

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

**Ing. František Pražák**

Pojednání ke státní doktorské zkoušce

**Tlumič odpružení jako prvek ovlivňující jízdní vlastnosti  
automobilu**

**Školitel:**

Doc. Ing. Ivan Mazůrek CSc.

Dr. Ing. Petr Porteš

**Druh vědecké výchovy:**

Doktorský studijní program – prezenční forma

**Obor:**

Konstrukční a procesní inženýrství

## Obsah

Použité veličiny a jednotky .....	2
1. Užité vlastnosti vozidel .....	3
2. Diagnostické signály ve vozidle .....	4
2.1 Elektronické systémy podvozku vozidla .....	4
2.2 Palubní diagnostika .....	4
2.3 Datová sběrnice CAN Bus .....	5
3. Závěs kola s tlumičem odpružení .....	5
3.1 Hydraulický tlumič odpružení .....	6
3.1.1 Tlumiče s polohově závislým tlumením .....	7
3.1.2 Tlumiče s elektronicky řízeným tlumením .....	8
3.1.3 Tlumiče nekonvenčních konstrukcí .....	8
3.2 Matematický model tlumiče.....	10
4. Diagnostické metody .....	13
4.1 Impulsní dokmitový test .....	13
4.2 Rezonanční amplitudový .....	13
4.3 Rezonanční adhezní test .....	14
4.4 Moderní metody bezdemnotážní diagnostiky.....	14
5. Vývoj matematického modelu automobilu .....	15
6. Formulace cílů a problémů disertační práce .....	18
Literatura .....	19

## Použité veličiny a jednotky

B	tlumení tlumiče	[Ns/m]
$c_1$	radiální tuhost pneumatiky	[N/m]
$c_2$	tuhost vozidlové pružiny	[N/m]
F	zátěžná síla tlumiče	[N]
I, $J_{y2}$	moment setrvačnosti karosérie automobilu	[kgm <sup>2</sup> ]
$k_1$	radiální tlumení pneumatiky	[Ns/m]
$k_2$	tlumení tlumiče odpružení	[Ns/m]
$K_p$	vnitřní pružnost tlumiče	[N/m]
$K_U$	pružnost uchycení tlumiče	[N/m]
l	rozvor náprav	[m]
$l_p$	vzdálenost osy předního kola od těžiště automobilu	[m]
$l_z$	vzdálenost osy zadního kola od těžiště automobilu	[m]
m	posuvná hmotnost tlumiče	[kg]
$m_1$	redukovaná hmotnost závěsu kola	[kg]
$m_2$	hmotnost karosérie	[kg]
$m_{2p}$	redukovaná hmotnost karosérie nad přední nápravou	[kg]
$m_{2z}$	redukovaná hmotnost karosérie nad zadní nápravou	[kg]
$m_C$	celková hmotnost automobilu	[kg]
p	tlak média v tlumiči	[MPa]
v	rychlost pístnice tlumiče	[m/s]
z	posunutí pístnice tlumiče	[m]

## 1. Užité vlastnosti vozidel

Automobil – slovo, které se stalo synonymem pro pohodlí. Prostředek umožňující přesun těžkých a objemných nákladů, lepší využití času. Naopak se může stát nebezpečnou zbraní. V 21. století se lidé v mnoha zemích bez automobilu nedokáží představit svůj život.

Pro uživatele automobilu často není rozhodující pouze účel, pro který byl automobil navržen. Zákazník často preferuje faktory jako líbiví design, vybavení a pohodlí, dynamické a říditelné vlastnosti, v neposledním případě rozhoduje i cena vozu. Automobilový trh se snaží reagovat na tuto spoustu požadavků víceúčelovými vozy, kde například terénní automobil může mít půvabný design, zároveň poskytuje pohodlnou jízdu po silnici jako luxusní osobní automobil. I přes nejrůznější nároky zákazníka musí konstruktér v návrhu vozu upřednostňovat:

- bezpečnost vozu nejen pro posádku, ale i pro okolí
- spotřebu energie a ekologie provozu
- životnost komponentů

Jedná se o požadavky na konstrukci automobilu, které jsou předepsané legislativními předpisy. Tyto nároky jsou mezi sebou významně provázané, což vede k určitým kompromisům.

Bezpečnost vozu není jen v dobré stavbě a vybavení karosérie s mnoha ochrannými prvky chránící posádku v případě nehody (deformační zóny, airbagy, bezpečnostní pásy, dětské sedačky atd.). Nutností je však nehodě předejít. Dnes dosahují vozy skvělých hodnot při razantním zabrzdění, aktivní podvozky s mnoha elektronickými systémy zaručují dokonalou ovladatelnost vozu v případě krizové situace. Nejproblematictější článkem vozu je však samotný řidič a jeho reakční schopnosti. Nestačí zajistit řidičovo pohodlí, kde zbytečné úsilí k ovládnutí vozu vede k zvyšování únavy řidiče. Automobilky nespí a vyvíjí elektronické systémy (asistent řidiče), které vyhodnocují a řeší nestandardní chování řidiče (nevhodná vzdálenost vpředu jedoucím automobilem, mikrospánek).

Bezpečnostní a ochranné prvky však zvyšují celkovou hmotnost vozu. Právě hmotnost je jedním z faktorů, která rozhoduje o velikosti energie potřebné k pohonu vozidla. Dnes je trendem do automobilové výroby zavádět lehké a pevnější materiály. Plast je již standardním materiálem nahrazující většinu kovových či skleněných dílů. Hliníková karosérie v podobě vozu Audi A2 je další možností jak ušetřit cenné kilogramy. Po vzoru formule 1 se začínají objevovat uhlíkové a kevlarové kompozity, kde však je překážkou jejich stále vysoká cena. Na „motorářích“ je jiné břemeno. Vyvinout lepší pohonné jednotky s vyšší využitelností dodávané energie. V průběhu let byla navržena celá řada úspěšných konstrukčních variant pohonných jednotek. Realizace většiny dobrých projektů však ztroskotala na nevhodnosti dosavadních konstrukčních materiálů, nedostupnosti energetických zdrojů ve velkém množství či na produkování velkého množství škodlivých látek.

Životnost komponentů je problematika i v jiných oblastech než v automobilovém průmyslu. Opotřebovaná či špatně vyrobená součástka ovlivní životnost ostatních komponentů stroje, má vliv na zvýšení hlučnosti a spotřeby pohonné energie. V případě vlastní destrukce může způsobit nejen finanční škody. Trvanlivost součástky hraje roli i

v životním prostředí – ekologii, a tedy je nutné přihlížet na nutné zásoby náhradních dílů, naopak zajistit likvidaci starých komponentů [15].

Vznikla tak technická diagnostika automobilu, tedy nezbytnost sledovat (diagnostikovat) nejrůznější mechanické systémy či dokonce automobil jako celek. Následná reakce na vyhodnocení diagnostické veličiny má zajistit ideální chování dané mechanické soustavy.

## 2. Diagnostické signály ve vozidle

Často není možné danou veličinu pozorovat. Dříve to bylo často nedostupnou měřicí technikou. Problém je, že daná veličina nejde přímo měřit. Musíme často měřit jinou veličinu a jistou metodikou dospět k pozorované veličině [20].

Diagnostika motorového vozidla se průběžně rozvíjela se zvyšující technickou úrovní vozidel. Metodika jak získat sledovanou veličinu dané soustavy také závisela na momentální významnosti dané veličiny:

*Externí diagnostika* – chování sledovaného objektu (soustavy) je přeneseno na pomocné zařízení, z kterého je vyhodnoceno chování pozorované soustavy

*Interní diagnostika* – daná veličina je získávána přímo z dané mechanické soustavy

Čas pro zpracování naměřených dat je také rozhodující:

*Off-line* – sledovaná veličina je vyhodnocena až po samotné zkoušce

*On-line* – někdy je však nutné reagovat na danou událost okamžitě. Proto je nutné mít neustálý přehled o dění dané soustavy a daná veličina je sledována neustále přímo za běhu dané soustavy

### 2.1 Elektronické systémy podvozku vozidla

Především pro zvýšení bezpečnosti v krizové situaci konstruktéři vytvořili mnoho elektronických systémů podvozku automobilu. Nejznámějším takovým systémem je ABS, systém zabráňující zablokování kol při prudkém brzdění a umožňující tak snadnější ovládání vozu na kluzkém povrchu. Další rozšířený systém je ASR (systém proti prokluzu kol na kluzkém povrchu), který nemá zas takový bezpečnostní charakter jako jiné systémy, ale spíše slouží pro řídicí pohodlí. Počáteční problémy s „losím testem“ vozů Mercedes třídy A a vozů Smart urychlili nástup systému ESP (systém elektronické stability vozu) do sériové výroby. Zmiňované systémy jsou zaměřeny na sledování samotné rotace kola. Na průjezd zatáčkou nebo prudkém manévrování má vliv i dynamické chování závěsu kola. Závěs je naladěn na určitý povrch vozovky, firma Sachs však přišla s možností přeladit toto dynamické chování závěsu kola pomocí tlumiče odpružení. Tlumič lze plynule seřizovat pomocí elektroniky, která je závislá na mnoha veličinách – pohyb závěsu kola, pohyb karosérie a signálů využívající systém ABS. Jedná se o systém nazvaný CDC.

Některé systémy jsou závislé na datech z jiného elektronického systému. Příkladem je systém ESP, kde jeho reakce je závislá na ABS. Se vznikem CDC se objevil systém, který sleduje už takřka celý podvozek – IDS. Tento systém je spojení systémů CDC a ESP.

Na automobilový trh se dostávají další elektronické systémy. Jedním z nich se systém MSR – systém proti podřazení na kluzkém povrchu. Dalším z nich je systém SBC (elektrohydraulické brzdy), kde jeho nástup je zbrzděn legislativou (soustava brzdový pedál – brzda nesmí být spon elektronickou vazbou)

V automobilech se objevuje mnoho systémů, které nemají až tak bezpečnostní charakter. Dešťové senzory zjišťují přítomnost vody na skle a podle toho ovládají stěrače. Automatická klimatizace je také elektronický systém a v mnoha vozech má i vlastní řídicí jednotku.

## 2.2 Palubní diagnostika

Elektrické obvody v automobilu s použitím nejrůznějších elektronických systémů se staly dosti nepřehledné. V případě jejich poruchy vznik problém odhalení závady. Proto v 70. letech vytvořen elektronický systém, který má úkol dle potřeby monitorovat jednotlivé elektrické prvky. Jedná se o tzv. palubní diagnostiku (on-board diagnostic). V případě závady některého ze členů elektrického obvodu má jednak zapsat závadu do elektronického protokolu o závadách a podle významnosti poruchy upozornit řidiče. Za druhé, podle významnosti poruchy má nastavit automobil na nouzové dojetí, kde se nepřihlíží na spotřebu paliva či emisní hodnoty.

Možnost vyčítání závad z řídicí jednotky automobilu je dle historického vývoje palubní diagnostiky. Dnes je možné se na řídicí jednotku připojit přes diagnostickou zásuvku osobním počítačem s příslušným počítačovým programem.

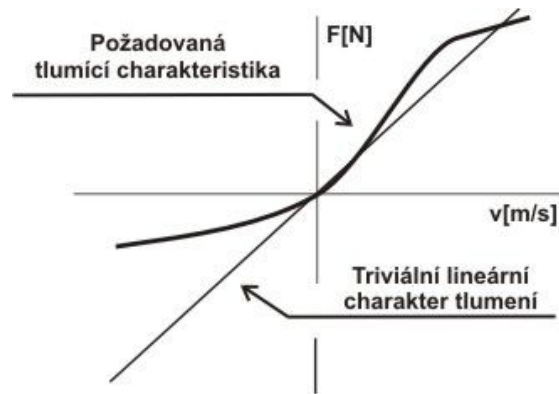
## 2.3 Datová sběrnice CAN Bus (Controller Area Network)

Dnešní automobily jsou vybaveny i několika řídicími jednotkami, které se věnují motoru, převodovce, klimatizaci nebo bezpečnostním systémům. Dokonce i obyčejné zadní svítilny nejsou ovládány klasickým elektrickým obvodem, kde již nefiguruje klasický obvod s dvěma vodiči, napájením a ovládacím spínačem. Jednotlivá elektrická zařízení automobilu využívají rozdílných elektrických signálů. Proto byla počátkem 80 let vyvinuta sériová datová sběrnice nazvaná CAN Bus [19], která má zajistit vzájemnou komunikaci mezi jednotlivými zařízeními.

## 3. Závěs kola s tlumičem odpružení

Jízdou po nerovném terénu se přes vozidlové kolo přenáší nepříjemné silové odezvy přímo na posádku a jednotlivé komponenty vozu. Proto je nutné spojit kolo s karosérií odpruženým závěsem. Vzniká tak mechanická soustava hmot a pružin, čímž přejezdem nerovností dochází k jejímu rozkmitání a tím i snížení přitlačné síly kolo-vozovka. Proto je nezbytné vybavit závěs vhodným tlumičem odpružení.

Funkčnost tlumiče odpružení 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]. V závěsech kol dopravních prostředků se ukázal jako nejvhodnější teleskopický tlumič využívající viskózního tření – hydraulický tlumič odpružení.



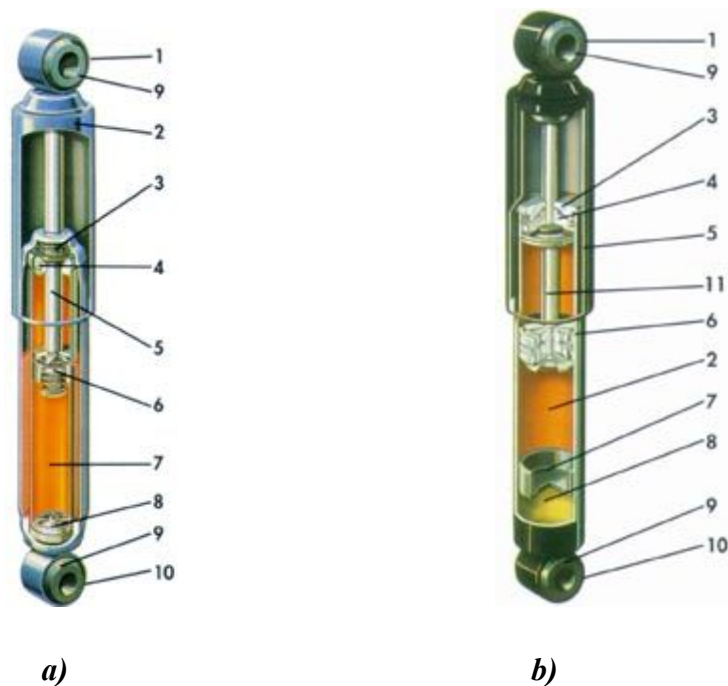
**Obrázek 3-1:** Charakteristiky tlumení znázorněné v  $F$ - $v$  a  $F$ - $z$  diagramech

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. 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 3-1).

### 3.1 Hydraulický tlumič odpružení

Jednou z nejčastějších konstrukčních variant hydraulických tlumičů odpružení je dvouplášťový teleskopický dvojčinný tlumič (obrázek 3-2a). Jeho funkci zajišťuje píst spojený s pístní tyčí, který protlačuje kapalinu přes otvory průtokových ventilů. Tlumící sílu, která je závislá na rychlosti pístu, tedy v podstatě tvoří hydraulický odpor vzniklý při škrcení průtoku. Mezi vnějším pláštěm a pracovním válcem tlumiče je vyrovnávací prostor, který je od prostoru pracovního oddělen vyrovnávacím ventilem. Do vyrovnávacího prostoru je vytlačován olej o objemu, který v pracovním válci zaujímá zasunutá pístnice. Vyrovnávací prostor také kompenzuje objemové rozdíly vzniklé ohřevem kapaliny [11].

Druhou nejčastější variantou automobilového tlumiče odpružení je jednoplášťový dvojčinný teleskopický tlumič (obrázek 3-2b). Je tvořen podobně jako dvouplášťového tlumiče pístem s dvěma druhy škrtících ventilů, ovšem vyrovnávání rozdílů objemu pracovního prostoru pod pístem je zajištěno změnou objemu stlačeného vzduchu přímo v pracovním prostoru válce tlumiče. Plyn od kapaliny může být oddělen plovoucím pístem.



**obrázek 3-2: teleskopické tlumiče odpružení**

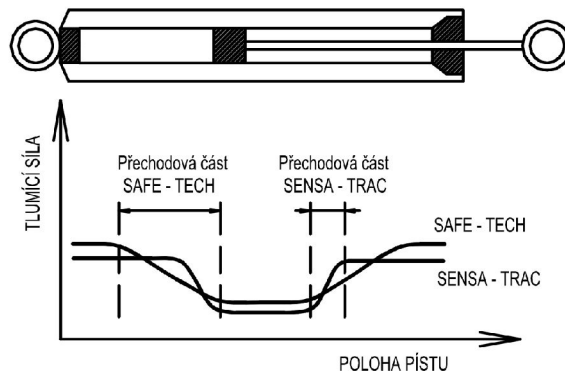
*a) dvouplášťový tlumič, b) jednoplášťový tlumič*

- 1 – horní úchyt, 2 – hydraulický olej, 3 – olejové těsnění, 4 – vodící pouzdro pístní tyče, 5 - ochranný kryt, 6 – víceúrovňový ventilový systém,  
7 – plovoucí píst, 8 - vysokotlaký plynový polštář, 9 – pryžové pouzdro, 10 – spodní úchyt, 11 – pístní tyč

Z podobné konstrukce vychází i tzv. vysokotlaký plynokapalinový tlumič, v němž je vzduch nahrazen např. náplní dusíku, která je stlačena na tlak až 2,5 MPa. Hlavním důvodem je především eliminace pění olejové náplně tlumiče. Z podobného důvodu je používána i varianta vycházející z konstrukce klasického dvouplášťového tlumiče tzv. nízkotlaký plynokapalinový tlumič, kdy vyrovnávací prostor nad hladinou tlumičového oleje ve vnějším plášti je jednorázově naplněn dusíkem o tlaku 0,25-0,5 MPa. Od olejové náplně je oddělen speciálně konstruovaným těsnícím kroužkem.

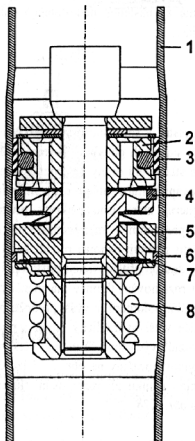
### 3.1.1 Tlumiče s polohově závislým tlumením

V podstatě principiálně jednoduchou konstrukční úpravou pracovního válce jednoplášťového dvojčinného tlumiče byla vytvořena firmou Monroe koncepce závislého tlumení na poloze pístu (Position Sensitive Damping – PSD). Koncepce byla použita u tlumičů Sensa-Trac (obrázek 3-3) a vychází z faktu, že během klidné jízdy s velmi malou zátěží je zapotřebí jen velmi malá tlumicí síla, která zajišťuje především jízdní komfort, při zvýšení zatížení podvozku je třeba zvýšit tlumicí sílu pro zajištění maximálního kontaktu kola s vozovkou. Konstrukčně je tento požadavek řešen bočním rozšířením pracovního válce v jeho střední části, které funguje jako obtok, tlumič je tedy v této části mimořádně měkký. Inovací této koncepce vznikla výrobní řada Safe-Tech, která má přepracovanou obtokovou drážku s velice pozvolnými přechody a její tvar byl specificky přizpůsoben každému typu vozu [20].



**obrázek 3-3:** Polohově závislé tlumení tlumičů se systémem Sensa – Trac a Sensa – Trac Safe Tech

Pro velkokapacitní osobní automobily byla vyvinuta koncepce DCD (obrázek 3-4) (Displaced Consious Dampig), kde jsou tlumiče vzhledem k maximálnímu využití prostoru v šikmé poloze a tím je tedy zkrácena délka pohybu pístnice a výrazně snížena účinnost tlumení. Tento systém je v podstatě tvořen klasicky pracujícím kapalinovým tlumičem, jehož válec má ovšem dva průměry. Ve střední části je průměr válce zvětšený a na obou koncích je průměr menší. Je to tedy opět princip tlumení závislého na poloze pístu [20].



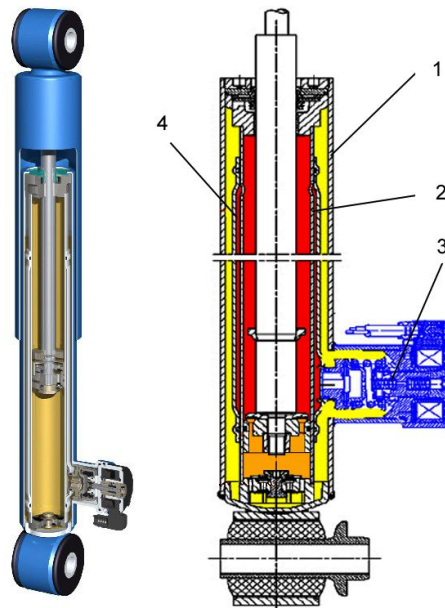
**obrázek 3-4:** Tlumící systém DCD : 1 – tlakový pracovní válec,

2 – píst, – pružný těsnící kroužek, 4 – tlakový těsnící kroužek,  
5 – těleso zpětného ventilu, 6 – pístní kroužek, 7 – planžeta zpětného ventilu, 8 – pružina

### 3.1.2 Tlumiče s elektronicky řízeným tlumením

Tlumiče s elektronicky řízeným tlumením jsou ve vozidle zakomponovány jako buď zcela autonomní systémy nebo častěji jako součást komplexního systému řízení podvozku. Plynulá regulace tlumení (CDC – Continous Damping Control) je tedy v přímém propojení se stabilizačním systémem ESP a protiblokovacím systémem ABS. Elektronická řídicí jednotka CDC přizpůsobuje hodnotu tlumení jednotlivých tlumičů odpovídající jízdě situaci a povrchu vozovky. Jedna z možných konstrukčních variant elektronicky řízeného tlumiče je na obrázku 3-5. Tento tlumič firmy Sachs vychází z konstrukce dvouplášťového teleskopického tlumiče, na jehož vnějším plášti je umístěn plynule regulovatelný přepouštěcí ventil. Tlumení je regulováno přepouštěním oleje z vyrovnávacího prostoru do mezipláště, který je přímo v horní části propojen s prostorem nad pístem. Ventilový systém v pístu i přepouštěcí ventil ve spodní části tlumiče, jsou konstruovány oproti klasickému tlumiči jako jednostranné, tzn.

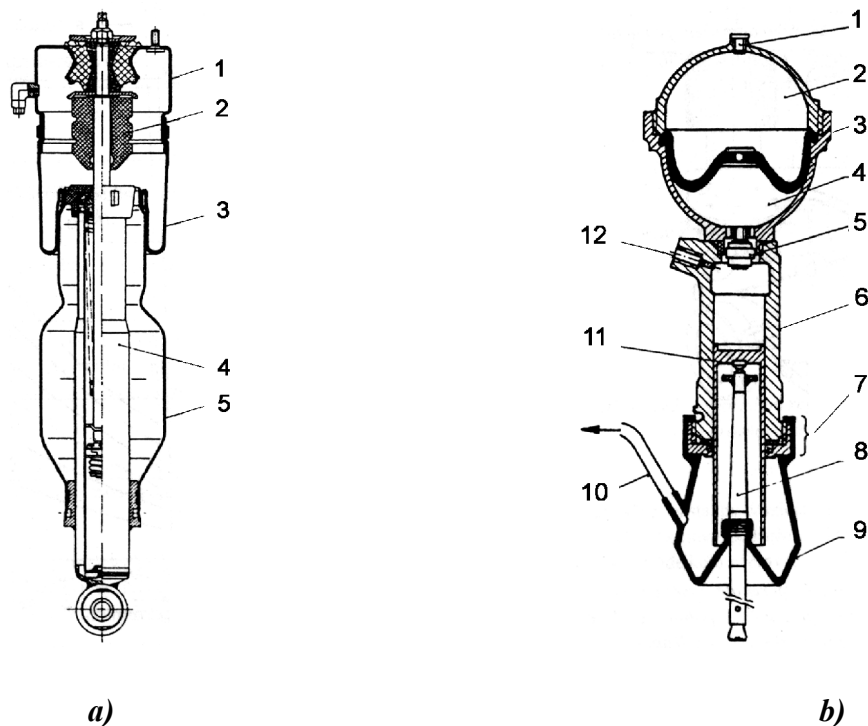
že při roztahování tlumiče jsou zcela zavřeny, jejich funkci přebírá regulovatelný přepouštěcí ventil.



**obrázek 3-5:** *Tlumič s elektronicky řízeným tlumením: 1 – vnější plášť, 2 – vnitřní plášť, 3 – regulovatelný ventil, 4 – přepouštěcí meziprostor*

### 3.1.3 Tlumiče nekonvenčních konstrukcí

Zvláštní kategorii mezi prvky závěsu kola zauímají pneumatické a hydropneumatické pružící jednotky, které zastávají funkci jak pružin, tak i tlumičů. Pneumatické pružící jednotky (obrázek 3-6a) jsou často řešeny jako kombinace plynokapalinových tlumičů a vzduchových pružin. Jednotky jsou obvykle automaticky regulovány bez možnosti zásahu řidiče za všech provozních podmínek. Regulace zajišťuje korekci výšky vozidla na základě snímání náklonu vozu v podélné a příčné rovině. Aby se zamezilo poklesu předku vozidla při brzdění, nahustí se vzduchové komory předních tlumících jednotek. Elektronické prvky zajistí současně pokles tlaku ve vzduchových komorách zadní nápravy. Při průjezdu zatáčkou se stabilita karoserie zajišťuje obdobným způsobem, avšak regulací tlaku vzduchu v příčném směru. Tlumící charakteristiku podvozku nastavuje řidič sám, tak lze přizpůsobit vlastnosti vozidla stylu jízdy, zatížení, charakteru provozu i povrchu vozovky.



**obrázek 3-6a:** Pneumatická pružicí jednotka [20] – vzduchová nádrž s opěrným ložiskem, 2 – přidavná pružina, 3 – krycí manžeta, 4 – tlumič, 5 – pružný píst s dodatečným objemem

**obrázek 3-6b:** Hydropneumatická pružicí jednotka [20]

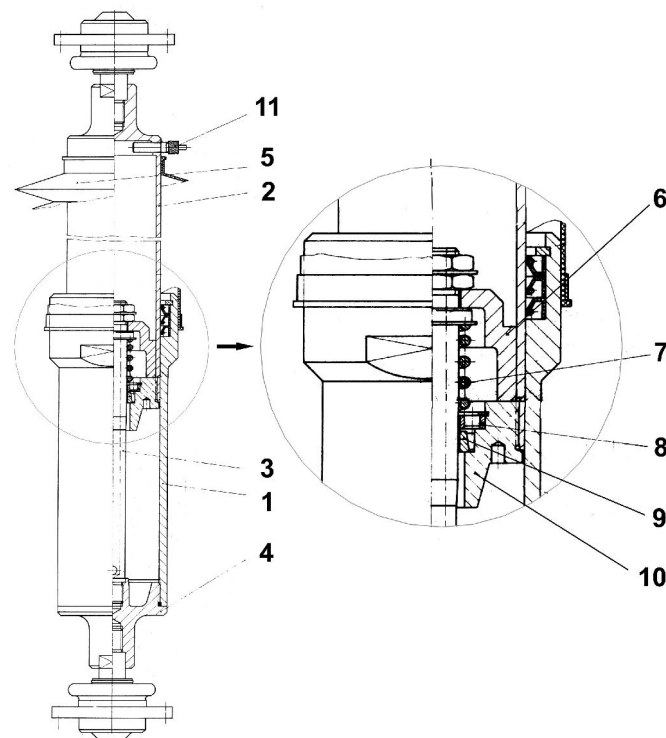
1 – plnicí otvor, 2 – náplň plynu (dusík), 3 – membrána, 4 – kapalina, 5 – tlumič, 6 – válec, 7 – těsnící systém, 8 – pístnice, 9 – těsnící vak, 10 – odvod uniklé kapaliny, 11 – píst, 12 – přívod tlakové kapaliny

Hydropneumatická pružicí jednotka pracuje na rozdíl od pneumatické s konstantní hmotností pružícího plynu. Jako plynová náplň je obvykle použit dusík. Typickým představitelem této kategorie jsou pružicí jednotky, jimiž jsou osazeny nápravy osobních vozů Citroën. Řez touto hydro-pneumatickou jednotkou je uveden na obrázku 3-6b. Základní částí je válec, ve kterém se pohybuje píst spojený pákovým převodem s ramenem zavěšeného kola. S horní částí válce je spojena tlaková nádoba kulového tvaru, kterou rozděluje pryžová membrána na dvě části. V horní polokouli je stlačený pružící plyn, prostor mezi membránou a pístem je vyplněn kapalinou. Mezi válcem a spodní polokoulí tlakové nádoby jsou umístěny redukční ventily, které zajišťují škrcení kapaliny při pohybu pístu, tím je zajištěn tlumící účinek. Rozdílné zatížení vozidla je kompenzováno přívodem kapaliny ze zásobníku do pracovního prostoru válce, čímž je tedy zajištěna regulace světlé výšky vozidla. Nová koncepce těchto pružících jednotek dovoluje spolu se světlou výškou také úpravu tvrdosti a tuhosti samotného pružení přímo během jízdy dle charakteru povrchu vozovky.

Mezi teleskopické hydro-pneumatické pružicí jednotky, které zastávají funkci pružiny i tlumiče odpružení patří i jednotky typu Krňávek (dle Ing. Krňávek – konstruktér). Na obrázku 3-7 je konstrukce ze sedmdesátých let, kdy byla tato koncepce zejména díky své jednoduchosti používána v autokrosovém sportu. Historie těchto tlumičů začala v ČZ Strakonice, kdy se Ing. Krňávek zabýval vývojem hydro-pneumatických jednotek tohoto typu pro použití v motokrosovém a enduro sportu.

Jednotka je tvořena do sebe se zasouvajícími kluzáky, které jsou na koncích opatřeny úchyty pro ukotvení k ramenu nápravy a ke karoserii popř. k nápravnicí. Činná část tlumiče je tvořena pístem, který je přes nepohyblivou pístnici spojen s vnějším kluzákem. Při stlačení

tlumiče tedy píst vůči kluzáku stojí a pohybuje se vnitřní kluzák, jehož spodní konec je ukončen tělesem. Útlum vzniká průtokem oleje přes otvory ve víku a kolem člunku v tělese. Větší útlum při roztahování je zabezpečen přesuvným člunkem, který se ve fázi roztahování tlumiče přesune na dno tělesa a zmenší tím průtočnou štěrbinu pouze na mezikruží mezi jím a pístnicí. Jako doraz při plném roztahování funguje pružina umístěná na pístnici mezi pístem a tělesem. Doraz při plném stlačení je zabezpečen hydraulicky, kdy dochází ke škrcení oleje ve štěrbině mezi kuželovými plochami spodního a vnitřního tělesa. Stlačený vzduch v prostoru nad pístem funguje jako pneumatická pružina. Objemem vzduchu lze regulovat světlou výšku vozidla a zároveň tuhost odpružení.



**obrázek 3-7:** Teleskopická hydropneumatická jednotka: 1 – kluzák, 2 – vnitřní kluzák, 3 – pístnice, 4 – spodní těleso, 5 – manžeta, 6 – píst, 7 – pružina, 8 – víko, 9 – člunek, 10 – vnitřní těleso, 11 – plnicí vzduchový ventil

### 3.2 Matematický model tlumiče

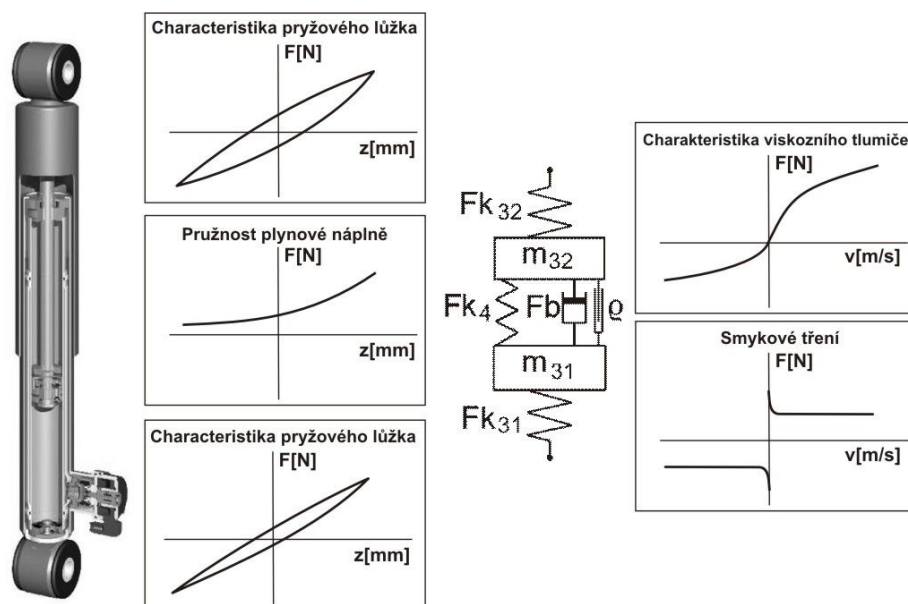
Při návrhu závěsu kol se s úspěchem využívá matematických modelů. Do tohoto modelu se často vkládají přímo naměřené charakteristiky pružin, pneumatik a tlumičů. Výhodnější je matematický model závěsu kola vytvořit podmodel hydraulického tlumiče s simulovat všechny jeho funkční vlastnosti a závady.

Pro model dynamické struktury hydraulického tlumiče lze využít mechanického modelu znázorněného na obrázku 3-8a. Toto schéma představuje tlumič upnutý v testovací stolici, přesně tak jak je tomu při zkouškách tlumičů na zkušebním stavu Gillop 1.4 (obrázek 3-8b - toto zařízení je součástí vybavení laboratoří Ústavu konstruování). Aby model upnutého tlumiče simuloval všechny případné závady a atypická chování musí splňovat tyto následující požadavky:

- pracovat s lomenou nelineární charakteristikou různou pro tah a tlak
- imitovat vůli v uchycení tlumiče



Pokud však budeme mít k dispozici naměřené charakteristiky tlumiče, můžeme vhodným naladěním komponentů modelu dosáhnout přibližně shodného průběhu (obrázek 3-9).



**obrázek 3-9:** Charakteristiky jednotlivých komponentů modelu (případ, kdy je tlumič uchycen v měkkém uložení nahoře i dole)

Na obrázku 3-10 je ukázka takového modelování předního tlumiče vozu Škoda 781. Zde byly odhadnuty následující parametry:

útlum při stlačování

$$b_s = 4250 \text{ Ns/m}$$

útlum při roztahování

$$b_{R1} = 23500 \text{ Ns/m}$$

zalomení při rychlosti 0.28 m/s

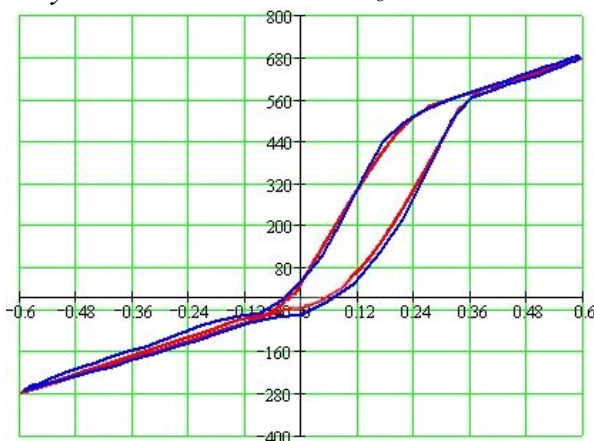
$$b_{R2} = 4290 \text{ Ns/m}$$

tlak plynného média

$$p = 0.1 \text{ MPa při objemu } 280 \text{ cm}^3$$

tuhost pružného uchycení

$$k_U = 500 \text{ N/mm}$$



**obrázek 3-10:** Ukázka namodelované a naměřené tlumicí charakteristiky  
 --- experimentálně zjištěná  $F$ - $v$  charakteristika předního tlumiče pro vůz Škoda 781  
 --- namodelovaná  $F$ - $v$  charakteristika téhož tlumiče

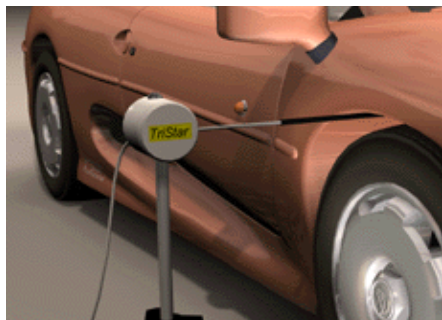
#### 4. Diagnostické metody

Stav prvků závěsu lze často určit vizuálně či odposlechem nestandardních hlukových projevů. Tato metodika však je nepoužitelná pro ověření funkčnosti tlumiče odpružení. Technický stav lze posoudit jedině na vymontovaném tlumiči pouze na testovací stolici (například stolice z obrázku 3-8b). Z naměřených křivek (síla v závislosti na dráze a na rychlosti) a porovnání s katalogovými hodnotami se určí další použitelnost tlumiče. Z hlediska velké různosti konstrukčních provedení tlumičů odpružení, časové i pracovní náročnosti je tato metoda nepřijatelná jak pro servisy, tak i pro zákazníky. Proto jsou v servisní praxi rozšířené metody bezdemontážní diagnostiky tlumičů. Tlumič je posuzován v zamontovaném stavu přímo na vozidle a jeho chování je určováno z dokmitového nebo rezonančního pohybu karosérie nebo závěsu kola.

Metodiky bezdemontážních diagnostik však vychází z hodnocení celého mechanismu závěsu kola. Tedy k posouzení funkčnosti tlumiče se předpokládá vyhovující technický stav závěsu i správné nahuštění pneumatiky.

#### 4.1 Impulsní dokmitový test

Zde je sledován pohyb karosérie, z kterého je vyhodnocen měrný útlum odpružené hmoty. Vybuzení pohybu karosérie může být realizováno ručním rozhoupáním. Pohyb je pak následně snímán mechanicky (TriStar Shock Tester – obrázek 4-1a) nebo opticky (M-Tronic – obrázek 4-1b). Jiným způsobem rozhoupání karosérie je „zakleknutí“ vozu při prudkém zabrzdění z nízké rychlosti na speciální brzdné plošině, která snímá kmitání odpružené hmoty jako brzdnou 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 4-1a: tester TriTec*

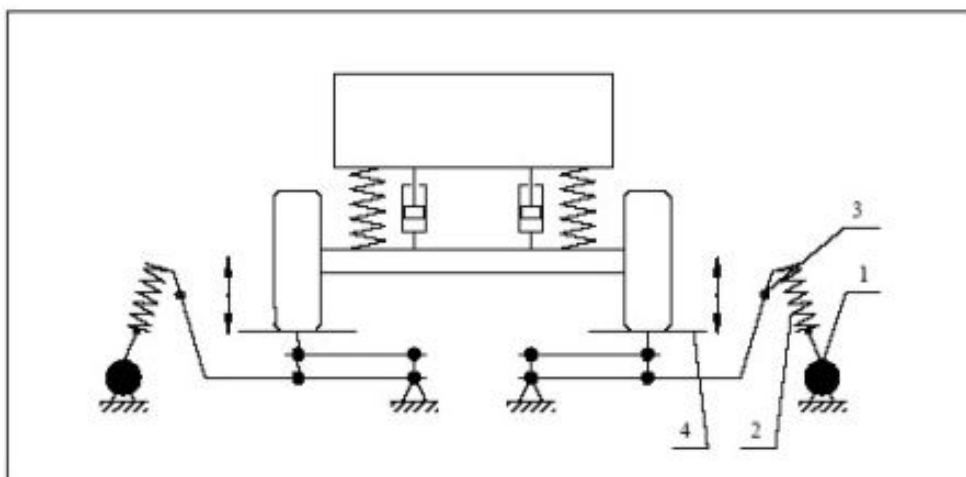


*obrázek 4-1b: tester M-Tronic*



#### 4.2 Rezonanční amplitudový test

Rezonanční bezdemontážní amplitudový test se provádí rozkmitáním plošiny, na které je najeto měřeným kolem. 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 4-2:** tester tlumičů AFIT BOGE upravený sadou TriSet  
1-vačkový mechanismus, 2-tlačná pružina, 3-snímač zrychlení, 4-opěrná plošina

### 4.3 Rezonanční adhezni test

Rezonanční bezdemontážní adhezni test posuzuje přilnavost kola ke kmitající plošině. Kmitající plošina simuluje nerovnosti vozovky a současně registruje přítlačnou sílu kola. Výsledkem zkoušky je nejmenší hodnota přítlaku v průběhu testu (Schenck DiTecFP30, Tritec Diagnostic).



**obrázek 4-3:** tester tlumičů TriTec

### 4.4 Moderní metody bezdemontážní diagnostiky

Na moderních automobilech se začínají objevovat systémy umožňující nastavit charakteristiku tlumiče přímo za jízdy pro dané jízdní podmínky (CDC). K tomu je zapotřebí neustále sledovat pohyb karosérie a závěsu kola. Ukazuje se tedy možnost z určitého naměřeného signálu zhodnotit nestandardní chování závěsu. Takovým signálem může být přejezd definované překážky (zpomalovací práh). Tím dojde k rozkmitání a následnému uklidnění karosérie i závěsu. Další metodikou může být sledování rotace karosérie okolo příčné osy těžiště automobilu.

Jak již bylo řečeno na začátku této kapitoly, pro hodnocení funkčnosti tlumiče je nejideálnější posouzení naměřených křivek F-v a F-z (síla v závislosti na poloze a rychlosti

pístnice tlumiče) s katalogovými hodnotami. Životnost a cenová dostupnost měřicí techniky umožňuje v dnešní době měřit tyto charakteristiky přímo na vozidle. Vzájemný pohyb karosérie vůči závěsu je standardně monitorován u závodních automobilů pomocí tahových potenciometrů (obrázek 4-4). Problém je, že prostor kola je vystaven ataku nečistoty z povrchu vozovky (prach, písek, bahno, voda či ostré kamení). Firma Sachs u systému CDC tento pohyb sleduje pomocí snímačů zrychlení, které jsou umístěny na závěsu a karosérii a lze je lépe uchránit proti poškození. Měření síly je nejsnadnější u formulových vozů, kde typ zavěšení umožňuje umístění tenzometrů na tzv. pushrody. Zavěšení kol u standardních automobilů obnáší vložení mezi karosérii a tlumič nějaký siloměrný prvek (obrázek 4-5). Tento prvek však nesmí ovlivnit geometrii nápravy.



obrázek 4-4: tahové potenciometry



obrázek 4-5: siloměrný prvek

## 5. Vývoj matematického modelu automobilu

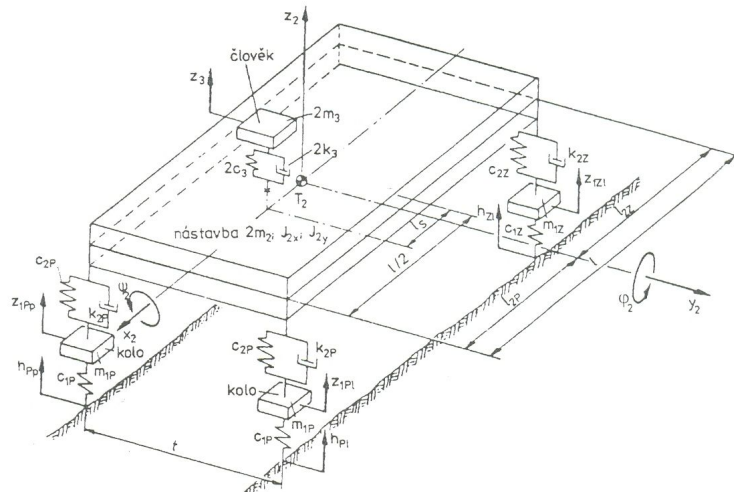
Před sestavením matematického modelu je nutné nejprve sestavit dynamický model, který co nejvíce odpovídá skutečnosti [4, 17]. Automobil představuje složitou kmitavou soustavu, kromě odpružení kol a karosérie je odpružená pohonná jednotka či sedadla. Samotné tělo člověka lze také znázornit jako soustavu hmot a pružin. Vzniká tak výpočtově složitá mechanická soustava, také vzhledem k jistým nelinearitám v systému, tření či materiálové pružnosti, jsou konstruktéři nuceni vytvářet jistá zjednodušení. Na obrázku 5-1 je znázorněn zjednodušený model celého automobilu. Karosérie je nahrazena deskou, závěsy s koly představují náhradní tělesa. Náhradní schéma za automobil musí odpovídat následujícím vztahům:

hmotnost vozidla musí odpovídat  $m_c = m_2 + \sum m_{1i}$

poloha těžiště musí být také stejná  $m_p l_p - m_z l_z = 0$

$m_r l_r - m_l l_l = 0$

moment setrvačnosti karosérie by měl také odpovídat realitě  $I = \begin{vmatrix} I_x & D_{xy} & 0 \\ D_{xy} & I_y & D_{yz} \\ 0 & D_{yz} & I_z \end{vmatrix}$



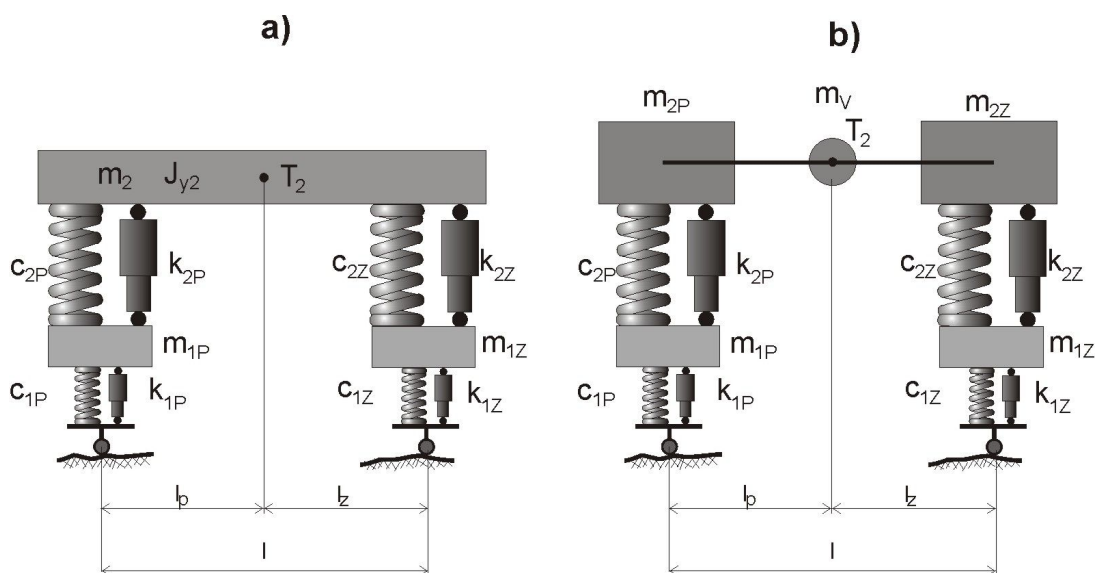
**obrázek 5-1:** zjednodušený plný model automobilu

Pro samotné pochopení významu tlumiče odpružení v závěsu kola je celkový model automobilu nevyhovující. Vhodnější je využít tzv. čtvrtinového modelu automobilu (quarter car model). Možnost přístupu ke čtvrtinovému modelu vysvětluje obrázek 5-2 a následující rovnice. Uvažujeme-li že automobil je symetrický k podélné ose a nebude se naklánět, pak se tedy můžeme zabývat rovnicemi pro rovinným modelem automobilu, jak je tomu právě v obrázku 1a. Z toho plyne, že tuhost pružiny  $c_{2P}$  je součet tuhostí pružin z levého a pravého závěsu, podobně je tomu i u veličit popisující tlumení tlumičů ( $k_{2P}$ ), radiální tuhosti pneumatiky ( $c_{1P}$ ) a tlumení ( $k_{1P}$ ) a stejně budeme postupovat i u zadní nápravy. Hmotnost neodpružených částí představující přední a zadní nápravu zastupují veličiny  $m_{1P}$  a  $m_{1Z}$ . Nástavbu popisuje hmotnost  $m_2$  a moment setrvačnosti  $J_{y2}$  s osu procházející těžištěm  $T_2$ . Podle obrázku 1b jsme nástavbu rozdělili na tři tělesa spojené nehmotnou tyčí, kde toto rozdělení musí odpovídat následujícím podmínkám:

1. zachování hmotnosti  $m_2 = m_{2P} + m_{2Z} + m_V$
2. zachována poloha těžiště  $m_{2P}l_P - m_{2Z}l_Z = 0$
3. zachování momentu setrvačnosti  $J_{y2} = m_2 i_y^2 = m_{2P}l_P^2 + m_{2Z}l_Z^2$   
( $i_y$  je poloměr setrvačnosti)

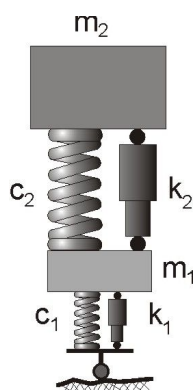
Z uvedených rovnic vyjádříme hmotnosti odpovídající jednotlivým tělesům:

$$m_{2P} = m_2 \frac{i_y^2}{l_P l} \quad m_{2Z} = m_2 \frac{i_y^2}{l_Z l} \quad m_V = m_2 \left( 1 - \frac{i_y^2}{l_P l_Z} \right)$$



**obrázek 5-2:** Rovinný model kmitání dvounápravového automobilu  
 a) vozidlo s nástavbou o hmotnosti  $m_2$  a momentem setrvačnosti  $J_{y2}$   
 b) náhrada nástavby třemi tělesy

Pokud hmotnost vazebního tělesa  $m_v=0$ , přeruší se vazba mezi přední a zadní nápravou. Z toho plyne, že hmotnosti  $m_{2P}$  a  $m_{2Z}$  jsou nezávislé. To znamená, bude-li vybuzena ke kmitání přední náprava, pak se bude pohybovat jen těleso s hmotností  $m_{2P}$  a těleso s hmotností  $m_{2Z}$  zůstane v klidu. Podmínka nulové hmotnosti  $m_v$  je splněna u řady automobilů. Soustavu na obrázku 1b tedy můžeme nahradit dvěma nezávislými soustavami o 2 stupních volnosti. V řádcích výše bylo uvedeno, že automobil uvažujeme v podélné ose symetrický. Je tedy možnost zabývat se konkrétním zavěšením a řešit matematický model dle obrázku 5-3 [3,4,13,14,18].



**obrázek 5-3:** Dílčí soustava  
 o dvou stupních volnosti představující závěs automobilu

Nutné je aby hodnoty z matematické simulace korelovaly s hodnotami naměřenými z reálného mechanismu. Tedy z hlediska naladění dynamiky závěsu ve čtvrtinovém modelu budeme pozorovat chování odpružené (nástavba) a neodpružené (závěs, brzdná soustava, hnací hřídel atd.) hmoty, vliv tuhost pružiny a tlumení tlumiče či pružící a tlumící vlastnosti pneumatiky. Z tohoto pohledu navrhnout experimentální zařízení, které ověří modelování čtvrtinového modelu jistě nebude složité. Většinou se takové konstrukce zatíží určitými konstrukčními podmínkami, v tomto případě se může jednat například o ladění všech dynamických parametrů popsanych z obrázku 5-3, možnost změny délky ramene závěsu, měření veličin, jednoduchost nebo cenový limit a k tomu zkusit na skutečném povrchu vozovky. Ideální pro představu je experiment na skutečném automobilu, což vyžaduje velké konstrukční úpravy a možná i omezení některých vypsanych požadavků, ne příliš snadné

provedení by vzniklo při zkouškách se čtvrtinou automobilu. Na ÚK VUT v Brně vzniklo vozidlo umožňující úpravu všech parametrů ovlivňující dynamiku závěsu – Experimentální vozík (obrázek 5-4). Jedná se o vozík, který umožňuje připojit za osobní automobil a provádět zkoušky v reálných podmínkách. Jednoduchost konstrukce nijak neomezuje měření potřebných údajů, je tedy možné pozorovat:

1. pohyb závěsu kola vůči karosérii
2. pohyb karosérie
3. síly působící na tlumič či pružící jednotku



*obrázek 5-4: Experimentální přívěsný vozík*

## 6. Formulace cílů a problémů disertační práce

Tlumič odpružení je bezesporu velmi důležitým prvkem podvozku automobilu. Má vliv na brzdou dráhu, říditelnost, pohodlí pro posádku a ekonomii provozu. Testy tlumičů v testovacích stolicích a zkoušky tlumičů v závěsu kola za rozličných zkušebních podmínek mají za úkol zjišťování odpovídajících charakteristiky. Zjištěné parametry z těchto měření jsou cenné zejména jako vstupní podmínky pro matematické modely závěsu kola či celého podvozku vozidla. Matematické modelování podvozku vozidla jako složitého dynamického systému souvisí s vývojem tzv. aktivních řídicích prvků podvozku, které jsou schopny reagovat na měnící se podmínky v průběhu jízdy a optimalizovat nastavení podvozku. Zmíněný přístup v konstrukci aktivních podvozků otvírá i zcela nové možnosti ve sledování technického stavu podvozku, kde se využívá získaných signálů jako vstupních dat pro systém palubní diagnostiky vozidla. Trvalý monitoring, který zavčas odhalí zhoršený technický stav podvozku, je tedy výrazným přínosem pro bezpečnost provozu. Věrnost matematických modelů podvozkových skupin vozidla je podmíněna kvalitní metodikou experimentů, na jejichž základě se bude ověřovat korelace počítačových simulací s realitou. Disertační práce „Tlumič odpružení jako prvek ovlivňující jízdní vlastnosti automobilu“ tématicky zapadá do soustavy projektů, které se zabývají modelováním podvozku automobilu, a měla by pokrývat především potřeby experimentálního zabezpečení.

Na požadavky, které by měl splňovat tlumič odpružení automobilu je zpravidla pohlíženo ze dvou hledisek. Prvních z nich je hledisko bezpečnosti, kdy je úkolem tlumiče pokud možno za všech provozních podmínek zajistit optimální kontakt kola s vozovkou pro možný přenos vzájemných sil. Tento požadavek tedy směřuje na dostatečné utlumení kmitajících neodpružených hmot automobilu. Druhým hlediskem je otázka komfortu jízdy, kdy je nutné dostatečně tlumit kmity odpružené hmoty, tedy karoserie automobilu, při přejezdu nerovnosti. Nároky na tlumič se ještě zvyšují při požadavku, aby jeho tlumící vlastnosti byly optimální při rozličných provozních podmínkách, jako např. při odlišném zatížení vozu či provozní teplotě tlumičové kapaliny. Tyto požadavky se ještě umocňují, pokud se jedná o tlumič sportovního vozu.

Na základě formulovaných problémů se chci v řešení disertační práce zaměřit na tyto cíle:

1. Vytvořit matematický model čtvrtinového modelu automobilu s podmodelem hydraulického tlumiče s možností simulovat všechny jeho funkční vlastnosti a závady.
2. Vytvořený matematický model aplikovat na Experimentální vozík a porovnat korelaci namodelovaných a naměřených hodnot
3. Na Experimentálním vozíku s použitím dobrého a špatného tlumiče ověřit různé metodiky testu tlumičů (dokmitový, adhezní a přejezdový test).

## Literatura

- [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] 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
- [4] Vlk F: Dynamika motorových vozidel, Nakladatelství a zasilatelství vlk, Brno 2001, ISBN 80-238-5273-6
- [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] Boichot P: Numerical modelling of an hydraulic damper, Mecanique Industrielle Et Materiaux 51 (2): 83-85 JUN 1998, ISSN: 1244-9091
- [8] Lee K, Numerical modelling for the hydraulic performance prediction of automotive monotube dampers, Vehicle System Dynamics 28 (1): 25-39 JUL 1997, ISSN: 0042-3114
- [9] Levesley MC, Kember SA, Barton DC, Brooks PC, Querin OM: Dynamic simulation of vehicle suspension systems for durability analysis, Modern Practice In Stress And Vibration Analysis Materials Science Forum 440-4: 103-110 2003, ISSN: 0255-5476
- [10] 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
- [11] 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

- [12] 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
- [13] Thompson AG, Pearce CM: RMS values for force, stroke and deflection in a quarter-car model active suspension with preview, *Vehicle System Dynamics* 39 (1): 57-75 JAN 2003, ISSN: 0042-3114
- [14] 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 control, *Journal of Sound and Vibration* 239 (2): 187-199 JAN 11 2001, ISSN: 0022-460X
- [15] Levesley MC, Kember SA, Barton DC, Brooks PC, Querin OM: Dynamic simulation of vehicle suspension systems for durability analysis, *Modern Practice in Stress and Vibration Analysis Materials Science Forum* 440-4: 103-110 2003, ISSN: 0255-5476
- [16] Hrovat D: Optimal Active Suspension Structures for Quarter-Car Vehicle Models, *Automatica* 26 (5): 845-860 SEP 1990, ISSN: 0005-1098
- [17] 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
- [18] Haiba M, Barton DC, Brooks PC, Levesley MC: Using a quarter-vehicle multi-body model to estimate the service loads of a suspension arm for durability calculations, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part K-Journal of Multi-Body Dynamics* 217 (2): 121-133 2003, ISSN: 1464-4193
- [19] <http://pp2can.wz.cz/>
- [20] Motejl V, Hořejší K.: *Učebnice pro řidiče a opraváře automobilů*, Litera Brno 2001, ISBN 80-85763-14-1