



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**SYSTÉMY PNEUMATICKÉHO ODPRUŽENÍ
PODVOZKŮ OSOBNÍCH VOZIDEL**

AIR SUSPENSION SYSTEMS FOR PASSENGER CAR CHASSIS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michaela Mračnová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Fojtášek

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Studentka:	Michaela Mračnová
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Jan Fojtášek
Akademický rok:	2018/19

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

Systémy pneumatického odpružení podvozků osobních vozidel

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Z hlediska komfortu a regulace podvozku je pro odpružení vozidel výhodné využití pneumatických vaků. Tato technologie však u moderních vozidel převládá především v kategorii nákladních automobilů a luxusních vozů s vyspělou dynamikou jízdy.

Cíle bakalářské práce:

Práce se bude zabývat systémy pneumatického odpružení podvozků dříve vyráběných a soudobých vozidel a vývojem těchto systémů. Práce bude popisovat:

- základní vysvětlení principu funkce těchto systémů,
- jejich přínos z hlediska dynamiky jízdy,
- studii hlavních výhod a nevýhod z hlediska provozu vozidla a uživatele.

Seznam doporučené literatury:

MASTINU, G. a PLOECHL, M. Road and off-road vehicle system dynamics handbook. Boca Raton: CRC Press, 2014. 1663 s. ISBN 978-0-8493-3322-4.

GILLESPIE, T. D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1992. 519 s. ISBN 1-56091-199-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Hlavným cieľom tejto bakalárskej práce je popísanie systémov pneumatického odpruženia. Úvodná kapitola práce popisuje historický vývoj týchto systémov. Práca zahŕňa popis hlavných komponentov systémov pneumatického odpruženia a vysvetľuje ich funkcie. Následne sa venuje princípu činnosti systému a odvodeniu vzťahov vyjadrujúcich charakteristické vlastnosti systému. V poslednej kapitole je uvedený prínos systémov z hľadiska dynamiky a komfortu jazdy.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

systém pneumatického odpruženia, pružina, vak, tuhosť pružiny, tlmič, dynamika jazdy, komfort

ABSTRACT

The main goal of this bachelor's thesis is to characterise pneumatic suspension systems. The introductory chapter chronicles the historical development of these systems. The thesis includes the description of the main components of pneumatic suspension systems and explains their functions. Furthermore, it describes the principle of the system operation and derivation of the equations expressing characteristic system properties. The last chapter presents the benefits of systems in terms of driving dynamics and comfort.

KEYWORDS

pneumatic suspension system, spring, bellow, spring rate, damper, driving dynamics, comfort

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

MRAČNOVÁ, Michaela. *Systémy pneumatického odpružení podvozků osobních vozidel*. Brno, 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Jan Fojtášek.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracovala som ju samostatne pod vedením Ing. Jana Fojtáška a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brne dňa 24. mája 2019

.....

Michaela Mračnová

POĎAKOVANIE

Týmto by som sa chcela poďakovať vedúcemu tejto práce pánovi Ing. Janovi Fojtáškoví za nápomocné rady k spracovaniu problematiky práce a za možnosť rozšírenia vedomostí z oblasti nadväzujúceho štúdia.

OBSAH

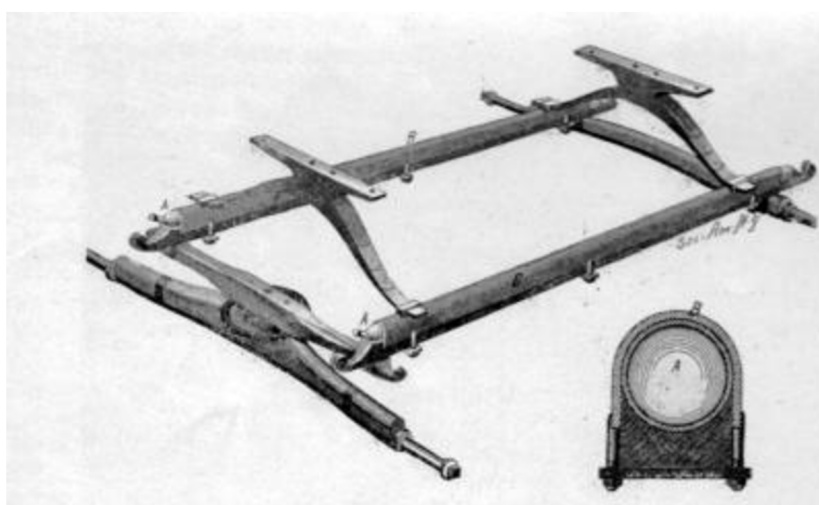
Úvod	9
1 Historický vývoj	10
2 Prvky systémov pneumatického odpruženia	13
2.1 Vzduchové pružiny	13
2.2 Tlmiče	16
2.3 Regulačné ventily	20
2.4 Zásobovanie vzduchu	20
2.5 Ovládací systém	21
3 Princíp činnosti systémov pneumatického odpruženia.....	23
3.1 Termodynamické vlastnosti pneumatických pružín	23
3.2 Progresivita pneumatických pružín	26
4 Vplyv systémov pneumatického odpruženia na dynamiku a komfort jazdy.....	31
4.1 Vplyv tuhosti pružín	32
4.2 Vplyv tlmenia	34
4.3 Regulované systémy pneumatického odpruženia	35
Záver.....	39
Zoznam použitých skratiek a symbolov	43

ÚVOD

Počas jazdy automobilom je úlohou vozidla zabezpečiť čo najvyššiu mieru komfortu a bezpečnosti jazdy. Tieto dve kritéria kvality jazdy v značnej miere ovplyvňuje práve typ použitého systému odpruženia. Dobrá miera komfortu vplyva ako na pohodlie posádky počas jazdy, tak aj na celkovú sústredenost' vodiča, ktorá by nemala byť ovplyvňovaná najmä z hľadiska bezpečnosti cestnej premávky. Pre bezpečnosť jazdy je taktiež veľmi dôležitá ovládateľnosť vozidla, na ktorú vplyva dynamika jazdy. V systémoch odpruženia bežných osobných automobilov sa využívajú konvenčné typy pružín, ako napríklad listové pružiny a vinuté pružiny, ktoré majú lineárnu pružiacu charakteristiku. U luxusnejších automobilov je kladený dôraz na vysoké pohodlie jazdy a tieto automobily preto využívajú regulovateľné systémy odpruženia pneumatickými alebo hydropneumatickými pružinami. Pneumatické pružiny sa vďaka možnosti regulácie ich pružiacich vlastností vyznačujú progresívnou pružiacou charakteristikou. A práve použitím regulovateľných pneumatických pružín a adaptívnych tlmičov v systémoch pneumatického odpruženia je možné dosiahnuť optimálneho nastavenia podvozku automobilov z hľadiska komfortu aj bezpečnosti jazdy. Dlhodobým vývojom týchto systémov sa dosiahlo, že súčasné automobily s týmito systémami sa dokážu prispôbovať podmienkam jazdy v reálnom čase. Práca sa bude preto zaoberať popisom vývoja a jednotlivých komponentov systému pneumatického odpruženia, opisom princípu činnosti systému a popisom vlastností systému, práve ktorých reguláciou môžeme dosiahnuť optimálneho nastavenia podvozku.

1 HISTORICKÝ VÝVOJ

Mohlo by sa zdať, že systém pneumatického odpruženia patrí medzi novšie technológie využívané v oblasti automobilového priemyslu, avšak nie je tomu tak. Ako prvý prišiel s myšlienkou vzduchového odpruženia v roku 1901 Američan, William W. Humphreys, s patentom „Pneumatická pružina pre vozidlá“ („Pneumatic spring for vehicles“). Jeho návrh, uvedený na obrázku (1), pozostával z dvoch dutých tyčí vedených paralelne pozdĺžne vozidla, ktoré spájali prednú a zadnú nápravu. Tieto tyče boli naplnené vzduchom a tvorili tak dlhé pneumatické vaky, uzatvorené na jednom konci a opatrené vzduchovým ventilom na druhom konci [1].



Obr. 1 Patent pneumatického odpruženia z roku 1901 [1]

Spoločnosť Cowey Motor Works z Veľkej Británie ako prvá vyvinula vzduchovú pružinu v roku 1909, ktorú neskôr pre niektoré svoje modely áut použil aj Lincoln v roku 1984. Pružina bolo vyhotovená v tvare valca a bola nafukovaná pumpou z bicykla cez ventil umiestnený vo vrchnej časti valca. V spodnej časti sa nachádzala membrána vyrobená z gumy a bola vystužená drôtmi. Membrána sa chovala ako pneumatický vak, pretože bola obklopená vzduchom. Hlavným problémom tejto pružiny však bol častý únik vzduchu [2].

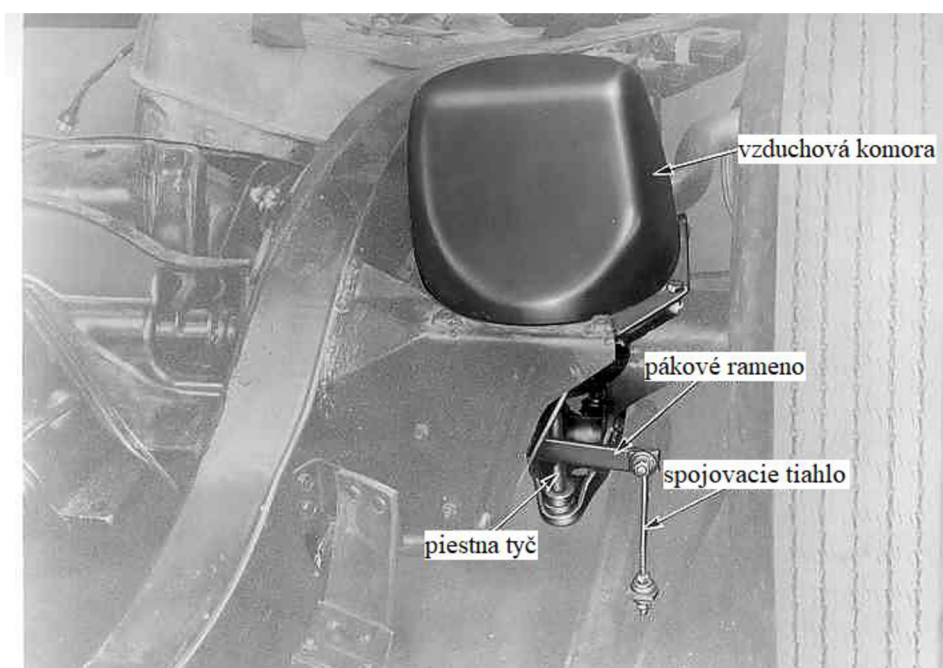
V roku 1929 sa českej spoločnosti Tatra ako prvej podarilo úspešne aplikovať vzduchové odpruženie na zadnú nápravu nákladného vozidla, konkrétne na model T 24. Avšak riešenie nebolo dokonalé a dochádzalo k úniku vzduchu z vakov, čo bol jeden z hlavných problémov daného typu odpruženia [3].

K ďalšiemu rozvoju došlo počas druhej svetovej vojny, kedy U.S. vyvinulo vzduchové odpruženie pre lietadlá, s cieľom dosiahnuť čo najnižšiu hmotnosť. Vzduchový systém bol taktiež používaný v nákladných vozidlách, kde vďaka meniteľnému tlaku vzduchu bolo možné zachovať konštantnú svetlú výšku vozidla bez ohľadu na hmotnosť nákladu [3].

Prvým plne funkčným vzduchovým odpružením disponoval prototyp automobilu Stout Scarab Experimental, predstavený v roku 1946. Za jeho vznikom stál Američan, William Bushnell Stout. Použitý systém odpruženia bol navrhnutý firmou Firestone ešte v roku 1933. Prototyp bol vybavený nezávislým pneumatickým odpružením pre všetky štyri kolesá. Prvenstvo tento automobil drží taktiež v použití laminátovej karosérie [4].

Firma Air Lift v roku 1949 prišla s konceptom vzduchového vaku vloženého do vinutej pružiny. Vzduchový vak svojim rozťahnutím vyplnil priestory medzi jednotlivými závitmi vinutej pružiny, čím zabránil úplnému stlačeniu vinutej pružiny pri naložení nákladu vyššej hmotnosti. Toto riešenie umožnilo zvýšiť nosnú kapacitu nákladu takmer každého automobilu alebo nákladného vozidla. Svoje uplatnenie v tom čase našiel tento koncept najmä u závodných automobilov. Jedno z prvých závodných áut využívajúcich technológiu firmy Air Lift bolo auto značky Oldsmobile, ktoré bolo v roku 1950 vybavené týmto systémom. Pri všetkých štyroch kolesách boli umiestnené nafukovacie butyl-kaučukové pružiny, plnené na hodnotu tlaku 7 - 138 kPa, čo umožnilo efektívne zaťaženie jednotlivých rohov podvozku a ovplyvnenie ovládateľnosti podľa potreby [5].

Cadillac Eldorado Brougham bolo prvé sériovo vyrábané auto s pneumatickým odpružením, uvedené na trh v roku 1957. Za výrobou tohto automobilu stojí firma General Motors, ktorá pri návrhu jeho odpruženia čerpala zo skúseností získaných vývojom vzduchového odpruženia pre lietadlá a nákladné vozidlá počas druhej svetovej vojny. Vyrobených ich však bolo len 400 kusov, keďže išlo o veľmi luxusný automobil. Auto obsahovalo pneumatický systém odpruženia v základnej výbave. Všetky štyri kolesá boli vybavené vzduchovou pružinou s pripojeným piestom (obr. 2), ktorá bola regulovaná pákovým ramenom pripojeným k náprave spojovacím tiahom. Išlo o otvorený typ systému, do ktorého bol vzduch vháňaný pomocou centrálného vzduchového kompresora zvonku. Plnenie vzduchových komôr ovládané pomocou ventilov a solenoidov sa kontinuálne prispôbovalo nákladu a jazdným podmienkam. Výsledkom bolo zachovanie konštantnej svetlej výšky bez ohľadu na hmotnosť nákladu a množstvo nerovností vozovky. V roku 1960 bol tento systém v základnej výbave pre tri modely Cadillac, a to Eldorado Seville, Biarritz a Brougham. Systém ale trpel na únik vzduchu zo vzduchových komôr, čo si vyžadovalo ich častú výmenu a tým zvýšené náklady na prevádzku automobilu. Kvôli tomuto nedostatku od neho Cadillac po roku 1960 upustil [6] [7].



Obr. 2 Systém pneumatického odpruženia Cadillac Eldorado Brougham z roku 1957 [8]

System vzduchového odpruženia ako voliteľnú výbavu začala ponúkať aj firma Buick pre svoje modely áut v roku 1958. Odpruženie nieslo názov „Vzduchovo-vyrovnávacie odpruženie“ („Air-Poise Suspension“) a pozostávalo zo štyroch vzduchových valcov. Umožňovalo automatickú úpravu svetlej výšky, ako aj nastavenie zdvihu až o 139,7 mm. V roku 1959 ponúkol Buick pre všetky modely áut voliteľný systém odpruženia s názvom „Vzduchová jazda“ („Air Ride“), ktorý kombinoval použitie oceľových vinutých pružín na prednej náprave a vzduchových pružín na zadnej [9].

Prvým nemeckým autom so samovyrovnávacím pneumatickým odpružením bol Borgward P100 z roku 1960, z ktorého vychádzal aj systém vzduchového odpruženia použitý firmou Mercedes-Benz u modelov Mercedes-Benz rady 300SE s typom karosérie W112 z roku 1962. Modely rady 300SE sa radili do kategórie luxusných automobilov, a to práve kvôli použitiu daného typu odpruženia, keďže išlo o pomerne stále novú technológiu. Systém využíval viacero regulačných ventilov pre distribúciu stlačeného vzduchu, a to hlavný ventil značky Bosch a dva ďalšie ventily, jeden na prednej a druhý na zadnej náprave. Pomocou týchto ventilov bolo zabezpečené ovládanie vzduchových pružín každého kola nápravy. Vzduchové pružiny boli v prevedení vakov upevnených na kužeľoch, čím sa úplne líšili od systému použitým firmou General Motors u modelov Cadillac. Vďaka použitiu kužeľovitého tvaru bolo odpruženie veľmi variabilné. Udržanie konštantnej svetlej výšky a zlepšenie jazdných vlastností boli hlavnými prednosťami použitého systému v porovnaní s bežne používanými oceľovými pružinami. Neskôršie verzie s typom karosérie W109 mali funkciu úpravy jazdnej výšky, kedy bolo možné ju zvýšiť až o 50 mm oproti normálnej jazdnej výške. V roku 1964 boli použité väčšie verzie kužeľovitých pružín u modelov rady 600 s typom karosérie W100, u ktorých bol systém stlačeného vzduchu použitý taktiež pre pohon brzdového servomotora. Tento systém bol u modelovej rady 600 používaný až do roku 1981 [3].

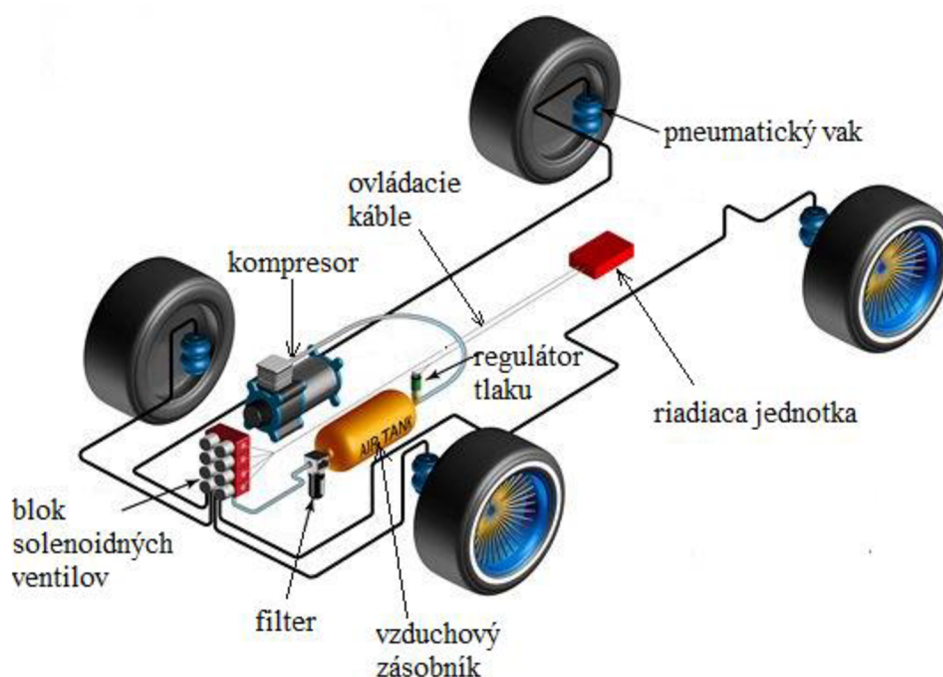
Na americkom trhu v rokoch 1960 až 1983 nebolo vzduchové odpruženie používané pre žiadne štandardne vyrábané modely. Až kým v roku 1984 spoločnosť Ford Motor Company predstavila model Lincoln Continental Mark VII [10].

Pokrokom v oblasti pneumatických systémov odpruženia bolo uvedenie prvého elektronicky ovládaného vzduchového odpruženia, o čo sa zaslúžila Toyota v roku 1986 predstavením modelu Soarer so systémom TEMS (Toyota Electronic Modulated Suspension), čo v preklade znamená elektronicky prispôsobivé odpruženie. Išlo o semiaktívny typ odpruženia, pri ktorom bola elektronicky ovládaná tuhosť tlmičov [9] [11]. O štyri roky neskôr, v roku 1990, prišla s elektronicky ovládaným vzduchovým odpružením (ECAS - Electronically Controlled Air Suspension) aj firma Dunlop pre automobily značky Range Rover [12].

Systémy pneumatického odpruženia začali byť čím ďalej, tým viac používané najmä pre luxusné modely automobilov rôznych značiek ako Maybach, Rolls-Royce, Lexus, Mercedes-Benz, Porsche, Audi, Lincoln, Volkswagen a mnoho ďalších. Medzi cenovo dostupnejšie patria modely značky Citroen s hydropneumatickým systémom odpruženia, ktorý je kombináciou hydraulického a pneumatického odpruženia. Avšak napriek tomu, že má pneumatické odpruženie za sebou pomerne dlhý historický vývoj, je dodnes považované za nadštandardnú výbavu a vo väčšine prípadoch je výsadou len luxusnejších automobilov.

2 PRVKY SYSTÉMOV PNEUMATICKÉHO ODPRUŽENIA

Systémy pneumatického odpruženia patria rozhodne medzi tie konštrukčne náročnejšie, pretože pozostávajú z mnohých častí, z čoho vyplýva aj jedna z mála nevýhod tohto typu systémov, a to vyššia hmotnosť oproti bežne používaným typom odpruženia. Množstvo zastúpených komponentov je dôsledkom aj vyššej ceny a náročnejšej údržby týchto systémov, preto sú tieto systémy používané najmä v drahších a luxusnejších automobiloch. Avšak neustálym vývojom týchto komponentov sa znižujú ich rozmery, hmotnosť a tiež nároky na údržbu, vďaka čomu sa začínajú objavovať tieto systémy aj u cenovo dostupnejších áut. Nasledujúca časť práce sa bude zaoberať práve popisom hlavných komponentov pneumatického systému odpruženia používaných rôznymi typmi týchto systémov. Medzi tieto komponenty patria vzduchové pružiny, tlmiče, regulačné ventily (výškový ventil, vzduchové ventily), komponenty pre zásobovanie vzduchu (kompresor, vzduchový zásobník, vzduchové prepojenia), prvky ovládacieho systému (senzory, riadiaca jednotka). Usporiadanie jednotlivých komponentov systému je uvedené na obrázku (3) [2].

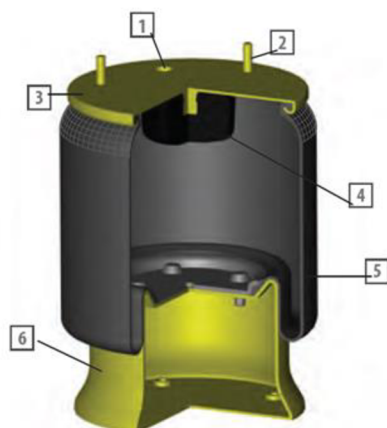


Obr. 3 Schéma pneumatického systému odpruženia [13]

2.1 VZDUCHOVÉ PRUŽINY

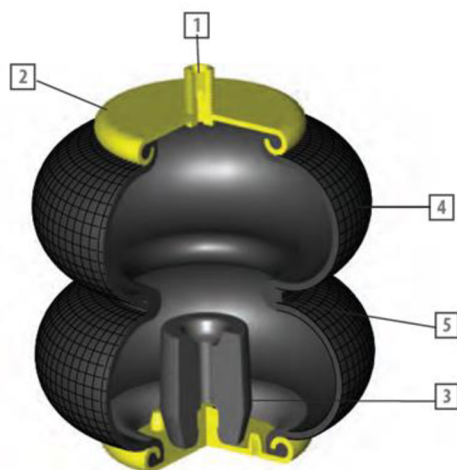
Tieto pružiny využívajú na odpruženie pružnosť plynov v uzavretej nádobe. Ako pružiacie médium je používaný vzduch, poprípade dusík. Najčastejším typom prevedenia vzduchových pružín je gumový mech v tvare vaku alebo vlnovca, ich prevedenie zobrazuje obrázok (4). Keďže sú vaky vyrobené z gumy, postupom času vplyvom vonkajších faktorov môže dôjsť ich stvrdnutiu a následnému praskaniu. Vlnovcové pružiny môžu mať dva až štyri vlnovce a spevňujú sa kordovými vložkami, čo zabezpečuje ich vysokú pevnosť a odolnosť voči prerazeniu. Keďže pri pružení dochádza len k ohýbaniu steny vlnovca, vyznačujú sa preto

aj vysokou životnosťou. Za to u vakových pružín sa pri pružení vak odvaluje po pieste, pričom dochádza k jeho značným deformáciám. Kvôli tomu pre dosiahnutie vysokej životnosti musí byť vak z veľmi odolného materiálu a piest vhodne tvarovaný. Pružiny sú taktiež vybavené bezpečnostným dorazom obmedzujúcim prepruženie v zvislom smere. Pri veľkom prepružení zvyšuje progresivitu vzduchovej pružiny a v prípade úniku vzduchu zamedzuje úplnému poklesu rámu vozidla [14].



Vaková pneumatická pružina

1. Prívod vzduchu
2. Upevňovacie kolíky
3. Doska
4. Bezpečnostný doraz
5. Gumový vak
6. Piest

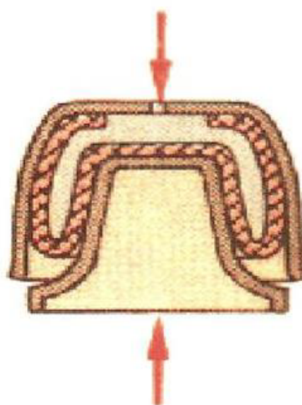


Vlnovcová pneumatická pružina

1. Prívod vzduchu v upevňovacom kolíku
2. Doska
3. Bezpečnostný doraz
4. Gumový vlnovec
5. Obruč

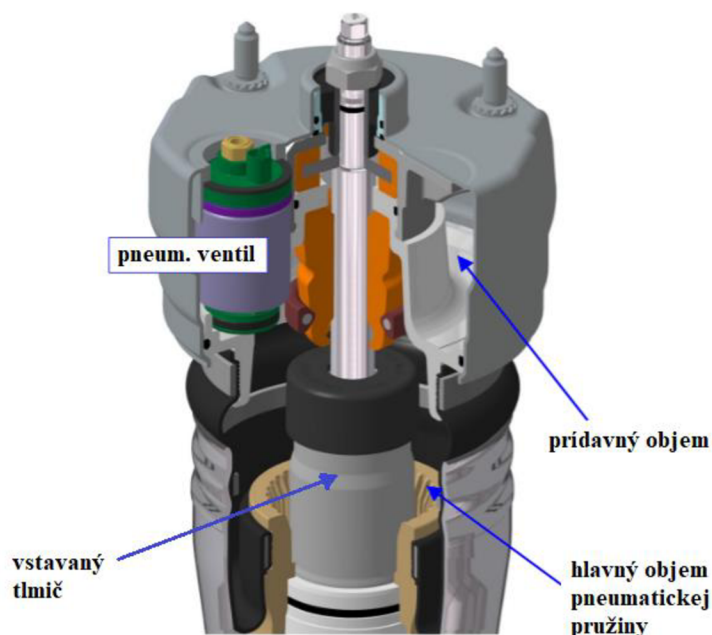
Obr. 4 Vaková a vlnovcová pneumatická pružina [15]

Pneumatická pružina môže byť vyhotovená aj z kovového valca a piestu, ktoré sú spojené membránou, toto prevedenie je zobrazené na obrázku (5). Podobne ako u vakovej pružiny, pri pružení dochádza k odval'ovaniu membrány po stene piestu pri jeho zasúvaní do valca [16].



Obr. 5 Pneumatická pružina s membránou [16]

Aby vzduchové pružiny nezaberali toľko priestoru najmä na prednej náprave, sú v súčasnosti používané pneumatické pružiny so vstavaným tlmičom (obr. 6). Pružný gumový mech je upevnený na plášti tlmiča, po ktorom sa mech pri prepružení odval'uje. Pri zmene zaťaženia sa mení množstvo vzduchu v mechu, a tým aj jeho tlak v rozmedzí 0,1 MPa až 0,8 MPa. Toto konštrukčné riešenie má prínos aj z hľadiska redukcie hmotnosti. Novšie vzduchové pružiny disponujú taktiež prídavným objemom vzduchu pre zlepšenie pružiacich vlastností. Vzduch prúdi medzi hlavným a prídavným objemom cez pneumatické prepojenia a tok vzduchu je regulovaný pneumatickým ventilom. Pre dosiahnutie maximálneho komfortu sú pneumatické prepojenia otvorené a pneumatický ventil reguluje v závislosti od zaťaženia celkový objem vzduchu pružiny, zvýšením objemu pružiny sa zníži jej tuhosť. Naopak pre dosiahnutie maximálnej bezpečnosti a stability pri priečnych dynamických manévroch sú prepojenia uzatvorené, čím sa dosiahne väčšej tuhosti. Zavedenie prídavného objemu umožňuje teda zväčšiť rozsah tuhosti pneumatickej pružiny podľa potreby, vďaka čomu tieto pružiny minimalizujú konflikt medzi komfortom a bezpečnosťou jazdy. Pri disipácii energie systémom môže prúdenie vzduchu pneumatickými prepojeniami vyvolávať tlmiace sily, ktoré sa tiež podieľajú na zlepšení odpruženia [16] [17].



Obr. 6 Pneumatická pružina s prídavným objemom vzduchu a vstavaným tlmičom prednej nápravy Porsche Panamera [18]

2.2 TLMIČE

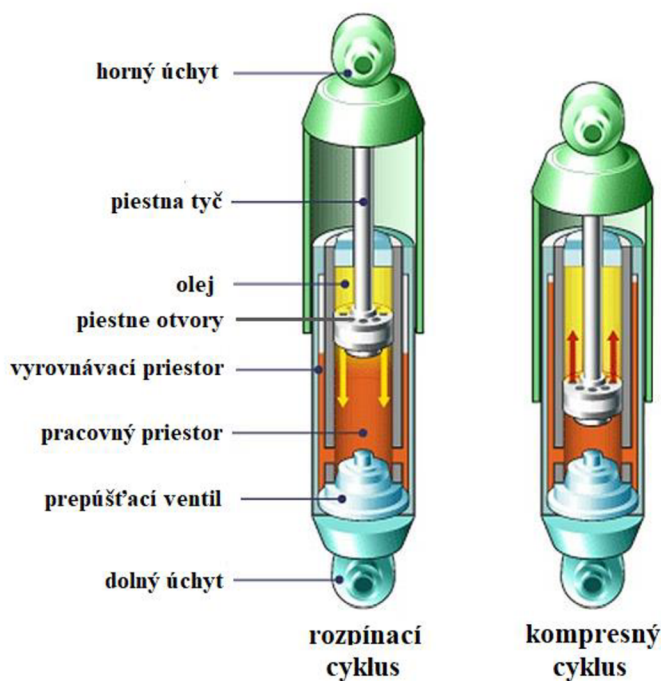
Vzduchové pružiny sa vyznačujú tým, že nemajú samotlmiaci účinok. Preto je nutné použiť tlmiče pre utlmenie vlastných kmitov pružiny vznikajúcich po prechode kolesa nerovnosťami vozovky, a tým zabrániť nadmernému vertikálnemu rozkmitaniu karosérie. Z hľadiska bezpečnosti je veľmi dôležitý styk kolies s vozovkou, ktorý je potrebný k prenosu brzdných a hnacích síl a k prenosu bočných síl pri zatáčaní. A preto úlohou tlmičov je taktiež udržovať kmitanie neodpružených častí v čo najmenšej možnej miere, aby bol zabezpečený lepší, pokiaľ možno neprerušený, styk kolies s vozovkou [14] [16].

Tlmiče podľa typu konštrukcie delíme na jedноплаšťové a dvojплаšťové, pričom priestor vo vnútornom valci je pracovný. Každý tlmič obsahuje ešte aj ochranný plášť. V pracovnom priestore sa pohybuje piest ovládaný piestnicou spojenou s ochranným plášťom. Účinnosť tlmiča v jednotlivých smeroch závisí od počtu a veľkosti prierezu otvorov v pieste, ktoré sú osadené samočinnými ventilmi. Tlmičom je osadené každé koleso vozidla a je umiestený medzi nápravou a rámom. Kovovo-gumové puzdra spájajú tlmič s vozidlom, pričom s rámom alebo karosériou je spojený ochranný plášť a s nápravou vnútorný, poprípade aj ďalší plášť. V súčasnosti sa prakticky používajú len teleskopické dvojčinné kvapalinové tlmiče, ktoré pracujú pri pohybe nápravy od vozidla a aj opačne, čiže v oboch smeroch. U bežných tlmičov je účinnosť tlmiča pri pohybe nápravy k vozidlu menšia ako pri pohybe v opačnom smere, a to kvôli tomu, aby tlmič čo najmenej ovplyvňoval tuhosť pružiny [16].

Základné rozdelenie tmičov [16]:

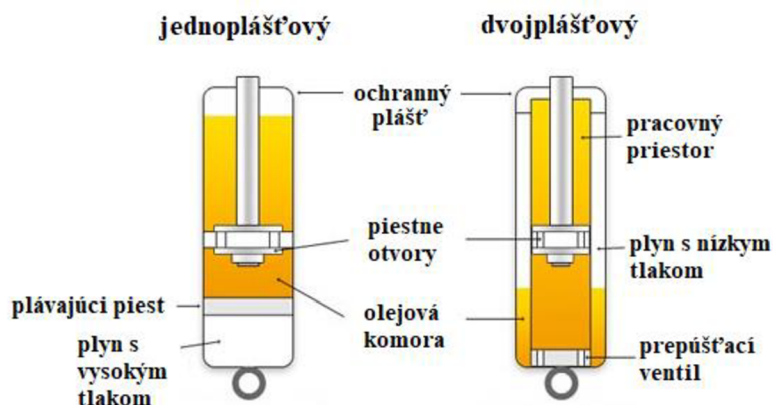
- kvapalinové
- plynokvapalinové

U **kvapalinových tmičov** je pracovným médiom olej vo vnútornom valci a existujú len v dvojplášťovom prevedení (obr. 7). Medzi vnútorným a vonkajším plášťom sa nachádza vyrovnávací priestor vyplnený vzduchom a je spojený s atmosférou. Množstvo oleja v pracovnom priestore je regulované v závislosti od smeru pohybu piestu pomocou prepúšťacieho ventilu. Pri pohybe nápravy k rámu je olej spod piestu pretlačovaný cez otvory v pieste do priestoru nad piestom. Pracovný priestor sa znižuje vnikaním piestnice a prebytok oleja je tak vytlačovaný cez prepúšťací ventil do vyrovnávacieho priestoru. V opačnom smere, pri pohybe nápravy od rámu, olej preteká spod piesta nad piest a nedostatok oleja v pracovnom priestore je doplnený nasatím oleja z vyrovnávacieho priestoru [16].



Obr. 7 Dvojplášťový kvapalinový tmič [19]

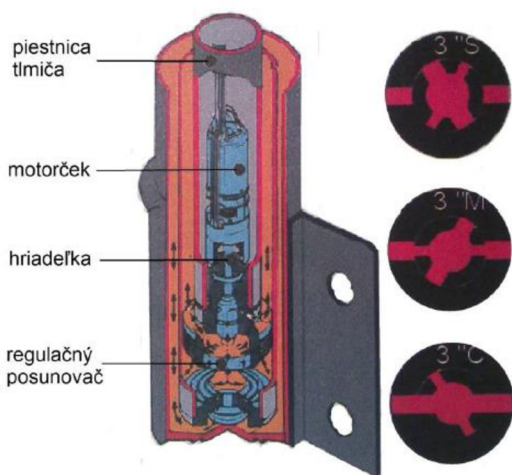
Pracovným médiom **plynokvapalinových tmičov** je taktiež olej, ale priestor nad olejom u dvojplášťového prevedenia je vyplnený dusíkom a nie je spojený s atmosférou, vďaka čomu je možné udržať v tmiči určitý pretlak, ktorý zamedzuje zavzdušneniu tmiča. Princiálne však fungujú rovnako ako kvapalinové dvojplášťové tmiče a konštrukčne sa od nich taktiež nelíšia. Tlak dusíka nad hladinou oleja sa pohybuje v rozmedzí 0,2 MPa až 0,8 MPa, a preto ich označujeme aj ako nízkotlakové tmiče. Plynokvapalinové tmiče môžu byť aj v jednoplášťovom vyhotovení. Tieto tmiče nedisponujú vyrovnávacím priestorom, ale majú plávajúci piest, ktorý vyrovnáva zmeny objemu pracovného priestoru kompresiou alebo expanziou plynu (dusíka) pod plávajúcimi piestom. Keďže tlak plynu u týchto tmičov je 2 MPa až 3 MPa, označujeme ich aj ako vysokotlakové tmiče. Rozdiel v konštrukcii týchto tmičov zobrazuje obrázok (8) [16].



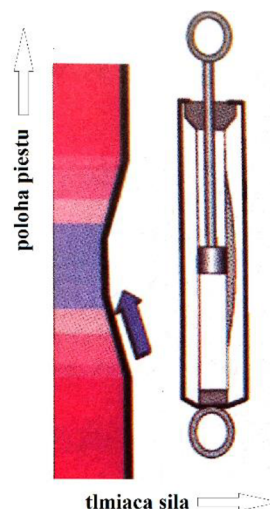
Obr. 8 Jednoplášťový a dvojplášťový plynokvapalinový tlmíč [20]

Ďalšie typy tlmíčov:

- **Elektronicky ovládaný tlmíč** (obr. 9) má vo vnútri piestu umiestnené šupátko regulujúce prietok oleja otvormi v pieste. Olej v tlmíči môže prúdiť vertikálne centrálnym otvorom v šupátku, ako aj horizontálne priečnymi kanálkami, ktoré môžu byť uzavreté alebo do rôznej miery otvorené. Šupátko je nastavované elektromotorom ovládaným elektronickou riadiacou jednotkou. Na základe údajov z rôznych senzorov nastavuje riadiaca jednotka vhodný stupeň regulácie tlmíča, a to buď základný, komfortný alebo športový [16].
- **Polohovo citlivý tlmíč** (obr. 10) je označovaný na základe použitej technológie polohovo citlivého tlmenia aj PSD (Position Sensitive Damping) tlmíč. Ide o nízkotlakový plynokvapalinový tlmíč a plní rovnakú funkciu ako elektronicky ovládaný tlmíč avšak bez použitia elektroniky. Pod názvom Sensa-Trac je vyrábaný belgickou firmou Monroe. Tlmíč je vybavený obtokovým kanálom v strednej časti. Toto konštrukčné prevedenie zabezpečuje progresivitu tlmenia, pretože pri pohybe piestu v strednej časti tlmíča časť oleja prúdi kanálom, čo znižuje jeho účinnosť. Naopak pri väčšom zaťažení sa piest pohybuje buď z časti v oblasti obtokového kanála, alebo úplne mimo neho, a vtedy má väčšiu účinnosť [16].

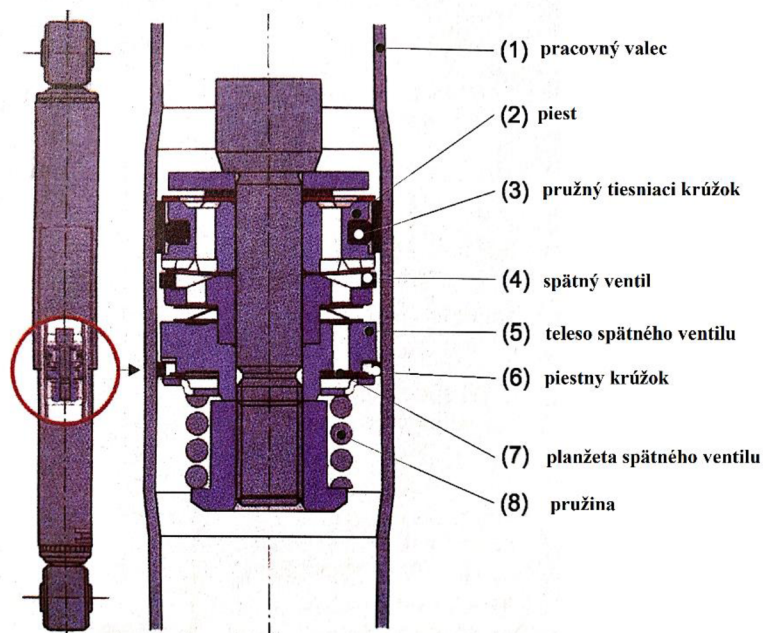


Obr. 9 Elektronicky ovládaný tlmíč [16]



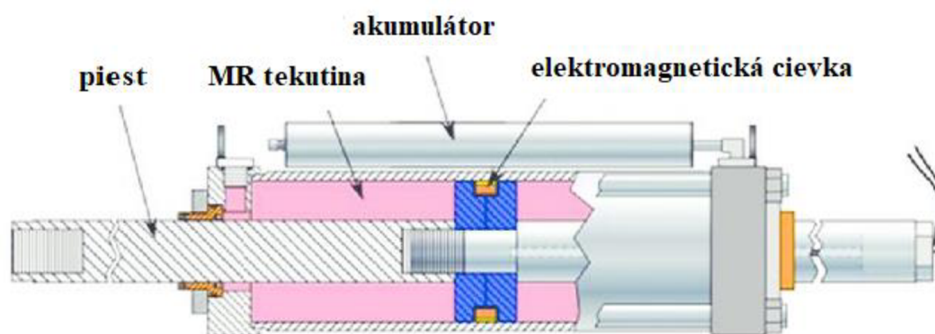
Obr. 10 Polohovo citlivý tlmíč [16]

- **Tlmič systému DCD** (Displacement Conscious Damping) má tiež ako prechádzajúci typ tlmiča premenlivú účinnosť, ktorej je u tohto tlmiča dosiahnutej rozšírením priemeru strednej časti pracovného valca. V tejto oblasti má tlmič nižšiu účinnosť a pri pohybe piestu v častiach s enším priemerom má naopak vyššiu účinnosť. Obrázok (11) zobrazuje priblíženie strednej časti tlmiča a popis jej častí [16].



Obr. 11 Tlmič systému DCD [16]

- **Elektroreologické a magnetoreologické tlmiče** využívajú tzv. „inteligentný olej“, ktorého viskozitu je možné meniť pôsobením elektrického alebo magnetického poľa. Zmenou viskozity sa mení tlmiaca charakteristika tlmiča. V elektroreologickej kvapaline pri vystavení elektrickému poľu dochádza k polarizácii guľčiek polyméru, ktoré sa spájajú a vytvárajú reťazce, čo má za dôsledok zvýšenie viskozity kvapaliny. Veľkosť viskozity sa mení v závislosti od veľkosti elektrického poľa. Nevýhodou je potrebné vysoké napätie pre vytvorenie požadovaného elektrického poľa. Lepšou variantnou sú magnetoreologické tlmiče (obr. 12), u ktorých pole pôsobiace na kvapalinu je magnetické a generuje sa prechodom prúdu vinutím cievky. Oproti predchádzajúcemu typu majú kompaktnější rozmery a fungujú pri nižšom napätí [16] [21].



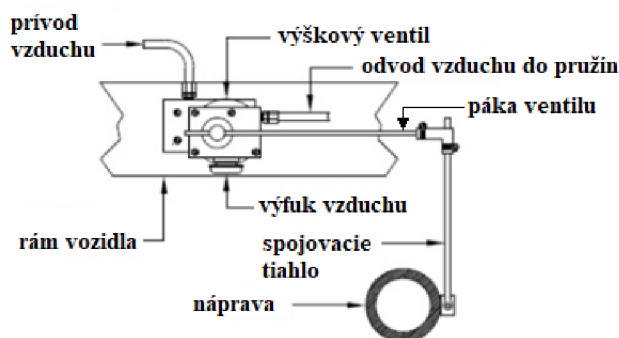
Obr. 12 Magnetoreologický tlmič [22]

2.3 REGULAČNÉ VENTILY

Výškový ventil (obr. 13) plní úlohu stabilizátora a regulátora svetlej výšky, čiže vyrovnáva náklon karosérie vozidla v zákrutách a udržiava konštantnú výšku vozidla od vozovky. Je upevnený na ráme vozidla a prepojený s nápravou spojovacím tiahom, umiestnenie je zobrazené na obrázku (14). Pri zaťažení vozidla alebo pri prejazde nerovnosťami dochádza k zmene vzdialenosti rámu vozidla a nápravy, v dôsledku čoho spojovacie tiahlo natáča páku ventilu, a tak sa reguluje priechod vzduchu medzi zásobníkom stlačeného vzduchu a pneumatikami [23].



Obr. 13 Výškový ventil [24]



Obr. 14 Umiestnenie výškového ventilu [2]

Vzduchové ventily slúžia na reguláciu prietoku vzduchu do rôznych častí systému. Plnia dôležitú úlohu pri izolácii vzduchu a pri jeho distribúcii systémom. V skorších verziách pneumatikových systémov odpruženia bolo používané dvojcestné rozloženie, čiže vaky umiestnené pri kolesách nápravy boli prepojené vzduchovým potrubím a vzduch prúdil medzi nimi. Pri prejazde zákrutou dochádzalo k stlačeniu vaku na jednej strane a vzduch z neho bol vytlačený do vaku na druhej strane, čo zväčšilo objem vaku. Toto malo za následok kolísanie vozidla pri prejazde zákrutou. V súčasnosti využívajú systémy viacero ventilov, čo zabezpečuje kontrolu nad kolísaním a lepšie ovládanie vozidla. V elektronicky ovládaných systémoch je používaný blok **solenoidných (elektromagnetických) ventilov** ovládajúcich plnenie a vyfukovanie každého vaku. Riadiaca jednotka dáva príkaz na otvorenie alebo zatvorenie solenoidných ventilov na základe meniacich sa jazdných podmienok, čím sa reguluje množstvo vzduchu v každom vaku zvlášť [25].

2.4 ZÁSBOVANIE VZDUCHU

Kompresor je poháňaný priamo motorom alebo remenicou a je upevnený buď priamo na motore, alebo pomocou držiakov a upínadiel. Má za úlohu zásobovať stlačeným vzduchom všetky časti vzduchovej techniky vo vozidle. Tlak stlačeného vzduchu v systéme sa pohybuje v rozmedzí 0,52 MPa (75 psi) až 0,93 MPa (135 psi). Pri dosiahnutí požadovaného tlaku v systéme regulátor tlaku zastaví činnosť kompresora a naopak pri poklesnutí tlaku ho opäť spustí. Pretlakovaniu systému v prípade zlyhania regulátora tlaku sa predchádza umiestnením bezpečnostných ventilov za hlavný zásobník, poprípade odlučovač vody, ak je v systéme. K ich otvoreniu dochádza zvyčajne pri dosiahnutí tlaku 1035 kPa. Stlačený vzduch je v systéme uchovávaný vo **vzduchových zásobníkoch**, ktorých rozmiestnenie a počet sa líši u každého systému. Niektoré systémy môžu mať 10 až 12 rozličných zásobníkov. Podľa

funkcie sú zásobníky aj rozlične označované ako primárne, sekundárne, mokré, predné brzdové alebo zadné brzdové zásobníky. Vonkajší vzduch nasávaný z okolia obsahuje vlhkosť a pri prechode kompresorom sa doň môže vmiešať aj olej používaný na mazanie kompresora. Vlhký vzduch s rozptýleným olejom je pre pneumatikový systém nežiaduci, a preto sú zásobníky na dne vybavené výpustnými ventilmi na odpustenie skondenzovanej vody a prímеси oleja. Najviac vlhkosti a prípadne oleja je odstránených v hlavnom (tzv. „mokrom“) zásobníku, do ktorého vzduch vstupuje ako prvý. Niektoré systémy majú na redukciu vlhkosti ešte odlučovač vody umiestnený medzi kompresorom a hlavným zásobníkom. Modernjšie systémy sú vybavené dvomi okruhmi (primárny, sekundárny) s vlastnými zásobníkmi. V prípade zlyhania primárneho okruhu sa o zásobovanie vzduchu do systému postarajú sekundárne zásobníky. Stlačený vzduch prúdi medzi jednotlivými prvkami systému pomocou **vzduchových trubiek** umiestnených pozdĺž rámu vozidla. Väčšina trubiek býva vyrobených z gumovo-polyuretánového materiálu, ale môžu byť aj v ocelovom prevedení pre dosiahnutie vyššej pevnosti [2] [26].

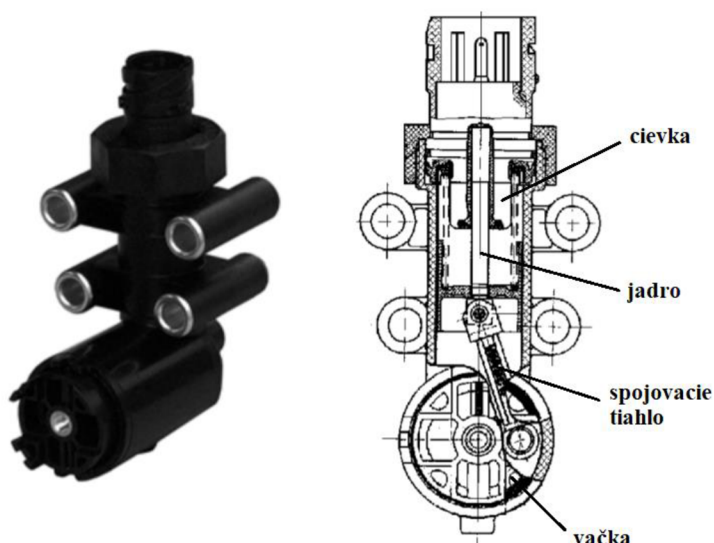
2.5 OVLÁDACÍ SYSTÉM

V aktívnych systémoch pneumatikového odpruženia sú používané rôzne typy **senzorov** najmä na meranie akcelerácie odpruženej a neodpruženej hmoty. Signály získavané senzormi monitoruje **riadiaca jednotka**, ktorej software ich vyhodnocuje v reálnom čase, na základe čoho je zabezpečené okamžité prispôsobenie odpruženia [2] [25].

Niektoré typy senzorov aktívneho systému pneumatikového odpruženia [2]:

- senzor polohy
- senzor výšky
- senzor tlaku
- senzor nerovností vozovky

Senzor výšky (obr. 15) je umiestnený na ráme vozidla a obsahuje cievku s pohybujúcim sa jadrom. Jadro je pripojené spojovacím tiahom k vačke na kľukovej hriadeľi a kľuka je pripojená k náprave. Pri zmene výšky medzi rámom vozidla a nápravou dochádza k natočeniu kľuky a následnému pohybu jadra v cievke. Pohyb jadra spôsobuje zmenu indukčiance cievky monitorovanú riadiacou jednotkou, ktorá spracovaním týchto zmien v krátkych intervaloch vyhodnocuje svetlú výšku vozidla a následne ju upravuje ovládaním solenoidných ventilov na požadovanú hodnotu. Významnú funkciu zastávajú taktiež senzory tlaku, ktoré monitorujú tlak v primárnom a sekundárnom okruhu, a v prípade poklesu tlaku pod 414 kPa (60 psi) dochádza k aktivácii výstražného zariadenia nízkeho tlaku [24] [26].



Obr. 15 Senzor výšky [24]

Riadiaca jednotka zohráva hlavnú úlohu v elektronicky ovládaných systémoch. V reálnom čase neustále vyhodnocuje vstupné signály od senzorov a porovnáva ich s uloženými hodnotami v pamäti, na základe čoho vykonáva náležité nastavenia systému. Tieto signály spracúva mikroprocesor s pripojenou pamäťou obsiahnutý v riadiacej jednotke. S jednotlivými komponentami je spojená pomocou 35-pólového alebo 25-pólového konektora obsahujúceho vstupy pre senzor výšky, senzor tlaku a solenoidné ventily. Obsadenosť jednotlivých vstupov konektora závisí od použitého systému, preto riadiaca jednotka môže byť použitá pre rôzne konfigurácie systémov. Úlohou riadiacej jednotky je okrem iného aj monitorovanie funkcií všetkých systémových komponentov, sledovanie zaťaženia náprav a testovanie prijímaných signálov z hľadiska chybných detekcie [24].

3 PRINCÍP ČINNOSTI SYSTÉMOV PNEUMATICKÉHO ODPRUŽENIA

Systémy pneumatického odpruženia využívajú elastického správania plynov v uzavretých nádobách. Vďaka použitiu vzduchových pružín je dosiahnutá samočinná progresivita odpruženia, pretože tuhosť pružín sa mení v závislosti od hmotnosti nákladu alebo aj v závislosti od podmienok jazdy. Keďže pneumatické pružiny nedokážu viesť nápravu, túto funkciu preberajú pozdĺžne a priečne výkyvné ramená alebo stabilizátory. Pružiacim médiom v pružinách je plyn, ktorý má však nízke tlmiace účinky, preto sú u pneumatických systémov odpruženia spolu so vzduchovými pružinami používané aj rôzne typy tlmičov, ktoré tlmia rozkmitanie nápravy po prechode nerovnosťami vozovky [27].

Z hľadiska priebehu pracovného cyklu pneumatického odpruženia rozlišujeme dva typy systémov. Prvým typom je **otvorený systém**, v ktorom kompresor nasáva vzduch priamo z okolia a po jeho stlačení ho rozvádza do vzduchových pružín. Použitý vzduch odchádza priamo do okolia a tento typ systému je používaný u úžitkových vozidiel a autobusov. Viac používaným typom je **uzavretý systém**. Obsahuje navyše vzduchový zásobník na úschovu stlačeného vzduchu, ktorý prúdi v obvode medzi zásobníkom a vzduchovými pružinami. Tlak vzduchu v systéme je udržiavaný na požadovanej hodnote vďaka použitiu vzduchového zásobníka, ktorý zabezpečuje taktiež plynulú zmenu tlaku vzduchu, čo je výhodou oproti otvorenému systému [25].

Pracovný cyklus systému prebieha nasledovne: kompresor nasáva vzduch z okolia a zabezpečuje jeho stlačenie, následne vzduch prechádza odlučovačom vody, čo ho zbaví nežiaducej vlhkosti a ďalej je vedený cez regulátor tlaku do vzduchových zásobníkov, odtiaľ je vzduch distribuovaný vzduchovými trúbkami k jednotlivým vzduchovým vakom, v ktorých sú tlak a množstvo vzduchu regulované pomocou výškových ventilov na požadovanú hodnotu. U elektronicky ovládaného systému je plnenie vakov zabezpečené solenoidnými ventilmi ovládanými riadiacou jednotkou, ktorá neustále vyhodnocuje informácie získavané z rôznych senzorov [14] [25].

3.1 TERMODYNAMICKÉ VLASTNOSTI PNEUMATICKÝCH PRUŽÍN

Pružiacie vlastnosti pneumatického systému odpruženia sú podmienené tuhosťou pružiny, ktorú určujú vlastnosti plynu vo vaku a vlastnosti plynov sú v podstatnej miere ovplyvnené termodynamickými zmenami. V počiatočnom nezaťaženom stave sa nachádza vo vaku určité množstvo molekúl plynu udávajúce jeho hmotnosť m_G . Táto hmotnosť je definovaná systémovým tlakom p_0 a objemom vaku V_0 . Systémový tlak p_0 je určený počas výroby vaku a vzťahuje sa k izbovej teplote 293,15 K (20 °C). Tento počiatočný stav popisuje stavová rovnica ideálneho plynu v tvare [28]

$$p_0 V_0 = m_G r T. \quad (1)$$

p_0 - systémový tlak, V_0 - počiatočný objem vaku, m_G - počiatočná hmotnosť plynu v nezaťaženom stave, r - merná plynová konštanta, T - teplota plynu/okolia

Z rovnice (1) vyplýva, že akákoľvek zmena teploty spôsobená buď vonkajšími vplyvmi, alebo samotnou činnosťou systému sa prejaví izochorickou zmenou tlaku plynu vo vaku,

čo vo výsledku ovplyvní tuhosť pružiny. S týmito zmenami je nutné počítať pri návrhu systému, ktorý bude počas prevádzky vystavený rôznym teplotám. Zmena tlaku plynu v závislosti na teplote je daná rovnicou [28]

$$p_{0,T} = p_0 \frac{T}{T_0}. \quad (2)$$

$p_{0,T}$ - tlak vyvolaný zmenou teploty, T_0 - pôvodná teplota plynu

Ako už bolo uvedené, samotná činnosť systému ovplyvňuje teplotu plynu. Statické zaťaženie systému má pomalý priebeh a patrí sem napríklad zvýšenie hmotnosti nákladu alebo počtu pasažierov. Dochádza pri ňom k pomalej kompresii plynu a zvýšeniu jeho tlaku. Teplo vznikajúce pomalým stláčaním plynu sa stíha odvádzať do okolia, a preto sa jeho teplota nemení (ostáva konštantnou) a zmena tlaku prebieha izotermicky. Pre výpočet zaťaženia s pomalým priebehom vychádzame teda z izotermického deja definovaného Boyle-Mariotteovou rovnicou [28]

$$V_1 = V_0 \frac{p_0}{p_1}. \quad (3)$$

V_1 - objem vaku pri statickom zaťažení, p_1 - tlak vyvolaný statickým zaťažením

Zmenou jazdných podmienok dochádza k dynamickému zaťaženiu systému, napríklad pri absorpcii rázov spôsobenými nerovnosťami vozovky alebo vyrovnávaním náklonu karosérie v zákrute, v týchto prípadoch adaptácia systému na zmenu podmienok prebieha veľmi rýchlo. V dôsledku rýchlej adaptácie odpruženia dochádza k pomalej disipácii a absorpcii tepla do okolia, čoho následkom je zmena teploty plynu. Za predpokladu, že nedochádza k žiadnej tepelnej výmene môžeme dej popísať rovnicou adiabatického deja [28]

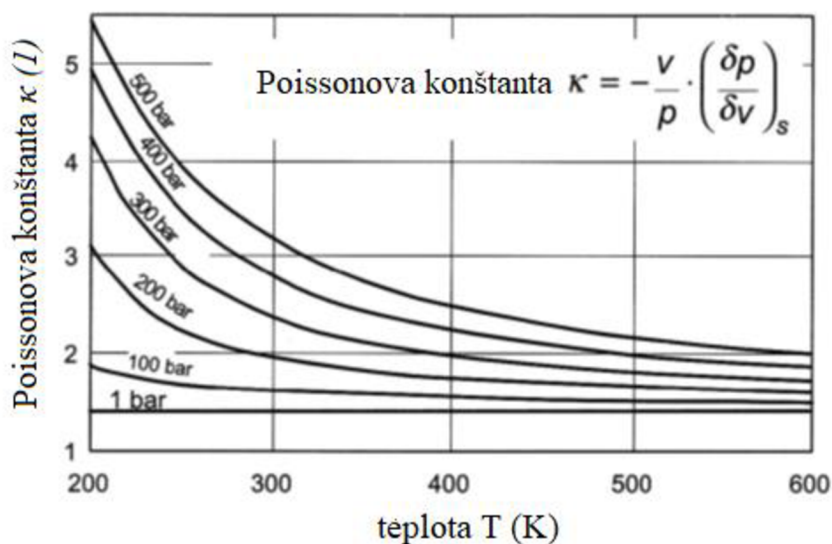
$$p_1 V_1^\kappa = p_2 V_2^\kappa. \quad (4)$$

κ - Poissonova konštanta, p_2 - tlak vyvolaný dynamickým zaťažením, V_2 - objem pri dynamickom zaťažení

V rovnici (4) ako adiabatický exponent vystupuje Poissonova konštanta κ , ktorá je určená pomerom c_p (merná tepelná kapacita za konštantného tlaku) a c_v (merná tepelná kapacita za konštantného objemu) a jej hodnoty sa bežne určujú za podmienok nízkeho tlaku a izbovej teploty. Príklady niektorých hodnôt Poissonovej konštanty [28]:

- $\kappa \approx 1,66$ pre 1-atómové plyny (napr. He)
- $\kappa \approx 1,40$ pre 2-atómové plyny (napr. N_2 , O_2 a taktiež vzduch)
- $\kappa \approx 1,30$ pre 3-atómové plyny (napr. CO_2)

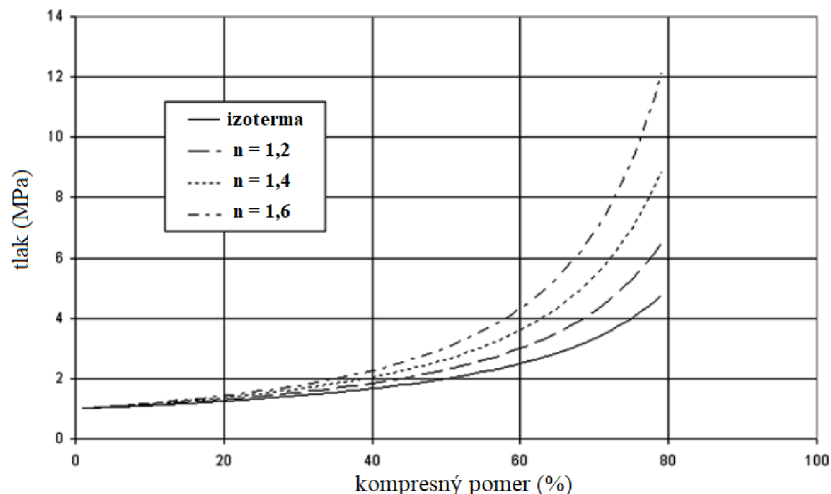
Dôležitým faktorom, ktorý má vplyv na činnosť pneumatického odpruženia je výrazná závislosť Poissonovej konštanty od teploty a tlaku plynu. Túto závislosť zobrazuje graf na obrázku (16) [28].



Obr. 16 Závislosť Poissonovej konštanty od teploty a tlaku [28]

Keďže ale reálny pneumatický systém umožňuje prenos väčšiny tepla do okolitých súčastí systému, zmeny v odpružení budú prebiehať polytropicky. Adiabatický exponent κ je nahradený polytropickým exponentom n , pre ktorý platí $1 < n < \kappa$. So zvyšujúcim množstvom odvedeného tepla sa hodnota polytropického exponentu približuje hodnote 1 a dochádza k takmer dokonalej výmene tepla, ako u izotermického deja. Avšak presné podmienky prenosu tepla sú väčšinou neznáme a veľmi ťažko sa zisťujú, a preto je aj zložité určiť presnú hodnotu polytropického exponentu z intervalu $(1; \kappa)$. Navyše aj samotná hodnota κ sa neustále mení vplyvom meniacej teploty a tlaku plynu vo vaku. Z tohto dôvodu je možné hodnotu polytropického exponentu len odhadnúť pre predbežné výpočty. Bežne uvažujeme pre výpočty hodnotu $n = 1,3$. Pri vysokých tlakoch a obzvlášť pri kombinácii s nízkymi prevádzkovými teplotami je odporúčané použiť $n = 1,4$ [28].

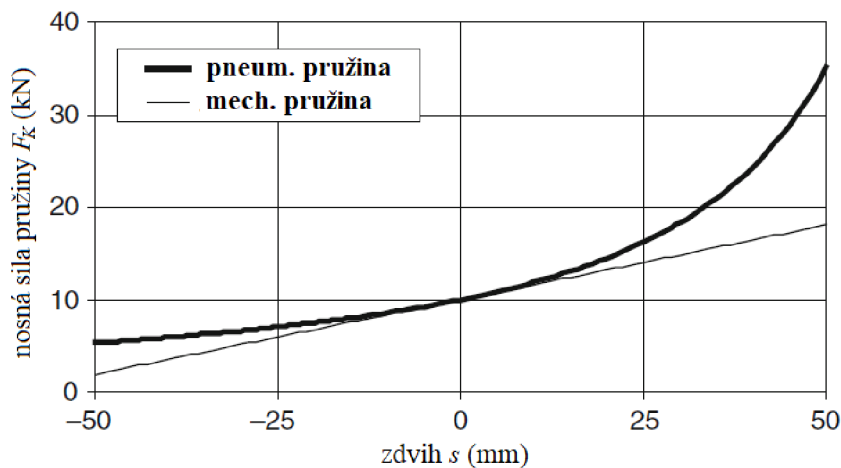
Vplyv polytropického exponentu n na priebeh p - V diagramu zobrazuje obrázok (17), z ktorého je zrejmé, že so zvyšujúcim sa exponentom n stúpa aj tlak plynu vo vaku, čo má výrazný vplyv na tuhosť pružiny [28].



Obr. 17 Priebeh p - V kriviek pre rozdielne polytropické exponenty [28]

3.2 PROGRESIVITA PNEUMATICKÝCH PRUŽÍN

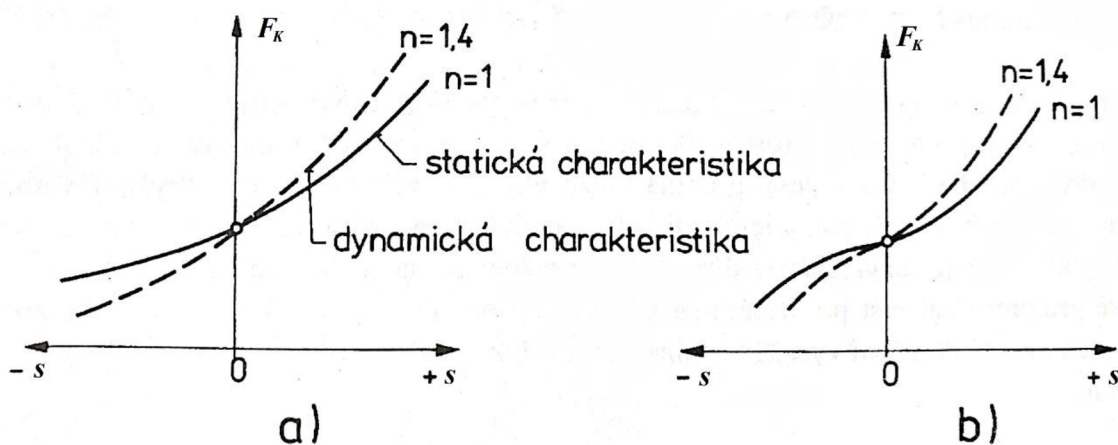
Progresivita pneumatických pružín je jednou z hlavných výhod oproti bežne používaným mechanickým pružinám (listové, vinuté pružiny). Znamená to, že tuhosť pružiny nie je konštantná, ale mení sa v závislosti od statického zaťaženia (zmena odpruženej hmotnosti) alebo dynamického zaťaženia (zmeny zaťaženia odpruženia vplyvom meniacich sa jazdných podmienok). Pružiacia charakteristika je závislosť nosnej sily pružiny F_K od svetlej výšky s (stlačenie/rozpínanie pružiny, zdvih) a je najvýznamnejšou charakteristikou popisujúcou progresívne správanie vzduchovej pružiny. U mechanickej pružiny je táto závislosť lineárna, zatiaľ čo u vzduchovej pružiny má výrazný progresívny priebeh, toto porovnanie je zobrazené na obrázku (18) [28].



Obr. 18 Závislosť tuhosti pružiny na statickom zatažení [28]

Podľa priebehu zaťaženia odpruženia sa môže systém nachádzať v niekoľkých rôznych stavoch, ktorými sú [28]:

- **stav 0:** Systém nie je zaťažený, $F_{F0} = 0$ N. Vak o objeme V_0 je naplnený plynom o tlaku p_0 produkovaným kompresorom [28].
- **stav 1:** Na systém pôsobí statické zaťaženie F_{F1} ($F_{F1} > F_{F0}$), ktoré izotermicky ($n = 1$) stláča plyn na objem V_1 s tlakom p_1 [28].
- **stav 2:** Systém je zaťažený dynamickou silou F_{F2} , ktorá osciluje okolo sily F_{F1} . Kompresia a expanzia plynu na objem V_2 s tlakom p_2 prebieha polytropicky ($n = 1,4$), nakoľko pri dynamickom zaťažení dochádza k rýchlym zmenám zaťaženia a zmene teploty plynu [28]. Rozdielny priebeh pružiacej charakteristiky pri statickom a dynamickom zaťažení zobrazuje obrázok (19).



Obr. 19 Vplyv exponentu polytropu na priebeh pružiacej charakteristiky: a) vlnovcová pružina, b) vaková pružina [14]

Pneumatické pružiny sa od jednoduchšej piestovej pružiny líšia najmä tým, že nemajú konštantnú činnú plochu, pretože sa mení v závislosti na prepružení a na vnútornom pretlaku. Nosná sila pneumatickej pružiny F_K závisí na vnútornom pretlaku p_K a činnnej ploche pružiny A_K . Táto závislosť je východiskom pre odvodenie vzťahu pre tuhosť pružiny [14] [28]

$$F_K(s) = p_K(s) A_K . \quad (5)$$

F_K - nosná sila pružiny, p_K - vnútorný pretlak v pružine, A_K - činná plocha pružiny, s - zdvih pružiny

Do rovnice pre polytropický dej medzi stavmi 1 a 2 [28]

$$p_1 V_1^n = p_2 V_2^n \quad (6)$$

n - polytropický exponent

dosadíme definíciu pre zmenu objemu závislú od zdvihu [28]

$$V_2 = V_1 - A_K s , \quad (7)$$

z čoho dostaneme vzťah popisujúci tlak p_2 [28]

$$p_2 = \frac{p_1 V_1^n}{V_2^n} = \frac{p_1 V_1^n}{(V_1 - A_K s)^n}. \quad (8)$$

Medzi stavmi 0 a 1 prebieha izotermický dej, pre ktorý platí [28]

$$p_1 V_1 = p_0 V_0, \quad (9)$$

z čoho vyplýva vzťah pre objem V_1 [28]

$$V_1 = \frac{p_0 V_0}{p_1} \quad (10)$$

Z rovnováhy nosnej sily pružiny a zaťažujúcej sily pôsobiacich na činnú plochu pružiny [28]

$$F_{F1} = p_1 A_K \quad (11)$$

F_{F1} - sila statického zaťaženia

plynie [28]

$$p_1 = \frac{F_{F1}}{A_K}. \quad (12)$$

Pre nasledujúce odvodenia môžeme použiť [28]

$$p_K(s) = p_2 \quad (13)$$

a dosadením predošlých vzťahov a úpravou dostaneme vzťah pre nosnú silu pružiny závislej od zdvihu [28]

$$F_K(s) = F_{F1} \frac{\left(\frac{p_0 V_0}{F_{F1}}\right)^n}{\left(\frac{p_0 V_0}{F_{F1}} - s\right)^n}. \quad (14)$$

Použitím substitúcie [28]

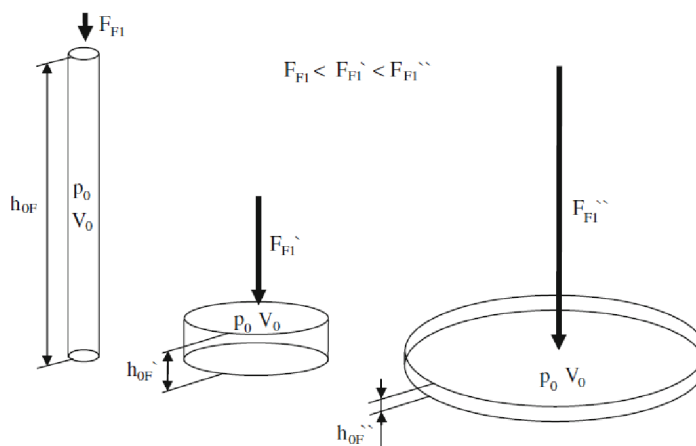
$$\frac{p_0 V_0}{F_{F1}} = h_{0F} \quad (15)$$

h_{0F} - parameter substitúcie

dostaneme zjednodušený zápis vzťahu pre $F_K(s)$ [28]

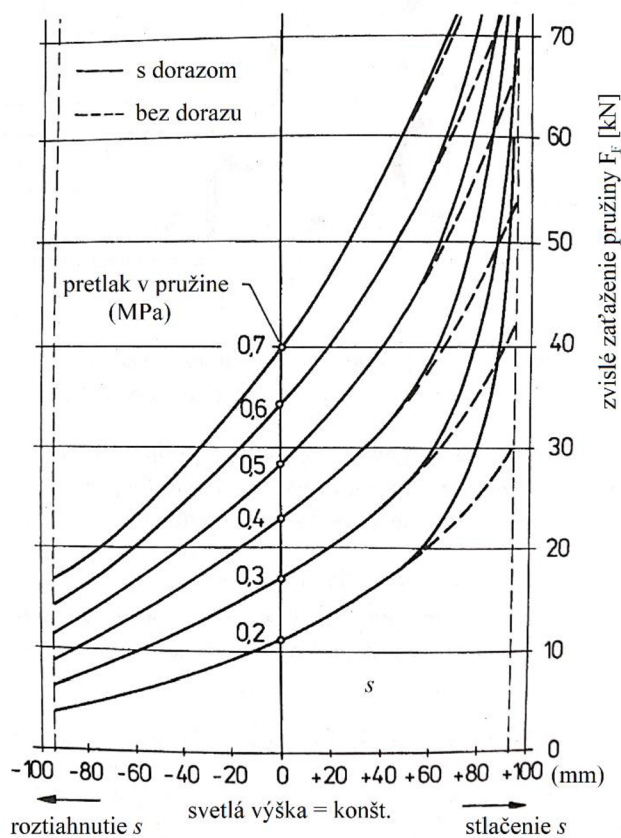
$$F_K(s) = F_{F1} \frac{h_{0F}^n}{(h_{0F} - s)^n}. \quad (16)$$

Rozmer h_{0F} je ekvivalentný výške stĺpca plynu o objeme V_0 a tlaku p_0 . Zmena rozmeru h_{0F} a činnnej plochy vaku v závislosti od veľkosti statického zaťaženia F_{F1} je zobrazená na obrázku (20) [28].



Obr. 20 Zmena parametra h_{0F} pre rozdielne statické zaťaženie F_{F1} [28]

Vyššie uvedený obrázok (20) zobrazuje jednu z najdôležitejších vlastností pneumatického systému odpruženia (progresivitu pružín) a to, že so zvyšujúcim zaťažením vzduchovej pružiny sa znižuje výška stĺpca plynu a pre udržanie konštantnej svetlej výšky je potrebné zachovať stály objem pružiny zvýšením tlaku plynu vo vaku, čo sa prejaví zvýšením tuhosti pružiny. Obrázok (21) zobrazuje nárast tlaku v pružine pri zvyšujúcom zaťažení pre zachovanie konštantnej svetlej výšky vozidla [28].



Obr. 21 Pružiacia charakteristika vzduchovej vlnovcovej pružiny s konštantnou svetlou výškou [14]

Závislosť tuhosti pružiny od zaťaženia je ďalšou dôležitou charakteristikou popisujúcou pneumatické pružiny a pre jej odvodenie budeme vychádzať zo základného matematického vyjadrenia pre tuhosť pružiny [28]

$$c = \frac{dF}{ds} = \frac{d(pA_K)}{ds} = A_K \frac{dp}{ds}. \quad (17)$$

c - tuhosť pružiny, dp - diferenciál tlaku, ds - diferenciál polohy

Použitím rovnice (8) a zderivovaním získame [28]

$$\frac{dp}{ds} = p_1 V_1^n (-n) (V_1 - A_K s)^{-n-1} (-A_K). \quad (18)$$

Využitím izotermického deja medzi stavmi 0 a 1, rovnice (10) a rovnováhy síl pôsobiacich na pružinu podľa rovnice (12) dostaneme zápis rovnice pre tuhosť pružiny v tvare [28]

$$c = A_K \frac{dp}{ds} = A_K \frac{F_{F1}}{A_K} \left(\frac{p_0 A_K V_0}{F_{F1}} \right)^n (-n) \left(\frac{p_0 A_K V_0}{F_{F1}} - A_K s \right)^{-n-1} (-A_K). \quad (19)$$

Riešením rovnice (19) a opätovným použitím h_{0F} zavedeného v rovnici (15) je vzťah pre tuhosť pružiny v závislosti na zdvihu [28]

$$c(s) = F_{F1} n \frac{h_{0F}^n}{(h_{0F} - s)^{n+1}}. \quad (20)$$

Z rovnice (20) nám vyplýva, že na tuhosť pružiny má vplyv aj premenná h_{0F} závislá na statickej zaťažujúcej sile F_{F1} , ktorá nie je konštantná. Po dosadení hodnoty zdvihu $s = 0$ do rovnice (20), získame tuhosť pružiny v normálnej (návrhovej) pozícii [28]

$$c = n \frac{F_{F1}^2}{p_0 V_0}. \quad (21)$$

Na základe týchto rovníc je založený princíp funkčnosti systémov pneumatického odpruženia. Zaujímavým faktom je, že geometria vaku alebo vlnovca sa v týchto rovniciach nikde nevyskytuje, a to pretože tuhosť gumového telesa s kordovými výstuhami nemá žiadny podiel na nosnosti pružiny dôsledku tenkosti a pružnosti steny vaku alebo vlnovca. Nosná sila je teda závislá len od vnútorného tlaku a tuhosť pružiny je daná závislosťou tejto sily na zdvihu. Na tuhosť pružiny má vplyv aj teplota plynu, ako bolo už spomínané v prechádzajúcej podkapitole, ktorá sa v priebehu činnosti systému môže meniť. So zvyšujúcou teplotou pružina mäkne a so znižujúcou teplotou sa stáva tuhšou [14] [28].

4 VPLYV SYSTÉMOV PNEUMATICKÉHO ODPRUŽENIA NA DYNAMIKU A KOMFORT JAZDY

Odpruženie spolu s tlmením má vplyv na pohodlie a bezpečnosť počas jazdy a stabilitu vozidla v zákrute. Na dynamiku jazdy a jazdný komfort vo veľkej miere vplyva vlastná frekvencia kmitov karosérie a nápravy vozidla. K rozkmitaniu karosérie (odpruženej hmoty vozidla) dochádza pri prejazde vozidla cez nerovnosti vozovky. Kmity spôsobené nerovnosťami nazývame budiacou frekvenciou f . Pneumatické odpruženie dokáže zachytiť a pohltiť pásmo budiacich frekvencií začínajúce pod hodnotou 1 Hz a končiace nad 10 Hz. Z hľadiska komfortu jazdy u kmitania motorových vozidiel je možné za rozhodujúce považovať zvislé kmitanie. Pre dosiahnutie maximálneho komfortu počas jazdy je žiaduce udržiavať vlastnú frekvenciu kmitania karosérie f_{02} v rozsahu 1 až 1,5 Hz odpovedajúcemu rozsahu frekvencie chôdze človeka. Vyššie frekvencie sú pociťované ako nepríjemné rýchle otrasy a nižšie frekvencie môžu u citlivejších ľudí vyvolať „morskú chorobu“. U výkonných automobilov pri tvrdom nastavení systému odpruženia, keď je komfort obetovaný na úkor lepšej ovládateľnosti, sa vlastná frekvencia karosérie pohybuje v rozsahu 2 až 2,5 Hz. Pre bezpečnosť jazdy je dôležitý neustály kontakt kôl s vozovkou, ktorý môže byť prerušený pri prechode veľkými nerovnosťami. V momente prerušenia styku kôl s vozovkou neprenášajú kolesá žiadne sily (ťažné, brzdné a posuvné). Pri rýchlej jazde v zákrute dochádza k zníženiu zaťaženia kôl pohybujúcich sa vnútri zákruty a schopnosť prenášať bočné sily u týchto kolies klesá, čo môže spôsobiť vynášanie vozidla zo zákruty. Systém odpruženia v spolupráci s tlmičmi a stabilizátormi musí preto zaisťovať stálu veľkosť adhézie medzi všetkými kolesami vozidla a vozovkou a udržiavať rovnomerné zaťaženie všetkých kolies. V nasledujúcej časti práce bude odvodená závislosť vlastnej frekvencie kmitania od statického zaťaženia odpruženia a ďalej bude pojednané o vplyve tuhosti pružín a vplyve tlmenia na dynamiku jazdy a jazdný komfort [16] [29] [30].

Najprv zavedieme rovnice uhlovej frekvencie vlastného netlmeného kmitania nápravy ω_{01} a karosérie ω_{02} [29]

$$\omega_{01} = \sqrt{\frac{c_1 + c_2}{m_1}}, \quad (22)$$

$$\omega_{02} = \sqrt{\frac{c_2}{m_2}}. \quad (23)$$

c_1 - tuhosť pneumatík, c_2 - tuhosť pneumatickej pružiny, m_1 - hmotnosť nápravy, m_2 - hmotnosť karosérie

Vzťah medzi vlastnou uhlovou frekvenciou karosérie ω_{02} a frekvenciou vlastných kmitov karosérie f_{02} je [28]

$$\omega_{02} = 2\pi f_{02}. \quad (24)$$

Rovnica pre statické zaťaženie má tvar [28]

$$F_{F1} = m_2 g. \quad (25)$$

g - gravitačné zrýchlenie

Následným dosadením rovnice pre tuhosť pružiny (21), rovníc (24) a (25) do rovnice (23) dostaneme zápis pre vlastnú frekvenciu karosérie f_{02} v tvare [28]

$$f_{02} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{nF_{F1}g}{p_0V_0}}. \quad (26)$$

Z rovnice (26) vyplýva, že vlastná frekvencia karosérie f_{02} sa mení úmerne s odmocninou statického zaťaženia F_{F1} . Z hľadiska správania vozidla počas jazdy, komfortu a celkovej stability je ideálne, ak vlastnosti systému odpruženia zostávajú konštantné pre všetky zaťažujúce podmienky. Aj v tomto spočíva výhoda pneumatického systému odpruženia, ktorý sa dokáže zmenám zaťaženia prispôbiť, a to vhodným upravením pružiacich a tlmiacich vlastností systému tak, aby boli dosiahnuté minimálne hodnoty zrýchlenia karosérie \ddot{z}_2 (pre maximálny komfort) a dynamickej sily F_{dyn} (pre maximálnu bezpečnosť) [28] [29].

Dôležitou vlastnosťou systému odpruženia je aj tlmenie kmitov, ktorú môžeme charakterizovať pomerným útlmom sústavy D_2 [29]

$$D_2 = \frac{k_2\omega_{02}}{2c_2} = \frac{k_2}{2\sqrt{c_2m_2}}. \quad (27)$$

k_2 - súčiniteľ tlmenia určený vlastnosťami použitých tlmičov v systéme odpruženia

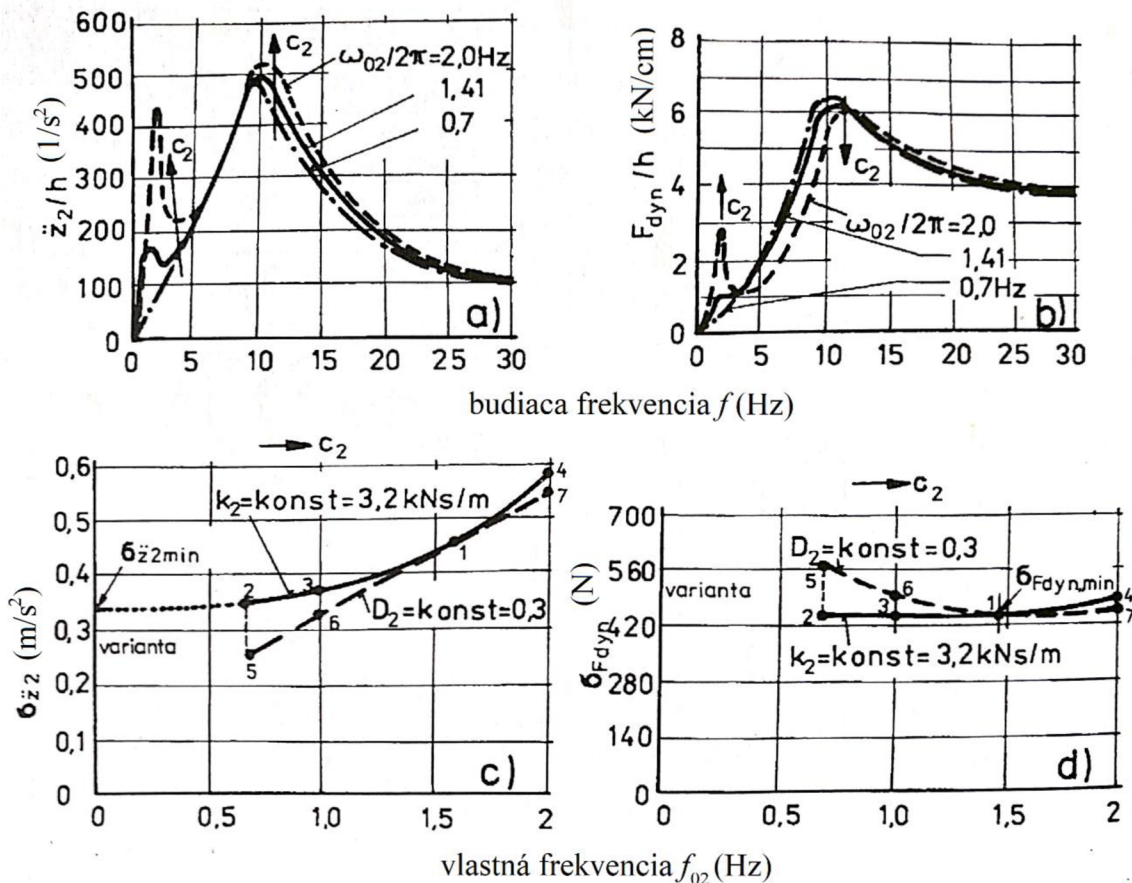
Rovnica (27) taktiež zobrazuje, že pomerný útlm je závislý od tuhosti pružiny nepriamoúmerne [29].

4.1 VPLYV TUHOSŤI PRUŽÍN

Ak meníme len tuhosť pružín c_2 , tak podľa rovnice (23) sa mení aj vlastná uhlová frekvencia karosérie ω_{02} . Cieľom regulácie tuhosti pružín je dosiahnutie nízkej a konštantnej vlastnej netlmenej uhlovej frekvencie karosérie ω_{02} pre zabezpečenie maximálneho jazdného komfortu. Progresívne chovanie pneumatických pružín udržiava konštantnú hodnotu ω_{02} pre rôzne zaťaženia. Zvyšovaním hodnoty c_2 pri zachovaní hodnoty súčiniteľa tlmenia k_2 dochádza podľa rovnice (27) k zníženiu pomerného útlmu karosérie D_2 . Na obrázku (23) graf (a) zobrazuje amplitúdovú frekvenčnú charakteristiku pre zrýchlenie karosérie \ddot{z}_2 a graf (b) pre dynamicкую radiálnu silu F_{dyn} . Podstatné rozdiely spôsobené zmenou tuhosti pružín c_2 vznikajú najmä v oblasti vlastnej frekvencie karosérie f_{02} (prvá rezonančná špička). Zrýchlenie karosérie \ddot{z}_2 a dynamicкая sila F_{dyn} sú pri nízkych budiacich frekvenciách menšie, ak je znížená hodnota c_2 . Nižšia tuhosť pružín prináša teda zvýšenie jazdného komfortu a bezpečnosti jazdy v oblasti nízkych budiacich frekvencií. V oblasti druhej rezonančnej špičky v grafoch (a) a (b), kde sa budiaca frekvencia f rovná približne vlastnej frekvencii nápravy f_{01} , sa zmena c_2 neprejavuje tak výrazne ako v oblasti $f \approx f_{02}$.

V grafoch (c) a (d) na obrázku (22) sú zobrazené závislosti smerodajnej odchýlky zrýchlenia $\sigma_{\ddot{z}_2}$ a dynamickej sily $\sigma_{F_{dyn}}$ na vlastnej frekvencii kmitania karosérie f_{02} . Znižovaním tuhosti c_2 (ostatné parametre sústavy ostávajú konštantné) dochádza k poklesu vlastnej frekvencie karosérie a smerodajná odchýlka zrýchlenia $\sigma_{\ddot{z}_2}$ sa znižuje. Z hľadiska bezpečnosti jazdy by mala byť smerodajná odchýlka práve čo najmenšia. Na veľkosť $\sigma_{F_{dyn}}$ vlastná frekvencia karosérie prakticky nemá vplyv. Ak pri zmene c_2 zmeníme zároveň aj hodnotu súčiniteľa

tlmenia k_2 tak, že pomerný útlm D_2 zostane konštantný, dôjde k ďalšiemu zlepšeniu jazdného komfortu a bezpečnosti, pretože sa zníži hodnota $\sigma_{\ddot{z}_2}$. Smerodajná odchýlka $\sigma_{F_{\text{dyn}}}$ pre $D_2 = \text{konšt.}$ v oblasti nízkych frekvencií naproti tomu rastie. K nárastu $\sigma_{\ddot{z}_2}$ a $\sigma_{F_{\text{dyn}}}$ dochádza aj vplyvom zrýchlenia jazdy, čo sa prejaví zvýšením vlastnej uhlovej frekvencie karosérie ω_{02} , s čím je spojená aj vyššia tuhosť pružín c_2 .



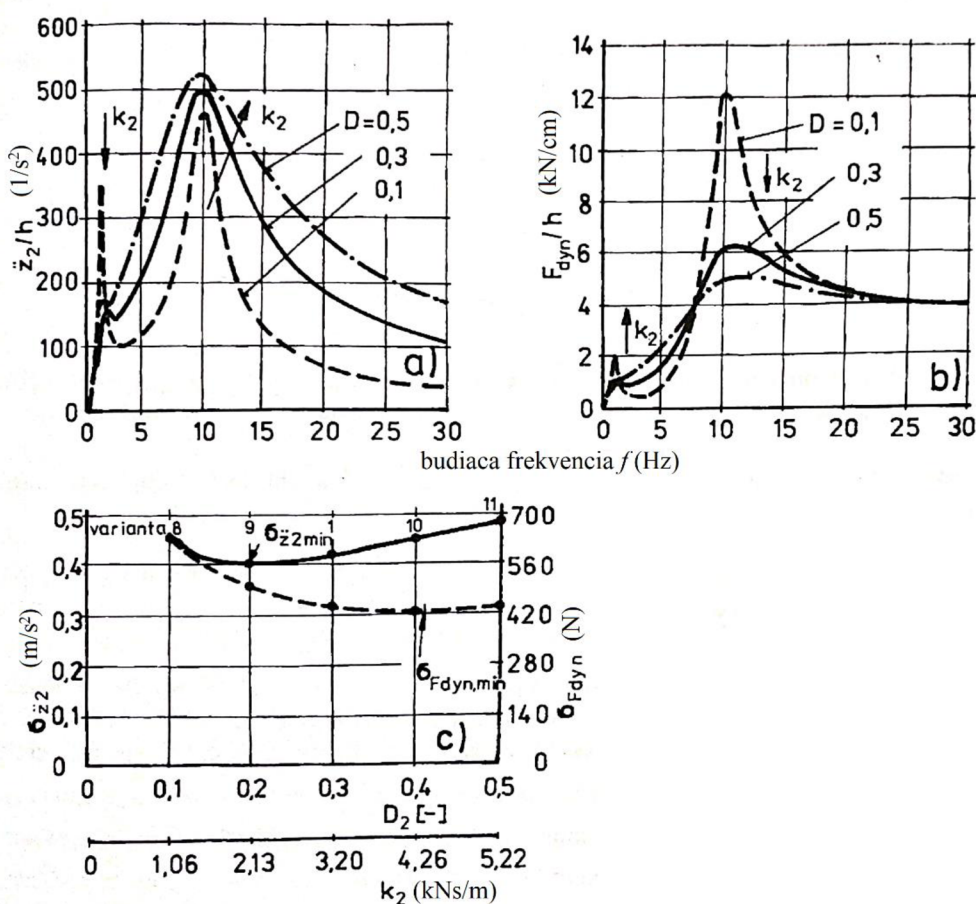
Obr. 22 Vplyv tuhosti pružín c_2 : a) amplitúdová frekvenčná charakteristika zrýchlenia, b) amplitúdová frekvenčná charakteristika dynamickej sily, c) smerodajná odchýlka zrýchlenia, d) smerodajná odchýlka dynamickej sily [29]

Pre dosiahnutie minimálnej smerodajnej odchýlky zrýchlenia nápravy $\sigma_{\ddot{z}_2}$ by musela byť tuhosť pružín nulová, čiže pružiny nekonečne mäkké. Optimálnu hodnotu tuhosti c_2 z hľadiska ovládateľnosti vozidla a namáhania vozovky určujeme teda vzhľadom k minimálnej hodnote $\sigma_{F_{\text{dyn}}}$, a to pomocou nasledujúceho vzťahu [29]

$$c_2 \left(\sigma_{F_{\text{dyn}} \text{ min}} \right) = \frac{c_1 m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} \cdot \quad (28)$$

4.2 VPLYV TLMENIA

Zväčšovaním súčiniteľa tlmenia k_2 pri zachovaní ostatných parametrov konštantných dochádza podľa rovnice (27) k nárastu pomerného útlmu D_2 . Vplyv zmeny súčiniteľa k_2 na zrýchlenie karosérie \ddot{z}_2 , dynamickú silu F_{dyn} a smerodajné odchýlky zrýchlenia $\sigma_{\ddot{z}_2}$ a dynamickej sily $\sigma_{F_{\text{dyn}}}$ zobrazujú grafy (a), (b) a (c) na obrázku (23). V grafe (a) a (b) v blízkosti prvej rezonančnej špičky ($f = f_{02}$) znižuje väčšie tlmenie amplitúdy zrýchlenia karosérie aj amplitúdy dynamickej sily. V oblasti vlastnej frekvencie nápravy ($f = f_{01}$) znižuje väčšie tlmenie len F_{dyn} a hodnota \ddot{z}_2 sa naopak zvyšuje. Pri vysokých budiacich frekvenciách f zhoršuje väčšie tlmenie jazdný komfort, ale zároveň zlepšuje bezpečnosť jazdy a znižuje namáhanie vozovky [29].



Obr. 23 Vplyv súčiniteľa tlmenia k_2 : a) amplitúdová frekvenčná charakteristika zrýchlenia, b) amplitúdová frekvenčná charakteristika dynamickej sily, c) smerodajné odchýlky zrýchlenia a dynamickej sily [29]

Keďže z hľadiska jazdného komfortu je požadovaná minimálna hodnota smerodajnej odchýlky zrýchlenia $\sigma_{\ddot{z}_2}$, tak súčiniteľ tlmenia k_2 môžeme určiť podľa rovnice [29]

$$k_2(\sigma_{\ddot{z}_2, \text{min}}) = \frac{c_1 m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} \cdot \quad (29)$$

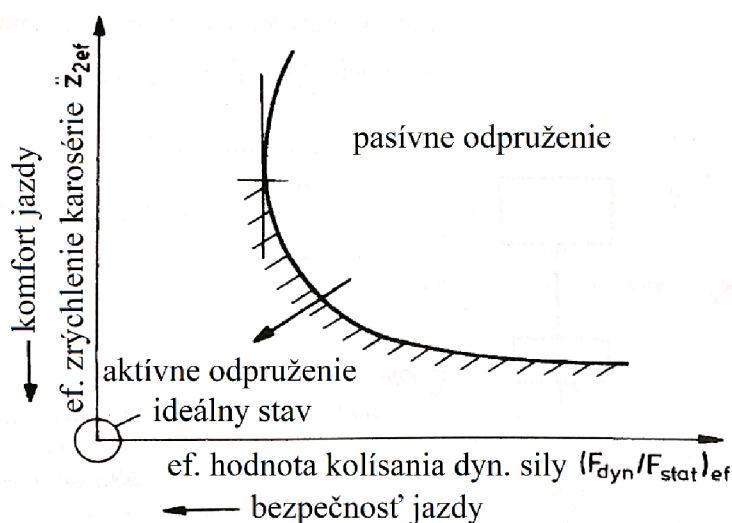
Optimálnu veľkosť súčiniteľa tlmenia k_2 z hľadiska bezpečnosti jazdy určujeme pre dosiahnutie minimálnej hodnoty smerodajnej odchýlky dynamickej sily $\sigma_{F_{\text{dyn}}}$ prostredníctvom vzorca [29]

$$k_2 \left(\sigma_{F_{\text{dyn}} \text{ min}} \right) = \sqrt{\frac{(m_1+m_2)c_2^2}{c_1} - \frac{2c_2m_1m_2}{m_1+m_2} + \frac{c_1m_1m_2^2}{(m_1+m_2)^2}} \quad (30)$$

Hodnota pomerného útlmu D_2 sa pohybuje v rozmedzí 0,2 až 0,4 pre prázdne osobné automobily a pre naložené automobily v rozmedzí 0,15 až 0,30. Z hľadiska jazdného komfortu je požadovaná hodnota pomerného útlmu $D_2 = 0,2$ a z hľadiska bezpečnosti jazdy $D_2 = 0,4$. Úlohou pneumatického systému odpruženia je teda vhodnou reguláciou tuhosti pružín c_2 , súčiniteľa tlmenia k_2 alebo oboch parametrov súčasne nastaviť optimálnu hodnotu pomerného útlmu pre dosiahnutie maximálneho komfortu aj bezpečnosti jazdy [29].

4.3 REGULOVANÉ SYSTÉMY PNEUMATICKÉHO ODPRUŽENIA

Regulované systémy odpruženia sa dokážu zmenou pružiacich a tlmiacich vlastností systému prispôbiť rôznym podmienkam zaťaženia, či už statickým alebo dynamickým. Podvozok s mäkkou pružiacou a tlmiacou charakteristikou je vhodný pre jazdný komfort a ochranu prepravovaného nákladu a je preto vhodný pre pomalú a nerušenú jazdu v priamom smere. Silnejšie tlmenie je výhodnejšie len pri budiacich frekvenciách vozovky ležiacich v oblasti rezonancie nápravy a karosérie. Tým je možné zmenšiť najmä namáhanie vozovky. Obrázok (24) zobrazuje tzv. cieľový konflikt medzi zrýchlením karosérie (komfort, ochrana nákladu) a kolísaním zaťaženia kolesa (bezpečnosť jazdy, namáhanie vozovky). Zobrazená krivka je medznou krivkou určujúcou závislosť medzi pohodlím a bezpečnosťou jazdy u konvenčných (pasívnych) systémov odpruženia. K priblíženiu ideálneho stavu je potrebná regulácia pružiacich a tlmiacich vlastností systému, čo umožňujú len systémy s regulovaným odpružením, medzi ktoré radíme aj pneumatické systémy odpruženia [29].



Obr. 24 Cieľový konflikt medzi bezpečnosťou a komfortom jazdy pri návrhu tlmenia/pruženia vozidla [29]

Podľa regulovateľnosti rozličných vlastností systému pneumatického odpruženia delíme tieto systémy do viacerých kategórií uvedených nižšie, zoradených podľa zvyšujúcich sa schopností regulácie [30].

Systémy s nastavením konštantnej svetlej výšky využívajú vzduchové pružiny a ich nafukovaním alebo vyfukovaním v závislosti od rozličného zaťaženia udržiavajú konštantnú svetlú výšku vozidla. Zmenu svetlej výšky deteguje výškový regulačný ventil, ktorý následne upraví množstvo vzduchu v pružinách [30].

Semiaktívne systémy obsahujú pružiacie a tlmiace elementy, ktorých vlastnosti môžu byť zmenené externým ovládaním. Signál alebo externá energia je dodávaná do týchto systémov za účelom zmeny pružiacich alebo tlmiacich vlastností. Semiaktívne systémy môžeme rozdeliť ešte aj do nasledujúcich podkategórií [30]:

- **Pomalé aktívne (adaptívne) systémy** - pružiacie a/alebo tlmiace vlastnosti systému môžu byť v dôsledku zmeny brzdného tlaku, uhlu riadenia alebo pohybov odpruženia nastavené na vyššiu hodnotu tlmenia alebo tuhosti. K tejto zmene vlastností systému dochádza v priebehu zlomku sekundy, čo umožňuje systému kontrolovať priečne kmitanie (kolísanie) a zvislé kmitanie karosérie, ako aj priečne a pozdĺžne nakláňanie karosérie pri náročnejších cestných alebo manévrovacích podmienkach. Avšak zmena späť na väčšie nastavenie systému prebieha s časovým oneskorením, preto sa tieto systémy neprispôbujú kontinuálne počas individuálnych cyklov oscilácie vozidla. Požadované nastavenie vlastností systému sa väčšinou prevedie voľbou módu jazdy (základný, komfortný, športový) [30].
- **Nízkopásmové systémy** - tuhosť pružín a/alebo súčiniteľ tlmenia sú kontinuálne regulované v závislosti od nízkofrekvenčných pohybov karosérie (1 až 3 Hz) [30].
- **Vysokopásmové systémy** - tuhosť pružín a/alebo súčiniteľ tlmenia sú kontinuálne regulované v závislosti od nízkofrekvenčných pohybov karosérie (1 až 3 Hz) a vysokofrekvenčných pohybov nápravy (10 až 15 Hz) [30].

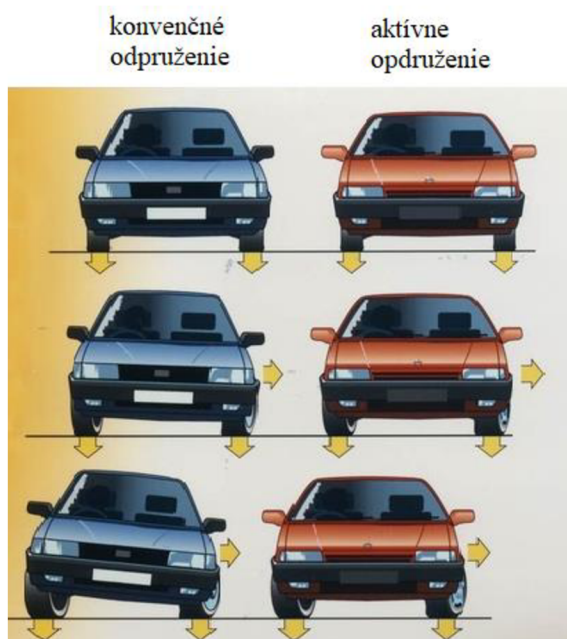
Plne aktívne systémy pneumatického odpruženia sú regulované plne elektronicky. Zahrňujú pneumatické aktuátory, ktoré generujú požadované sily v odpružení. Pre funkčnosť aktuátorov je však potrebná externá energia dodávaná pneumatickou pumpou poháňanou motorom alebo elektromotorom. Prispôbenie tlmiacich a pružiacich vlastností systému v závislosti od podmienok jazdy prebieha v reálnom čase. Tuhosť pružín je regulovaná solenoidnými ventilmi ovládanými riadiacou jednotkou, ktorá zabezpečuje aj ostatné nastavenia systému na základe vyhodnotenia vstupných informácií z rôznych senzorov. Tieto systémy môžu pracovať ako nízkopásmové alebo ako vysokopásmové [2] [30].

Záujem o semiaktívne a plne aktívne systémy pneumatického odpruženia plyní z ich potenciálnej možnosti zlepšiť výkon a kvalitu jazdy bez kompromisov v ovládateľnosti vozidla. Celková kvalita a výkon jazdy, ktoré môžu byť zlepšené aktívnou reguláciou, sú dané nasledujúcimi schopnosťami aktívneho systému [30]:

- **Ovládanie jazdy** - zlepšenie jazdy môže byť dosiahnuté viacerými metódami. Systém môže detegovať a ovládať kolísavé a kmitavé pohyby vozidla priamo. Zlepšenie jazdy môže byť dosiahnuté aj nepriamo, keď je aktívna regulácia aplikovaná pri schopnostiach uvedených nižšie. Pružiacie vlastnosti, ktoré optimalizujú komfort jazdy, majú vždy za následok zníženie výkonu ostatných

schopností systému. Avšak aktívny systém môže upraviť vlastnosti jazdy len počas manévrov a pri iných módoch jazdy zostanú celková kvalita a výkon jazdy nezmenené [30].

- **Ovládanie výšky** - automatické ovládanie svetlej výšky vozidla ponúka viacero výhod z hľadiska výkonu. Pri jazde po nerovnej vozovke sú strany nápravy vystavované rozdielnym nerovnostiam, to spôsobuje nakláňanie karosérie zo strany na stranu, čo sa prejavuje kolísaním karosérie. Kolísanie karosérie je eliminované nepretržitou reguláciou pružín na oboch stranách vozidla tak, aby výška vozidla bola udržaná v návrhovej polohe (bez ohľadu na zmeny zaťaženia alebo aerodynamických síl). Jazda pri návrhovej výške taktiež eliminuje zmeny v ovládateľnosti vozidla, ktoré by mohli nastať jazdou na svetlej výške vozidla inej ako návrhovej. Pri rýchlej jazde môže systém znížiť výšku vozidla pre redukciu ťahu alebo úpravou sklonu vozidla môže pozmeniť aerodynamický zdvih. Výšku vozidla môžeme taktiež zvýšiť, čo je vhodné najmä pre jazdu v náročnejšom teréne [30].
- **Ovládanie priečného náklonu** - k priečnému náklonu vozidla dochádza pri jeho prejazde zákrutou, kedy sú kolesá vo vnútri zákruty menej zaťažované v zvislom smere, čo spôsobuje aj zmenšenie prenosu obvodovej sily (dôležitej pre brzdenie) a bočnej sily (dôležitej pre ovládateľnosť). Popisované správanie vozidla zobrazuje obrázok (25). V extrémnom prípade pri nulovom zvislom zaťažení kolesa môže dôjsť k odskočeniu kolesa. V prípade odskočenia kolesa hnacej nápravy sa stáva vozidlo neovládateľným. Aktívny systém monitorovaním rýchlosti vozidla, uhlu riadenia a priečného zrýchlenia vyhodnocuje, či je potrebné regulovať priečny náklon. Využitím komponentov generujúcich aktívne sily v odpružení (aktuátorov) je možné úplne eliminovať nakláňanie vozidla v zákrutách [29] [30].



Obr. 25 Rozdiely v náklone vozidla s konvenčným a aktívnym odpružením pri prejazde zákrutou [31]

- **Ovládanie pozdĺžneho náklonu** - pri brzdení dochádza k náklonu vozidla dopredu a pri zrýchľovaní dozadu. Toto chovanie môžeme eliminovať zvýšením tlmenia alebo vyvolaním síl pôsobiacich v odpružení v smere proti danému náklonu. Ovládanie náklonu pri brzdení môže byť aktivované signálom od brzdového svetla, zmenou brzdového tlaku alebo zmenou pozdĺžneho zrýchlenia. Pri zrýchlení môže byť ovládanie náklonu aktivované pozíciou škrtiaceho ventilu, zvolením prevodovej rýchlosti alebo zmenou pozdĺžneho zrýchlenia [30].
- **Ovládanie stability** - systémy aktívneho odprużenia majú taktiež potenciál v zlepšení stability vozidla redukciou dynamických odchýlok v zaťažení kolies, ktoré sú spôsobené nerovnosťou vozovky. Stabilita vozidla je dôležitá najmä pri zatáčaní vozidla, a preto je žiaduce ak sú dynamické odchýlky zaťaženia minimalizované. Okrem iného znížením dynamického zaťaženia kolies dochádza aj k menšiemu poškodzovaniu povrchu vozovky [30].

V súčasnosti a do budúcnosti bude vývoj pneumatického odprużenia spočívať najmä v zlepšovaní aktívnej regulácie systému. Aktívne systémy sa už dokážu prispôbovať zmenám podmienok jazdy v reálnom čase, avšak cieľom je dosiahnuť predvídateľnosť systému a to použitím kamier na monitorovanie podmienok pred vozidlom alebo využitím GPS, čo by sa dalo využiť napríklad na predčasnú zmenu vlastností odprużenia pri blížení sa do oblasti konštrukčných prací na ceste.

ZÁVER

Systémy pneumatického odpruženia prešli dlhodobým vývojom, ktorého cieľom bolo a aj je zabezpečiť vysoký komfort a bezpečnosť jazdy. Pružiacie a tlmiace vlastnosti systému ovplyvňujú pohodlnosť a aj dynamiku jazdy, s ktorou úzko súvisí práve bezpečnosť jazdy. Výhodou systémov pneumatického odpruženia oproti konvenčným typom odpruženia, ako sú napríklad vinuté pružiny, je progresivita pneumatických pružín, ktorej je dosiahnutej regulovateľnou tuhosťou pružín. Progresivita pružín umožňuje regulovať pružiacie vlastnosti systému v závislosti od zmien zaťaženia, a tak zabezpečiť požadovaný komfort jazdy. Avšak pneumatické pružiny majú nízke samotlmiace účinky a nedokážu viesť nápravu, tieto funkcie sú v pneumatickom systéme odpruženia zaistené použitím tlmičov a stabilizátorov. Jednoduchšie systémy pneumatického odpruženia pracujú na princípe udržania konštantnej svetlej výšky pri rôznych typoch zaťaženia, čím je dosiahnutá stála kvalita komfortu. Tieto systémy sú vybavené mechanickým výškovým ventilom, ktorý udržuje konštantnú svetlú výšku zmenou tuhosti pružín. Vyspelejšie systémy pneumatického odpruženia (semiaktívne a plne aktívne systémy) sú ovládané čiastočne alebo plne elektronicky a využitím adaptívnych tlmičov umožňujú aj reguláciu tlmiacich vlastností. Regulácia pružiacich a tlmiacich vlastností prebieha v reálnom čase a zabezpečuje ju riadiaca jednotka na základe vyhodnotenia údajov zo senzorov. Pružiacie a tlmiace vlastnosti systému odpruženia ovplyvňujú pohodlie jazdy ale aj dynamiku jazdy. K výrazným zmenám dynamiky jazdy dochádza najmä pri rýchlom rozjazde a brzdení vozidla, pri rýchlom prejazde vozidla zákrutami a pri jazde po nerovnej vozovke. Vďaka možnosti regulácie pružiacich aj tlmiacich vlastností dokážu tieto systémy odpruženia dosiahnuť optimálneho nastavenia podvozku z hľadiska komfortu aj bezpečnosti jazdy. Systémy pneumatického odpruženia majú zložitú konštrukciu pozostávajúcu z veľkého množstva komponentov. Výsledkom je vyššia hmotnosť, cena a celková údržba systému. Kvôli tomu sú tieto systémy u osobných vozidiel používané najmä v tých drahších a luxusnejších modeloch. Avšak neustálym zdokonaľovaním jednotlivých komponentov sa znižujú ich rozmery, hmotnosť a nároky na údržbu. Vďaka tomu sa začínajú postupne objavovať aj u cenovo dostupnejších osobných vozidiel, u ktorých poskytujú značné výhody oproti konvenčným typom odpruženia. Konštatovaním súčasného stavu používaných systémov pneumatického odpruženia môžeme vývoj v budúcnosti očakávať najmä v zdokonaľovaní regulácie pružiacich a tlmiacich vlastností systému. To môžeme dosiahnuť práve vylepšovaním monitorovacej techniky a najmä ovládacieho softwaru riadiacej jednotky. Využitím rovníc uvedených v tejto práci by sa dal zostaviť výpočtový model pre ovládací software, ktorý by na základe vstupných údajov dokázal optimálne nastaviť vlastnosti odpruženia pre blížiace zmeny jazdných podmienok.

POUŽITÉ INFORMAČNÉ ZDROJE

- [1] Pneumatic Spring For Vehicles. *Machine-History.Com* [online]. ©30 Dec 2013 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20131230230232/http://www.machine-history.com/Pneumatic%20Spring%20For%20Vehicles>
- [2] MOON, Suchit. Active Air Suspension System. *SlideShare* [online]. ©2019, Sep 27, 2014 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/suchitmoon/active-air-suspension-system>
- [3] WERMINGHAUSEN, Martin. Mercedes Air Suspension. *600AirSuspension* [online]. Boston, February 11 , 2014 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://600airsuspension.com/resources/article-on-mercedes-air-suspension-by-martin-werminghausen.pdf>
- [4] 1946 Stout Scarab Experimental. *Conceptcarz.com* [online]. ©1998-2019 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.conceptcarz.com/z20937/stout-scarab-experimental.aspx>
- [5] CHARVONIA, Keith. Do You Know The Real History Of Air Suspension?. *Speedhunters* [online]. ELECTRONIC ARTS, ©2019, 1ST MAY 2014 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://www.speedhunters.com/2014/05/know-real-history-air-suspension/>
- [6] 1950-1959 Cadillac. *HowStuffWorks* [online]. ©2019, 3 March 2007 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://auto.howstuffworks.com/1950-1959-cadillac.htm>
- [7] 1960_Cadillac_Full_Line-16. *The Old Car Manual Project* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: http://www.oldcarbrochures.org/North%20America/Cadillac/1960_Cadillac/1960-Cadillac-Full-Line-Brochure/slides/1960_Cadillac_Full_Line-16.html
- [8] 1957_Cadillac_Eldorado_Brougham_Press_Release. In: *The Old Car Manual Project* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: http://www.oldcarbrochures.com/static/NA/Cadillac/1957_Cadillac/1957_Cadillac_Eldorado_Brougham_Press_Release/1957%20Cadillac%20Eldorado%20Brougham-14.html
- [9] Air suspension. *Wikiwand* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: http://www.wikiwand.com/en/Air_suspension
- [10] Air suspension. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 10 March 2019 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Air_suspension
- [11] Technical Development: Chassis. *75 Years of TOYOTA* [online]. ©2012 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: http://www.toyota-global.com/company/history_of_toyota/75years/data/automotive_business/products_technology/technology_development/chassis/index.html
- [12] Dunlop. *Airbag Man* [online]. ©2018 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://airbagman.com.au/pages/dunlop>

- [13] What is Air Suspension?. In: *Buy Auto Parts* [online]. ©2019 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: https://www.buyautoparts.com/howto/what_is_air_suspension.htm
- [14] VLK, František. *Podvozky motorových vozidel: pneumatiky a kola, zavěšení kol, nápravy, odpružení, řídicí ústrojí, brzdové soustavy*. Brno: Nakladatelství a vydavatelství VLK, ©2000, 392 s. ISBN 80-238-5274-4.
- [15] SureRide Air Springs Bag W013589370/ W01-358-9370 "Best Warranty". In: *EBay* [online]. ©1995-2019 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: https://www.ebay.com/itm/SureRide-Air-Springs-Bag-W013589370-W01-358-9370-Best-Warranty-/153013496726?_ul=AR
- [16] JAN, Zdeněk, Bronislav ŽDÁNSKÝ a Jiří ČUPERA. *Automobily. (1), Podvozky*. 6. vydání. Brno: Avid, spol. s r.o, ©2018, 245 s. ISBN 978-80-87143-40-7
- [17] CROLLA, David, David E. FOSTER, Toshio KOBAYASHI a Nicholas VAUGHAN, ed. *Encyclopedia of Automotive Engineering* [online]. ©2015: John Wiley & Sons, 2015 [cit. 2019-05-22]. ISBN 978-0-470-97402-5. Dostupné z: Google Books
- [18] NITSCHKE, Torsten. The closed air suspension system of the Porsche Panamera. In: *DocPlayer* [online]. ©2019, 22.06.10 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://docplayer.net/23858852-The-closed-air-suspension-system-of-the-porsche-panamera.html>
- [19] One-Way Shock Absorber. In: *KRM* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <http://www.pilingandpipe.com/oil-field-supply-chain/downhole-tools/one-way-shock-absorber.html>
- [20] Monotube Vs Twin-Tube - What is the Difference? What is Better?. In: *ISC Suspension* [online]. ©2011- [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://iscsuspension-na.com/monotube-vs-twin-tube-difference-better/>
- [21] DIXON, John C. *The Shock Absorber Handbook* [online]. Second Edition. Chichester: John Wiley & Sons, ©2007 [cit. 2019-05-22]. ISBN 978-0-470-51642-3. Dostupné z: Google Books
- [22] ASKARI, Mohsen, Jianchun LI, B. SAMALI a Xiaoyu GU. Experimental forward and inverse modelling of MR dampers using an optimal TSK fuzzy scheme. In: *ResearchGate* [online]. ©2008-2019, September 2015 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/281979464_Experimental_forward_and_inverse_modelling_of_MR_dampers_using_an_optimal_TSK_fuzzy_scheme/figures
- [23] Odpružení vozidel. *Střední škola automobilní Kyjov, příspěvková organizace* [online]. ©2019 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: http://www.sossoukyjov.cz/data/file/Odpruzeni_s_obrazky.pdf
- [24] Air Suspension Systems. *WABCO* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <http://inform.wabco-auto.com/intl/pdf/815/00/57/8150100573-15.pdf>
- [25] BAXTER, Eric. How Air Suspension Systems Work. *HowStuffWorks* [online]. ©2019, 21 June 2012 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://auto.howstuffworks.com/air-suspension-systems.htm>

- [26] Air Supply Subsystem. *Ontario* [online]. ©2012-19, May 3, 2019 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.ontario.ca/document/official-air-brake-handbook/air-supply-subsystem#section-0>
- [27] Druhy odpružení. *ELUC* [online]. 25. 8. 2014 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1485>
- [28] BAUER, Wolfgang. *Hydropneumatic suspension systems*. New York: Springer, ©2011, 237 s. ISBN 978-3-642-15146-0.
- [29] VLK, František. *Dynamika motorových vozidel: jízdní odpory, hnací charakteristika, brzdění, odpružení, říditelnost, ovladatelnost, stabilita*. Brno: Nakladatelství a vydavatelství Vlk, ©2000, 434 s. ISBN 80-238-5273-6.
- [30] GILLESPIE, Thomas D. *Fundamentals of vehicle dynamics*. Warrendale: Society of Automotive Engineers, ©1992, 495 s. ISBN 1-56091-199-9.
- [31] Why is a body roll bad for car handling and racing cars? - Quora. In: *Quora* [online]. Feb 4, 2018 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.quora.com/Why-is-a-body-roll-bad-for-car-handling-and-racing-cars>

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

A_K	[m ²]	činná plocha pružiny
c	[N·m ⁻¹]	tuhosť pružiny
c_1	[N·m ⁻¹]	tuhosť pneumatík
c_2	[N·m ⁻¹]	tuhosť pneumatickej pružiny
D_2	[-]	pomerný útlm sústavy
DCD		Displacement Conscious Damping
dp	[Pa]	diferenciál tlaku
ds	[m]	diferenciál polohy
ECAS		Electronically Controlled Air Suspension
f	[Hz]	budiaca frekvencia
f_{01}	[Hz]	frekvencia vlastných kmitov nápravy
f_{02}	[Hz]	frekvencia vlastných kmitov karosérie
F_{dyn}	[N]	dynamická sila
F_{F1}	[N]	sila statického zaťaženia
F_{F2}	[N]	sila dynamického zaťaženia
F_K	[N]	nosná sila pružiny
g	[m·s ⁻²]	gravitačné zrýchlenie
h_{0F}	[Pa·m ³ ·N ⁻¹]	parameter substitúcie
k_2	[N·s·m ⁻¹]	súčiniteľ tlmenia
m_1	[kg]	hmotnosť nápravy
m_2	[kg]	hmotnosť karosérie
m_G	[kg]	počiatočná hmotnosť plynu v nezaťaženom stave
n	[-]	polytropický exponent
p_0	[Pa]	systémový tlak
$p_{0,T}$	[Pa]	tlak vyvolaný zmenou teploty
p_1	[Pa]	tlak vyvolaný statickým zaťažením
p_2	[Pa]	tlak vyvolaný dynamickým zaťažením
p_K	[Pa]	vnútorný pretlak v pružine
PSD		Position Sensitive Damping
r	[J·K ⁻¹ ·kg ⁻¹]	merná plynová konštanta
s	[m]	zdvih pružiny
T	[K]	teplota plynu/okolia

T_0	[K]	pôvodná teplota plynu
TEMS		Toyota Electronic Modulated Suspension
V_0	[m ³]	počiatočný objem vaku
V_1	[m ³]	objem vaku pri statickom zaťažení
V_2	[m ³]	objem vaku pri dynamickom zaťažení
\ddot{z}_2	[m·s ⁻²]	zrýchlenie karosérie
κ	[-]	Poissonova konštanta
$\sigma_{F_{dyn}}$	[N]	smerodajná odchýlka dynamickej sily
$\sigma_{\ddot{z}_2}$	[m·s ⁻²]	smerodajná odchýlka zrýchlenia
ω_{01}	[rad·s ⁻¹]	uhlová frekvencie vlastného netlmeného kmitania nápravy
ω_{02}	[rad·s ⁻¹]	uhlová frekvencie vlastného netlmeného kmitania karosérie