ |
| v_2 | rychlost odpružené hmoty | $[m/s]$ |
| x_1 | poloha neodpružené hmoty | $[m]$ |
| x_2 | poloha odpružené hmoty | $[m]$ |
| x_3 | poloha hmoty tlumiče | $[m]$ |
| z | posunutí pístnice tlumiče | $[m]$ |

1. Úvod

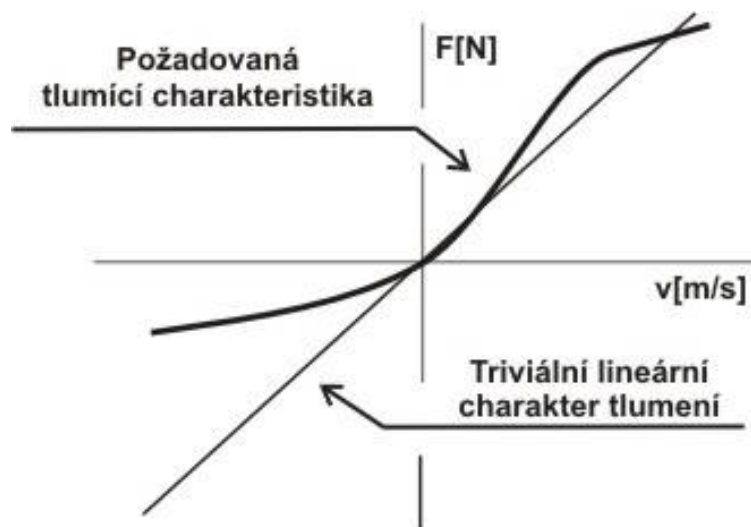
Disertační práce se zabývá problematiku chování zavěšení kola automobilu v závislosti na technickém stavu tlumiče a nastavení podvozku s podporou matematického modelování. Práce navazuje na úspěšné projekty a prohlubuje stávající projekty v oblasti bezdemontážní diagnostiky závěsu kola automobilu řešené na Ústavu konstruování VUT v Brně.

Použité matematické simulace napomáhají bližšímu poznání v problematice hodnocení zavěšení kola automobilu. Pro snadnější analýzu chování jednoho závěsu kola se v praxi využívá zjednodušené modelové situace v podobě tzv. čtvrtinového modelu automobilu. V této práci jsou na tento simulační model aplikované známé bezdemontážní testy tlumičů - impulsní dokmitový test, rezonanční adhezní a rezonanční amplitudový test. Výsledky z těchto matematických simulací stanovují použitelnost testerů a zkušebních metodik pro různé diagnostické záměry. Je zde prezentována i nová metodika hodnocení tlumičů, a to přejezdový test.

1.1 Přehled o současném stavu problematiky

Tlumič odpružení je významným komponentem podvozku automobilu. Jeho funkčnost je posuzována z hlediska komfortu pro posádku a bezpečnosti jízdy. Komfort jízdy je zajištěn vhodným utlumením nepříjemného kmitání odpružených hmot, tedy karoserie automobilu. Naopak bezpečnost jízdy je ovlivněna kmitáním neodpružených hmot, kde tato otázka souvisí s potřebou zajištění optimálního kontaktu pneumatiky kola s vozovkou. V neposlední řadě dochází vlivem nedostatečného utlumení kmitů kola k rychlému opotřebení celého mechanismu závěsu nebo pneumatiky. Tlumič odpružení se na základě požadavků, které jsou na jeho funkci kladeny stal bezpochyby dominantním elementem závěsu kola, na jehož dobrém technickém stavu je závislá přímo bezpečnost silničního provozu. Pohybová energie je v tlumiči transformována pomocí smykového nebo viskózního tření na teplo [1, 2, 3]. V závěsech kol dopravních prostředků se ukázal jako nejvhodnější teleskopický tlumič využívající viskózního tření – hydraulický tlumič odpružení.

Tlumiče odpružení automobilů však nepracuje s lineárním charakterem tlumící síly v závislosti na rychlosti zdvihu kola. Jedním z důvodů je požadavek na rozdílnou intenzitu tlumení při zdvihu a poklesu kola, protože tlumič nesmí bránit propérování při prvním nájezdu na překážku, naopak musí dostatečně utlumit rychlost při roztahování závěsu kola [4, 5, 6]. Další problémem je vznik velkých tlumících sil namáhajících nadměrně uchycení závěsu kola při rázové zatížení. Kompromisem mezi nejlepšími jízdními vlastnostmi a požadavkem na dostatečnou životnost komponentů závěsu kola je používání tlumičů s degresivní charakteristikou. Jednoduchá realizace v hydraulickém systému tlumiče je řešení s „lomenou“ charakteristikou (obrázek 1).



obrázek 1: Charakteristiky tlumení znázorněné v F - v diagramu

Tlumič odpružení není však jediným prvkem ovlivňující průjezd zatáčkou či rychlé zabrzdění na krátké vzdálenosti. Různé nahuštění pneumatiky, použití lehčích kol (tzv. neodpružená hmota) nebo přiložení nákladu (zvýšení odpružené hmoty) jsou parametry, které se podílí na změnách jízdního chování vozu. Vliv tuhosti karosérie nebo elastické vlastnosti závěsů kol jsou další veličiny ovlivňující jízdní vlastnosti. Preciznost nastavení zmiňovaných parametrů vozu se preferuje u sportovních vozů jako formule 1, cestovní vozy nebo motokáry. Při ladění podvozku je stále využíváno znalostí a pocitů zkušebních plotů. Tento způsob nastavení vozu je však časově i finančně náročný. Konstrukteři se čím dál více se uchylují k počítačovým simulacím a matematickému modelování, jenž nabízí nasimulovat a rychleji tak otestovat mnoho jiných variant nastavení podvozku. Další oblastí ladění podvozku pomocí matematických simulací se využívá při vývoji aktivního pérování. Pro optimální nastavení tlumiče odpružení je nutné mít znalosti o chování závěsu kola při daném určitém vybuzení závěsu. Matematické simulace jsou tak velmi produktivní a cenově levná metody.

Počítačový trh nabízí pro matematické simulace mnoho programů [7]. Výběr vhodného softwaru souvisí s nároky na hardwarové vybavení. Přihlíží se i k příjemnosti uživatelského prostředí, času potřebného k naprogramování modelu a času pro samotný výpočet. Vhodné je využívání jednotného programového prostředí, kvůli spolupráci mezi jednotlivými výzkumnými týmy. Většina vývojových pracovišť a konstruktérů využívá programového prostředí od firmy Mathworks – MathLab. Mezi konstruktéry se hojně rozšiřuje uživatelsky příjemné, objektově orientované programové prostředí s možností grafické simulace program Adams od firmy MSC software.

K zajištění požadované bezpečnosti vozu během technického života vozu je nutná častá kontrola bezporuchového stavu závěsů kol a tlumičů odpružení. Správnou funkčnost tlumiče je možné ověřit na testerech tlumičů. Tato metodika z hlediska nutnosti vymontovávání tlumičů z automobilů je pro servisní praxi nevhodná. Trh se servisní technikou však nabízí bezdemontážní formu otestování

tlumičů odpružení. Testery, využívající nejrůznějších metodik k vyhodnocení tlumičů a umožňují snadné a rychlé ověření tlumiče odpružení. Jakákoliv bezdemontážní diagnostika však vyžaduje dobrý technický stav závěsu a správné nastavení podvozku (především správné nahuštění pneumatiky). Nedodržení těchto zásad má vliv na konečné hodnocení tlumiče odpružení.

Vzhledem k požadavkům na konstrukci a bezpečnosti moderních vozů se stále zvyšuje celková hmotnost vozu. Také se mění požadavky na pérování a tlumení automobilu. Pružné vlastnosti pneumatiky během let získaly také jiný charakter. S těmito fakty je nutné sledovat použitelnost testerů pro bezdemontážní diagnostiku tlumičů. Nepokrytou oblastí v servisní technice je hodnocení tlumičů pro motocykly a nákladní vozy.

1.2 Cíle disertační práce

Cílem této disertační práce je využití matematického modelování pro analýzu chování závěsu kola automobilu v závislosti na technickém stavu tlumiče odpružení. Dalším úkolem je pomocí matematické simulace ověřit meze funkčnosti jednotlivých testerů určených pro bezdemontážní diagnostiku tlumičů. Výsledky matematického modelování ověřit reálnými experimenty na zkušebním vozidle.

Dílčí cíle disertační práce:

1. Doplnit soustavu rovnic popisující chování čtvrtinového modelu automobilu o diagnostický model hydraulického tlumiče s možností simulovat všechny jeho funkční vlastnosti a závady.
2. Matematickým modelováním simulovat typické závady tlumiče při různých metodikách testů tlumičů (impulsní dokmitový test, rezonanční amplitudový, rezonanční adhezni a přejezdový test). Stanovit citlivost diagnostických veličin na změny provozních podmínek.
3. Vytvořený matematický model aplikovat na Experimentální vozík a ověřit věrnost modelu porovnáním modelovaných a měřených hodnot.
4. Na Experimentálním vozíku s vybranými stavy tlumiče odpružení ověřit výše zmíněné metodiky testů tlumičů

2. Tlumiče odpružení – F-v charakteristika

Charakteristika tlumiče je prezentována jako síla v závislosti na rychlosti pohybu při stlačování a roztahování, tzv. F-v charakteristika neboli rychlostní charakteristika. Tato charakteristika se zjišťuje na speciálních měřicích stavech.

Jedním takovým testerem disponují laboratoře Ústavu konstruování VUT v Brně (obrázek 2). Budící kmitání upnutého tlumiče je zajišťován pomocí klikového mechanismu. Vyhodnocovací program, naprogramovaný v programovém prostředí LabView znázorňuje okamžitou F-v a F-z (síla v závislosti na poloze) charakteristiku.



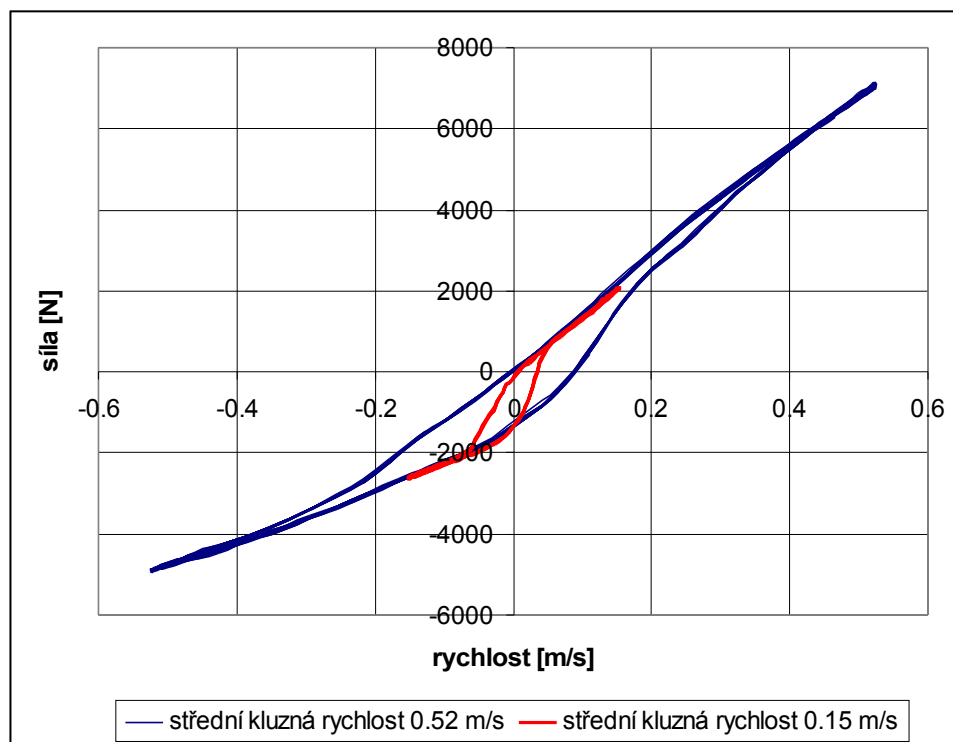
obrázek 2: Tester tlumičů Gillop 1.4

Při měření reálného tlumiče odpovídá průběh skutečné tlumící síly jen při malých rychlostech. Se zvyšující se frekvencí budícího kmitání se objevuje v F-v charakteristice jistá hystereze (obrázek 3). Experimenty se zjistilo, že tento projev je způsoben pružností uchycení tlumiče a vnitřní pružností tlumiče (především vliv tlaku plynného média). Další projev je v posunu charakteristiky směrem k záporným hodnotám (tedy při nulové rychlosti není nulová rychlost). Toto posunutí je způsobeno tlakem plynného média v tlumiči.

Charakteristika, která je závislá na směru pohybu (roztahování - stlačování tlumiče) a budící frekvenci je obtížně matematicky popsatelná. Problém především vzniká při vkládání takovéto charakteristiky do určitých typů programového prostředí. Většina programů umožňuje popsat tlumič pouze jako lineární několikrát zalomenou charakteristiku.

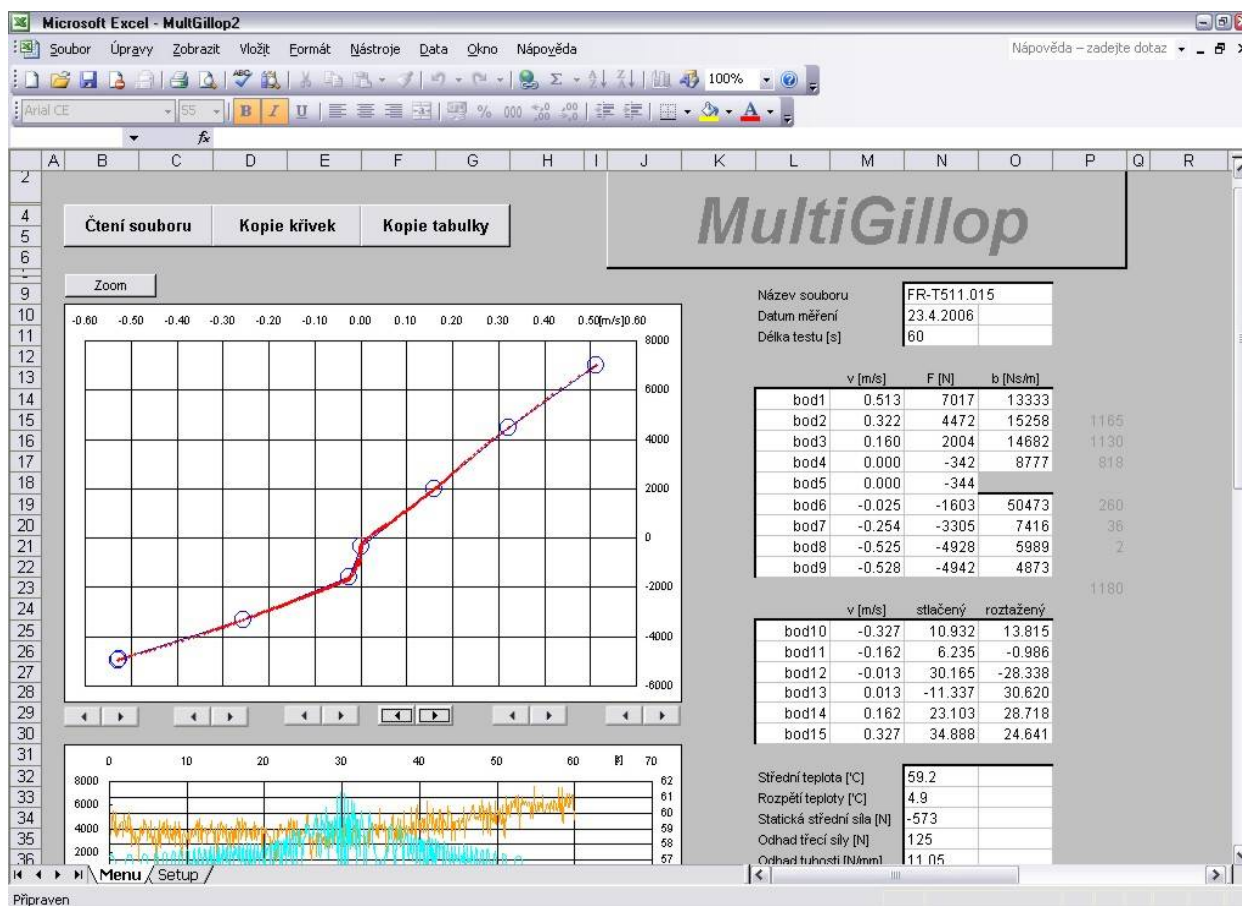
2.1 Získání čisté tlumící síly s využitím globální charakteristiky

Jak již bylo řečeno, rychlostní charakteristika je závislá na směru pohybu a budící frekvenci kmitání. Na obrázku 3 jsou znázorněny F-v charakteristiky při rychlosti střední kluzné rychlosti 0.52 (modře) a 0.15 (červeně) m/s.



obrázek 3: F-v charakteristika tlumiče Oram, určený pro formulové vozy

Je patrné, že tlumící síla je závislá především na rychlosti a zrychlení. Pokud tedy předpokládáme, že tlumící síla odpovídá při malých rychlostech, odpovídá tedy i při malých zrychleních [8]. Jestliže proměříme tlumič v požadovaném rozsahu rychlostí získáme trojrozměrné vyjádření charakteristiky tlumiče odpružení, tzv. globální charakteristiku. Tedy při vyšších rychlostech čistá tlumící síla odpovídá přibližně při nulovém zrychlení. Při měření tlumičů na ÚK VUT v Brně z tohoto předpokladu vycházíme. Proměření tlumičů v požadovaných rychlostech se provádí pomocí rozběhové a doběhové zkoušky. Výsledná tlumící charakteristika je vyhodnocena v programu MultiGillop, který je naprogramován v programu Excel (obrázek 4).



obrázek 4: Program MultiGillop pro analýzu tlumící síly

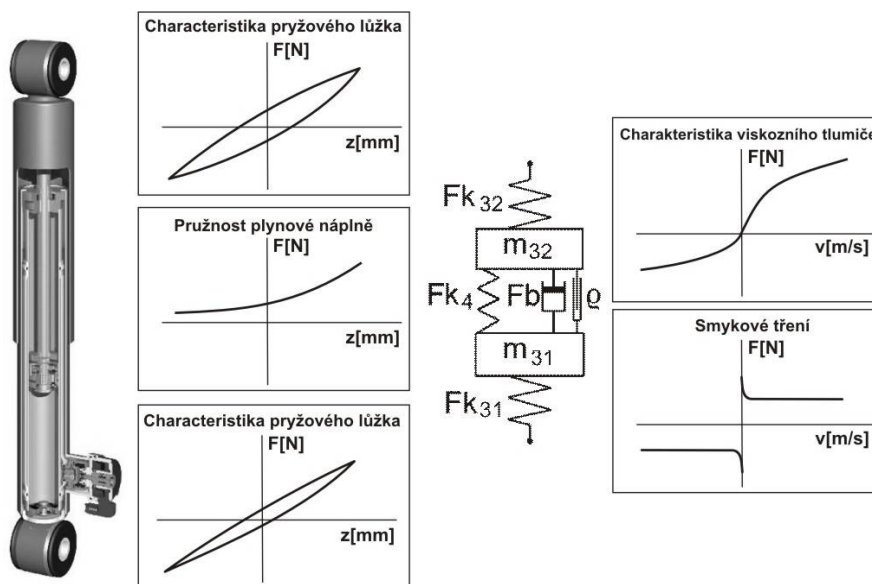
2.2 Diagnostický matematický model tlumiče odpružení

Vzhledem k mé výzkumné práci zabývající se technickým stavem tlumičů odpružení, jsem musel vytvořit diagnostický model tlumiče, který umožňuje simulovat nejrůznější závady a atypická chování tlumiče popsaný v následujících bodech:

- pracovat s lomenou nelineární charakteristikou různou pro tah a tlak
- imitovat vůli v uchycení tlumiče
- simulovat pružnosti montážních pružných lůžek
- zohlednit setrvačné hmoty tlumiče
- přihlídnout k pružnost plynové náplně
- simulovat smykové tření v systému
- uvažovat s vlivem přetlaku systému u plynových tlumičů

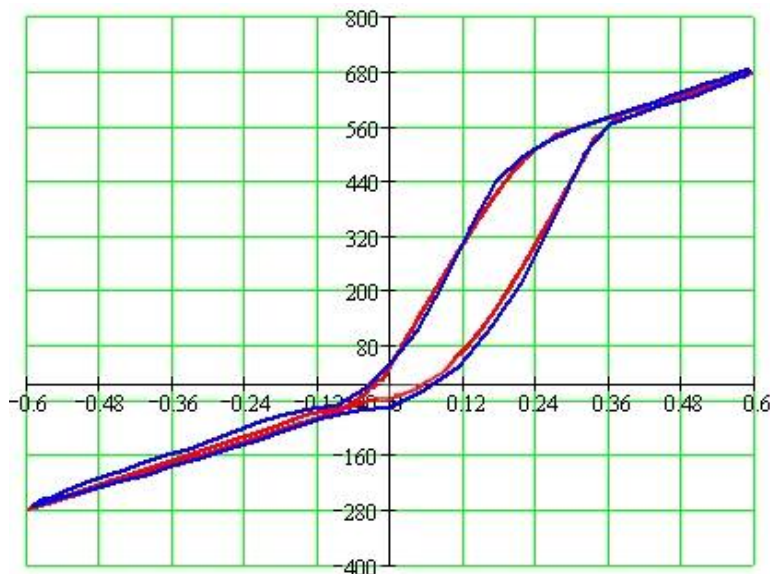
Pro modelovou situaci hydraulického tlumiče s požadavky popsanými výše lze použít mechanického modelu znázorněného na obrázku 5. Toto schéma představuje tlumič upnutý v testovací stoličce, přesně tak jak je tomu při zkouškách tlumičů na

zkušebním stavu Gillop 1.4 (obrázek 2) [9]. Pokud získáme z experimentálně změřené globální charakteristiky tlumiče čistou tlumící sílu, můžeme vhodným naladěním ostatních komponentů modelu dosáhnout přibližně shodného průběhu, jak je tomu na obrázku 6 [4].



obrázek 5: Charakteristiky jednotlivých komponentů modelu (případ, kdy je tlumič uchycen v měkkém uložení nahoře i dole)[4]

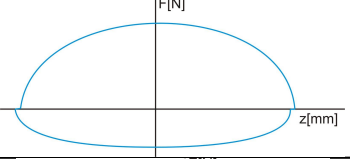
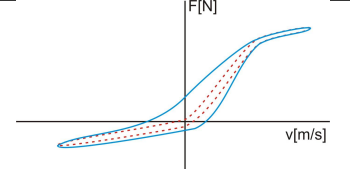
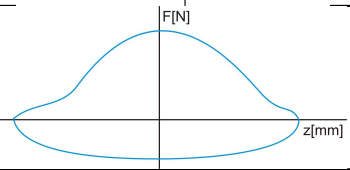
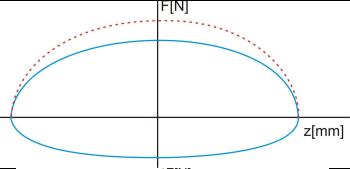
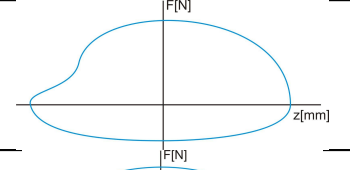
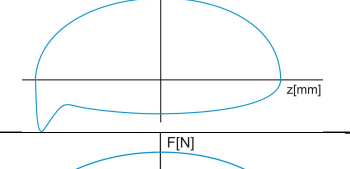
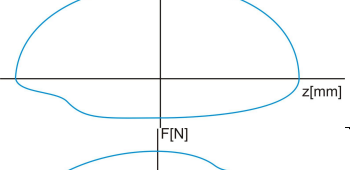
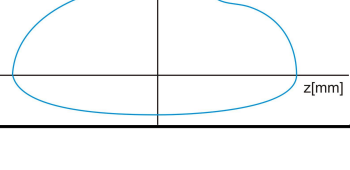
Na obrázku 6 je ukázka modelování předního tlumiče vozu Škoda 781. Zde byly odhadnuty následující parametry:



obrázek 6: Ukázka namodelované a naměřené rychlostní charakteristiky
 --- experimentálně zjištěná F - v charakteristika předního tlumiče pro vůz Škoda 781
 --- namodelovaná F - v charakteristika téhož tlumiče

2.3 Typické závady tlumiče

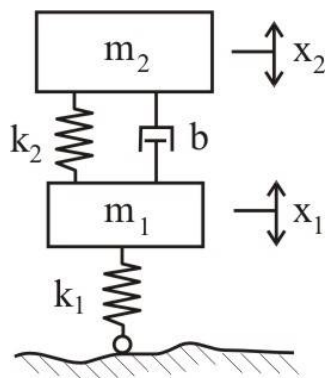
Mezi nejčastější závady tlumiče odpružení patří snížení tlumicí schopnosti. Častým projevem je „vychození“ pístu s válcem tlumiče nebo sníženou schopnost přepouštěcích ventilů. Na snížení technického stavu tlumiče má vliv také chybějící olej jenž unikl ucpávkou. Dalším problémem bývá vůle v uchycení tlumiče odpružení. Tabulka 1 popisuje jednotlivé závady, které se projeví v F-v a F-z charakteristice [2].

| Různé jevy v tlumiči odpružení znázorněné v F-z a F-v diagramech | |
|---|--|
|  | - vůle v uchycení tlumiče |
|  | - projev pružného uchycení tlumiče |
|  | - malý tlak plynného média ve vyrovnávací nádobce |
|  | - nečistota v oleji – ventil nad pístem nesedí - deformovaný ventil nad pístem - vůle mezi pístem a pracovním válcem |
|  | - pod pístem je vzduch - olej uniká vlivem poškozené pístnice |
|  | - velké množství oleje |
|  | - sací ventil neuzavírá – olej je vytlačován do zásobního prostoru - pod pístem je nasáván vzduch - zpěněná kapalina |
|  | - vyběhaný pracovní válec |

Tabulka 1: Projev různých vlivů v tlumiči na jeho F-z a F-v charakteristiky

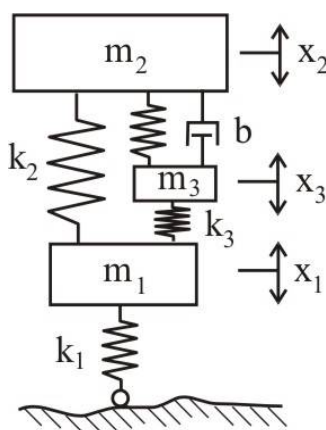
3. Čtvrtinový model automobilu s podmodelem hydraulického tlumiče

Pro samotnou analýzu chování jednoho závěsu se často používá tzv. čtvrtinový model automobilu (obrázek 7) [10]. Snaha konstruktérů je, aby výsledky simulací odpovídali co nejvíce výsledkům naměřených na reálné soustavě. Proto jsou parametry a charakteristiky (tuhost vozidlové pružiny, radiální tuhost pneumatiky, F-v charakteristika tlumičů, hmotnostní a tuhostní parametry karosérie a závěsů kol) ovlivňující dynamiku této soustavy zjišťovány experimentálně.



obrázek 7: Čtvrtinový model automobilu

V tomto modelu tlumič odpružení neumožňuje mít požadované vlastnosti, které jsou zmiňované v kapitole 2.2. Vložení tohoto diagnostického modelu tlumiče do čtvrtinového modelu automobilu, vznikne modelová situace umožňující simulovat nejrůznější funkční vlastnosti a závady tlumiče odpružení. Na obrázku 8 je znázorněn čtvrtinový model automobilu s podmodelem diagnostického tlumiče [16, 17].



obrázek 8: Čtvrtinový model automobilu s podmodelem tlumiče odpružení[6, 7]

Jak je patrné z rovnic (1) se jedná o výpočtově náročnější modelovou situaci. Tento model se třemi stupni volnosti je popsán následujícími stavovými rovnicemi. Řešení takovéto úlohy vyžaduje vhodný výběr matematické metody, jenž umožňuje řešení pohybových rovnic.

$$\begin{aligned} m_1 \cdot a_1 &= k_2(s_2 - s_1) + k_3(s_3 - s_1) - k_1 s_1 \\ m_2 \cdot a_2 &= k_2(s_1 - s_2) + k_4(s_3 - s_1) + b(v_3 - v_2) \\ m_3 \cdot a_3 &= k_3(s_1 - s_3) + k_4(s_2 - s_3) + b(v_2 - v_3) \end{aligned} \quad (1)$$

3.1 Matematická metoda Runge-Kutta

Matematické metody Runge-Kutta jsou vhodným nástrojem pro řešení diferenciálních pohybových rovnic [8]. Tato metoda je modifikací Eulerovy metody přímé integrace. Jedná se o explicitní jednokrokové metody, které mohou být libovolného řádu u nichž jsou odezvy soustav vyjádřeny pomocí dříve určených hodnot přemístění, rychlostí a zrychlení. V praxi se nejčastěji používá metoda Runge-Kutta 4. řádu, jenž dosahuje požadované přesnosti výpočtu. Prvotní podmínkou výpočtu je znát počáteční podmínky, tzv. stavové veličiny, jimiž jsou přemístění a rychlost. Tyto veličiny můžeme znázornit stavovým vektorem

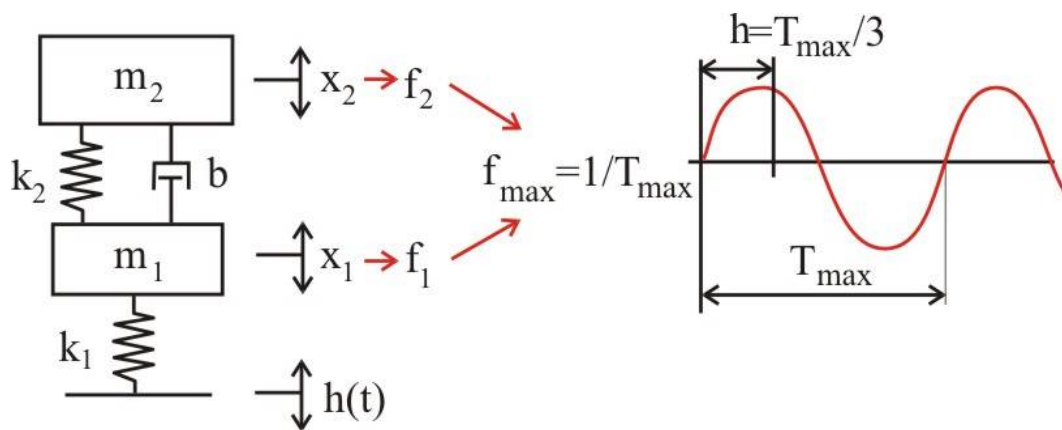
$$x = \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Pohybová soustava rovnic $\mathbf{M}\ddot{q} + \mathbf{B}\dot{q} + \mathbf{K}q = \mathbf{Q}(t)$ (3)

se pro řešení metodou Runge-Kutta přepíše do následujícího tvaru, kde se vyjádří zrychlení soustavy:

$$\ddot{q} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}q - \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}\dot{q} - \mathbf{M}^{-1}\mathbf{Q}(t) \quad (4)$$

Výsledkem řešení této metody je průběh přemístění, rychlosti a zrychlení v závislosti na čase t . Přesnost metody je však závislá na délce kroku h . Velikost kroku h by měla vycházet z periody nejvyšší vlastní frekvence v soustavě, kde h má být $1/3$ z této periody (obrázek 9) [18]. V praxi se však doporučuje $h = \frac{1}{10}T_{\max}$. Metody Runge-Kutta nejsou tak citlivé na velikost časového kroku, jako jiné výpočtové metody.



obrázek 9: Určení minimálního kroku pro výpočet metodou Runge-Kutta

Vlastní jednotlivých kroků této metody popisuje rovnice (5).

$$y_{n+1} = y_n + \frac{1}{6}h(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (5)$$

Pomocné koeficienty, které zajišťují přesnost metodu jsou následující:

$$k_1 = f(x_n, y_n) \quad (6)$$

$$k_2 = f\left(x_n + \frac{1}{2}h, y_n + \frac{1}{2}hk_1\right) \quad (7)$$

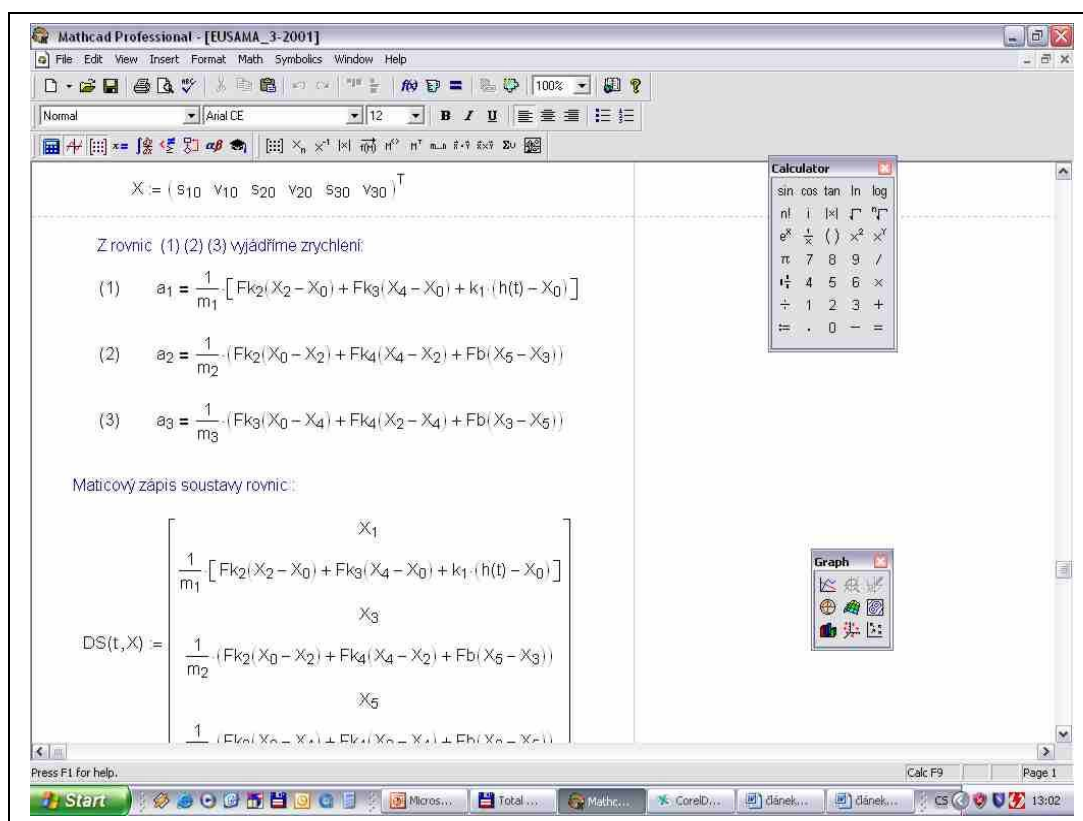
$$k_3 = f\left(x_n + \frac{1}{2}h, y_n + \frac{1}{2}hk_2\right) \quad (8)$$

$$k_4 = f(x_n + h, y_n + hk_3) \quad (9)$$

3.2 Programové prostředí

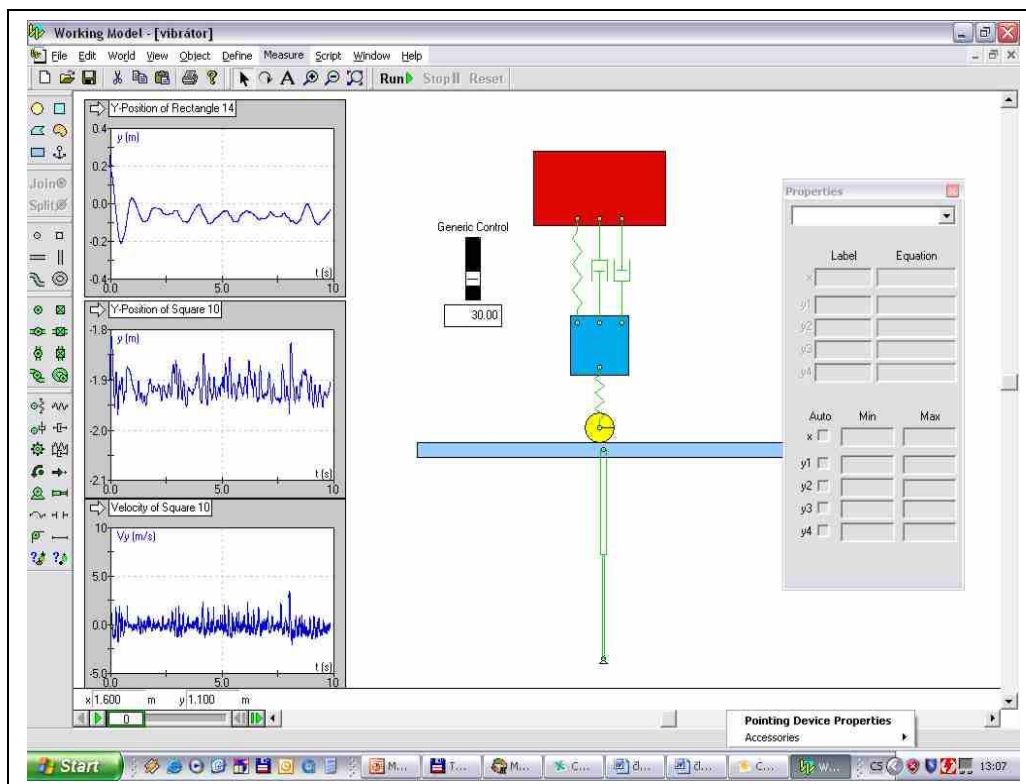
K samotné simulaci matematického modelu patří jak volba programového prostředí, tak i výběr vhodné matematické metody. Počítačový trh nabízí celou řadu počítačových programů. Při mém výzkumu jsem odzkoušel programy MathCad, Working Model 2D, Adams a MathLab.

Software MathCad (verze 2001i, obrázek 10) umožňuje popsat model pohybovými rovnicemi tak, jak by to zapsal vědecký pracovník na papír, popis modelu je tak přehledný. Pro výpočet diferenciálních rovnic MathCad disponuje metodou Runge-Kutta 4. řádu. Naprogramování modelové situace je ovšem časově náročné. Samotný výpočet je také časově delší než u dalších zkoumaných programů.



obrázek 10: MathCad

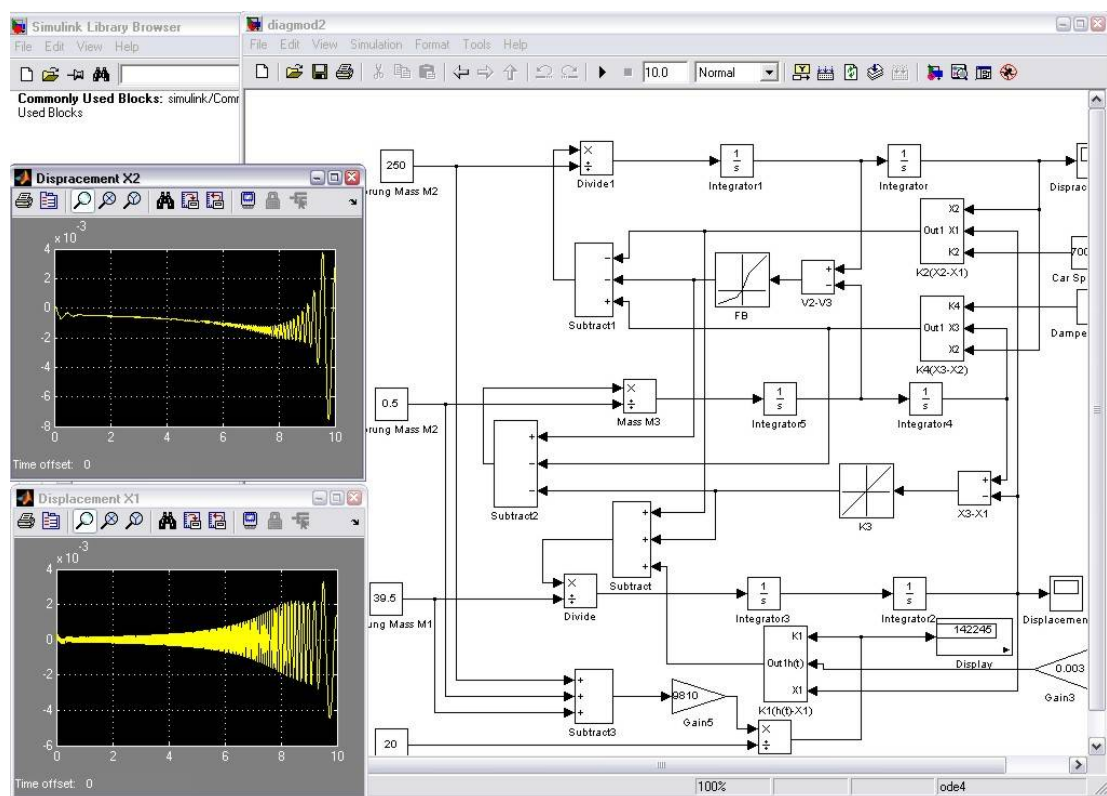
Další možností jak zapsat modelovou situaci je pomocí objektově orientovaných programů, tzv. multibody systémů. Zástupci jsou programy Working Model 2D a Adams. Working Model (obrázek 11) je program umožňující vytvořit model ve 2D prostředí, k výpočtům využívá Eulerovy metody. Vzhledem k možnostem programu a získaných výsledků ze simulací se tento program hodí spíše pro rychlý náhled na pozorovanou situaci. Výhody programu Adams je v možnosti „trojrozměrného programování“. Zde není nutné zjednodušovat model na čtvrtinový model automobilu, ale zavěšení kola lze přímo geometricky namodelovat. Vzniká tak možnost vložit do modelu i matematicky špatně popsatelné vlastnosti jako tření či materiálovou pružnost. Nutností pro použití Adamsu je mít k dispozici výkonnější hardwarové vybavení. Jelikož u obou programů nejsou dostatečně viditelné určité vlastnosti naprogramovaného modelu (výpočtová metody, vzorkovací frekvence, vnější vlivy působící na soustavu, vlastnosti modelu) je nezbytností velmi dobrá znalost těchto programů.



obrázek 11: Working Model 2D

Posledním programem, který jsem vyzkoušel pro modelování výše popsané situace, je MathLab, konkrétně nástavba Simulink (obrázek 12). Program je graficky orientovaný, tedy každá operace v pohybové rovnici má svůj funkční blok. Graficky se však jedná o dosti nepřehlednou situaci. Výhodou programu je naopak rychlé sestavení modelu a velmi rychlý výpočet simulace. Jelikož je tento program ve světě velmi používaný, patří mezi jeho další výhody možnost lepší spolupráce s jinými výzkumnými týmy. Pro výpočet je připraveno mnoho matematických metod jako například Adamsova, Dormand-Priceova, Runge-Kuttova nebo Bogacki-Shamineova.

Pro srovnání, k výpočtu výše uvedené úlohy se třemi stupni volnosti je zapotřebí vzorkovací frekvence 10kHz. Porovnání jsem provedl na počítači s parametry Intel Celeron M350 (1.3 GHz, RAM 256 MB). Při 10-ti sekundové simulaci tuto úlohu nerychleji zvládl program Simulink, kde výpočet trval 3 vteřiny. U programu MathCad tento čas byl 125 vteřin. Programové prostředí Adams zvládlo simulaci cca 7 minut. Simulace v programu Working Model vzhledem k použití horší matematické metody dávala neuspokojivé výsledky.



obrázek 12: Programové prostředí MathLab, nástavba Simulink

4. Matematická simulace závad tlumiče a projev na testery tlumičů

4.1 Současná diagnostika bezdemontážní diagnostiky tlumičů

Na trhu se servisní technikou je mnoho testerů pro bezdemontážní diagnostiku tlumičů odpružení. Každý z nich využívá pro zhodnocení technického stavu tlumiče a závěsu kola rozdílných metodik závislých na sledování pohybu buď odpružené nebo neodpružené hmoty [19]. Testery lze rozdělit do tří kategorií:

- *impulsní dokmitový test* – hodnotící stlačením rozhoupaný pohyb karosérie (TriTec, M-Tronic)
- *rezonanční adhezní test* – rozkmitáním závěsu kola se sleduje přítlačná síla k vozovce (metodika EUSAMA)
- *rezonanční amplitudový test* – rozkmitáním závěsu kola se monitoruje amplituda odpružení plošiny kola (metodika BOGE)

Dalším testem, s kterým nově přišla naše výzkumná skupina, je *přejezdový test*. Zde je hodnocen pohyb závěsu kola, který je vybuzen přejezdem přes definovanou překážku.

Při hledání literatury, která hodnotí testery určené pro bezdemontážní diagnostiku tlumičů jsme našel pouze dva publikační zdroje [20, 21]. Rozhodl jsem

se rozšířit tyto práce a ohodnotit funkčnost jednotlivých testerů s vozem, na kterém mohou měnit parametry nastavení podvozku. Tento experiment provedl s pomocí matematické modelování na již dříve popisovaném čtvrtinovém modelu automobilu s podmodelem diagnostického tlumiče. Na tento model jsem aplikoval všechny čtyři kategorie testů bezdemontážní diagnostiky tlumičů odpružení. Základní parametry modelu jsou uvedeny v tabulce 2, které vychází z přední nápravy vozu Škoda Fabia.

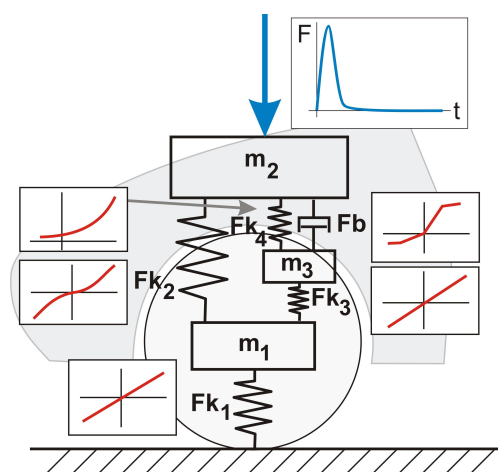
| nasavení parametrů modelu | jednotky | základní nastavení | vůle v uložení tlumiče | měkčí uložení tlumiče | změna charakteristika tlumiče |
|--|-----------------|--------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| neodpružená hmota m1 | kg | 250 | 250 | 250 | 250 |
| odpružená hmota m2 | kg | 39.5 | 39.5 | 39.5 | 39.5 |
| hmota tlumiče m3 | kg | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| subtangenta | mm | 20 | 20 | 20 | 20 |
| radiální tuhost pneumatiky k1 | N/mm | 142.25 | 142.25 | 142.25 | 142.25 |
| tuhost vozidlové pružiny k2 | N/mm | 70 | 70 | 70 | 70 |
| charakteristika tlumiče odpružení (síla při dané rychlosti pohybu tlumiče) | N při 0.52 m/s | 1200 | 1200 | 1200 | 1200 |
| | N při 0.13 m/s | 600 | 600 | 600 | 600 |
| | N při 0 m/s | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | N při -0.13 m/s | -250 | -250 | -250 | 0 |
| | N při -0.52 m/s | -500 | -500 | -500 | 0 |
| vůle | mm | 0 | 1 | 0 | 0 |
| tuhost uchycení tlumiče | N/mm | 5000 | 5000 | 500 | 5000 |

tabulka 2: Použité parametry modelu

Porovnávací simulační testy jsem rozdělil do dvou kategorií. První kategorií se zabývá vlivem změny základních parametrů vozu na tester. Konkrétně jsem se zaměřil na parametry jenž mohou být jednoduše změněny (nevědomě řidičem vozu). Jedná se o změny velikosti odpružené hmoty (například změna nákladu, přisednutí osoby), změně neodpružené hmoty (tuning s použitím lehčího kola) a změna nahuštění pneumatiky (nesprávný tlak v pneumatikách). Tyto parametry byly měněny v rozsahu od -30% do 30% ze základního nastavení závěsu. Druhou kategorií testů je experiment při zhoršeném technickém stavu závěsu kola (tabulka 2). Zde je hodnocen vliv vůle v uchycení tlumiče 1mm, uchycení tlumiče v měkčím pryžovém lůžku a snížená funkčnost tlumiče odpružení ve stlačovací fázi.

4.1.1 Impulsní dokmitový test

Při tomto typu testu je sledován pohyb karosérie, z kterého je vyhodnocen měrný útlum odpružené hmoty. Vybuzení pohybu karoserie může být realizováno ručním rozhoupáním. Pohyb je pak následně snímán mechanicky (TriStar Shock Tester – obrázek 13) nebo opticky (M-Tronic). Jiným způsobem rozhoupání karosérie je „zakleknutí“ vozu při prudkém zabrzdění z nízké rychlosti na speciální brzdě plošině, která snímá kmitání odpružené hmoty jako brzdou reakci (HEKA Universal). Další metodou jak zajistit pohyb odpružené hmoty je při pádu vozu z malé výška (KONI). Jelikož zkušební rychlosti při tomto druhu testu jsou poměrně malé, je možné získat poměrně přesné hodnocení stavu tlumiče, které není příliš ovlivněno stavem celého závěsu. Nezbytností je zajisti dostatečné stlačení karosérie, což v případě tvrdšího nastavení odpružení vozu je nemožné a tato metoda je nevhodná pro dodávkové a nákladní vozy.

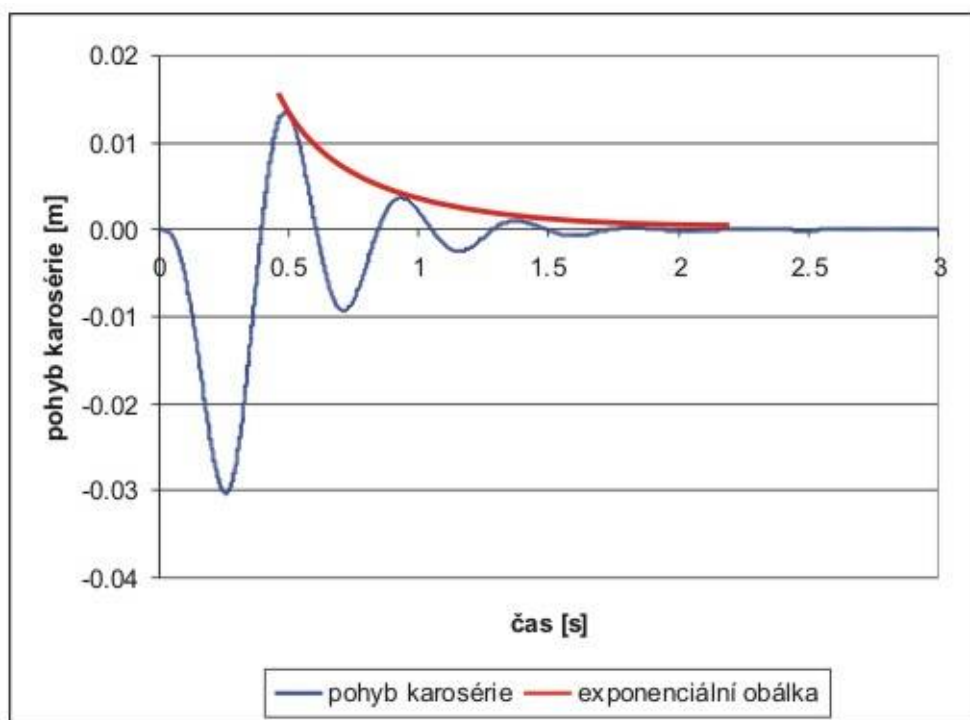


obrázek 13: Impulsní dokmitový test a jeho modelová situace

Modelová situace tohoto testu je naznačena na obrázku 13. Budící signál má simulovat zhoupnutí karosérie člověkem, přibližně 80 kg hmotným. Impulsní sílu $F(t)$ (viz rovnice modelu 10) jsem zvolil o hodnotě 1000 N s dobou trvání 0.3 vteřiny.

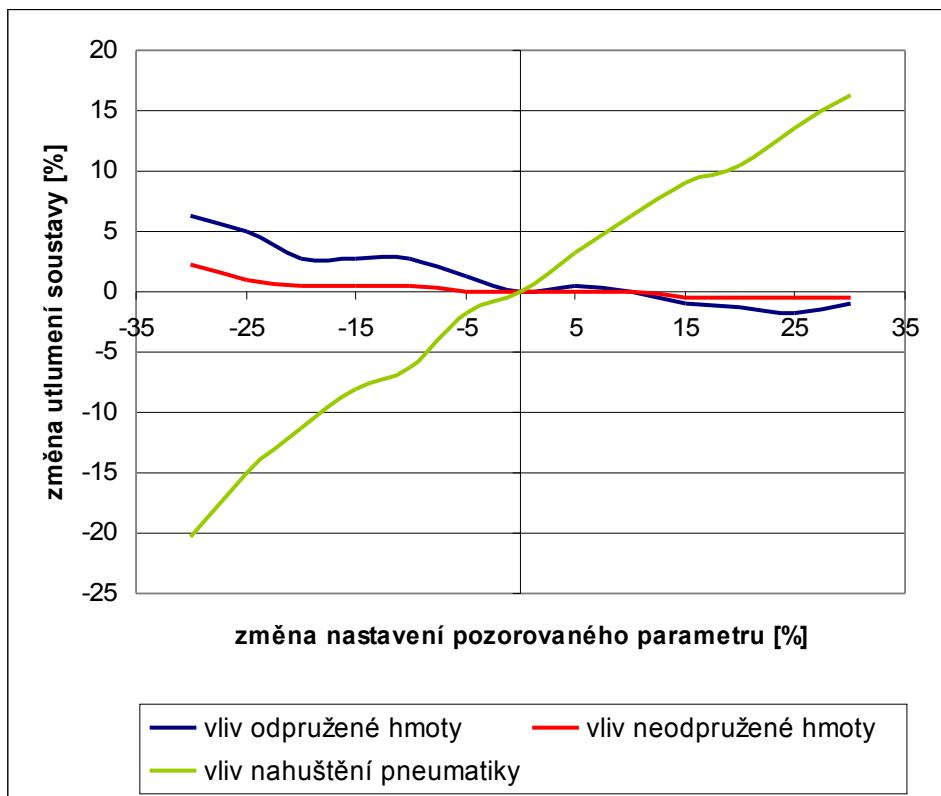
$$\begin{aligned}
 m_1 \cdot a_1 &= Fk_2(s_2 - s_1) + Fk_3(s_3 - s_1) - Fk_1 s_1 \\
 m_2 \cdot a_2 &= Fk_2(s_1 - s_2) + Fk_4(s_3 - s_1) + Fb(v_3 - v_2) - F(t) \\
 m_3 \cdot a_3 &= Fk_3(s_1 - s_3) + Fk_4(s_2 - s_3) + Fb(v_2 - v_3)
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Sledovaným parametrem je pohyb odpružené hmoty (karosérie). Z naměřeného signálu je vyhodnoceno volné dokmitání karosérie, kde obálka naměřeného signálu lze vyjádřit exponenciálou. Exponent této obálky vyjadřuje měrný útlum soustavy. Dalším parametrem, který je možné získat z naměřeného signálu je vlastní frekvence karosérie. Na obrázku 14 je ukázka naměřeného signálu pohybu karosérie a jeho následné vyhodnocení.

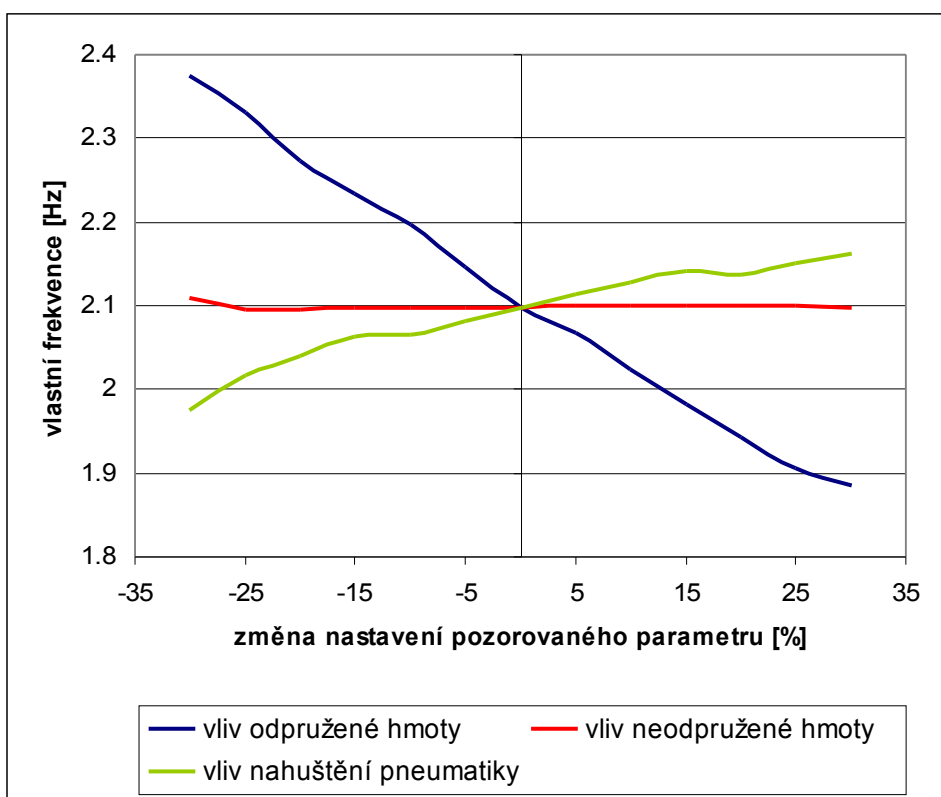


obrázek 14: Záznam pohybu karosérie a následné vyhodnocení (základní nastavení závěsu kola)

V obrázcích 15 a 16 jsou zobrazeny změny v nastavení podvozku mající vliv na utlumení pohybu karosérie a vlastní frekvenci karosérie. Měrný útlum základního nastavení vyše 0.221 a vlastní frekvence karosérie 2.098Hz. Z výsledků je patrné, že změna odpružené a neodpružené hmoty prakticky nemá vliv na hodnotící metodiku testeru. Zvýšení nákladu, tedy změna velikosti odpružené hmoty má vliv pouze na pohodlí pro cestující, což je zřejmé z vlastní frekvencí karosérie (obrázek 16). Nejpodstatnější vliv má však nahuštění pneumatiky, které může výrazně ovlivnit výsledek měření touto metodikou testu. Jak je patrné z obrázku 15, podhuštěná pneumatiky (snížení radiální tuhosti pneumatiky) zajistí lepší utlumení karosérie. Tedy pokud automobil bude mít špatný tlumič odpružení a test bude proveden s podhuštěnou pneumatikou, může obsluha testeru usoudit, že tlumič odpružení je v pořádku. S přehuštěnou pneumatikou může být závěr opačný.



obrázek 15: Vliv změny nastavení podvozku vozu na tlumení pohybu karosérie



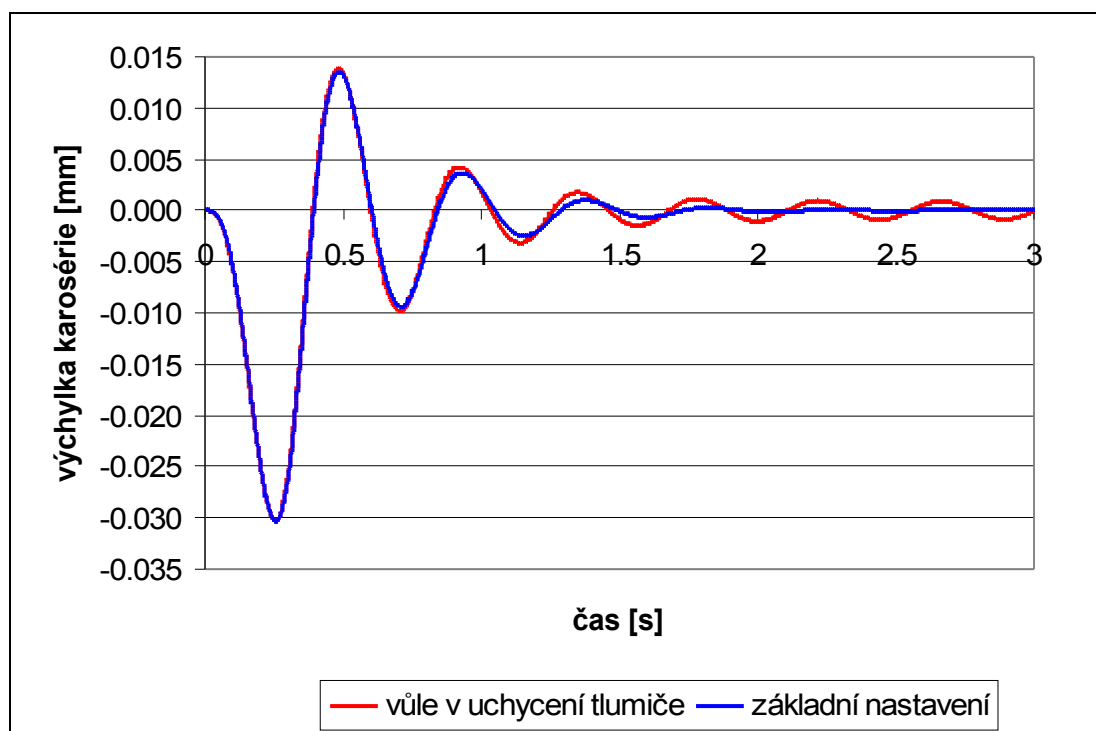
obrázek 16: Vliv změny nastavení podvozku vozu na vlastní frekvenci karosérie

Druhým testem, který prověří tester, je monitorování pohybu karosérie při sníženém technickém stavu – vůle v uchycení tlumiče 1mm, snížení tuhosti pryžového lůžka uchycení tlumiče z 5000 N/mm na 500 N/mm a nefunkčnost tlumiče při stlačovací fázi. Tabulka 3 porovnává výsledky se zladným nastavením modelu.

| | měrný útlum | pokles útlumu [%] | vl. frekvence [Hz] | pokles frekvence [%] |
|---------------------------|-------------|-------------------|--------------------|----------------------|
| poměrný útlum | 0.221 | 0 | 2.098 | 0 |
| vůle v uchycení | 0.219 | -0.905 | 2.123 | 1.19 |
| měkké pryžové lůžko | 0.213 | -2.74 | 2.128 | 1.43 |
| snížená funkčnost tlumiče | 0.192 | -12.33 | 2.083 | -0.715 |

tabulka 3: Vliv technického stavu závěsu kola na poměrný útlum a vlastní frekvenci karosérie

Z tabulky je patrné, že každé zhoršení technického stavu zhorší kvalitu útlumu karosérie. Na obrázku 17 je srovnání průběhu při vůli v uchycení tlumiče a základního nastavení. Při malých výchylkách se celý mechanismus pohybuje v oblasti vůle, čímž je znemožněno působení tlumiče. Stejně tomu je i u měkkého uložení tlumiče, kde veškerý pohyb se děje v pryžovém úchyty a tlumič je opět vyřazen z provozu.

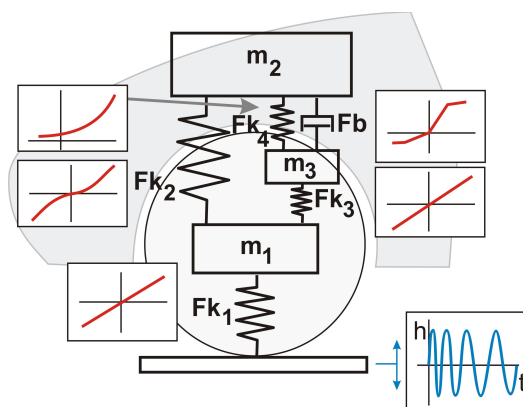


obrázek 17: Ukázka průběhu pohybu karosérie – dobrý a špatný technický stav závěsu se základním nastavením a vůlí v uchycení

4.1.2 Rezonanční adhezní test

Rezonanční bezdemontážní adhezní test posuzuje přilnavost kola ke kmitající plošině. Kmitající plošina simuluje nerovnosti vozovky a současně registruje přítlačnou sílu kola. Výsledkem zkoušky je nejmenší hodnota přítlaku r_{\min} v průběhu testu dle metodiky EUSAMA [22].

$$r_{\min} = 100 \cdot \frac{F_{\min}}{F_s} [\%] \quad (11)$$

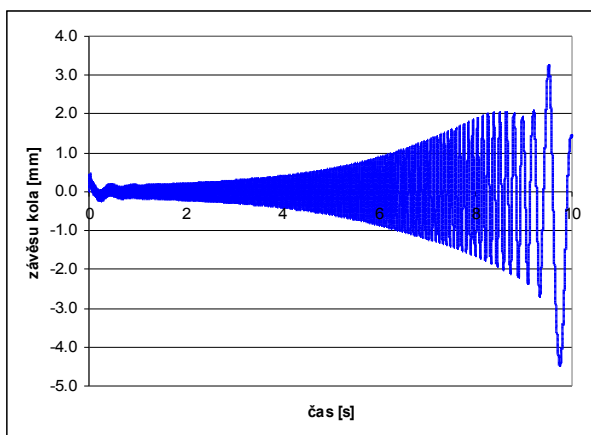


obrázek 18: Matematický model rezonančního adhezního testu

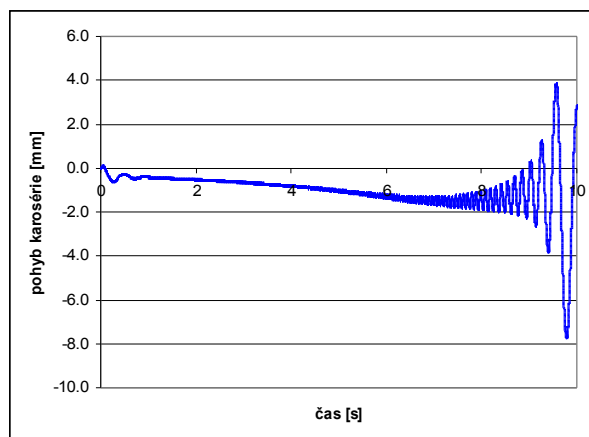
Matematický model je zobrazen na obrázku 18. Popis tohoto modelu na testeru vystihují následující rovnice:

$$\begin{aligned} m_1 \cdot a_1 &= Fk_2(s_2 - s_1) + Fk_3(s_3 - s_1) + Fk_1(h(t) - s_1) \\ m_2 \cdot a_2 &= Fk_2(s_1 - s_2) + Fk_4(s_3 - s_1) + Fb(v_3 - v_2) \\ m_3 \cdot a_3 &= Fk_3(s_1 - s_3) + Fk_4(s_2 - s_3) + Fb(v_2 - v_3) \end{aligned} \quad (12)$$

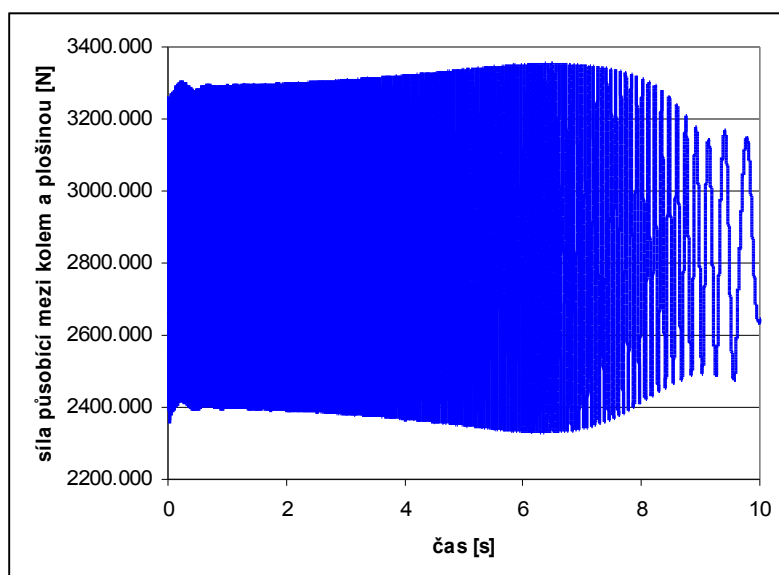
Budící signál má tvar rozmitaného signálu. Jedná se o harmonický signál s konstantní amplitudou 3 mm a s lineárně klesající frekvencí (od 50 Hz do 0 Hz). Na obrázku 19a a 19b je znázorněn průběh pohybu odpružené a neodpružené hmoty, obrázek 20 popisuje průběh přítlačné síly na čase, respektive budící frekvenci.



obrázek 19a: Průběh odpružené hmoty (základní nastavení modelu)

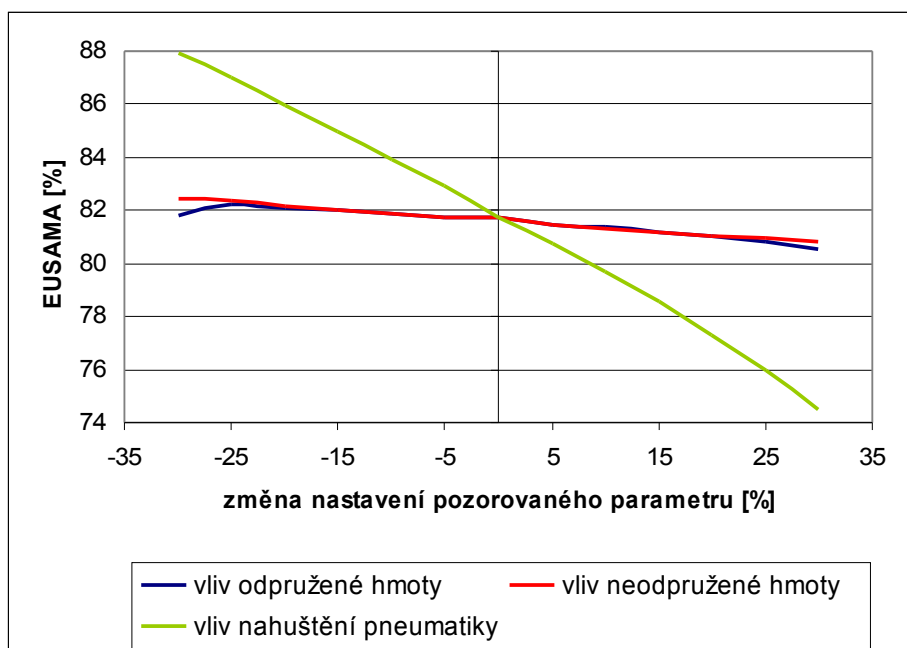


obrázek 19b: Průběh odpružené hmoty (základní nastavení modelu)



obrázek 20: Průběh přitlačné síly kola k vozovce (základní nastavení modelu)

Jedním z testů bylo ohodnocení vlivu při různém nastavení podvozku, konkrétně při změně odpružené a neodpružené hmoty a nahuštění pneumatiky vyjádřenou radiální tuhostí pneumatiky. Jednotlivé parametry jsem měnil v rozsahu od -30% do 30 % od základního nastavení a sledoval jsem změnu přitlačné síly. Obrázek 21 popisuje výsledek testu. Zvýšení či snížení odpružené a neodpružené hmoty nemá tak výrazný vliv na přitlačnou sílu, jako změna tlaku v pneumatice.



obrázek 21: Průběh přítlačné síly v závislosti na naladění zavěšení kola

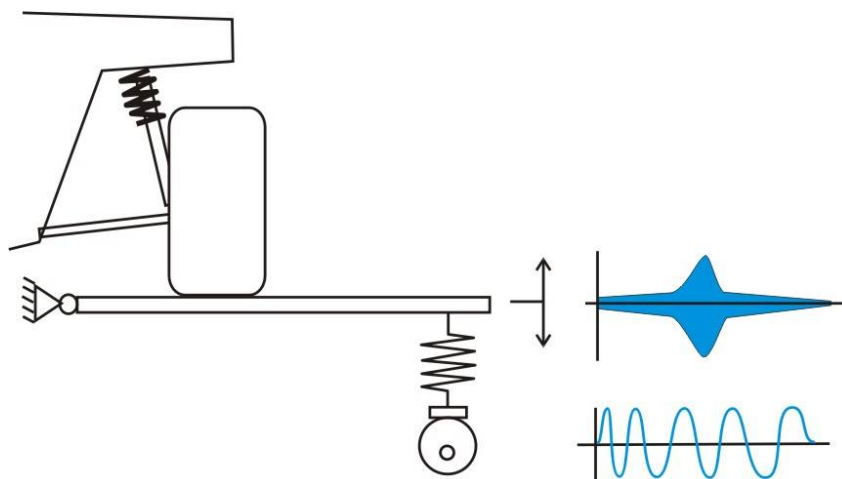
Dalším testem je opět zmiňovaný test při snížené funkčnosti závěsu kola. Zde se opět potvrdil fakt (tabulka 4), jak významný je dobře upnutý tlumič, tedy upnutý pevně a bez vůle. Vadný tlumič vykazuje zhoršenou přilnavost kola k vozovce a tedy i sníženou bezpečnost vozu.

| | EUSAMA [%] | Sníží přítlačnou sílu [%] |
|--------------------------------|------------|---------------------------|
| Základní nastavení | 81.72 | 0 |
| Vůle v uchycení | 79.73 | -2.44 |
| Pružné lůžko | 80.55 | -1.43 |
| Vada v tlumící charakteristice | 78.41 | -4.05 |

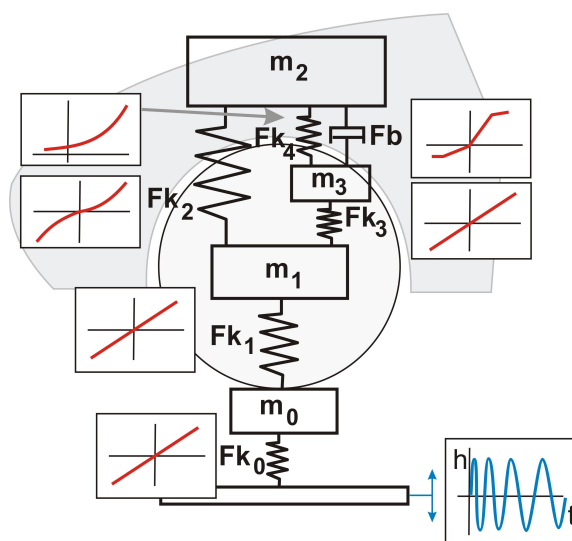
tabulka 4: Vliv technického stavu závěsu kola na nejnižší přítlačnou sílu (EUSAMA)

4.1.3 Rezonanční amplitudový test

Rezonanční bezdemontážní amplitudový test se provádí rozkmitáním plošiny, na které je najeto měřeným kolem (obrázek 22). Plošina je rozkmitána pomocí vačkového mechanismu do frekvence vyšší než je vlastní frekvence plošiny s kolem. Po vypnutí pohonu klesá frekvence kmitání přes rezonanční oblast až do zastavení, přičemž je zaznamenáván pohyb kmitů plošiny. Vyhodnocován je rozkmit pomocné hmoty testeru.



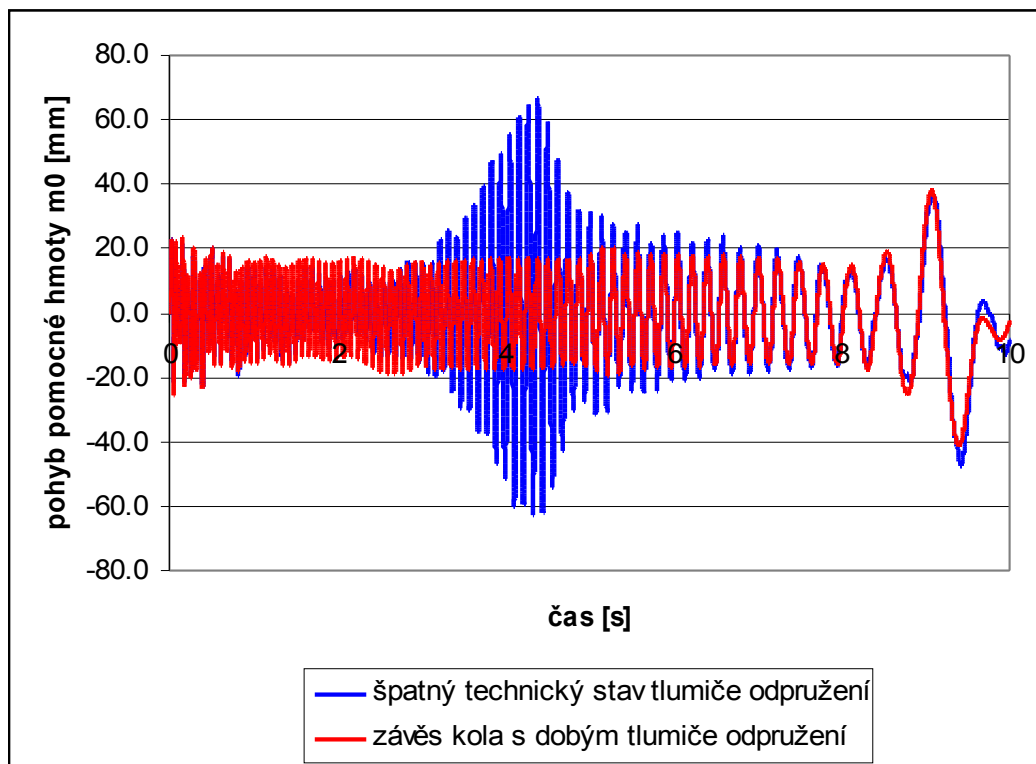
obrázek 22: Mechanismus rezonančního amplitudového testeru



obrázek 23: Matematický model rezonančního amplitudového testu

Modelová situace tohoto testu je na obrázku 23. Tento model testeru se diagnostickým čtvrtinovým modelem automobilu je mechanická soustava se čtyřmi stupni volnosti. Tomu odpovídá i stejný počet stavových rovnic popisující model:

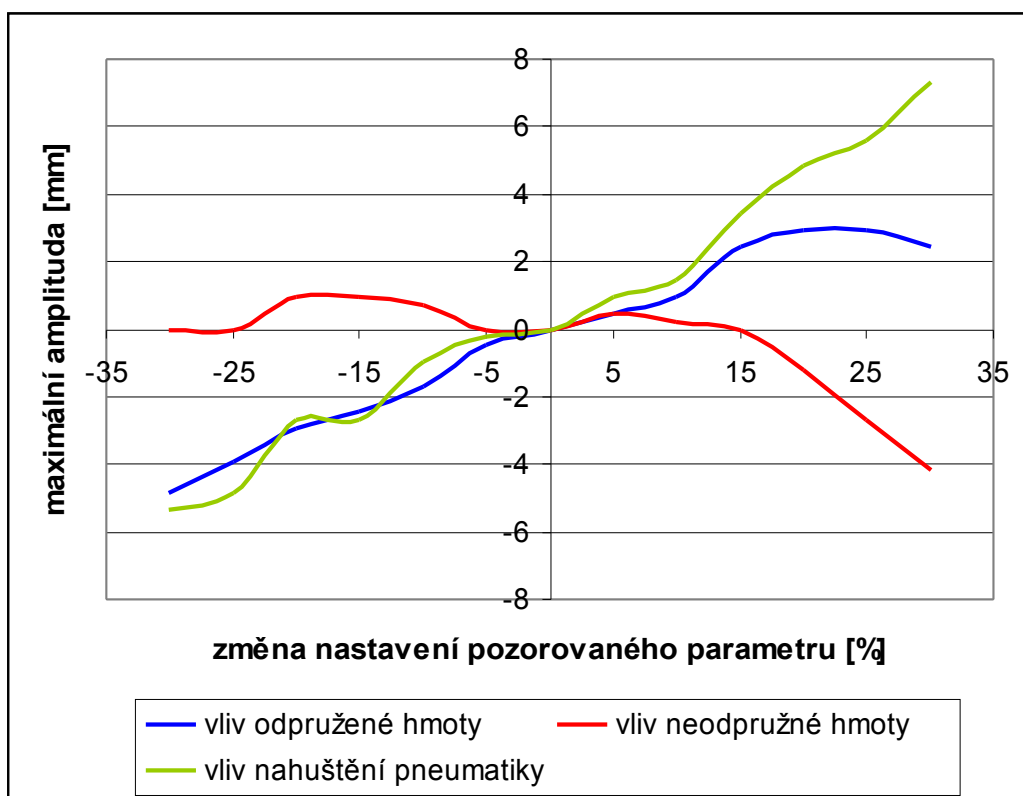
$$\begin{aligned}
 m_0 \cdot a_0 &= Fk_1(s_1 - s_0) + Fk_0(h(t) - x_0) \\
 m_1 \cdot a_1 &= Fk_2(s_2 - s_1) + Fk_3(s_3 - s_1) + k_1(s_0 - s_1) \\
 m_2 \cdot a_2 &= Fk_2(s_1 - s_2) + Fk_4(s_3 - s_1) + Fb(v_3 - v_2) \\
 m_3 \cdot a_3 &= Fk_3(s_1 - s_3) + Fk_4(s_2 - s_3) + Fb(v_2 - v_3)
 \end{aligned}
 \tag{13}$$



obrázek 24: Záznam testu pro základní nastavení modelu

Budící signál vychází z parametrů skutečného testeru Sachs Shocktester 200 EFD. Plošina m_0 je přes pružinu F_{k_0} (tuhost 150 N/mm) buzena exentrem s amplitudou 9 mm rozmítaným signálem z frekvence 15.75 Hz (otáčky 945 1/min) až do 0 Hz po dobu 10 vteřin. Pákový poměr mezi působením pružiny k_0 a k_1 je 2.7. Sledovaným parametrem je rozkmit pomocné hmoty m_0 , kde jsem hodnotil maximální amplitudu v oblasti frekvence neodpružené hmoty.

Pozoruhodné je (obrázek 25), že změna nastavení podvozku nemá extrémní vliv na konečné hodnocení testu (maximální výchylku pomocné hmoty m_0). Stejně tomu je i při zhoršeném uchycení tlumiče odpružení (vůle, měkké uchycení). Pouze pokud jsem měnil tlumicí charakteristiku tlumiče odpružení, monitorovaná hodnota amplitudy pomocné hmoty se výrazně změnila (především při snižování tlumících sil) – obrázek 26.



obrázek 25: Záznam testu pro základní nastavení modelu

| | Max. amplituda [mm] | Změna amplitudy [%] |
|--------------------------------|---------------------|---------------------|
| Základní nastavení | 20.5 | 0 |
| Vůle v uchycení | 20 | -2.44 |
| Pružné lůžko | 20 | -2.44 |
| Vada v tlumicí charakteristice | 27.3 | 33.17 |

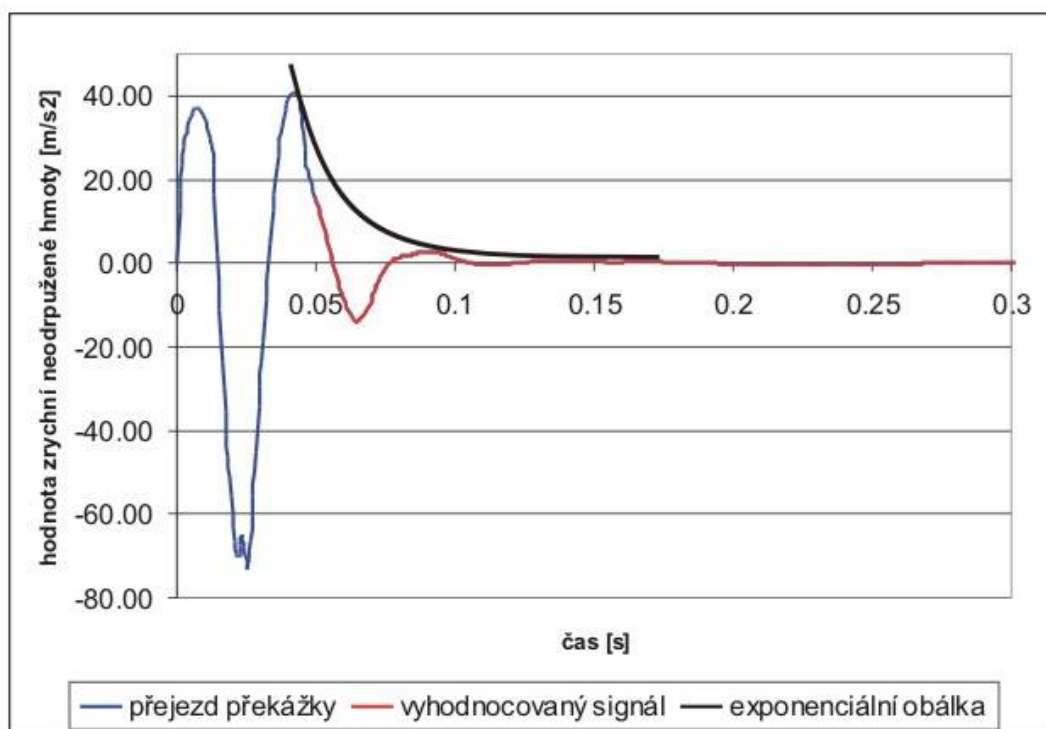
tabulka 5: Vliv technického stavu závěsu kola na amplitudu závěsu kola

4.2 Nová metodika hodnocení zavěšení kola - Přejezdový test

Přejezdový test je námi vytvořený nový typ testu pro bezdemontážní diagnostiky tlumičů. Základní myšlenka tohoto testu je sledování dokmitání závěsu kola automobilu po přejetí definované překážky. K tomu to účelu je vozidlo vybavené snímačem zdvihu umístěným mezi závěsem kola a karosérií, respektive snímačem zrychlení umístěným na závěsu kola. Stejně tomu je i v modelové situaci zobrazené na obrázku 20.

Prvním krokem je identifikace okamžiku nájezdu na práh a počátku volného dokmitávání při plynulé jízdě. Z dokmitové křivky je následně vyčíslen vlastní

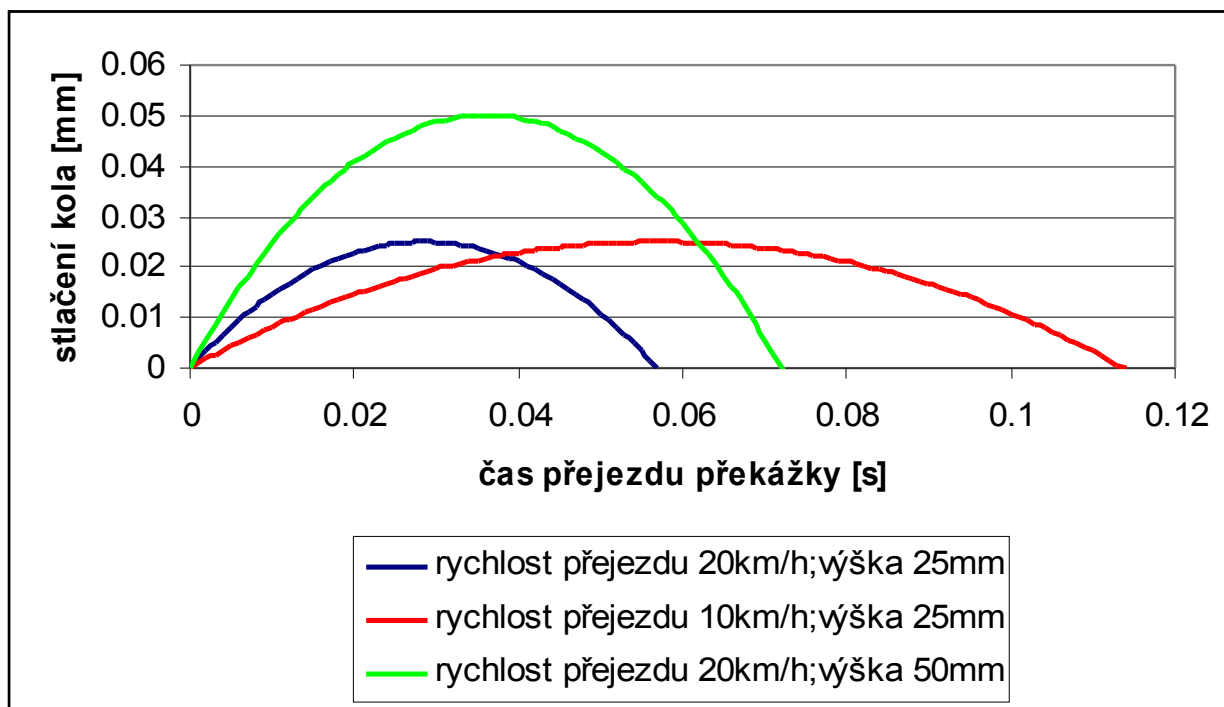
kmitočet modelu a regresní analýzou lokálních extrémů křivky odhadnuty parametry exponenciální obálky, stejně jako tomu je u metodiky impulsní dokmitové. Na následujícím obrázku 27 jsou zachyceny rozfázované jednotlivé etapy při hodnocení. Výsledkem je tedy odhadnutá hodnota vlastního kmitočtu a součinitel lineárního viskózního tlumení pro každý závěs. Linearizace celé problematiky si vynucuje využití testu jako srovnávacího, tj. pouze pro srovnání vozidel téhož typu (nejlépe téhož exempláře vozidla), při dodržení stejných zkušebních podmínek. Zjištěný kmitočet závěsu je důležitý právě pro posouzení identických zkušebních podmínek. Velmi rychle odhalí např. i malou odchylku tlaku v pneumatikách, či jinou změnu v nastavení podvozku.



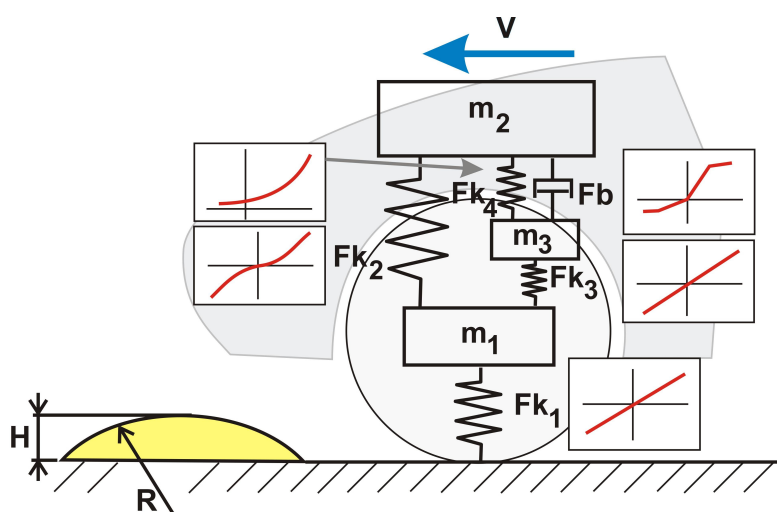
obrázek 27: Průběhu zrychlení neodpružené hmoty

Na obrázku 27 je ukázka namodelovaného průběhu zrychlení neodpružené hmoty pro základní nastavení modelu. Výsledné tlumení má hodnostu 0.334. U testeru TriStar pro základní nastavení je 0.221. Důvod tohoto rozdílu lze přisoudit rozdílnému budicímu signálu.

Vybuzení závěsu je závislé nejen na tvaru překážky, ale také na výšce a délce překážky, poloměru kola a na rychlosti přejezdu překážky. Na obrázku 28 je ukázka tak se mění tvar budicího signálu při různých rychlostech přejezdu a výšce přejezdu. Pro následující modelování této metody jako základní nastavení jsem vybral práh s výškou $H = 25\text{mm}$ a délkou překážky 200mm. Poloměr kola 14-ti palcového kola je $r = 300\text{ mm}$. Rychlost přejezdu 20 km/h. Budicí signál je zapsán v rovnicích modelu (obrázek 29) jako $h(t)$.



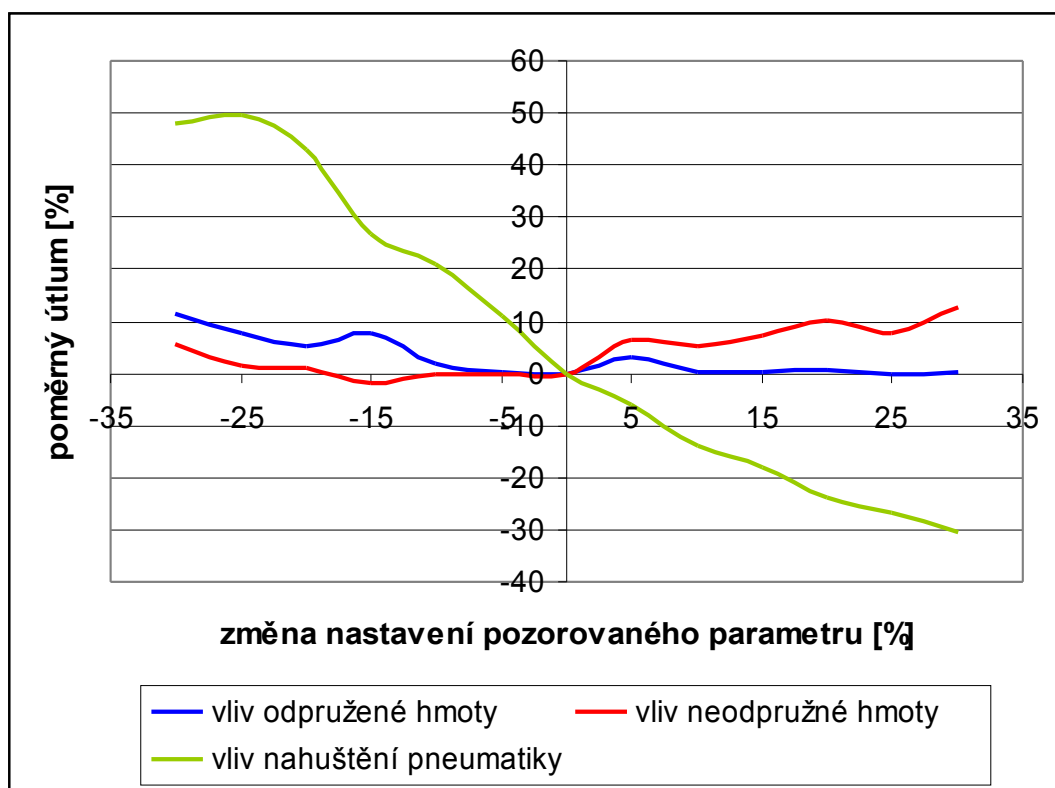
obrázek 28: Charakter budícího signálu odvozený od výška překážky a nájezdové rychlosti



obrázek 29: Matematický model přejezdového testu

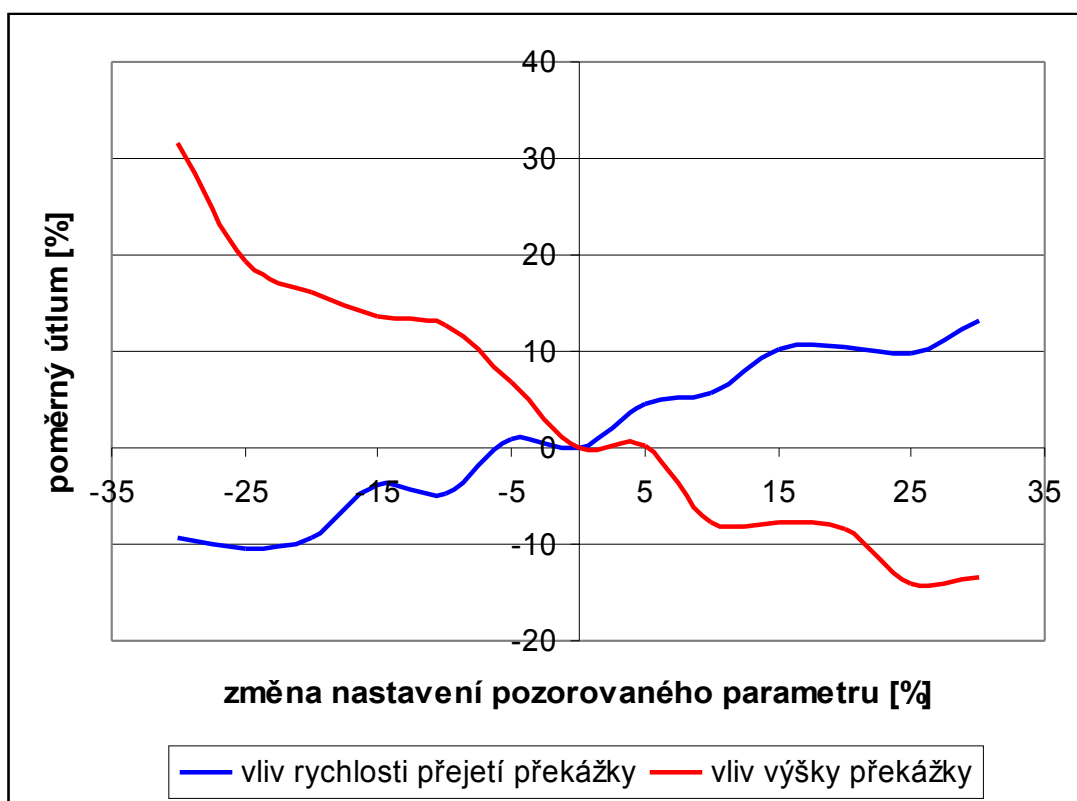
$$\begin{aligned}
 m_1 \cdot a_1 &= Fk_2(s_2 - s_1) + Fk_3(s_3 - s_1) + Fk_1(h(t) - s_1) \\
 m_2 \cdot a_2 &= Fk_2(s_1 - s_2) + Fk_4(s_3 - s_1) + Fb(v_3 - v_2) \\
 m_3 \cdot a_3 &= Fk_3(s_1 - s_3) + Fk_4(s_2 - s_3) + Fb(v_2 - v_3)
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

Na obrázku 30 je opět sledování vlivu nastavené podvozku. Zde není výjimkou extrémního ovlivnění testu pomocí špatně nahuštěnou pneumatikou. Výsledek testu může být (pro mnou používané parametry vozu) ovlivněn až o 50%.



obrázek 30: Vliv nastavení podvozku

Pro ověření tohoto testu jsem zařadil další experiment, který má zjistit vliv výšky překážky a nájezdové rychlosti (obrázek 31). Nájezdová rychlost je důležitá pro opakovatelnost testu. Základní nájezdová rychlost je 20 km/h, pokud dáme povolený rozptyl rychlosti +/- 10% (rychlost od 18 do 22 km/h), jsou výsledky ovlivněny o 5%. Dá se říci, že vliv nájezdové rychlosti nemá vliv na hodnocení testu. Výška prahu má také jistý vliv na konečný výsledek, zde se však předpokládá použití standardní překážky.



obrázek 31: Vliv přejezdu překážky

Dalším testem je opět zmiňovaný test při snížené funkčnosti závěsu kola. Jak je patrné z tabulky 6, je tento test velmi náchylný na technický stav závěsu kola.

| | Poměrný útlum [-] | Sníží tlumení [%] |
|--------------------------------|-------------------|-------------------|
| Základní nastavení | 0.335 | 0 |
| Vůle v uchycení | 0.275 | -14.03 |
| Pružné lůžko | 0.286 | -17.91 |
| Vada v tlumící charakteristice | 0.222 | -33.73 |

tabulka 6: Vliv technického stavu závěsu kola

4.3 Zhodnocení testerů tlumičů

Předchozí kapitoly nastínily chování testerů pro různé stavy a nastavení podvozku automobilu. U všech metodik bezdemontážní diagnostiky je se ukázalo, že špatně nahuštěná pneumatika nejpodstatněji ovlivní závěrečné hodnocení technického stavu závěsu. Změna v nastavení odpružené a neodpružené hmoty (změna do 10 %) se projeví jen nepatrně.

Z hlediska sledování technického stavu tlumiče odpružení se ukázala jako nejvhodnější metodika rezonanční amplitudová. Tato metodika je nejméně citlivá na změnu nastavení podvozku, dokonce i eliminuje případné vůle v uložení. Mechanismus tohoto testeru vnímá pouze změnu v tlumení soustavy. Tento tester však vyžaduje velké zástavbové prostory.

Metoda impulsní dokmitává je nejnáchylnější na nahuštění pneumatik. Oproti metodice rezonanční amplitudové je tento test citlivý na závadu v závěsu kola. Vada v uchycení tlumiče je patrná v naměřené charakteristice nedokonalým utlumením karosérie.

Z naměřených charakteristik a ze závěrečného hodnocení metodikou EUSAMA je nemožné odhalit zda-li se jedná o špatný technický stav závěsu nebo vadný tlumič odpružení. Výsledky z této metodiky lze brát pouze jako bezpečnostní kritérium, které zhodnocuje přítlačnou sílu kola k vozovce.

Nevýhodou výše zmiňovaných testerů je nemožnost použití pro testování zavěšení kol motocyklů, dodávkových a nákladních vozů. Z hlediska váhy nákladních vozů jsou rezonanční testery značně rozměrné. Pro motocykly, jenž jsou jednostopá vozidla vyžadující zajištění opěry, je tento test nepoužitelný a z hlediska konstrukce přední vidlice motocyklu je její rozkmitání v reálných podmínkách nepřirozené. Vzhledem nesnadnosti zhoupnutí nákladního vozu i motocyklu je impulsní dokmitová metoda opět nevhodná.

Test tlumičů odpružení, který je vhodný pro všechny kategorie dopravních prostředků je přejezdový test. Tento test vyžaduje pouze testovací dráhu, předepsaný typ překážky. Vybuzení závěsu kola je přirozené. Nevýhodou je, že tento test je citlivý na nastavení parametrů ovlivňující dynamické chování závěsu a lze ho použít pouze jako srovnávací test. Tento fakt si však vyžaduje použití katalogových hodnot.

5. Ověření závěrů modelování s použitím Experimentálního vozíku

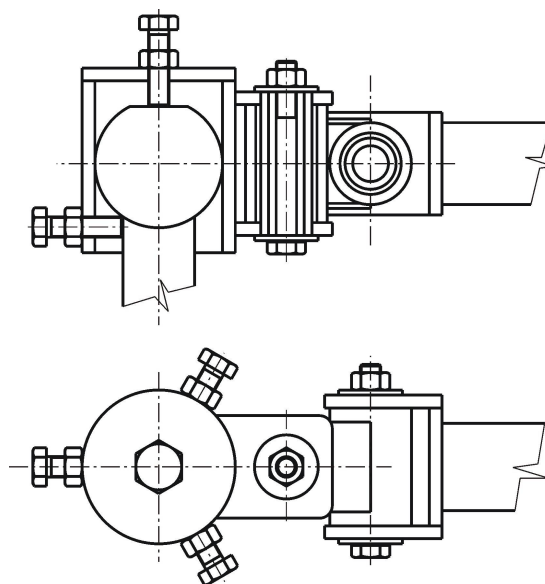
Matematické simulace dávají konstruktérovi rychlý náhled jak se bude daná chovat mechanická soustava při změně určitého parametru. Matematický model by měl plně korespondovat s mechanickou soustavou, ale vzhledem k jistým nelinearitám v systému, tření či materiálové pružnosti, jsme nuceni vytvářet jistá zjednodušení. Právě tato zjednodušení se projeví v rozdílnosti namodelovaných a experimentálně zjištěných výsledků. Jevy obtížně matematicky popsitelné lze nahradit experimentálně naměřenými daty, což obnáší vyvinout i nemalý počet testovacích zařízení.

V rámci grantového projektu BD 134 3030, jsem pro ověření čtvrtinového modelu automobilu navrhl a vyrobil jeho fyzický model - Experimentální vozík (obrázek 32). Jedná se o jednokolový přívěsný vozík, jenž umožňuje naladění veškerých parametrů ovlivňující jeho dynamické chování (nastavení odpružené a neodpružené hmoty, tuhost odpružení, radiální tuhost pneumatiky a použití nejrůznějších tlumičů odpružení). S tímto vozidlem lze ověřit modelové situace

přímo v reálných podmínkách a je zároveň ideálním prostředkem pro ověření testerů tlumičů.



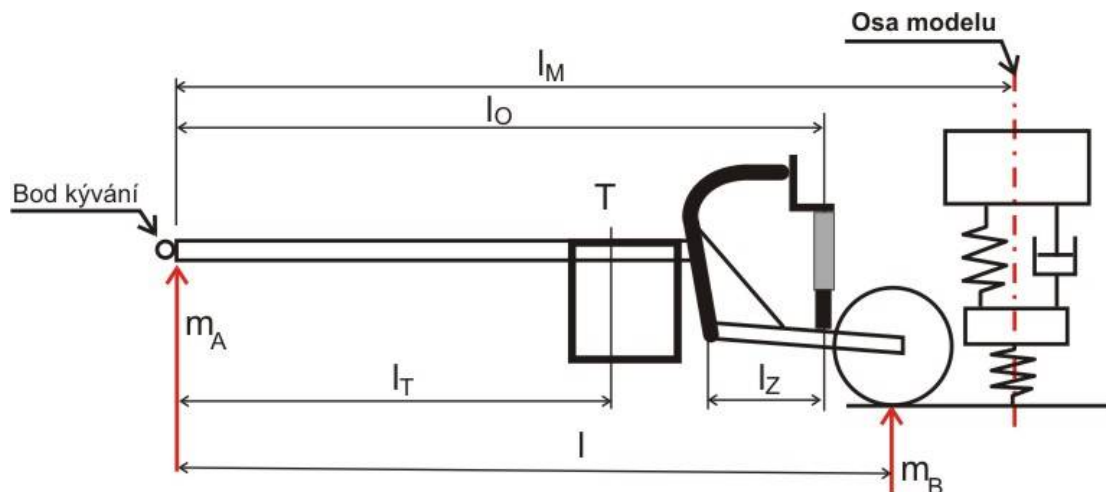
obrázek 32: Experimentální vozík v laboratorních podmínkách



obrázek 33: Uchycení vozíku za běžné závěsné zařízení automobilu

5.1 Identifikace fyzikálních parametrů vozíku

Vozík svým uchycením za automobil vykonává kývavý pohyb, stejně tomu je i u kyvné vidlice vozíku. Modelová situace jsou popsány pro vertikální pohyb. Všechny parametry vozíku, tedy odpružená a neodpružená hmoty, tuhost odpružení atd., je nutné přepočítat na pohyb svislý. Na obrázku 34 je naznačen postup přepočtu.



$l = 1600\text{mm}$ – vzdálenost od osy kývání k stykovému bodu pneumatika-vozovka

$l_T = 1020\text{ mm}$ – poloha těžiště vozíku

$l_O = 1400\text{mm}$ – umístění snímačů zrychlení na tlumiči

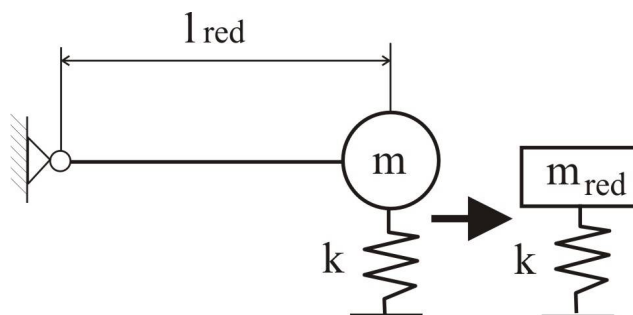
$l_M = 1600\text{mm}$ – osa modelu

$l_Z = 180\text{mm}$ - umístění tlumiče na závěsu kola (přepákování tlumiče je 1:2)

obrázek 34: Experimentální vozík

5.1.1 Identifikace odpružené a neodpružené hmoty

Pohyb hmoty, která provádí kývavý pohyb nelze použít hmotnost, který je staticky navážená (případě přepočtená) v ose modelu. Kývavý pohyb odpružené či neodpružené hmoty jsem přepočítal na bodové těleso pomocí redukce hmoty (obrázek 35), dle rovnice 15, z experimentálně zjištěného momentu setrvačnosti (rovnice 16).



obrázek 35: Redukce obecného tělesa na bodové těleso

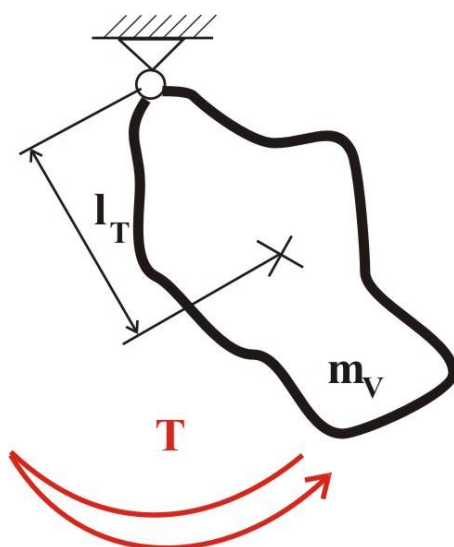
$$I = m_{red} l_{red}^2 \quad (15)$$

kde m_{red} redukovaná hmotnost rámu vozíku
 l_{red} vzdálenost od bodu rotace rámu k ose modelu

Moment setrvačnosti celého vozíku je získán experimentálně tzv. odkýváním. Vzorec (rovnice 17) je odvozen z matematického kyvadla (obrázek 36), moment setrvačnosti je vypočten z doby kyvu rámu vozíku (pro neodpruženou hmotu z vidlice vozíku). Rám vozíku je odkýván bez kyvné vidlice.

$$I = m_v g l_T \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 \quad (16)$$

kde m_v hmotnost rámu vozíku
 l_T vzdálenost od bodu kývání k těžišti rámu



obrázek 36: Odkývání obecného tělesa pro zjištění momentu setrvačnosti

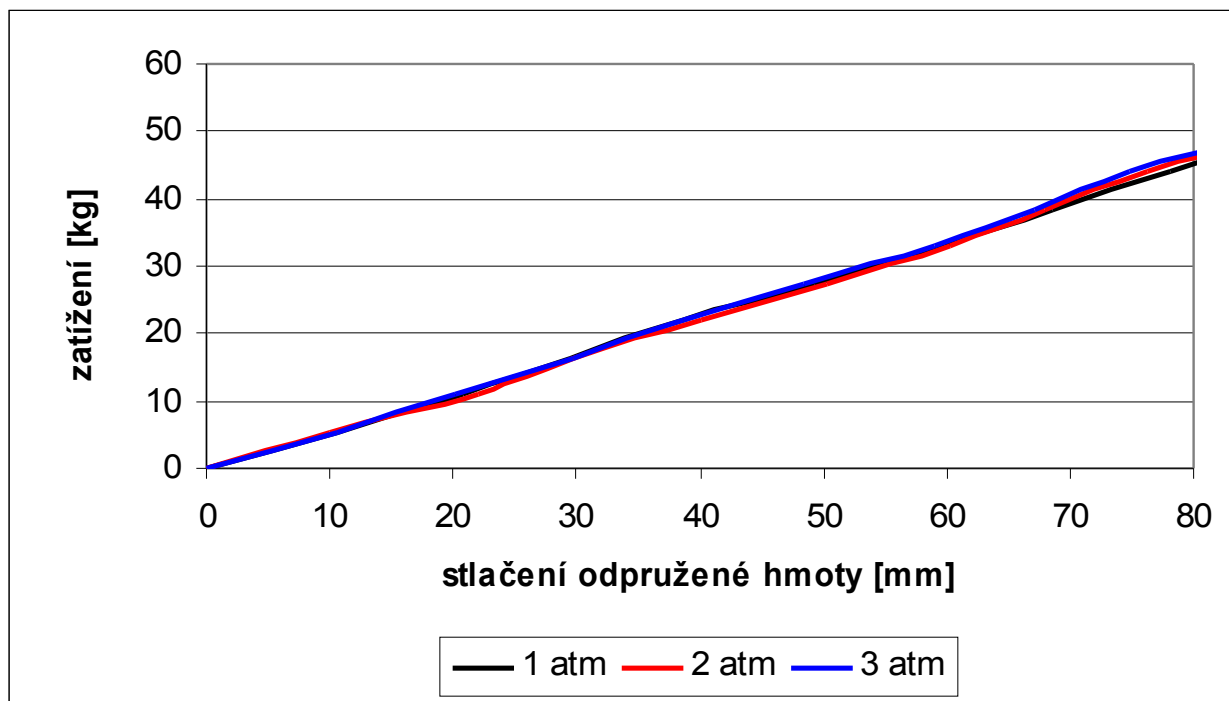
5.1.1.1 Další hmoty ovlivňující váhu vozíku

Přídavná závaží, které jsme používaly jako zátěž pro zvýšení odpružené a neodpružené hmoty, zvýší moment setrvačnosti rámu. Tato hmota jsem považoval za bodové těleso na daném poloměru otáčení. Přídavná hmota je složena z určitého počtu závaží (dle typu zkoušky). Další přídavnou hmotou jsou dvě pružící jednotky, kde jedna má hmotnost 1.3kg a je na poloměru setrvačnosti 1242mm.

Redukovaná hmotnost kyvné vidlice byla zjištěna stejným způsobem jako rám vozíku. Zde byly dvě nastavení, bez přídavné hmoty a s přídavnou hmotou.

5.1.2 Tuhost odpružení

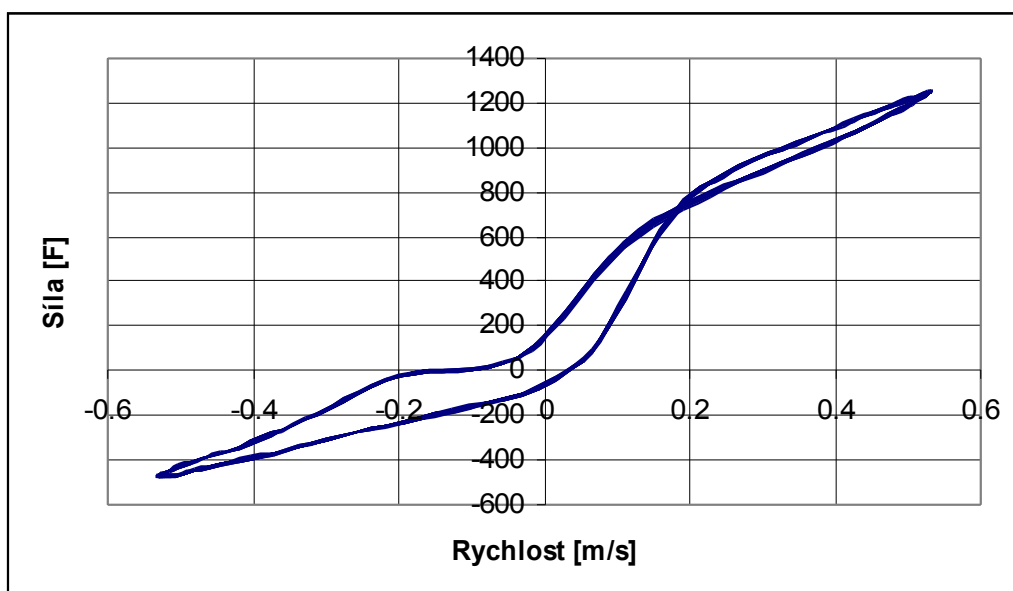
Tuhost odpružení v ose modelu bylo odvozeno z přítláčné síly kola k vozovce a stlačení vozíku v ose modelu. Stlačení pružiny pak bylo stanoveno z výšky rámu vozíku (měřeno v ose modelu) měřené od země a stlačení pneumatiky. Tuhost se zjišťovala při různém nahuštění pneumatiky. Z obrázku 5 je patrné že nahuštění pneumatiky nemá vliv na odpružení vozíku. Tuhost pružiny v ose modelu je 4 N/mm.



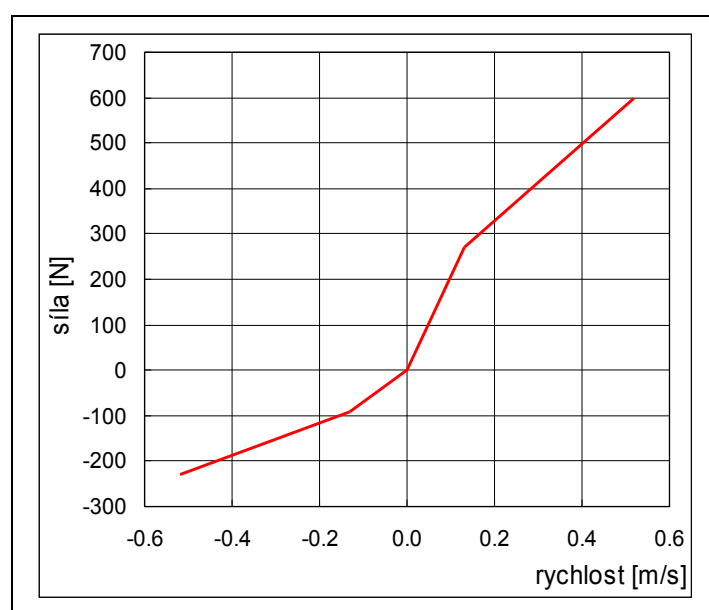
obrázek 37: Tuhost vozidlové pružiny v ose modelu při různém tlaku v pneumatice

5.1.3 Charakteristika tlumiče

Charakteristika tlumiče odpružení byla zjištěna zvlášť na esteru tlumičů Gillop (obrázek 38). Tato charakteristika se musela pak přepočítat vzhledem k uložení tlumiče ve vozíku. Přepákování tlumiče vzhledem ke kolu vozíku je 1:2, Tedy charakteristika tlumiče (síla vs. rychlost) naměřená na testovací stoličce tlumičů Gillop je pozmeněna v tomto poměru – síla je 2x menší, rychlost stlačování je 2x větší. Pro požadavky modelu byla z této přepočtené charakteristiky zjištěna čistá tlumící síla (obrázek 39).



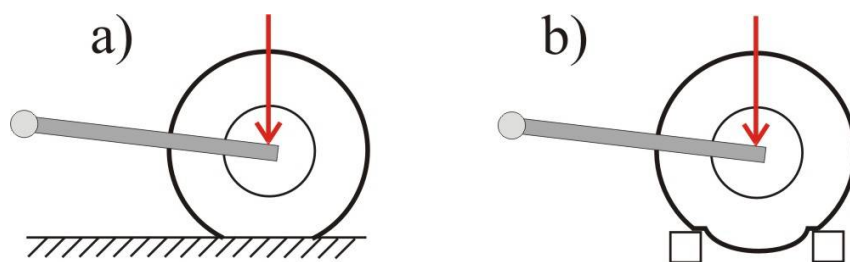
obrázek 38: Skutečná charakteristika tlumiče odpružení použitého ve vozíku (měřeno při kluzné rychlosti 0.52 m/s)



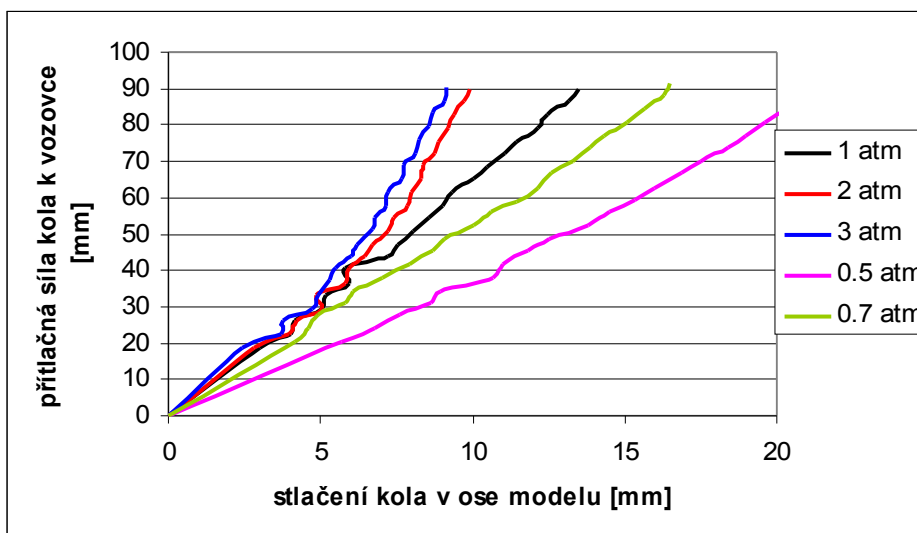
obrázek 39: Skutečná tlumící charakteristika tlumiče

5.1.4 Radiální tuhost pneumatiky

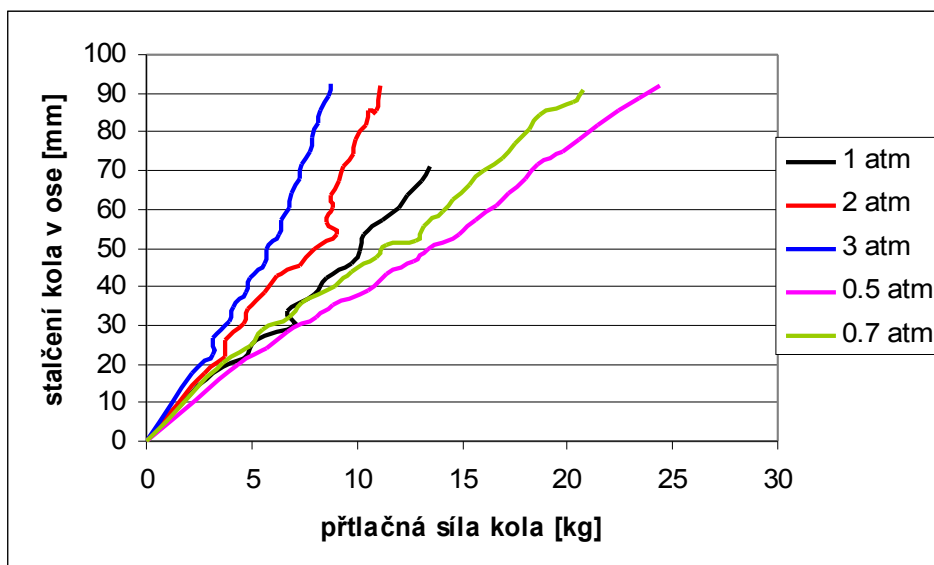
Radiální tuhost pneumatiky byla stanovena statickou metodou – přítlačná síla pneumatiky v závislosti na stlačení pneumatiky (měřeno v ose kola). Proměřilo se pět variant nahuštění pneumatiky – 0.5, 0.7, 1, 2 a 3 atm. Tuhost pneumatiky se zjišťovala pro dva různé povrchy, a to rovný povrch a na rámu testeru TriTec (obrázek 40). Výsledné charakteristiky tuhostí pneumatiky při různém nahuštění jsou na obrázku 41 a 42.



obrázek 40: Deformace pneumatiky
 a) na rovném povrchu b) na testeru TriTec



obrázek 41: Tuhost pneumatiky na rovné vozovce



obrázek 42: Tuhost pneumatiky v testovacím zařízení TriTec

5.2 Odhad frekvenčního naladění vozíku

Při návrhu vozíku bylo požadováno aby tento fyzický model závěsu kola odpovídal dynamickému chování skutečného automobilu. Především vlastní frekvence odpružené hmoty, která se pohybuje kolem 2 Hz. Pro první odhad frekvenčního naladění odpružené a neodpružené hmoty vozíku jsem použil vzorce pro netlumené kmitání [1]:

$$\text{vlastní frekvence neodpružené hmoty} \quad \Omega_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c_1 + c_2}{m_1}} \quad (17)$$

$$\text{vlastní frekvence odpružené hmoty} \quad \Omega_2 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c_2}{m_2}} \quad (18)$$

obrázek 43: Amplitudo frekvenční spektrum dvou hmotové soustavy (amplituda vychýlení hmoty [m] v závislosti na budící frekvenci [Hz])

Pro reálné testy s Experimentálním vozíkem bylo 24 různých nastavení vozíku - 3 hodnoty odpružené hmoty, 2 hodnoty neodpružené hmoty, tuhost odpružení nebyla měněná, 2 hodnoty nahuštění pneumatiky a dvě varianty nastavení tlumiče. Tabulka 7 popisuje veškeré nastavení vozíku s odhadem vlastních frekvencí neodpružené a odpružené hmoty. Jelikož byly prováděny testy na testeru TriTec, jsou vlastní frekvence vzhledem k jiné radiální tuhosti pneumatiky nižší (tabulka 8).

| | odpružená hmota [kg] | neodpružená hmota [kg] | tuhost pneumatiky [N/mm] | tuhost odpružení [N/mm] | vl. frekvence odpružené hmoty [Hz] | vl. frekvence neodpružené hmoty [Hz] |
|---------------------------|----------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| rovina, tlak pneu 1.5 atm | 41.8 | 10.5 | 71.4 | 4.03 | 1.52 | 13.49 |
| | 56.3 | 10.5 | 71.4 | 4.03 | 1.31 | 13.49 |
| | 70.2 | 10.5 | 71.4 | 4.03 | 1.17 | 13.49 |
| | 41.8 | 5.4 | 71.4 | 4.03 | 1.52 | 18.81 |
| | 56.3 | 5.4 | 71.4 | 4.03 | 1.31 | 18.81 |
| | 70.2 | 5.4 | 71.4 | 4.03 | 1.17 | 18.81 |
| rovina, tlak pneu 0.7 atm | 41.8 | 10.5 | 53.4 | 4.03 | 1.51 | 11.78 |
| | 56.3 | 10.5 | 53.4 | 4.03 | 1.3 | 11.78 |
| | 70.2 | 10.5 | 53.4 | 4.03 | 1.16 | 11.78 |
| | 41.8 | 5.4 | 53.4 | 4.03 | 1.51 | 16.42 |
| | 56.3 | 5.4 | 53.4 | 4.03 | 1.3 | 16.42 |
| | 70.2 | 5.4 | 53.4 | 4.03 | 1.16 | 16.42 |

tabulka 7: Výpis možných variant nastavení na vozíku a příslušné vlastní frekvence (pro jedno nastavení tlumiče odpružení)

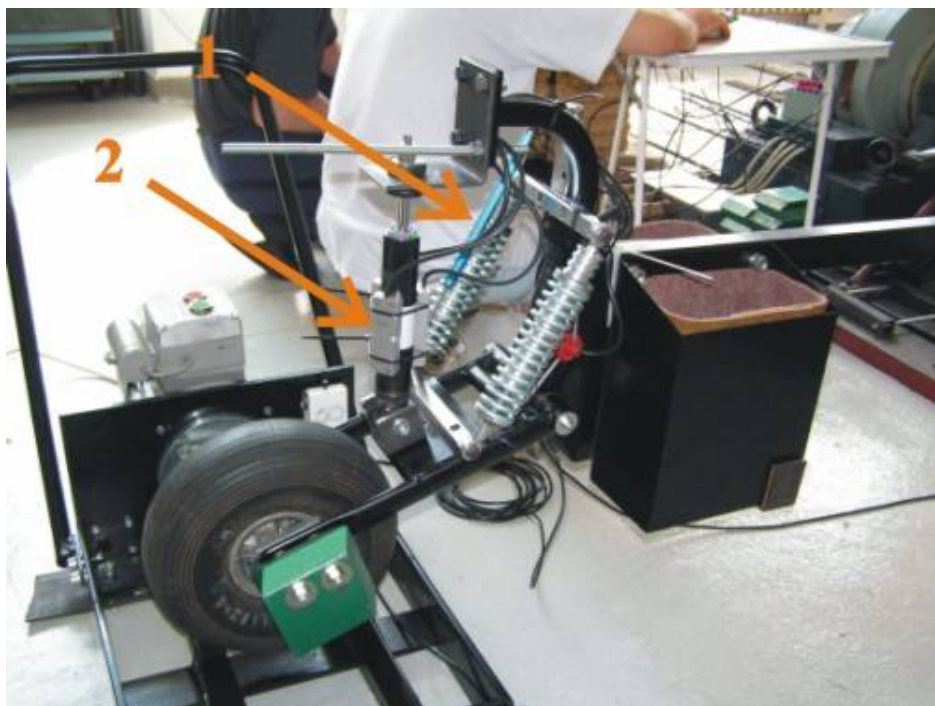
| | odpružená hmota [kg] | neodpružená hmota [kg] | tuhost pneumatiky [N/mm] | tuhost odpružení [N/mm] | vl. frekvence odpružené hmoty [Hz] | vl. frekvence neodpružené hmoty [Hz] |
|---------------------------|----------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| TriTec, tlak pneu 1.5 atm | 41.8 | 10.5 | 57.9 | 4.03 | 1.51 | 12.23 |
| | 56.3 | 10.5 | 57.9 | 4.03 | 1.3 | 12.23 |
| | 70.2 | 10.5 | 57.9 | 4.03 | 1.17 | 12.23 |
| | 41.8 | 5.4 | 57.9 | 4.03 | 1.51 | 17.05 |
| | 56.3 | 5.4 | 57.9 | 4.03 | 1.3 | 17.05 |
| | 70.2 | 5.4 | 57.9 | 4.03 | 1.17 | 17.05 |
| TriTec, tlak pneu 0.7 atm | 41.8 | 10.5 | 43.9 | 4.03 | 1.49 | 10.76 |
| | 56.3 | 10.5 | 43.9 | 4.03 | 1.29 | 10.76 |
| | 70.2 | 10.5 | 43.9 | 4.03 | 1.15 | 10.76 |
| | 41.8 | 5.4 | 43.9 | 4.03 | 1.49 | 15 |
| | 56.3 | 5.4 | 43.9 | 4.03 | 1.29 | 15 |
| | 70.2 | 5.4 | 43.9 | 4.03 | 1.15 | 15 |

tabulka 8: Výpis možných variant nastavení na vozíku pro testy na testeru TriTec (pro jedno nastavení tlumiče odpružení)

5.3 Prostředky pro měření

Chování závěsu kola bylo monitorováno jednak pomocí snímače zrychlení ADXL uchyceného na tlumiči odpružení (obrázek 49). Druhé nezávislé sledování závěsu bylo pomocí tahového potenciometru uchyceného mezi kyvnou vidlicí a

rámem vozíku. Pro přejezdové testy bylo nutné měřit přejezdovou rychlost. K tomu byl ke kolu namontován Hallův snímač registrující 4 pulsy na jedno otočení kola. Dále jsme měli k dispozici měřicí ústřednu Dewetron 2010 s programem (vytvořeným v programovém prostředí LabView) pro sběr a archivaci dat (obrázek 32). Vzorkovací frekvence pro měření na testeru TriTec byla zvolena 1000Hz, pro ostatní testy 200Hz.



*obrázek 49: Použité snímače (měření na testeru TriTec)
1 – tahový potenciometr, 2 – snímače zrychlení ADXL*

5.4 Testovací metodiky

Na Experimentálním vozíku jsme se rozhodli ověřit všechny dostupné testy, které jsou dostupné v laboratořích Ústavu konstruování VUT v Brně. K dispozici mám tester TriStar (obrázek 13) pro impulsní dokmitový test a tester TriTec (obrázek 49), který jsme navrhli a vyrobili v rámci grantového projektu BD 1353030. Pro realizaci přejezdového testu jsem použil standardního zpomalovacího přejezdového prahu s výškou 30, 50 a 60 mm.

5.4.1 Rezonanční adhezní test

Tento test je zobrazen na obrázku 49. Zde byly prozkoušeny všechny konfigurace nastavení vozíku. Jelikož se jednalo o první test, byl zaměřen především na odzkoušení měřicí aparatury.

| | odpružená hmota [kg] | neodpružená hmota [kg] | tuhost pneumatiky [N/mm] | tuhost odpružení [N/mm] | stav tlumiče | modelovaná vl. frekvence odpružené hmoty [Hz] | modelovaná vl. frekvence neodpružené hmoty [Hz] | naměřená vl. frekvence odpružené hmoty [Hz] | naměřená vl. frekvence neodpružené hmoty [Hz] |
|-----------------------|----------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------|---|---|---|---|
| TriTec, tlak pneu 1.5 | 10.5 | 41.8 | 57.9 | 4.03 | bez oleje | 1.61 | 13.5 | 2.07 | 16.24 |
| | 10.5 | 56.3 | 57.9 | 4.03 | | 1.46 | 13.6 | 1.92 | 17.82 |
| | 10.5 | 70.2 | 57.9 | 4.03 | | 1.32 | 13.6 | 1.9 | 19.5 |
| | 5.4 | 41.8 | 57.9 | 4.03 | | 1.54 | 18.8 | 2.01 | 21 |
| | 5.4 | 56.3 | 57.9 | 4.03 | | 1.5 | 18.9 | 1.88 | 24.29 |
| | 5.4 | 70.2 | 57.9 | 4.03 | | 1.39 | 18.8 | 1.79 | 27.34 |
| TriTec, tlak pneu 0.7 | 10.5 | 41.8 | 43.9 | 4.03 | | 1.53 | 11.84 | 1.7 | 15.75 |
| | 10.5 | 56.3 | 43.9 | 4.03 | | 1.48 | 12.2 | 1.56 | 16.11 |
| | 10.5 | 70.2 | 43.9 | 4.03 | | 1.3 | 12.23 | 1.51 | 17.7 |
| | 5.4 | 41.8 | 43.9 | 4.03 | | 1.43 | 16.9 | 1.62 | 20 |
| | 5.4 | 56.3 | 43.9 | 4.03 | | 1.4 | 17.12 | 1.57 | 22.95 |
| | 5.4 | 70.2 | 43.9 | 4.03 | | 1.38 | 17.09 | 1.54 | 23.44 |
| TriTec, tlak pneu 1.5 | 10.5 | 41.8 | 57.9 | 4.03 | s olejem | 1.47 | 11.45 | 2.54 | 17.6 |
| | 10.5 | 56.3 | 57.9 | 4.03 | | 1.39 | 13.54 | 2.3 | 19.29 |
| | 10.5 | 70.2 | 57.9 | 4.03 | | 1.35 | 14.3 | 2.7 | 20 |
| | 5.4 | 41.8 | 57.9 | 4.03 | | 1.4 | 18.78 | 1.22 | 22.7 |
| | 5.4 | 56.3 | 57.9 | 4.03 | | 1.34 | 19.05 | 2.53 | 25.9 |
| | 5.4 | 70.2 | 57.9 | 4.03 | | 1.32 | 19.32 | 2.8 | 28 |
| TriTec, tlak pneu 0.7 | 10.5 | 41.8 | 43.9 | 4.03 | | 1.51 | 11.2 | 2.3 | 17.1 |
| | 10.5 | 56.3 | 43.9 | 4.03 | | 1.43 | 13.21 | 2.09 | 17.8 |
| | 10.5 | 70.2 | 43.9 | 4.03 | | 1.38 | 13.54 | 2.4.2006 | 18.7 |
| | 5.4 | 41.8 | 43.9 | 4.03 | | 1.45 | 17.6 | 2.3 | 21.8 |
| | 5.4 | 56.3 | 43.9 | 4.03 | | 1.44 | 18.08 | 2.7 | 23.9 |
| | 5.4 | 70.2 | 43.9 | 4.03 | | 1.32 | 18.14 | 2.34 | 22.6 |

tabulka 9: Výsledky vlastních frekvencí naměřené pro různé nastavení vozíku

Dále se zde ověřovala shodnost modelovaných a naměřených výsledků, kde se sledovala vlastní frekvence odpružené a neodpružené hmoty. Z tabulka 9 je patrné neshoda výsledků modelováním a měřením. Výsledky z modelování jsou přibližně shodná z výsledků vypočtených z teoretických vzorců pro vlastní frekvenci odpružené a neodpružen hmoty. Vl. frekvence vyhodnocená z naměřeného průběhu jsou vyšší, především frekvence neodpružené hmoty. K rozřešení tohoto rozporu pomohly další experimentální testy.

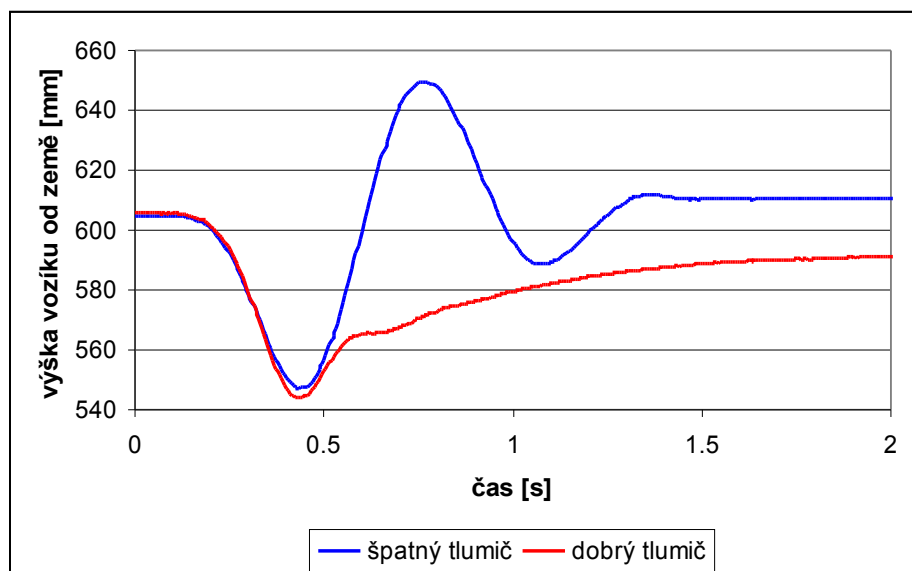
5.4.2 Test impulsní dokmitový

Druhým testem byl impulsní dokmitový test. Tento test spočíval pouze ve impulsním stlačení vozíku (obrázek 50) pro všechna nastavení. Zde byl zaznamenán signál jednak ze snímačů zrychlení ADXL a tahového potenciometru, za druhé pomocí testeru TriStar (obrázek 13).



obrázek 50: Test impulsní dokmitový provedený na Experimentálním vozíku

Při tomto testu se ukázal další problém s konstrukcí vozíku. Jednalo se o tlumič odpružení, který vykazoval velké tlumící síly pro roztahování. Vozík tak nechtěl po stlačení dokmitávat (obrázek 51).



obrázek 51: *Propružení vozíku se špatným a dobrým tlumičem*

I přes ideální dokmitání vozíku se špatným tlumičem odpružení nešla tato situace namodelovat. U špatného tlumiče převládalo smykové tření, které jsem nedokázal věrohodně naměřit ani matematicky popsat. I přes tento nezdar, data z tohoto testu pomohly pro ověření vlastní frekvence odpružené hmoty (tabulka 10).

| | Odpružená hmotá [kg] | neodpružená hmotá [kg] | tuhost pneumatiky [N/mm] | tuhost odpružení [N/mm] | teoretická vl. Frekvence odpružené hmoty [Hz] | naměřená vl. 45frekvence odpružené hmoty [Hz] |
|---------------------------|----------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|---|---|
| rovina, tlak pneu 1.5 atm | 41.8 | 10.5 | 71.4 | 4.03 | 1.52 | 2.08 |
| | 56.3 | 10.5 | 71.4 | 4.03 | 1.31 | 1.54 |
| | 70.2 | 10.5 | 71.4 | 4.03 | 1.17 | 1.4 |
| | 41.8 | 5.4 | 71.4 | 4.03 | 1.52 | 2.06 |
| | 56.3 | 5.4 | 71.4 | 4.03 | 1.31 | 1.55 |
| | 70.2 | 5.4 | 71.4 | 4.03 | 1.17 | 1.34 |
| | 70.2 | 5.4 | 71.4 | 4.03 | 1.17 | 1.34 |
| rovina, tlak pneu 0.7 atm | 41.8 | 10.5 | 53.4 | 4.03 | 1.51 | 2.08 |
| | 56.3 | 10.5 | 53.4 | 4.03 | 1.3 | 1.54 |
| | 70.2 | 10.5 | 53.4 | 4.03 | 1.16 | 1.37 |
| | 41.8 | 5.4 | 53.4 | 4.03 | 1.51 | 2.06 |
| | 56.3 | 5.4 | 53.4 | 4.03 | 1.3 | 1.54 |
| | 70.2 | 5.4 | 53.4 | 4.03 | 1.16 | 1.39 |
| | 70.2 | 5.4 | 53.4 | 4.03 | 1.16 | 1.39 |

tabulka 10: *Tabulka výsledků z testeru TriStar*

5.4.3 Přejezdový test

Než se přistoupilo k ostrému přejezdovému testu, vyzkoušela se konstrukce vozíku a měřicí aparatura v laboratorních podmínkách (obrázek 52) s veškerým možným nastavením. Vzhledem k poznatkům z laboratorních přejezdových testů jsme snížili počet nastavení vozíku a věnoval jsme se spíše chování na charakter přejezdu, tedy rychlost přejezdu a výška překážky. Zvolil jsem 3 typy zpomalovacího prahu s výškou 30, 50 a 60 mm. Dále jsem zvolil dvě nájezdové rychlosti – 10 a 20 km/h. Velikost odpružené a neodpružené hmoty byla pro všechny přejezdové testy stejná (odpružená hmota 56.3kg, neodpružená hmota 10.5kg). Pouze se měnilo nahuštění pneumatiky (0.7 a 1.5 atm.) a dobrý a špatný tlumič.



obrázek 52: Přejezdové testy prováděné v laboratorních podmínkách



obrázek 53: Příprava na přejezdový test v reálných podmínkách

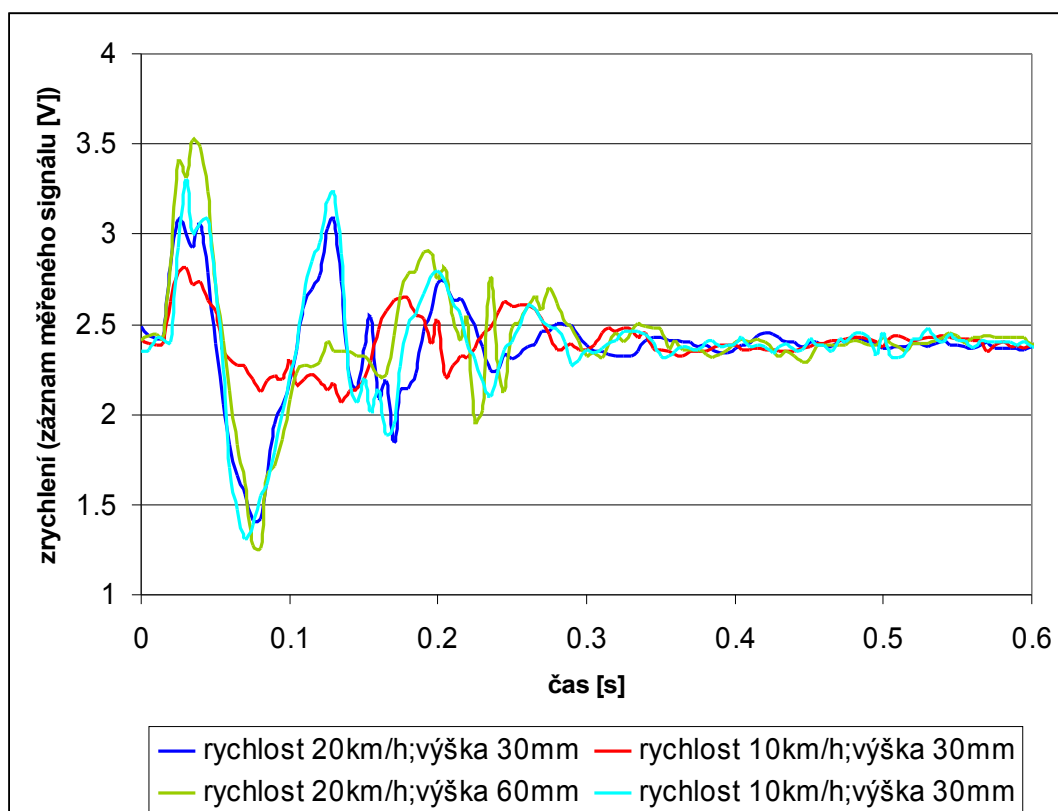
Naměřené výsledky byly porovnány s výsledky naměřenými experimentálně (tabulka 11). Výsledky měření však ukázaly na je jistý problém s vozíkem. Vozík vybavený horším tlumičem odpružení měl lepší utlumení závěsu kola než s dobrým tlumičem. Po bedlivém prozkoumání tohoto problému, za přispění matematického modelování a výsledků z předchozích testů se ukazuje problémovým prvkem pneumatika. Jistý podíl na výsledcích má i tření ve vedení pružících jednotek a uložení kyvné vidlice.

| tlak v pneumatice [atm] | tlumič | rychlost přejezdu [km/h] | výška překážky [mm] | měrný útlum - naměřeno | vl.frekvence neodpružené hmoty [Hz] - naměřeno | měrný útlum - modelované | vl.frekvence neodpružené hmoty [Hz] - modelované |
|-------------------------|--------|--------------------------|---------------------|------------------------|--|--------------------------|--|
| 0.7 | špatný | 10 | 30 | 0.11 | 10 | X | |
| 0.7 | | 20 | 30 | 0.097 | 16.271 | | |
| 0.7 | | 20 | 60 | 0.107 | 14.015 | | |
| 1.5 | | 20 | 30 | 0.129 | 15.61 | | |
| 0.7 | dobrý | 10 | 30 | 0.208 | 8.067 | 0.316 | 15.772 |
| 0.7 | | 20 | 30 | 0.089 | 12.152 | 0.44 | 6.328 |
| 0.7 | | 20 | 60 | 0.088 | 14.015 | 0.289 | 18.131 |
| 1.5 | | 20 | 30 | 0.107 | 12.549 | 0.385 | 11.617 |

tabulka 11: Tabulka výsledků z přejezdového testu

I přes tento nezdar se získali poznatky z naměřených signálů o přejezdech vozíku při určité rychlosti a výšce prahu. Obrázek 54 naznačuje chování vozíku při rychlosti 20 km/h, 10 km/h, zvýšeném prahu ze 30 mm na 60 mm a při nahuštění

pneumatice a dobrém tlumiči odpružení. Z grafu i z tabulky 11 je patrné že nízká nájezdová rychlost (10 km/h) je nevhodná pro vyhodnocení.



obrázek 54: Dokmitávání závěsu Experimentálního vozíku při přejezdovém testu

5.5 Shrnutí experimentálních testů

S Experimentálním vozíkem jsem provedl tři typy testů bezdemontážní diagnostiky závěsu kola – rezonanční adhezní test, test impulsní dokmitový a přejezdový test. Při těchto testech jsme se především zaměřil na funkčnosti a vhodnosti konstrukce vozíku. Reálné testy byly doplněny matematickým modelováním a čímž vznikla možnost předpokládat naměřené hodnoty.

Po analýze výsledků experimentů se ukázali jisté neshody výsledků modelovaných a experimentálně naměřených. Domnívám se, že problematickým prvkem je pneumatika. Chování pneumatiky (na vozíku je použita pneumatika bantamového typu) se zdá být závislé na charakteru stlačování pneumatiky.

Testy však pomohly ověřit vhodnost měřící techniky. Dále se získalo mnoho poznatků o nově prováděném přejezdovém test, kde se hledala vhodnost přejížděné překážky a rychlost přejezdu. Z naměřených dat se mohla vytvořit i vyhodnocovací metodika.

6. Závěr

V této práci je prokázána vhodnost použití matematického modelování pro klasifikaci experimentální metodiky při diagnóze technického stavu vozidla. Matematické modelování přispělo i k vývoji nové metodiky bezdemontážní diagnostiky závěsu kola – přejezdový test. K namodelování skutečných charakteristik tlumiče odpružení byl vytvořen diagnostický matematický model tlumiče odpružení. Pomocí tohoto modelu lze vytvořit charakteristiku se všemi vlastnosti tlumiče jako je smykové tření nebo jeho vnitřní pružnost. Na modelu lze zároveň pozorovat v F-v a F-z charakteristikách vliv vůle v uchycení nebo použití pryžových lůžek tlumiče. Pro tento model je čistá tlumící síla získána z reálně naměřené globální charakteristiky tlumiče. Na tomto modelu lze nasimulovat nejrůznější závady a atypická chování tlumiče jako například měnit tlumící charakteristiku tlumiče, imitování vůle v uchycení tlumiče, simulovat smykové tření atd.

V projektu byly ověřeny nejrůznější programové prostředí, kde rozhodovali kritéria snadnost naprogramování, přehlednost programu, možnost použití kvalitní matematickou metodu a rychlost výpočtu. Ve většině požadavků zvítězil software MathLab s nástavbou Simulink, především rychlostí výpočtu.

Jednou z významných kapitol této práce je právě porovnání třech současných testerů určených pro bezdemontážní diagnostiku tlumičů – impulsní dokmitavý test, rezonanční adhezni test, rezonanční amplitudový test. Z výsledků je patrné, že prvkem nejvíce ovlivňujícím konečné hodnocení tlumičů je špatně nahuštěná pneumatika. Pro hodnocení kvality utlumení závěsu kola je nejvhodnější metodika rezonanční amplitudová, jenž je nejméně citlivá na nastavení podvozku automobilu a zhoršený technický stav závěsu. Naopak pomocí impulsní dokmitavé metody je možné velmi jednoduše určit špatný technický stav. Metodika EUSAMA je nejméně vhodným testem pro hodnocení kvality tlumiče odpružení. Při tomto testu není možné určit, zda li se jedná o zhoršený technický stav nápravy nebo o špatný tlumič odpružení. Hodnocení přítláčné síly kola k vozovce je možné uplatnit pro posouzení bezpečnosti vozu a při nastavování podvozku automobilů sportovních vozů.

V této práci je prezentována i nová metodika pro hodnocení závěsu kola, a to přejezdový test. Test spočívá v přejezdu definované překážky, kde po té se vyhodnocuje volné dokmitání závěsu kola. Z tohoto průběhu se vyhodnotí exponenciální obálka, která dává pohled na utlumení soustavy. Díky jednoduchosti testu a přirozenosti vybuzení závěsu kola je možné otestovat tlumiče na motocyklech a nákladních automobilech. I přes svou jednoduchost tento test podává velmi dobré a srovnatelné výsledky s ostatními metodikami testů tlumičů odpružení.

Modelované testy byly ověřeny reálnými experimenty s pomocí Experimentálního vozíku. Výsledné testy vykázali jisté nesrovnalosti s daty modelovanými a experimentálně naměřenými. Po bedlivé analýze a prozkoumání literatury usuzují, že problémovým prvkem vozíku pneumatika. Zdá se, že pneumatika bantamového typu je pro tyto testy nevhodná. Charakteristika pneumatiky byla zjištěna staticky, tedy jejím postupným zatěžováním, kde se zaznamenávala přítláčná síla v závislosti na jejím stlačení. Při dynamickém

stlačování tato charakteristika vlivem tangenciálních sil mezi pneumatikou a vozovkou bude mít jiný tvar. V době vytváření této práce probíhají přípravné práce k zjišťování dynamické tuhosti pneumatiky (grantový projekt BD 136 3030).

Literatura a elektronické zdroje

- [1] Dixon J.C.: The Shock Absorber Handbook, Society of Automotive Engineers, 1999, ISBN 0-7680-0050-5
- [2] Duym S, Stiens R, Reybrouck K: Evaluation of shock absorber models, Vehicle System Dynamics 27 (2): 109-127 FEB 1997, ISSN: 0042-3114
- [3] Liu YQ, Zhang JW, Cheng XM: Experimental and dynamic study of the piston rod lateral friction for the twin-tube hydraulic shock absorber, Shock and Vibration 10 (3): 169-177 2003, ISSN: 1070-9622
- [4] Duym SWR: Simulation tools, modelling and identification, for an automotive shock absorber in the context of vehicle dynamics, Vehicle System Dynamics 33 (4): 261-285 2000, ISSN: 0042-3114
- [5] Ping Y: Experimental and mathematical evaluation of dynamic behaviour of an oil-air coupling shock absorber, Mechanical Systems and Signal Processing 17 (6): 1367-1379 NOV 2003, ISSN: 0888-3270

- [6] Eberhard P, Piram U, Bestle D: Optimization of damping characteristics in vehicle dynamics, *Engineering Optimization* 31 (4): 435-455 1999, ISSN: 0305-215X
- [7] Nikravesh Pe, Gim Gh: Ride and Stability Analysis of a Sports Car Using Multibody Dynamic Simulation, : *Mathematical and Computer Modelling* 14: 953-958 1990, ISSN: 0895-7177
- [8] Votrubech R.: Globální charakteristika tlumiče, disertační práce, Technická universita Liberec, Fakulta mechatroniky a mezioborových studií, Liberec, 2005
- [9] Pražák F., Mazůrek I.: Matematické modelování závad v tlumiči odpružení, sborník přednášek 28. mezinárodní konference TD 2005 – DIAGON 2005, Academia centrum UTB, Zlín, 2005, ISBN 80 – 7318 – 293 – 9
- [10] Cambiaghi D., Gadola M., Manzo L., Vetturi D., Racecar aktive suspension: Hints on a quarter car model, Università di Brescia, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, <http://bsing.ing.unibs.it/~gadola/papers/iftomm95/iftomm1.htm>, 1995
- [11] Yoshimura T, Kume A, Kurimoto M, Hino J: Construction of an active suspension system of a quarter car model using the concepts of sliding mode kontrol, *Journal of Sound and Vibration* 239 (2): 187-199 JAN 11 2001, ISSN: 0022-460X
- [12] Boichot P: Numerical modelling of an hydraulic damper, *Mecanique Industrielle Et Materiaux* 51 (2): 83-85 JUN 1998, ISSN: 1244-9091
- [13] Benmrad R, Levitt Ja, Fassois Sd: Nonlinear Dynamic Modeling of an Automobile Hydraulic Active Suspension System, *Mechanical Systems and Signal Processing* 8 (5): 485-517 SEP 1994, ISSN: 0888-3270
- [14] Vlk F: Dynamika motorových vozidel, Nakladatelství a zasilatelství vlk, Brno 2001, ISBN 80-238-5273-6
- [15] Hrovat D: Optimal Active Suspension Structures for Quarter-Car Vehicle Models, *Automatica* 26 (5): 845-860 SEP 1990, ISSN: 0005-1098
- [16] Pražák F., Mazůrek I.: Matematický model tlumiče v závěsu kola automobilu, sborník přednášek 46. mezinárodní konference Kateder částí a mechanismů strojů, Lázně Sedmihorky, 2005, ISBN 80 – 7083 – 951 – 1

- [17] Mazůrek I., Dočkal A., Pražák F.: Diagnostic model of a shock absorber, Engineering Mechanics, 2005, ISSN 1210-2717
- [18] Slavík J.: Počítačové metody mechaniky, Vysoké učení technické v Brně, Brno, 2001
- [19] Motejl V, Hořejší K.: Učebnice pro řidiče a opraváře automobilů, Litera Brno 2001, ISBN 80-85763-14-1
- [20] Mazůrek I.: Bezdemontážní diagnostika automobilových závěsů, habilitační práce, Vysoké učení technické v Brně, Brno, 2000, ISBN 80-214-1592-4
- [21] AXONtuning: Srovnávací test zkušeben tlumičů, <http://axontuning.cz/cz/mtronic.srovnani.php>, 2006
- [22] EUSAMA – Recommendations for a performance test specification of an “on car” vehicle suspension testing system – TS-02-76.

Publikační činnost

- [1] PRAŽÁK F.: Particulate Filter of Diesle Engine, diplomová práce 2003, VUT v Brně. UDT – obor spalovací motory, 2003
- [2] PRAŽÁK F., MAZŮREK I.: Realizace diagnostického modelu zavěšení kola automobilu, sborník přednášek 27. mezinárodní konference TD 2004 – DIAGON 2004, Academia centrum UTB, Zlín, 2004, ISBN 80 – 7318 – 195 – 6, str. 91-95
- [3] PRAŽÁK F., MAZŮREK I.: Experimentální vozík, sborník přednášek 45. mezinárodní konference Kateder částí a mechanismů strojů, Blansko, 2004, ISBN 80 – 214 – 2702 – 7, str. 540-544
- [4] PRAŽÁK F.: Náhrada závěsu kola automobilu, grant fondu vědy FSI, BD 134 3030, 2004, ISBN 80 – 214 – 2934 – 8
- [5] PRAŽÁK F., MAZŮREK I.: Matematické modelování závad v tlumiči odpružení, sborník přednášek 28. mezinárodní konference TD 2005 – DIAGON 2005, Academia centrum UTB, Zlín, 2005, ISBN 80 – 7318 – 293 – 9, str. 47-52
- [6] PRAŽÁK F., MAZŮREK I.: Matematický model tlumiče v závěsu kola automobilu, sborník přednášek 46. mezinárodní konference Kateder částí a

mechanismů strojů, Lázně Sedmihorky, 2005, ISBN 80 – 7083 – 951 – 1, str. 283-287

- [7] MAZŮREK I, DOČKAL A., PRAŽÁK F.: Diagnostic model of a shock absorber, Engineering Mechanics, 2005, ISSN 1210-2717, str. 71-76
- [8] PRAŽÁK F.: Analýza kmitočtových vlastností nápravy, grant fondu vědy FSI, BD 135 3030, 2005
- [9] MAZŮREK I, DOČKAL A., PRAŽÁK F.: Diagnostika závěsu kola automobilu, sborník přednášek 29. mezinárodní konference TD 2006 – DIAGON 2006-05-09
- [10] PRAŽÁK F., MAZŮREK I.: Simulation Model of Car Wheel Suspension