VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE AND TRANSPORT ENGINEERING

VYUŽITÍ VZDUCHOVÝCH PRUŽIN U ZÁVODNÍHO VOZU

THE USE OF AIR SPRINGS FOR RACE CAR

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — BC. JAKUB BLAŽEK
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — ING. PETR PORTEŠ, DR.
SUPERVISOR

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Akademický rok: 2012/13

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jakub Blažek

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Automobilní a dopravní inženýrství (2301T038)**

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

Využití vzduchových pružin u závodního vozu

v anglickém jazyce:

The use of air springs for race car

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vypracujte studii zaměřenou na využití vzduchových pružin u závodních vozu. Vypracujte rovněž konstrukční návrh. Zaměřte se zejména na vhodnost pružin z hlediska jízdních vlastností, odpružení vozu a jízdní výšky.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je vypracovat studii zaměřenou na využití vzduchových pružin u závodních vozu. Součástí diplomové práce je konstrukční návrh odpružení vozu vzduchovými pružinami.

Seznam odborné literatury:

VLK,F., Dynamika motorových vozidel. ISBN 80-238-5273-6, Nakladatelství VLK, Brno 2000.

Reimpell,J.;Stoll,H.;Edward,A., The automotive chassis - engineering principles. Arnold, London 1996. ISBN 0-340-61443-9.

Vedoucí diplomové práce:Ing. Petr Porteš, Dr.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne 19.11.2012

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ DĚKANÁT

L.S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá studií využití vzduchových pružin u závodního vozu, přesněji vozu pro soutěže Formula Student. Rešeržní část práce se zabývá volbou vhodné vzduchové pružiny pro dané použití. V praktické části je pak výpočet parametrů pro vhodné nastavení vzduchové pružiny tak, aby vyhovovala pravidlům soutěže a simulace její funkce při reálném použití.

KLÍČOVÁ SLOVA

vzduchová pružina, tlumič, charakteristika pružiny, závodní vůz, MBS, čtvrtinový model vozu

ABSTRACT

This diploma thesis studies the use of air springs for race car, precisely Formula Student race car. Research part of the thesis deals with choosing suitable air spring for given application. In practical part, there is computation of parameters for appropriate setting of air spring, so it will comply with the rules of Formula Student. There is also simulation of air spring functionality in real use.

KEYWORDS

air spring, damper, spring characteristics, race car, MBS, quarter car model

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Blažek, J. *Využití vzduchových pružin u závodního vozu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 63 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Porteš, Dr..

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Petra Porteše, Dr. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24. května 2013 ……..……..……..

Jakub Blažek

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Petru Portešovi, Dr. za jeho cenné připomínky a rady, kterými přispěl k vypracování této diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat mé rodině a přítelkyni za podporu během studia.

OBSAH

Úvod ... 9
1 Odpružení ... 10
1.1 Vinuté pružiny ... 10
1.2 Vzduchové pružiny ... 12
1.2.1 Konstrukce a aplikace vzduchových pružin ... 14
2 Vzduchové pružiny u závodních vozů ... 18
2.1 Rock crawler, sand buggy ... 18
2.2 Buggy, čtyřkolky ... 19
2.3 Klasické automobily v závodní úpravě ... 20
3 Vzduchové pružiny pro Formula Student ... 21
3.1 Výběr alternativy ke stávajícímu odpružení ... 21
3.2 Cane Creek DBAir ... 24
3.2.1 Konstrukce ... 24
3.2.2 Pružení ... 24
3.2.3 Tlumení ... 26
4 Nastavení pružící jednotky ... 29
4.1 průběh pružící síly na kole nápravy ... 37
5 Simulace ... 44
5.1 Data pro zadání tlumení ... 44
5.2 Simulační model ... 45
5.3 Sledované veličiny ... 47
5.4 Simulace modelu přední nápravy ... 47
5.4.1 Simulace s nastavením tlumení 0 – 5 – 0 – 5 ... 47
5.4.2 Simulace s nastavením tlumení 4 – 4 – 4 – 4 ... 48
5.4.3 Simulace s nastavením tlumení 7 – 4 – 7 – 4 ... 49
5.5 Simulace modelu zadní nápravy ... 50
5.5.1 Simulace s nastavením tlumeni 0 – 5 – 0 – 5 ... 50
5.5.2 Simulace s nastavením tlumení 4 – 4 – 4 – 4 ... 51
5.5.3 Simulace s nastavením tlumení 7 – 4 – 7 – 4 ... 52
5.6 Porovnání se stávající pružící jednotkou ... 53
5.7 Vliv na řidiče ... 55
6 konstrukční řešení ... 57
Závěr ... 58
Seznam použitých zkratek a symbolů ... 62
Seznam příloh ... 63

ÚVOD

Náplní práce je studie vhodnosti použití vzduchových pružin u vozu Formule Student. Při konstrukci závodních vozů pro soutěže Formule Student používá většina týmů vinuté pružiny, a proto je cílem této práce porovnat základní charekteristiky vinuté a vzduchové pružiny, jejich vliv na jízdní vlastnosti vozu a možnosti jejich nastavení. Za srovnání stojí i hmotnost dané pružící jednotky a její pořizovací cena, protože oba tyto paramtery hrají důležitou roli při návrhu závodního vozu.

Obsahem rešerše je seznámení s obecnými vlastnostmi vzduchových pružin, jejich použití v osobní a hromadné dopravě. Dále se budeme zabývat aplikací vzduchových pružin v různých odvětvích motorsportu a výběrem vhodné alternativy ke stávající pružící jednotce vozu Formula Student, která využívá vinutou pružinu.

V praktické části práce je pak výpočet základních parametrů zvolené vzduchové pružiny, jejichž výstupem jsou pak hodnoty, které by měly být použity pro nastavení vzduchové pružiny, aby její funkce byla ideální a zároveň vyhovovala pravidlům soutěže. Takto nastavenou pružinu pak doplníme o tlumící jednotku a zakomponujeme do čtvrtinového modelu vozidla, kde pomocí simulačního software otestujeme, jak by se při reálném použití měla náprava vozidla chovat. Na základě získaných charakteristik a obecných vlastností vzduchové pružiny budou vyvozeny závěry o vhodnosti použití vzduchových pružin u vozu Formula Student.

1 ODPRUŽENÍ

Odpružení je součástí zavěšení, jehož funkcí je zmenšení přenosu kmitavých pohybů způsobených nerovnostmi vozovky na podvozek a karoserii vozidla. Tím chrání posádku, před nežádoucími otřesy. Nejzásadnější funkcí odpružení je zajištění stálého styku pneumatiky s vozovkou i při přejíždění nerovností. Tato funkce má vliv na ovladatelnost a řiditelnost vozidla, přesněji přenos hnacích a brzdných sil a kontakt řídicích kol s vozovkou [1].

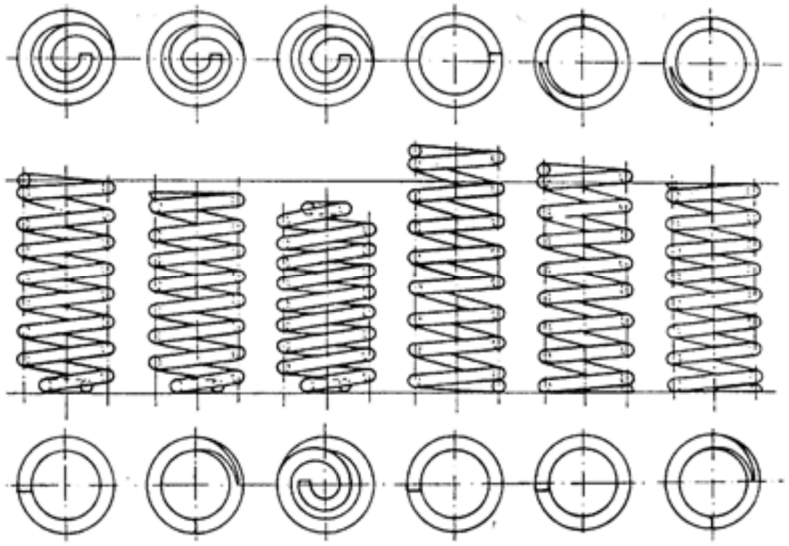
Odpružení vozidla zajišťují pružiny, které se od sebe liší jak konstrukcí, tak i použitým materiálem. Dle [1] pružiny mohou být:

a) ocelové – listové, vinuté, torzní
b) pryžové
c) vzduchové (pneumatické)
d) vzduchokapalinové (hydropneumatické)
e) pryžokapalinové (hydroelastické)

Cílem této diplomové práce je zabývat se náhradou vinutých pružin pružinou vzduchovou. Než se ale žačneme zabývat vzduchovými pružinami, tak bych se chtěl krátce věnovat pružině vinuté.

1.1 VINUTÉ PRUŽINY

Vinuté pružiny jsou použity hlavně u osobních automobilů. Jejich výhody oproti jiným typům ocelových pružin (listové, torzní) jsou: nižší hmotnost, menší nároky na údržbu, jednoduché uložení a žádné suché tření. K jejich nevýhodám patří to, že nemohou vést nápravu, protože nejsou schopny přenášet příčnou sílu a nemají vlastní tlumení [1].



Obr.1.1. *Příklady konstrukčního provedení vinutých pružin [1].*

Co se týče konstrukce vinuté pružiny, je navržena tak, aby při maximálním stlačení byla zajištěna vůle mezi jednotlivými závity. V opačném případě by docházelo ke zkrácení činné

délky pružiny, hluku a přenosu rázů z vozovky na vozidlo. Vinutá pružina je na koncích vybavena tzv. závěrnými závity, které zabezpečují styk s opěrnými plochami. Délka závěrného závitu je nejméně ¾ obvodu vinutí a jeho stoupání je menší než u činných závitů. Závěrné závity na koncích vinuté pružiny mají být vůči sobě pootočené o 180° [1].

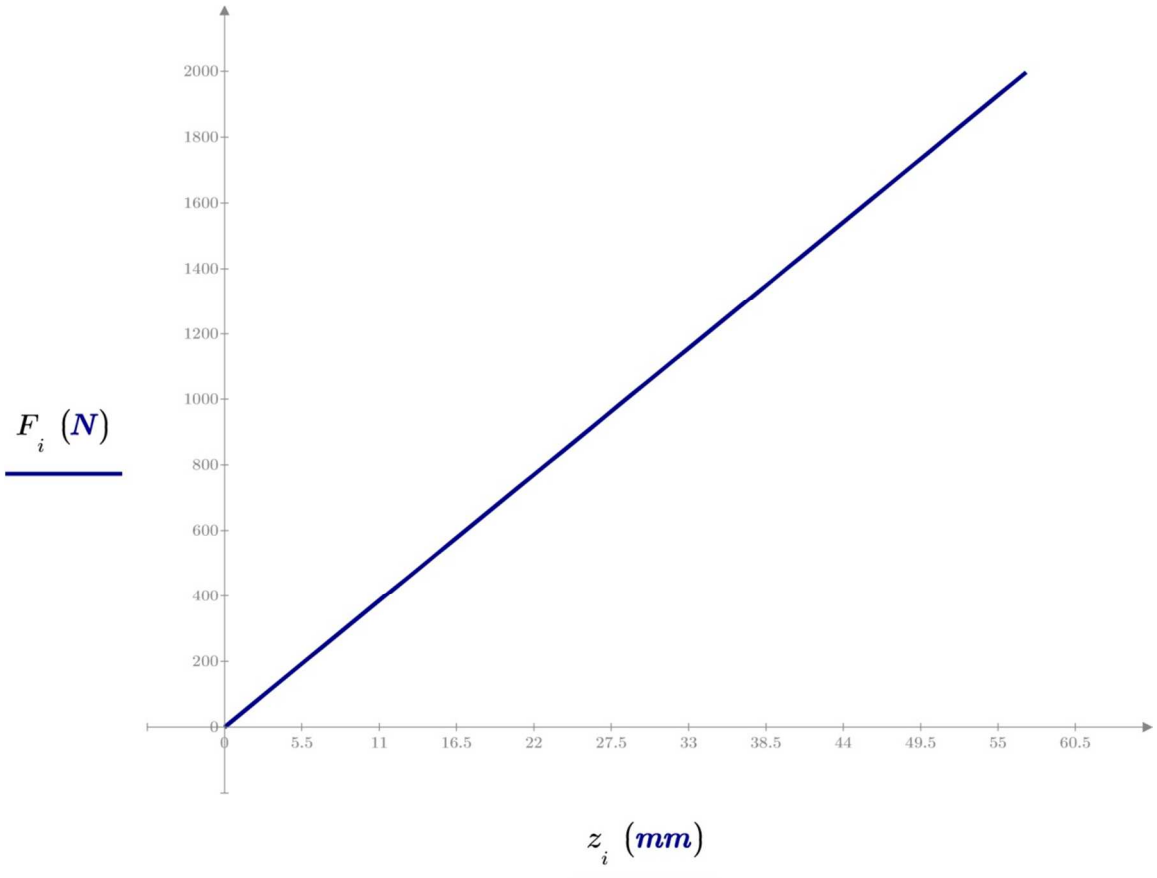
Určující veličinou pružiny je její tuhost (v literatuře též jako pružinová konstanta, anglicky spring rate).Tuhost vinuté pružiny se vypočítá ze vztahu [1]:

$$c = \frac{d^4 \cdot G}{8 \cdot n \cdot D^3}, \tag{1.1}$$

kde *d* je průměr drátu pružiny, *G* je modul pružnosti ve smyku, *n* je počet činných závitů a *D* je průměr pružiny. Z tohoto vztahu plyne, že tuhost je přímo úměrná čtvrté mocnině průměru drátu pružiny a nepřímo úměrná počtu činných závitů a třetí mocnině průměru pružiny. Deformační charakteristika tlačné válcové pružiny je lineární a lze ji výjádřit vztahem:

$$F = c \cdot z, \tag{1.2}$$

kde *F* je síla potřebná ke stlačení pružiny, *c* je tuhost pružiny a *z* je stlačení.



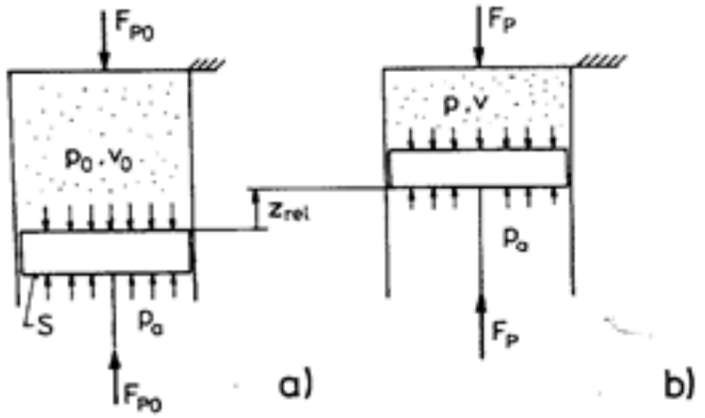
Obr.1.2. *Deformační charakteristika vinuté pružiny o tuhosti 200 lb/in (35 N/mm).*

Pokud bychom chtěli dosáhnout progresivní deformační charakteristiky, lze použít několika způsobů:

a) proměnlivé stoupání závitů pružiny – např. pružina s větším stoupáním závitů ve střední části a s menším stoupáním v částech krajních;
b) proměnlivý průměr drátu pružiny – drát se od středu k jednomu či oběma koncům pružiny zužuje, což má za důsledek vzájemný dotek závitů s menším průměrem drátu při velkém stlačení a pružina se stává tvrdší;
c) proměnlivý průměr drátu a zároveň proměnlivý průměr pružiny (tzv. miniblokové progresivní pružiny) [1]

1.2 VZDUCHOVÉ PRUŽINY

Vzduchové pružiny využívají k pružení stlačitelnosti plynu a z této fyzikální podstaty mají progresivní deformační charakteristiku závislou na stlačení pružiny $F_p = f(z)$. Tuhost vzduchové pružiny není konstantní jako u vinutých pružin, ale je definována jako směrnice tečny k deformační charakteristice. Pro odvození deformační charakteristiky budeme uvažovat pístovou plynovou pružinu [1].



Obr.1.3. *Schéma k odvození deformační charakteristiky: a) klidový stav, b) stlačený stav [1].*

V klidovém stavu je síla působící na píst rovna přetlaku plynu v pracovní komoře násobené plochou pístu. Při stlačení dochází ke zvýšení tlaku plynu v pracovní komoře podle polytropického izotermického zákona [1]:

$$p_0 \cdot V_0^n = p \cdot V^n \,, \tag{1.3}$$

$$V = V_0 - S \cdot z \,, \tag{1.4}$$

kde p_0 je tlak plynu v pracovní komoře v klidovém stavu, V_0 je objem pracovní komory, S je plocha pístu a z je zdvih pístu. Polytropický exponent n může mít dvě hodnoty v závislosti na tom, zda počítáme s pomalou změnou objemu (n = 1, izotermický děj) nebo s rychlou změnou objemu, která nastává například při kmitání vozidla (n = 1,4, adiabatický děj). Po dosazení rovnice (1.4) do rovnice (1.3) dostaneme vztah pro tlak stlačeného plynu v pracovní komoře pružiny [1]:

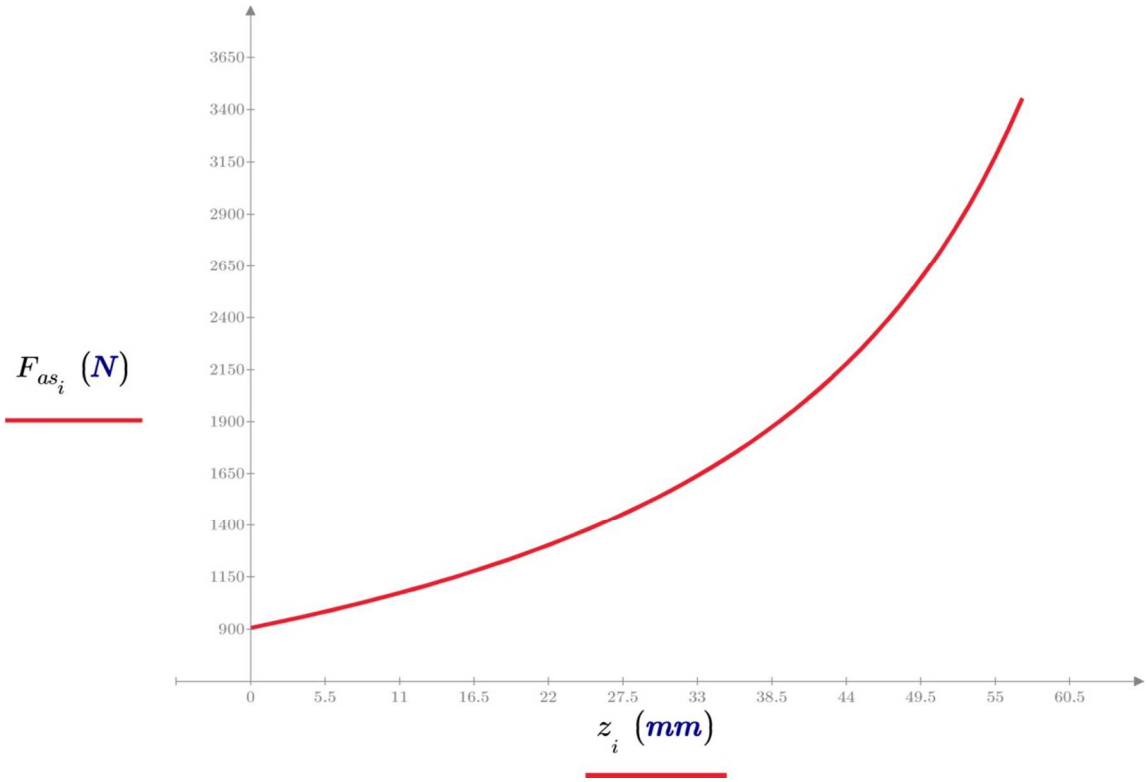
$$p = p_0 \cdot \left(\frac{V_0}{V_0 - S \cdot z}\right)^n , \tag{1.5}$$

který dosadíme do vzorce pro pružící sílu (sílu působící na píst) v zatíženém stavu:

$$F_p = (p - p_a) \cdot S , \tag{1.6}$$

po úpravě:

$$F_p = \left[\frac{p_0 \cdot V_0^n}{(V_0 - S \cdot z)^n} - p_a\right] \cdot S , \tag{1.7}$$



Obr.1.4. *Deformační charakteristika vzduchové pružiny pro tlak 0,7 MPa v pracovní komoře a polytropickém koeficientu n = 1.*

Tuhost vzduchové pružiny získáme derivací vztahu pro pružící sílu podle zdvihu pístu [1]:

$$c = \frac{dF_p}{dz} = \frac{n \cdot p_0 \cdot V_0^n \cdot S^2}{(V_0 - S \cdot z)^{n+1}} , \tag{1.8}$$

pokud dosadíme za zdvih hodnotu $z = 0$, tak dostaneme statickou tuhost vzduchové pružiny [1]:

$$c_0 = \frac{n \cdot p_0 \cdot S^2}{V_0} , \tag{1.9}$$

1.2.1 KONSTRUKCE A APLIKACE VZDUCHOVÝCH PRUŽIN

Systémy odpružení vozidel využívající vzduchové pružiny mají výhodu nad vinutými pružinami v těchto ohledech:

- nemění se vlastní frekvence odpružené hmoty v závislosti na zatížení vozidla;
- jednoduché nastavení světlé výšky vozidla;
- zajištění kopletního zdvihu kola i při zatížení vozidla.

V závislosti na konstrukci systému odpružení lze zajistit i následující vlastnosti:

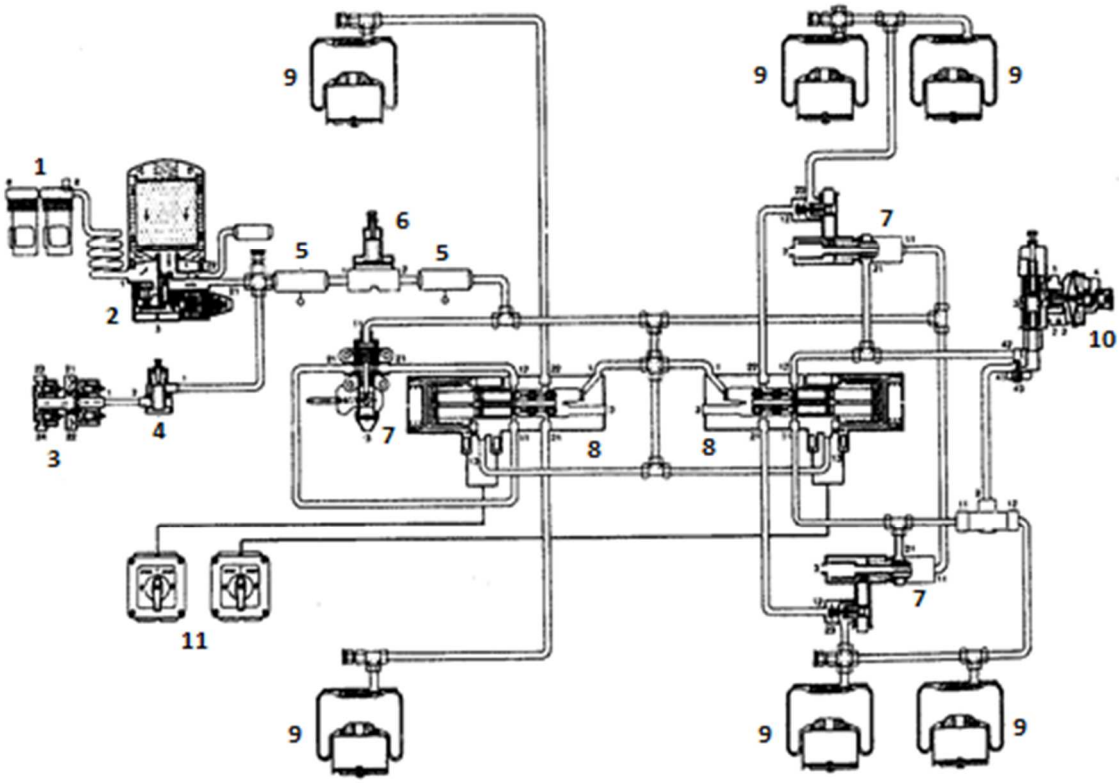
- vyrovnání nesymetrického zatížení vozidla na levé či pravé straně;
- vliv na klopení vozidla a tím i vliv na dynamické zatížení kol;
- tlumení v závislosti na jízdních podmínkách (rychlost, podélné, příčné a svislé zrychlení).

Díky těmto výhodám našly systémy odpružení vzduchovými pružinami uplatnění v autobusech a užitkových vozech pro cestování na dlouhé vzdálenosti. Jejich použití roste i v oblasti dodávek (např. Mercedes–Benz Vito). Vzduchové pružiny najdou své využití u osobních vozidel vyšší a vyšší střední třídy se zaměřením na komfort pasažéra (např. BMW řady 5, Audi A6, Mercedes-Benz třídy S) [2].

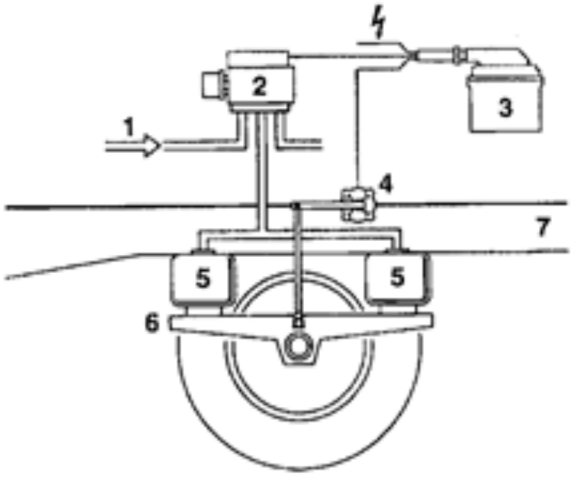
Systém odpružení vzduchovými pružinami je ale složitější než odpružení vinutými pružinami, protože obsahuje prvky odpovědné za regulaci jízdní výšky a dalších výše zmíněných vlastností. U užitkových vozidel a autobusů se používají vzduchové systémy odpružení s otevřeným okruhem (jednou použitý vzduch odchází do atmosféry) [1].

Funkci pružícího systému si popíšeme na **obr. 1.5**: Kompresor (1) dodává stlačený vzduch přes odlučovač vody a regulátor tlaku (2) do zásobníku (5). Jednotlivé ventily (7) řídí tlak vzduchu v pružinách (9) tak, aby odpovídal nákladu vozidla, tzn. aby byla výška nástavby od nápravy stále stejná. Vzduchové ventily (7) jsou upevněny na rámu vozidla a spojeny ventilovou pákou přes spojovací tyče s nápravou. Při zatížení klesne nástavba, ventilová páka se posune a vzduchové pružiny (9) se dohustí. Nástavba se nadzvihuje tak dlouho, dokud není ventilová páka ve střední poloze. Při odlehčení je postup opačný [1].

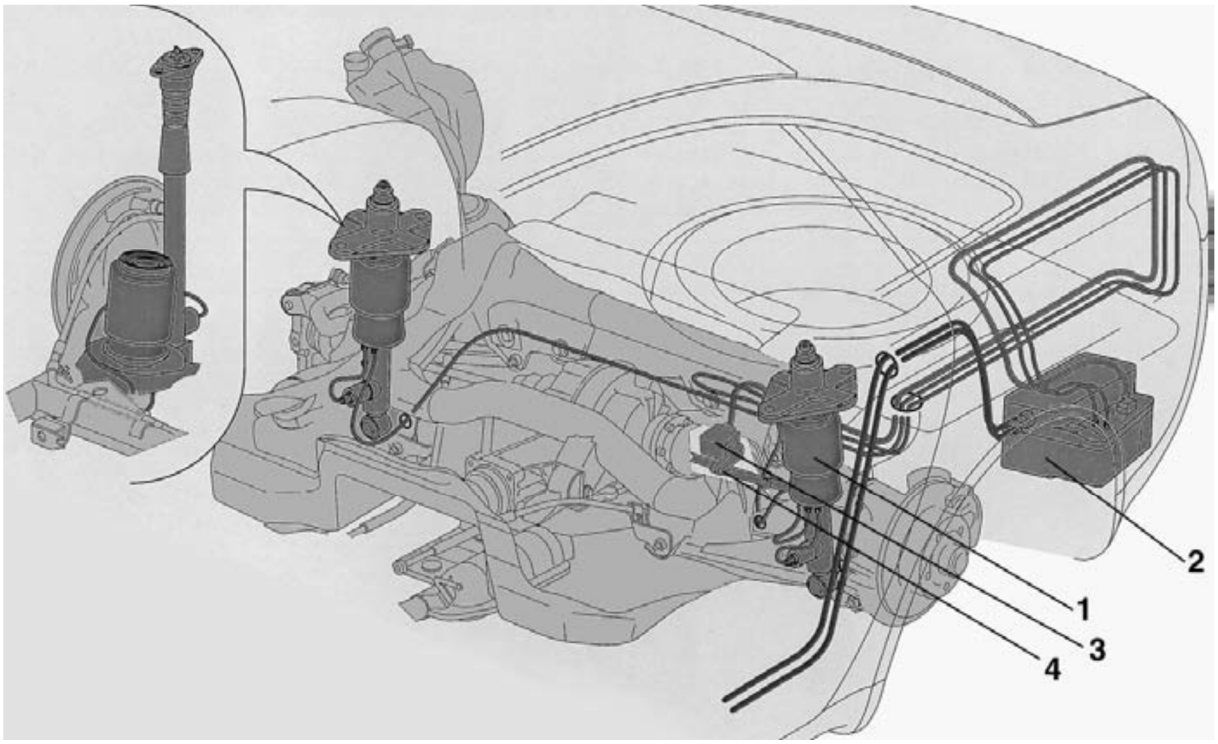
Výšková regulace probíhá buď mechanicky regulačním ventilem nebo elektronicky pomocí snímače výšky, který funguje na principu otočného potenciometru. V obou případech je ovládacím prvkem táhlo spojené s nápravou, které otáčí buď pákou ventilu nebo jezdcem potenciometru. Regulační ventil pak otevře průchod mezi kopresorem a vzduchovou pružinou. U elektronicky řízeného systému řídící jednotka vyhodnotí signály z potenciometru a vyšle příkazy pro elektromagnetické ventily, které řídí tlak ve vzduchové pružině. Elektromagnetické ventily navíc umožňují snižování výšky vozidla a tím například usnadnění nastupování do autobusu [1].



Obr.1.5. *Systém vzduchového odpružení: 1 – dmychadlo; 2 – odlučovač vody s tlakovým regulátorem; 3 – čtyřcestný ochranný ventil; 4 – pojistný ventil; 5 – zásobník vzduchu pro odpružení; 6 – přetlakový ventil; 7 – ventil pro vzduchové odpružení; 8 – elektropneumatický přepínací ventil; 9 – vzduchové pružiny; 10 – regulátor brzdné síly; 11 – elektrické řízení zdvihání a spouštění [1].*

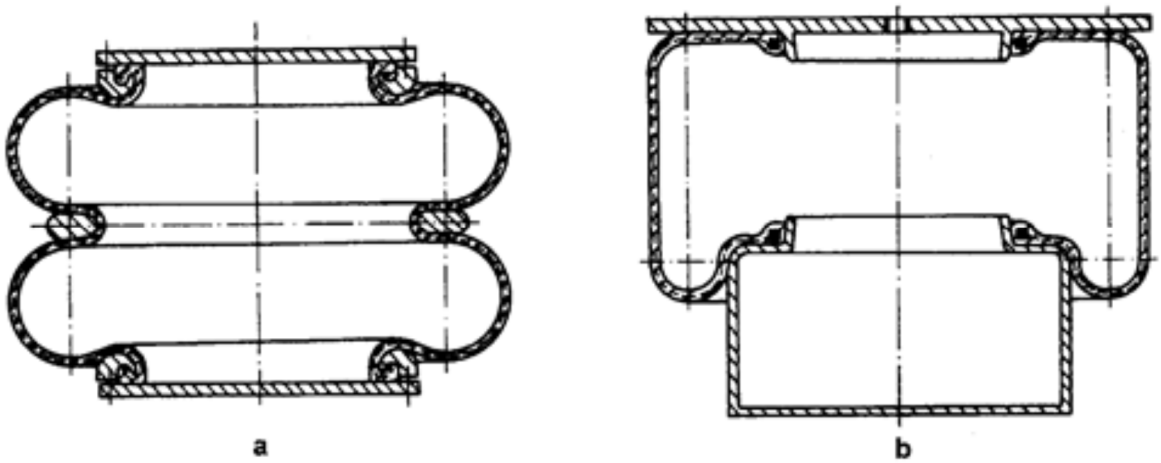


Obr.1.6. *Schéma vzduchového odpružení autobusu (Bosch): 1 – přívod vzduchu; 2 – ventilová jednotka; 3 – řídící jednotka; 4 – snímač výšky; 5 – vzduchová pružina; 6 – náprava; 7 – nástavba [1].*



Obr.1.7. *Zadní lichoběžníková náprava se vzduchovými pružinami vozu Audi A6 Quattro (r.v. 1997): 1 – vzduchová pružina s tlumičem; 2 – kompresor s vysoušečem vzduchu a ovládacími ventily; 3 – hallův snímač natočení; 4 – propojení snímače s nápravou pro zjištění jízdní výšky vozidla. Systém vyvinut firmou Continental AG [2].*

Konstrukce vzduchových pružin u těchto aplikací není pístová, ale s uzavřeným prostorem. Nejčastěji se používají pružné měchy, a to buď vlnovce nebo vaky. Vlnovcová pružina má dva až čtyři vlnovce a její pryžový plášť je zpevněn kordovými vložkami, které zaručují jeho pevnost a odolnost proti proražení. Vlnovcové pružiny mají velkou životnost, protože se při pružení jejich stěna pouze ohýbá. Vakové pružiny mají píst, po kterém se při pružení odvaluje vak a dochází ke značným deformacím. Proto jsou kladeny vyšší nároky na materiál vaku a tvarování pístu [1].



Obr.1.8. *Základní typy vzduchových pružin: a) vlnovcová pružina, b) vaková pružina [1].*

Tyto možnosti použití vzduchových pružin, jak již bylo zmíněno, jsou vhodné pro nákladní, městskou hromadnou a osobní dopravu. Pro závodní použití tato aplikace vzduchových pružin není vhodná. A to především z důvodů hmotnosti a složitosti systému, což jsou důležité faktory při návrhu závodního vozu. V následující kapitole si tedy rozebereme aplikace vzduchových pružin v motorsportu a provedeme výběr vhodné pružící jednotky pro vůz Formula Student.

2 VZDUCHOVÉ PRUŽINY U ZÁVODNÍCH VOZŮ

I když většina vozidel, ať už se jedná o jednostopé či dvoustopé, určená pro závodní použití používá vinutých pružin, najde se pár disciplín, kde se používají vzduchové pružiny. Většinou je to z toho důvodu, že vinuté pružiny jsou příliš těžké a vlastnosti vzduchové pružiny jsou pro dané použití dostačující. Co se týče konstrukce, tak se většinou jedná o celek pružící a tlumící jednotky.

2.1 ROCK CRAWLER, SAND BUGGY

V těchto disciplínách jde především o to, co nejvíc ušetřit váhu, proto se zde používá pneumatické odpružení. Pracovním médiem zde není vzduch, ale dusík, který má menší teplotní roztažnost než vzduch a pružina si tak ponechá původní vlastnosti i při vyšší teplotě pracovního média [3].

Obr.2.1. *Rock crawler[3]*

Z modelů pružících a tlumících jednotek používaných v těchto disciplínách lze uvést například King Shock 2.0“ Air Shock nebo Fox 2.0“ Air Shock. Oba modely jsou konstrukčně podobné, liší se jen zdvihem a celkovou délkou. King Shock nabízí zdvihy od 6“ do 16“ (od 150 mm do 406 mm), Fox od 4“ do 18“ (od 100 mm do 457 mm). Nastavení u obou modelů je podobné. Jízdní výška a tuhost pružiny se nastavuje tlakem pracovního média. Fox udává, že nárůst tlaku o 1 psi (přibližně 7 kPa) znamená nárůst tuhosti o 1,1 lb/in (0,2 N/mm). Parametry tlumení se nastavují pomocí výměny ventilů na pístu tlumení [3][4].

Obr.2.2. *King Shock 2.0“ Air Shock (vlevo), Fox 2.0“ Air Shock (vpravo) [3][4].*

2.2 BUGGY, ČTYŘKOLKY

U těchto vozidel se pohybujeme na relativně malých hmotnostech, proto jsou zde pružící jednotky menších rozměrů a kratších pracovních zdvihů. Ovšem i přes to je zde stále velký rozdíl v hmotnostech pružících jednotek používajících vinutou pružinu a pružinu vzduchovou.

Jako příklad modelu použitého v těchto aplikacích jsem si vybral Fox Float X Evol, který má mnoho parametrů k nastavení. Délka a zdvihy jsou následující: 16,1“ x 4,6“ (409 mm x 117 mm); 18,5“ x 5,0“ (470 mm x 127 mm); 20,0“ x 5,8“ (500 mm x 147 mm). Hmotnost je 2,1 kg při délce 20“. Co se týče nastavení, tak tlakem vzduchu v hlavní pracovní komoře nastavujeme jízdní výšku a tuhost pružiny. Tlak vzduchu v komoře Evol má vliv na průběh chrakteristiky ke konci zdvihu. Dále lze nastavit tlumení rychlé a pomalé komprese a také tlumení vyvěšení [5].

Obr.2.3. *Fox Float X Evol a jeho použití u čtyřkolky [5].*

Za zmínku také stojí, že pružící jednotky toho typu se využívají pro odpružení závodních vozů série BajaSAE, což je soutěž pro studenty amerických technických univerzit a jedná se o off – road variantu FormulaSAE [6].

2.3 KLASICKÉ AUTOMOBILY V ZÁVODNÍ ÚPRAVĚ

U tohoto typu závodních vozů je konstrukce odpružení podobná jako u osobních automobilů používajících systém vzduchového odpružení. Není zde ale regulace jízdní výšky za pomocí snímačů a řídící jednotky, která zpracovává signály ze snímačů, ale tlak ve vzduchových pružinách a tím i jízdní výšku si reguluje řidič sám pomocí ovládání v kabině vozidla [7].

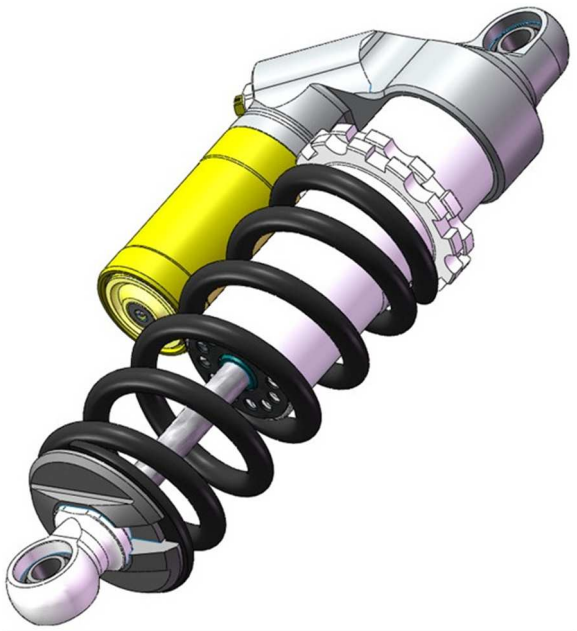
Systém odpružení se tedy skládá z kopresoru, zásobníku tlakového vzduchu, elektromagneticky řízených ventilů, vzduchových pružin (vlnovcové nebo vakové) a bezdrátového ovládání pro nastavování jízdní výšky a tuhosti pružiny. U tlumení nastavujeme tlumení vyvěšení a tlumení rychlosti komprese jedním společným ovládacím prvkem [7].

Obr.2.4. *Vlnovcová vzduchová pružina a tlumič pro zavěšení MacPherson (vlevo), vzduchová pružina a tlumič pro víceprvkovou nápravu (vpravo) [7].*

Obr.2.5. *Závodní vůz Mini Cooper se systémem vzduchového odpružení AirRex [8].*

3 VZDUCHOVÉ PRUŽINY PRO FORMULA STUDENT

Stávající vůz Formula Student používá pružící jednotku Öhlins TTX25 MkII, která byla vyvinuta pro použití ve vozech Formula Student. Jedná se o pružící jednotku s vinutou pružinou, která je dodávána v sadách o různých tuhostech od 150 lb/in (26,3 N/mm) do 650 lb/in (113,8 N/mm) a dvouplášťový tlumič s možností nastavení čtyřech tlumících parametrů. Jde o nastavení tlumení při rychlé kompresi, rychlém vyvěšení, pomalé kompresi a pomalém vyvěšení. Je tedy žrejmé, že tato pružící jednotka nabízí širokou škálu nastavení pro daný jízdní styl nebo závodní trať. Z toho důvodu je dobré vybírat alternativu k této pružící jednotce s podobnými možnostmi nastavení. Hmotnost této pružící jednotky je přibližně 450 g (bez pružiny). S pružinou je to v závislosti na zvolené tuhosti přibližně 950g [9].



Obr.3.1. *Öhlins TTX25 MkII [9]*

3.1 VÝBĚR ALTERNATIVY KE STÁVAJÍCÍMU ODPRUŽENÍ

V předchozí kapitole jsme si ukázali použití vzduchových pružin u různých druhů závodních vozů. Tyto konstrukce vzduchových pružin jsou ale pro použití u vozu Formula Student nevyhovující. Jejich nevhodnost spočívá jak v zástavbových rozměrech, které jsou příliš velké, tak i v tom, že jsou konstruovány pro větší zatížení. Zástavbové rozměry jsou víceméně dány body zavěšení a kinematikou nápravy. Tyto parametry byly navrhnuty pro použití výše zmiňovaného odpružení Öhlins TTX25 MkII, které má celkovou délku 200 mm (ve vyvěšeném stavu, měřeno od středů úchytových ok) a pracovní zdvih 57 mm. U vozů Formula Student se zatížení na každém kole pohybuje přibližně od 70 kg do 80 kg, když uvažujeme vůz s řidičem a distribuci zatížení na nápravy v poměru 50:50.

Pokud tedy vezmeme v potaz tyto parametry a použijeme je jako kritérium pro výběr alternativy ke stávajícímu odpružení, tak musíme hledat mimo motorsport. Nejvíce těmto parametrům totiž vyhovují odpružení používaná u horských kol, kde tyto pružící jednotky slouží k odpružení zadní stavby. Jinak řečeno, slouží k eliminaci vibrací zadního kola způsobených přejížděním přes nerovnosti.

Při rešerži produktů výrobců odpružení pro horská kola byly vybrány tyto možné varianty:

ROCK SHOX VIVID AIR R2C

Parametry:

- délka: 200 mm;
- zdvih: 57 mm;
- hmotnost: 530 g
- možnosti nastavení:
  - pružení: tuhost vzduchové pružiny změnou tlaku v pracovní komoře;
  - tlumení: rychlost roztažení v počátku a na konci vyvěšení, rychlost komprese [10].

Obr.3.2. *Rock Shox Vivid Air R2C [10]*

FOX DHX AIR 5.0

Parametry:

- délka: 200 mm;
- zdvih: 57 mm;
- hmotnost: 443 g
- možnosti nastavení:
  - pružení: tuhost vzduchové pružiny změnou tlaku v pracovní komoře, progresivita pružení ke konci zdvihu
  - tlumení: rychlost vyvěšení, citlivost komprese (tři stupně regulace – tlumič citlivý jak k malým rychlostem komprese, tak i k velkým rychlostem komprese; tlumič citlivý jen k velkým rychlostem komprese; tlumič se chová jako tuhý, není možné stlačení) [11].

Obr.3.3. *Fox DHX Air 5.0 [11]*

CANE CREEK DBAIR

Parametry:

- délka: 200 mm;
- zdvih: 57 mm;
- hmotnost: 500 g;
- možnosti nastavení:
  - pružení: tuhost vzduchové pružiny změnou tlaku v pracovní komoře, změna progresivity pružení pomocí změny objemu pracovní komory distančními podložkami
  - tlumení: rychlá komprese, rychlé vyvěšení, pomalá komprese, pomalé vyvěšení [12].

Obr.3.4. *Cane Creek DBAir [12]*

3.2 CANE CREEK DBAIR

Z výše uvedených variant byla nakonec vybrána finální alternativa ke stávajícímu odpružení. Cane Creek DBAir byl vybrán z důvodu shodného nastavení tlumení jako Öhlins TTX25 MkII a také z důvodu toho, že firma Cane Creek pracuje pro firmu Öhlins jakožto výrobce modelu TTX25 MkII. Dá se tedy říct, že se jedná o variantu se vzduchovou pružinou ke stávajícímu odpružení.

V této podkapitole se tedy důkladněji podíváme na zvolenou variantu. A to jak z hlediska konstrukce, tak i z hlediska funkce pružení a tlumení a jejich nastavení.

3.2.1 KONSTRUKCE

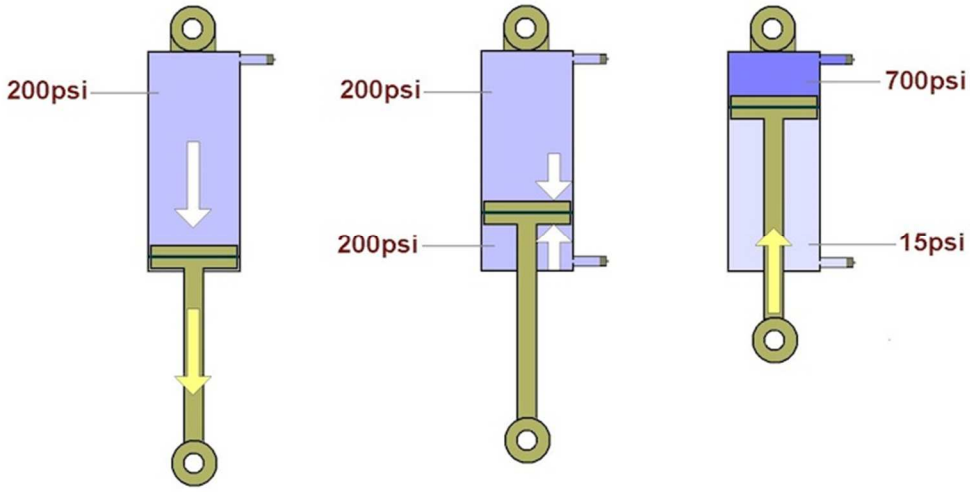
Jedná se o odpružení pístovou vzduchovou pružinou v jednom celku s dvouplášťovým tlumičem. Vybraný model se nabízí v různých délkách a zdvizích. Pro nás je nejvíce vyhovující délka 200 mm (vzdálenost mezi středy ok pro uchycení) a zdvih 57 mm. Oka na uchycení mají průměr 12,5 mm. Jak již bylo řečeno, jedná se o pístovou konstrukci, která je doplněna o tzv. „piggy back“ rezervoár. Ten obsahuje zásobu oleje pro tlumení a vnitřní plovoucí píst, který odděluje olej od dusíku. Díky tlaku dusíku na plovoucí píst je celý pracovní prostor tlumiče zaplněn olejem a tlumič tak může pracovat pod jakýmkoliv úhlem.

Obr.3.5. *Cane Creek DBAir: 1 – pracovní komora vzduchové pružiny; 2 – píst vzduchové pružiny; 3 – komora negativní vzduchové pružiny; 4 – komora tlumení komprese; 5 – píst tlumiče; 6 – komora tlumení vyvěšení; 7 – „piggy back“ rezervoár s plovoucím pístem; 8 – ventil pro regulaci tlaku vzduchu v pružině; 9 – nastavení tlumení; 10 – oko na uchycení.*

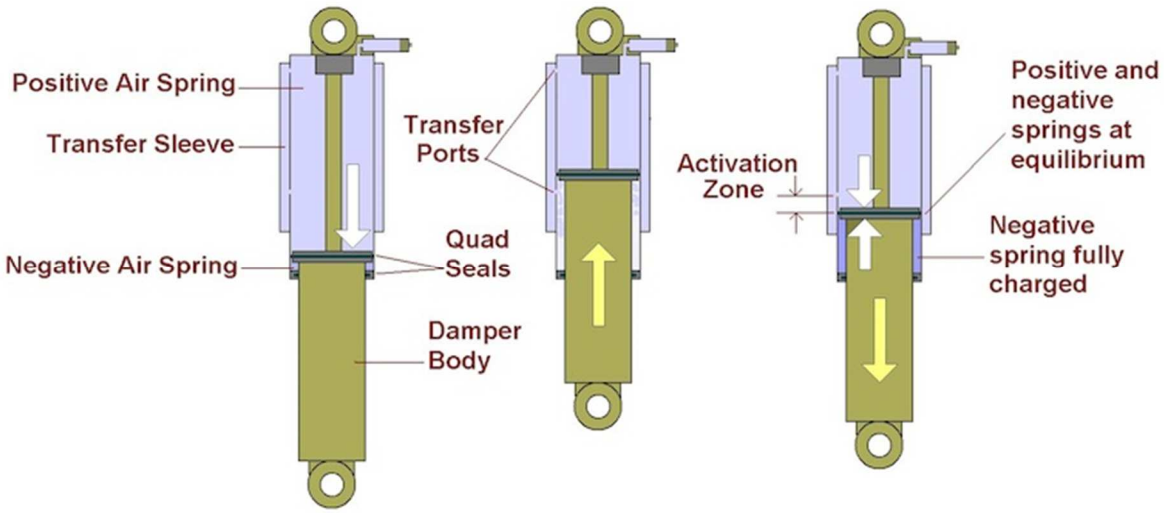
3.2.2 PRUŽENÍ

Pružení se skládá ze vzduchové pružiny a takzvané negativní pružiny. Nastavení tuhosti pružiny je tlakem vzduchu, který dodáváme do komory přes ventil. Další možnost nastavení pružící charakteristiky spočívá ve změně objemu pracovní komory pomocí distančních podložek. Tím dosáhneme změny progresivity pružení při stejném tlaku vzduchu.

Negativní pružina je nezbytným doplňkem klasické vzduchové pružiny. Funkcí každé pružiny je kumulovat energii, která vzniká při její deformaci. Když si vezmeme vinutou přužinu, tak ta při nulovém stlačení (zdvihu) uchovává nulovou energii. Lze to vyčíst i z její deformační charakteristiky (**obr.1.2**). U vzduchové pružiny toto ale neplatí, protože i při nulovém stlačení v sobě uchovává energii, která je jí dána počátečním nahustěním (**obr.1.4**). To má za důsledek, že při návratu do původní polohy po stlačení jsou pružící síly větší než síly tlumící a výsledkem je špatné chování pružiny a tlumiče jako celku. Negativní pružina tento nedostatek odstraňuje. Její nastavení je buď manuální (**obr.3.6**), kdy přes ventil nahustíme určitý tlak (daný výrobcem v závislosti na tlaku ve vzduchové pružině) vzduchu do prostoru pod pístem pružiny nebo automatické (**obr.3.7**). Automatické nastavení spočívá v důmyslné konstrukci pracovní komory vzduchové pružiny. Ta je vybavena přepouštěcím kanálem, který se aktivuje při pohybu pístu směrem vzhůru a dojde k přepuštění části vzduchu do prostoru pod pístem [13].



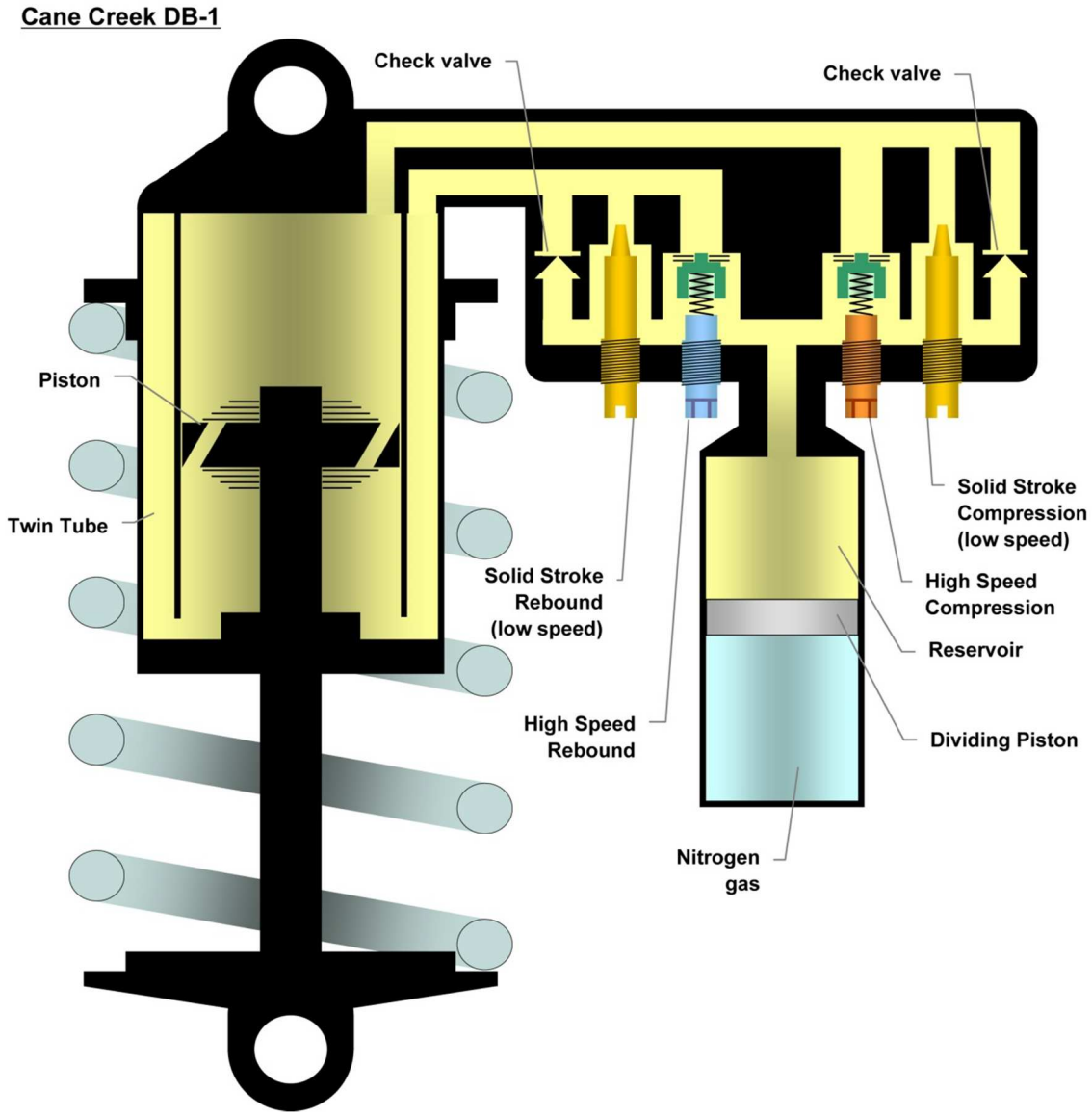
Obr.3.6. *Manuální nastavení negativní vzduchové pružiny [13].*



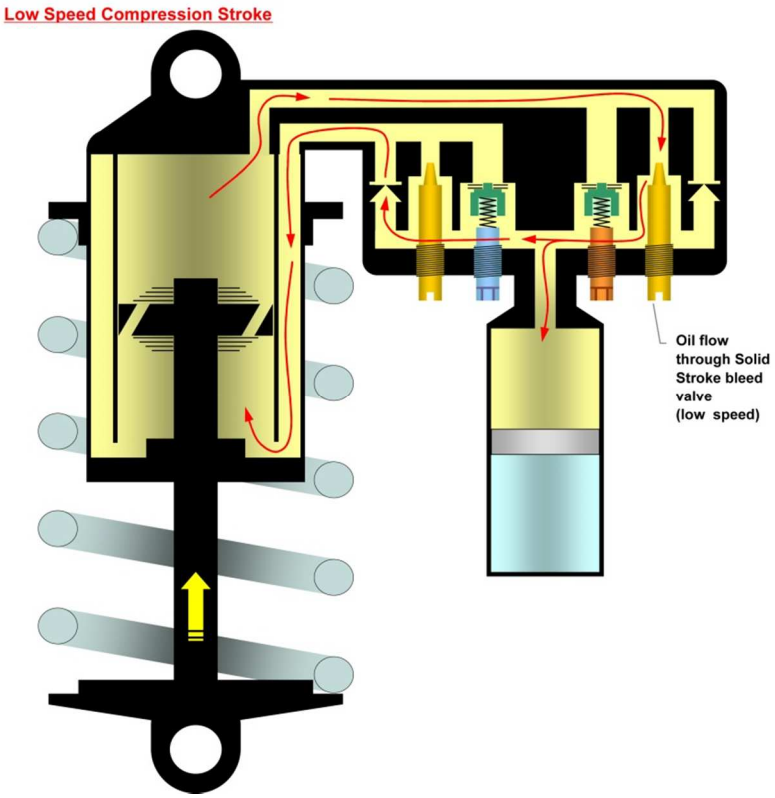
Obr.3.7. *Automatické nastavení negativní vzduchové pružiny [13].*

3.2.3 TLUMENÍ

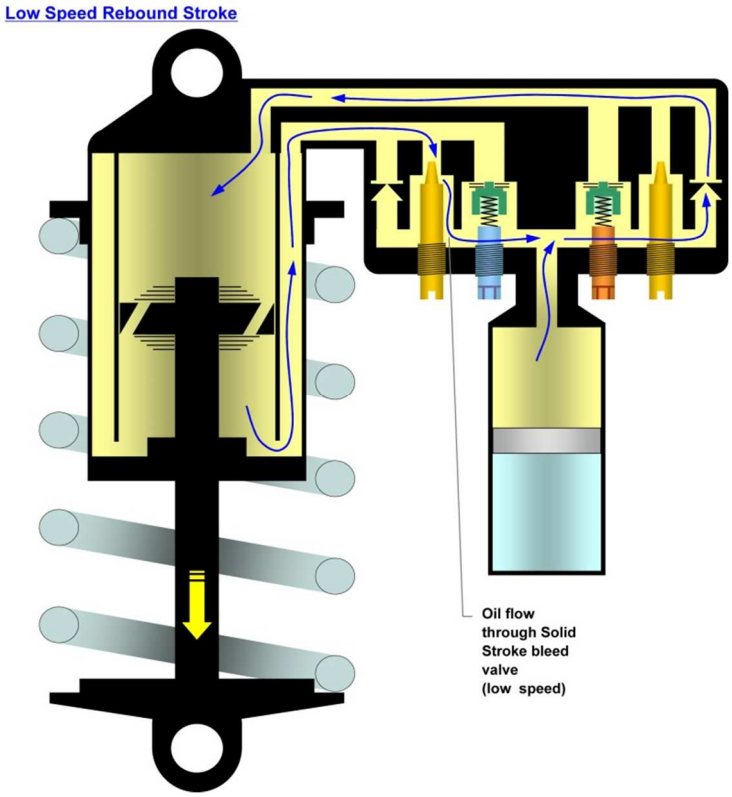
O tlumení se stará dvouplášťový tlumič s nezávislým nastavením tlumení komprese a odskoku. Nastavení probíhá pomocí čtyřech regulačních prvků pro rychlou kompresi (high – speed compression), pomalou kompresi (low – speed compression), rychlý odskok (high – speed rebound) a pomalý odskok (low – speed rebound). Schémata tlumení na následujících obrázcích (**obr.3.8.** až **obr.3.12.**) jsou pro tlumící systém odpružení Cane Creek DB – 1, ale DBAir má stejný tlumící systém.



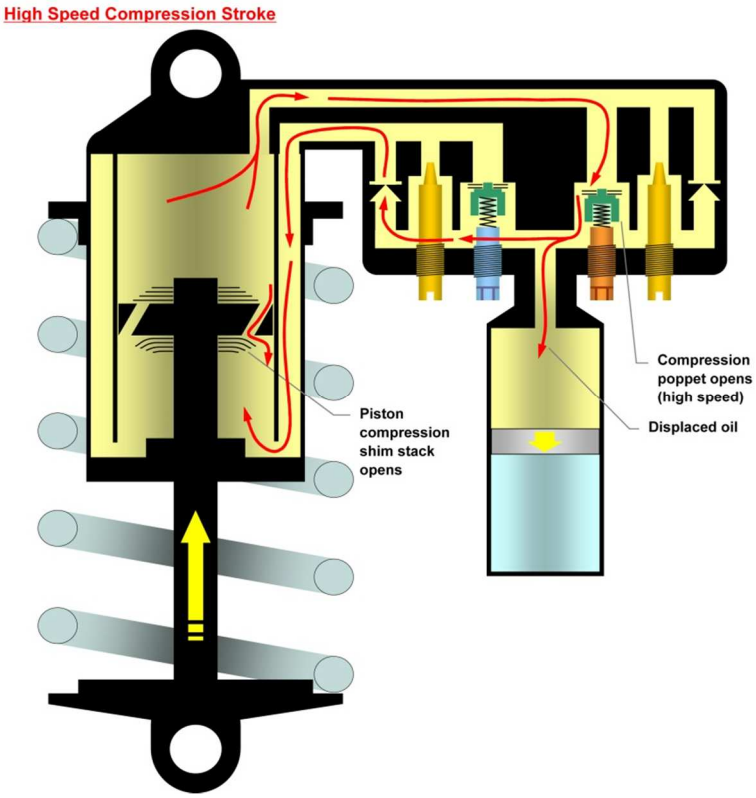
Obr.3.8. *Schéma tlumícího systému Cane Creek [14].*



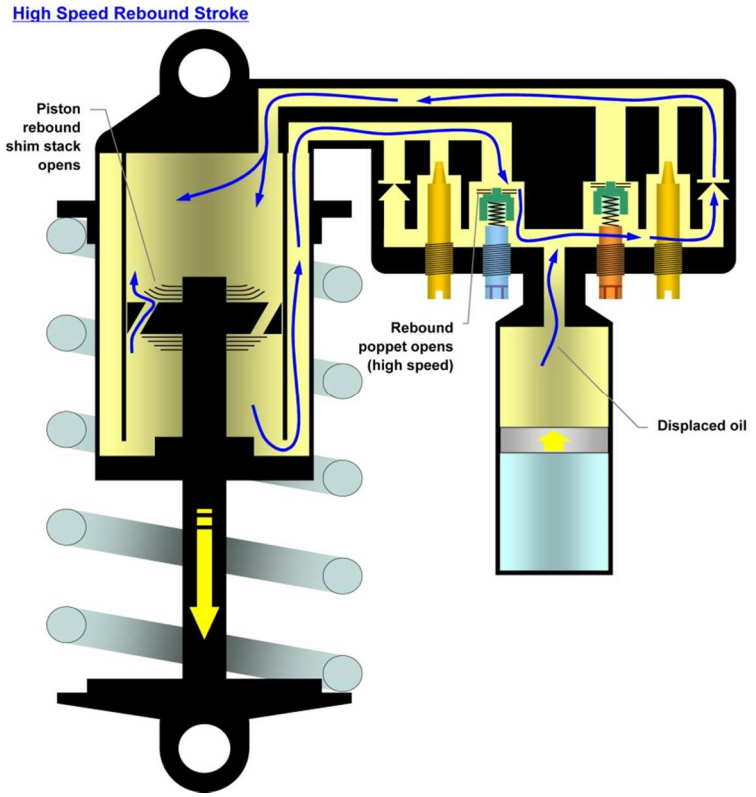
Obr.3.9. *Schéma toku oleje při tlumení pomalé komprese [14].*



Obr.3.10. *Schéma toku oleje při tlumení pomalého odskoku [14].*



Obr.3.11. *Schéma toku oleje při tlumení rychlé komprese [14].*



Obr.3.12. *Schéma toku oleje při tlumení rychlého odskoku [14].*

4 NASTAVENÍ PRUŽÍCÍ JEDNOTKY

Pro správnou funkci vzduchové pružiny je potřeba, aby byla správně nastavena. To v praxi znamená zvolit správný tlak vzduchu v pracovní komoře vzduchové pružiny. Tuhost pružiny a vlastní frekvence odpružených a neodpružených hmot jsou závislé na tlaku vzduchu.

Uživatelský manuál pro Cane Creek DBAir uvádí, že při ideálním nastavení by se měl píst vzduchové pružiny zanořit o 28 - 33% svého zdvihu (v anglické literatuře je toto statické zanoření pístu pružiny označováno jako tzv. „sag“) [15]. To proto, aby bylo zajištěno stálého styku kola s vozovkou při vyvěšení. Na tento aspekt myslí také pravidla soutěže Formula Student, která v sekci suspension požadují zdvih kola minimálně 50,8 mm, z toho 25,4 mm při stlačení a 25,4 mm při vyvěšení [16]. Nastavení tedy musí být takové, aby těmto pravidlům vyhovovalo.

PARAMAETRY VZDUCHOVÉ PRUŽINY PŘI ROVNOVÁŽNÉM STAVU:

Objem pracovní komory pozitivní pružiny:	124364,9 mm^3
Plocha pístu pozitivní pružiny:	1540,166 mm^2
Objem pracovní komory neg. pružiny:	2793,1 mm^3
Plocha pístu neg. pružiny:	789,197 mm^2

Při hledání vhodného tlaku v pracovní komoře pozitivní pružiny budeme vycházet ze vztahu (1.7.), ale musíme uvažovat, že proti pístu nepůsobí atmosférický tlak, jak je tomu u výše uvedeného případu, ale tlak v negativní pružině. Nastavení tlaku v negativní pružině je automatické a u modelu Cane Creek DBAir funguje principielně stejně jak je uvedeno na příkladu na **obr.3.7.**. Z toho vyplývá, že při poloze pístu pružiny, kdy dochází k přepouštění vzduchu z prosotru pozitivní pružiny do prostoru negativní pružiny, musí být tlak v obou komorách:

$$p_p(z_p) \geq p_n(z_p)\,, \tag{4.1.}$$

kde p_0 je tlak v pozitivní komoře, p_n je tlak v negativní komoře a z_p je zdvih pístu pružiny, při kterém dochází k přepouštění. Tento zdvih je roven z_p = 4,5 mm, tomu odpovídá délka pružící jednotky L_p = 195,5 mm (při zdvihu z = 0 mm je délka L = 200 mm). Tato podmínka pak slouží jako kontrola správnosti výpočtu tlaku.

Pro výpočet tlaku uvažujeme už plně nastavenou negativní pružinu. V tom případě pak musí platit, že při nulovém zdvihu jsou síly působící na píst pružiny od pozitivní a negativní pružiny v rovnováze. Platí tedy vztah:

$$\frac{p_p(z_0)\cdot V_p^n}{\left(V_p - S_p\cdot z_0\right)^n}\cdot S_p = \frac{p_n(z_0)\cdot V_n^n}{(V_n + S_n\cdot z_0)^n}\cdot S_n\,, \tag{4.2.}$$

kde p_p je tlak v pozitivní komoře, p_n je tlak v negativní komoře, S_p je plocha pístu pozitivní pružiny, S_n je plocha pístu negativní pružiny, z_0 je nulový zdvih (délka L_0 = 200 mm) a n je polytropický koeficient. Po úpravě tedy dostaneme:

$$p_p(z_0) \cdot S_p = p_n(z_0) \cdot S_n \tag{4.3.}$$

Pro přední nápravu uvažujme rozdělení zatížení na jedno kolo 68,25 kg, z toho 10,35 kg je hmotnost neodpružených hmot. Výsledná hmotnost působící na pružinu je tedy 57,9 kg, což činí při převodovém poměru vahadla 0,641 (poměr stlačení pružiny ke zdvihu kola) zatížení pružiny silou 886,1 N. Abychom vyhověli pravidlům soutěže Formula Student, tak musí být „sag" minimálně 16,3 mm. Pro výpočet vhodného tlaku jsem si zvolil „sag" 28,5 mm, což je polovina zdvihu pružiny a toto zanoření odpovídá výchozí poloze pružící jednotky v simulačním modelu. Vztah pro výpočet tlaku je pak:

$$F = \frac{p_p(z_{prac}) \cdot V_p^n}{\left(V_p - S_p \cdot z_{prac}\right)^n} \cdot S_p - \frac{p_n(z_{prac}) \cdot V_n^n}{\left(V_n + S_n \cdot z_{prac}\right)^n} \cdot S_n \,, \tag{4.4.}$$

kde z_{prac} odpovídá zdvihu pístu pružiny 28,5 mm a tím délce pružící jednotky 171,5 mm. Z rovnice (4.3.) vyjádříme p_n a dosadíme do rovnice (4.4.), odkud pak vyjádříme vztah pro výpočet p_p:

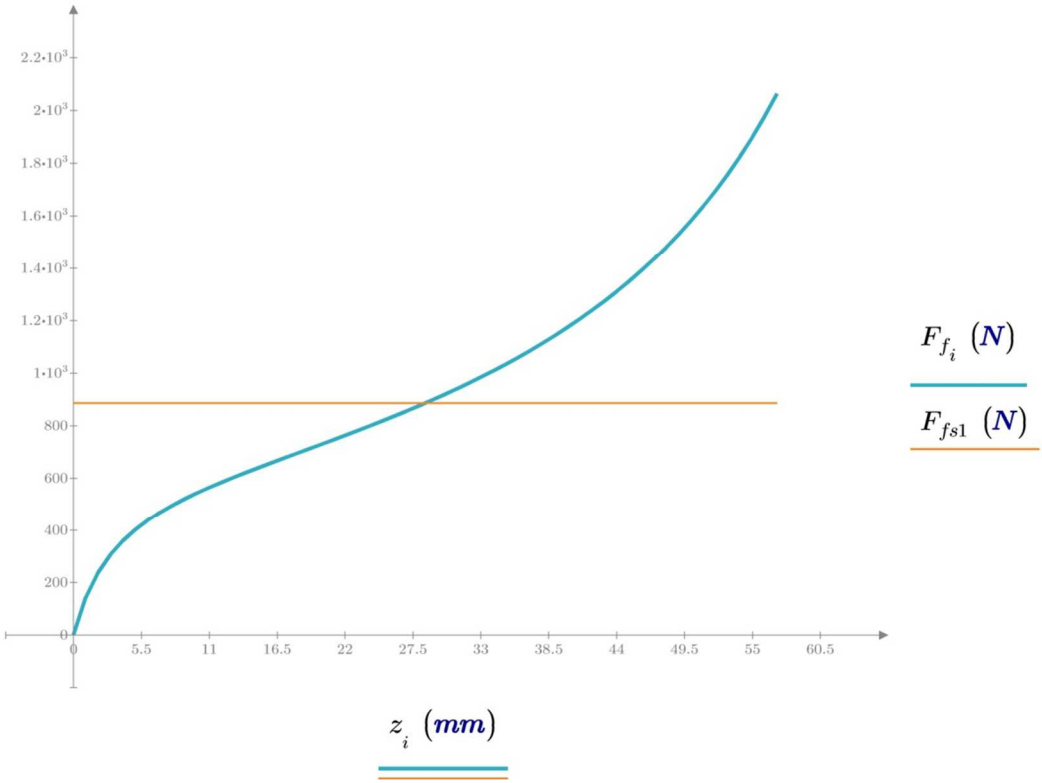
$$p_p = \frac{F}{\frac{S_p \cdot V_p^n}{\left(V_p - S_p \cdot z_{prac}\right)^n} - \frac{S_p \cdot V_n^n}{\left(V_n + S_n \cdot z_{prac}\right)^n}} \tag{4.5.}$$

Pro námi zadané podmínky je výsledný tlak roven 58 psi (0,4 MPa). Celkovou charakteristiku vzduchové pružiny vypočteme podle vzorce:

$$F_p = \frac{p_p \cdot V_p^n}{\left(V_p - S_p \cdot z_i\right)^n} \cdot S_p - \frac{p_n \cdot V_n^n}{(V_n + S_n \cdot z_i)^n} \cdot S_n \,, \tag{4.6.}$$

kde z_i je zdvih od 0 mm do 57 mm (délka pružící jednotky L od 200 mm do 143 mm). Výslednou charakteristiku pak vykreslíme do grafu spolu se statickým zatížením. Pro lepší přehlednost jsem hodnoty pružící síly vypsal do tabulky.

zdvih [mm]	pružící síla [N]
0	0
5	402
10	543
15	640
20	728
25	818
30	917
35	1033
40	1173
45	1350
50	1581
55	1899
57	2064

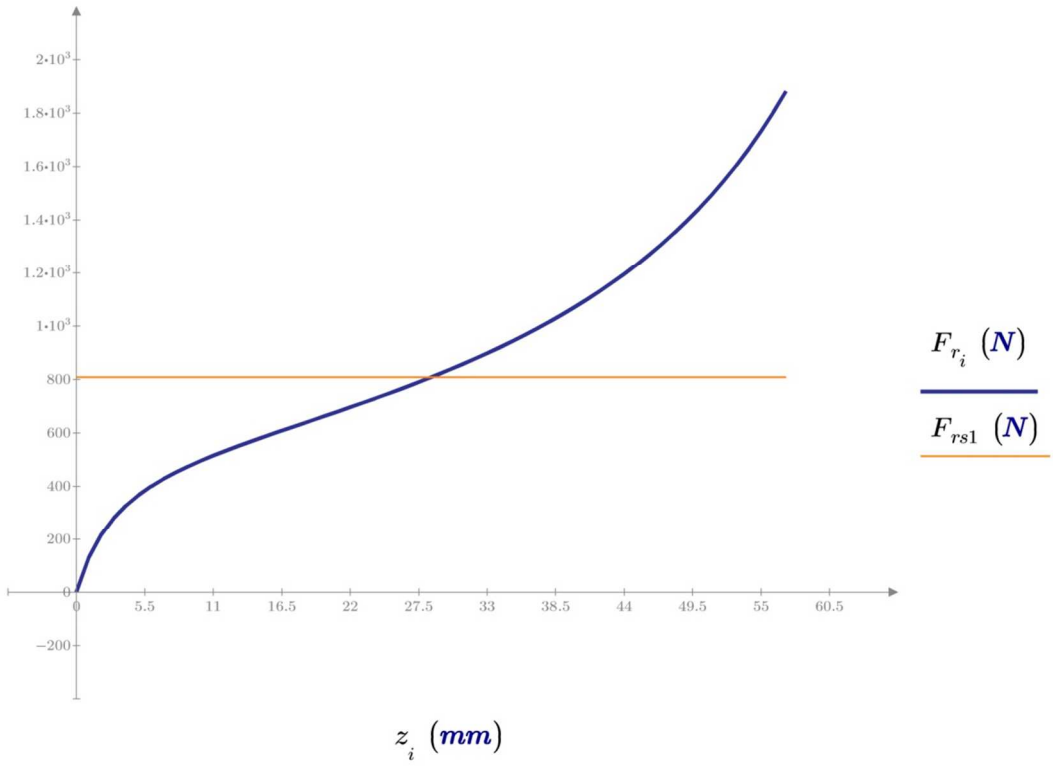


Obr.4.1. *Charakteristika vzduchové pružiny Cane Creek DBAir pro přední nápravu.*

Pro zadní nápravu uvažujme stejné rozdělení zatížení, ale neodpružené hmoty zde mají hmotnost 10,75 kg. Výsledná hmotnost působící na pružinu je tedy 57,5 kg. Převodový poměr vahadla je zde 0,698 a statické zatížení pružiny na zadní nápravě je rovno 808,1 N. Pro vyhovění pravidlům potřebujeme „sag“ minimálně 17,7 mm. Pro výpočet tlaku jsem opět volil „sag“ 28,5 mm.

Vztahy pro výpočet vhodného tlaku vzduchu v pracovní komoře pozitivní pružiny jsou stejné jako vztahy (4.1.) až (4.6.). Výsledkem je pak tlak 53 psi (0,37 MPa).

zdvih [mm]	pružící síla [N]
0	0
5	367
10	496
15	584
20	664
25	746
30	837
35	942
40	1070
45	1231
50	1442
55	1732
57	1882

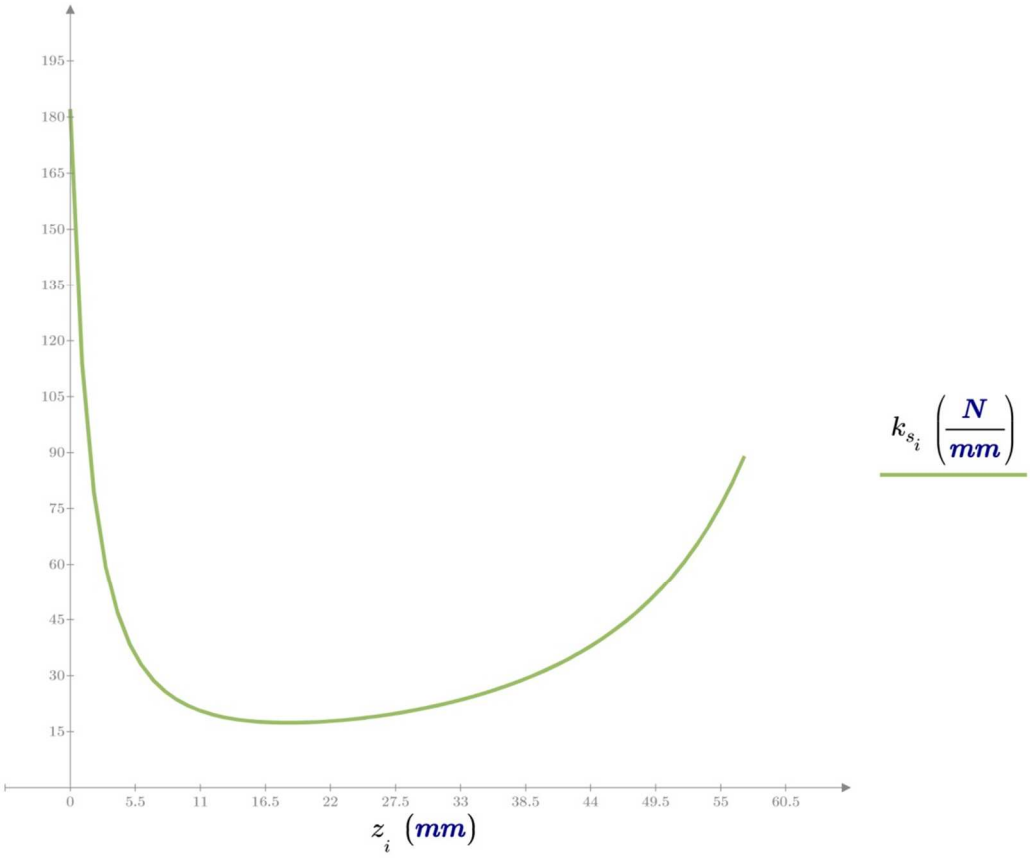


Obr.4.2. *Charakteristika vzduchové pružiny Cane Creek DBAir pro zadní nápravu.*

Jak již bylo řečeno v kapitole **1.2.**, tuhost vzduchové pružiny je závislá na tlaku v pracovní komoře a je nelineární jako průběh pružící síly. Pokud tedy zderivujeme vztah (4.6.) podle zdvihu *z*, dostaneme:

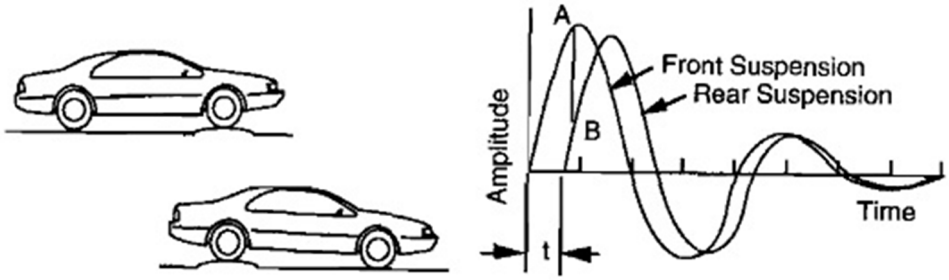
$$k_s = \frac{n \cdot S_n^2 \cdot V_n^n \cdot p_n}{(V_n + z \cdot S_n)^{n+1}} + \frac{n \cdot S_p^2 \cdot V_p^n \cdot p_p}{(V_p - z \cdot S_p)^{n+1}} \qquad (4.7.)$$

Dosadíme do něj tlaky vzduchu v pracovních komorách pružin pro přední a zadní nápravu. Při statickém zanoření přední nápravy z_{prac} = 28,5 mm je tuhost pružiny rovna $k_{sf}(z_{prac})$ = 20,4 N/mm. Pro zadní nápravu a zanoření z_{prac} = 28,5 mm má tuhost hodnotu $k_{sr}(z_{prac})$ = 18,6 N/mm. Tuhost pružiny v závislosti na zdvihu pro přední nápravu vykreslená do grafu vypadá takto:



Obr.4.3. *Tuhost pružiny přední nápravy.*

Dalším důležitým parametrem, na který je nutné brát zřetel, je vlastní frekvence odpružených a neodpružených hmot. U vlastních frekvencí odpružených hmot přední a zadní nápravy nejde primárně o velikost jejich hodnot, ale o jejich rozdílnost, která má vliv na chování vozidla po přejetí nerovnosti. To je znázorněno na **obr.4.4.**.



Obr.4.4. *Kmitání náprav vozidla po přejetí nerovnosti [18].*

Vzorec pro výpočet vlastní frekvence odpružených hmot jednoho kola nápravy je:

$$f_s = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot RR}{m_s}}, \tag{4.8.}$$

kde m_s je odpružená hmota nápravy a *RR* je společná tuhost pneumatiky a pružiny vyjádřená vzorcem:

$$RR = \frac{k_t \cdot k_{su}}{k_t + k_{su}}, \tag{4.9.}$$

kde k_t je tuhost pneumatiky a k_{su} je tuhost nápravy (tuhost pružiny k_s kdyby byla umístěna nad kolem). Tuhost pneumatiky je k_t = 100 N/mm. Tuhost nápravy vypočítáme z tuhosti pružiny k_s, kterou vynásobíme kvadrátem převodového poměru vahadla q.

$$k_{su} = k_s \cdot q^2 \tag{4.10.}$$

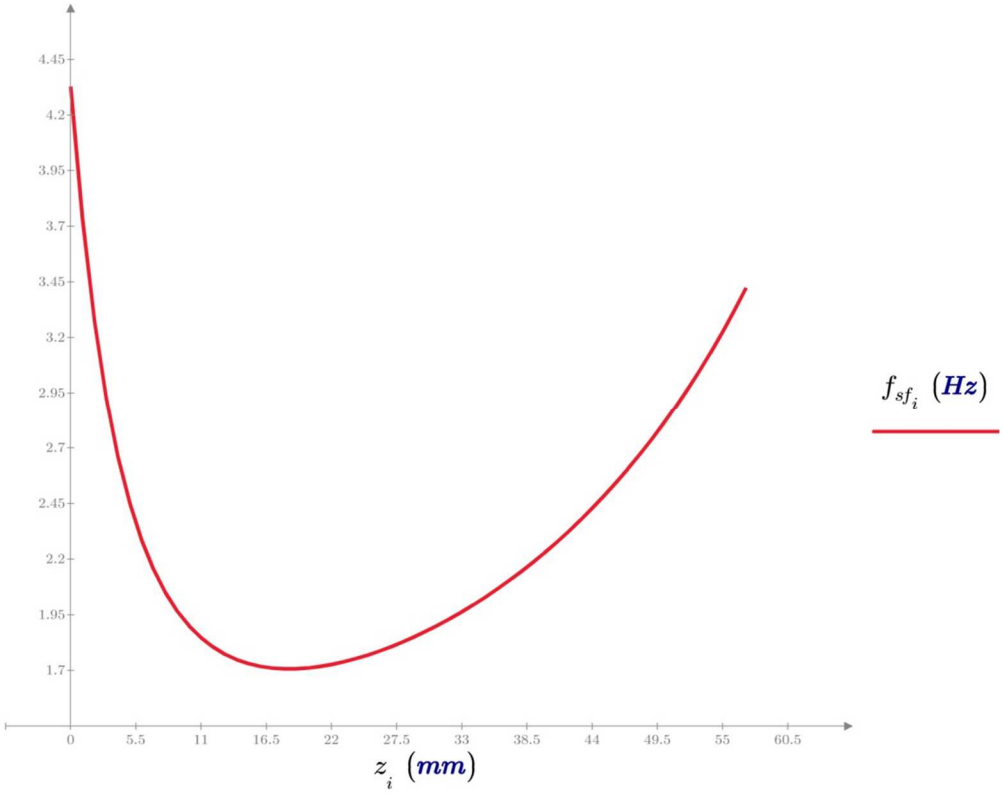
To platí i pro tuhost pružiny ve vztahu pro výpočet vlastní frekvence neodpružených hmot, jejíž vzorec je:

$$f_u = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (k_t + k_{su})}{m_u}}, \tag{4.11.}$$

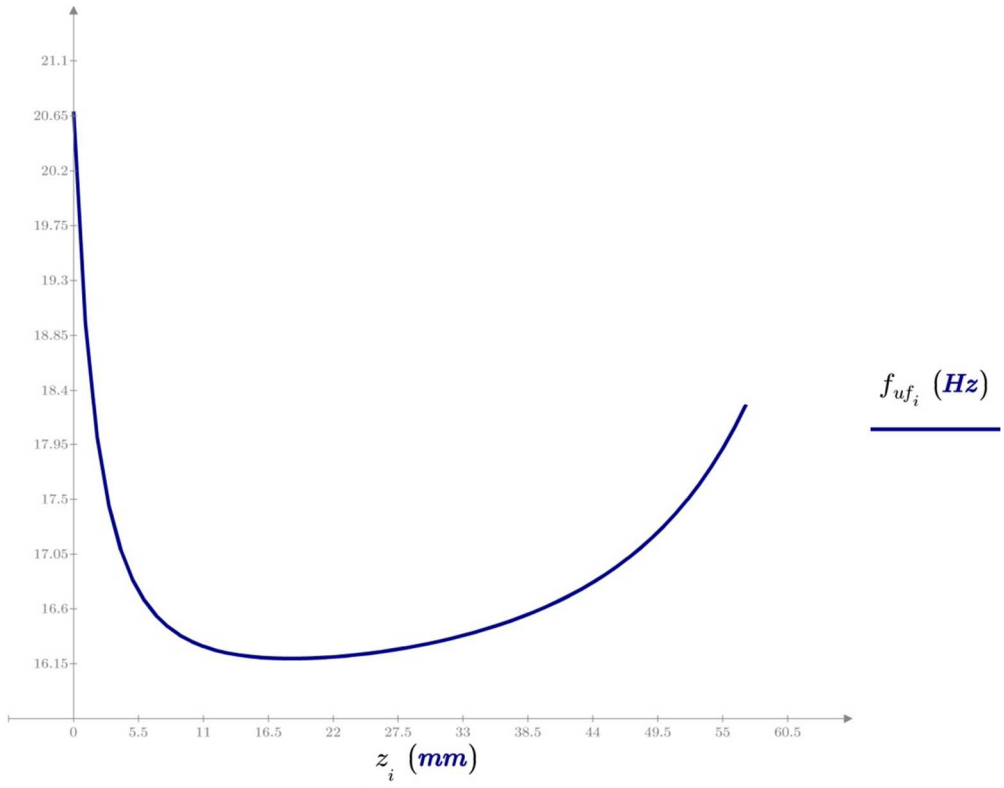
kde m_u je neodpružená hmota nápravy.

Pokud při hmotnosti vozu Formula student 205 kg a hmotnosti řidiče 68 kg budeme uvažovat rozdělení zatížení na nápravy v poměru 50:50, připadá na přední nápravu hmotnost 136,5 kg. Z toho činí 20,7 kg hmotnost neodpružených částí a 115,8 kg hmotnost částí odpružených. Vezmeme – li tyto data spolu s hodnotami tuhosti pneumatiky a přepočítané tuhosti pružiny a dosadíme je do vztahů (4.8.) a (4.11.), získáme hodnoty vlastních frekvencí odpružených a neodpružených hmot přední nápravy. Jelikož je hodnota vlastní frekvence závislá na tuhosti pružiny, tak se její hodnota se vzrůstajícím zdvihem mění.

Vlastní frekvence odpružených hmot přední nápravy pro statické zanoření z_{prac} = 28,5 mm je rovna $f_{fs}(z_{prac})$ = 1,84 Hz. Vlastní frekvence neodpružených hmot přední nápravy je při statickém zanoření z_{prac} = 28,5 mm rovna $f_{fu}(z_{prac})$ = 16,29 Hz.



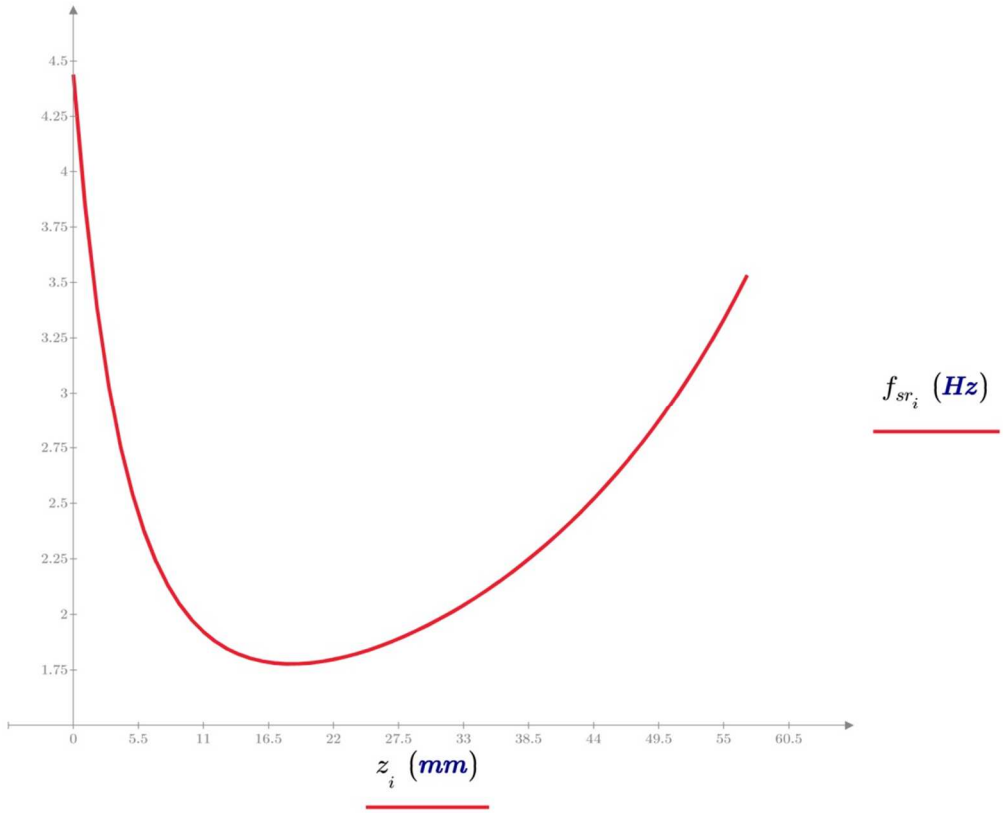
Obr.4.5. *Graf závislosti vlastní frekvence odpružených hmot přední nápravy na zdvihu.*



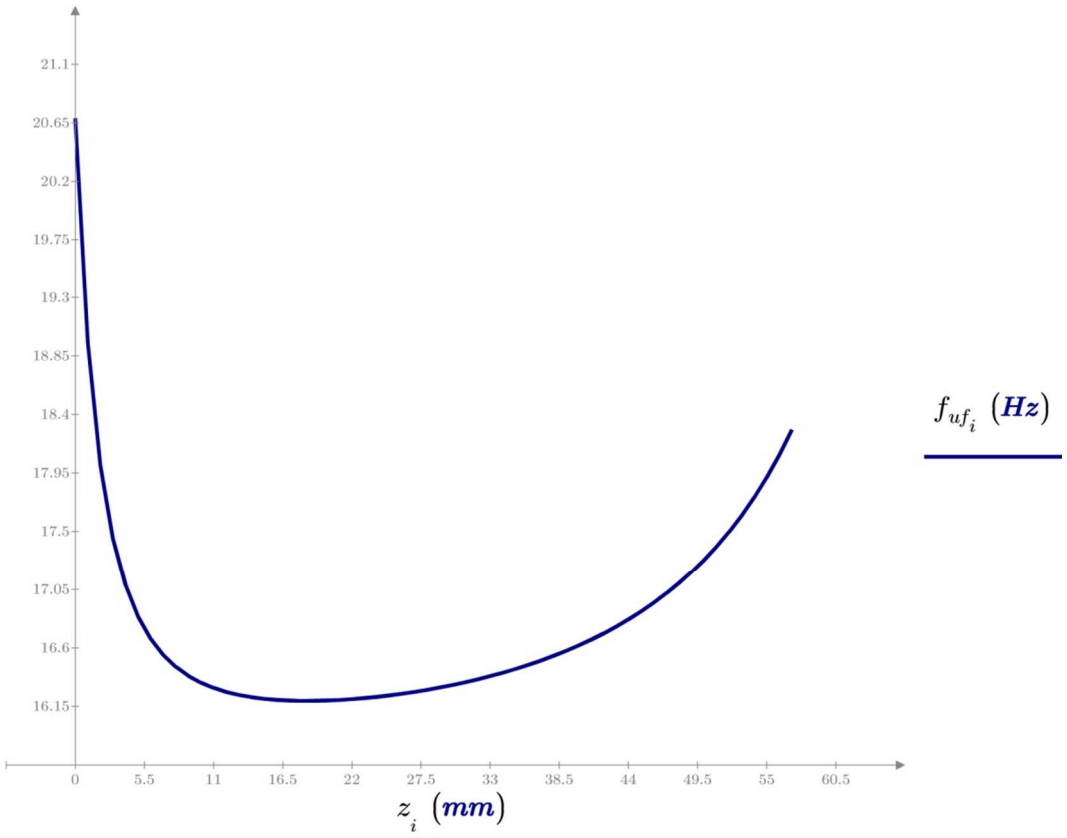
Obr.4.6. *Graf závislosti vlastní frekvence neodpružených hmot přední nápravy na zdvihu.*

Zatížení zadní nápravy je stejné jako u nápravy přední, ale hmotnost odpružených a neodpružených částí je tu jinak rozdělena. Neodpružené části mají hmotnost 21,5 kg a odpružené části váží 115 kg. Tyto data opět dosadíme spolu s tuhostmi do vztahů (4.8.) a (4.11.), čímž získáme hodnoty vlastních frekvencí odpružených a neodpružených hmot zadní nápravy.

Vlastní frekvence odpružených hmot zadní nápravy pro statické zanoření z_{prac} = 28,5 mm je rovna $f_{rs}(z_{prac})$ = 1,91 Hz. Vlastní frekvence neodpružených hmot zadní nápravy je při statickém zanoření z_{prac} = 28,5 mm rovna $f_{ru}(z_{prac})$ = 16,03 Hz.



Obr.4.7. *Graf závislosti vlastní frekvence odpružených hmot zadní nápravy na zdvihu.*



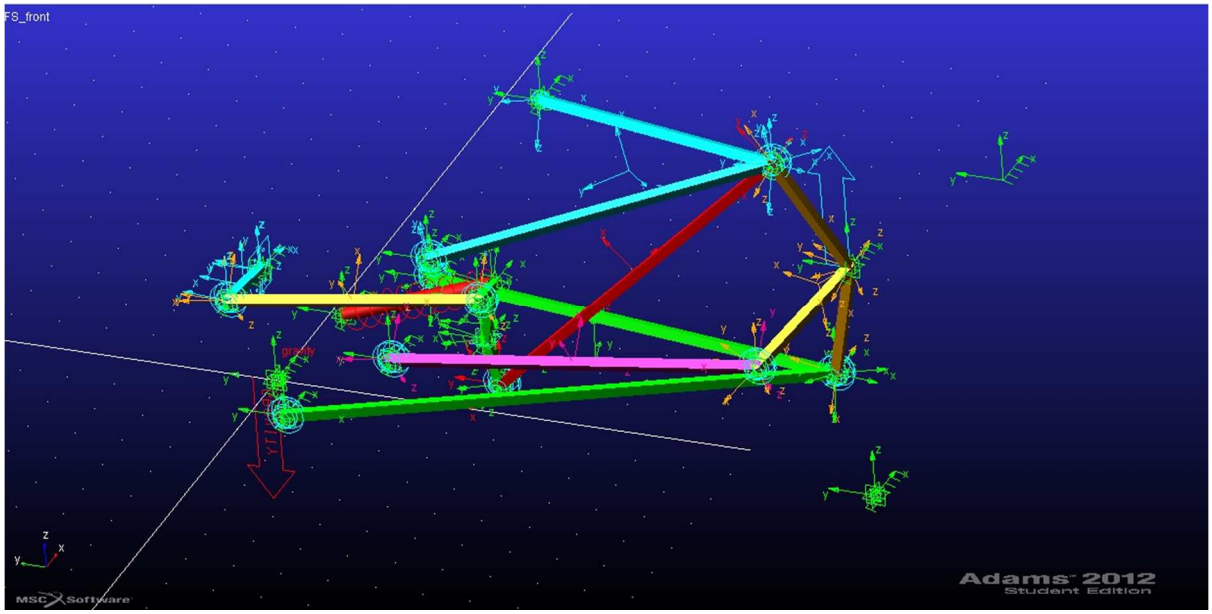
Obr.4.8. *Graf závislosti vlastní frekvence neodpružených hmot zadní nápravy na zdvihu.*

4.1 PRŮBĚH PRUŽÍCÍ SÍLY NA KOLE NÁPRAVY

Deformační charakteristika pružiny, která je uvedená na obrázcích 4.1. a 4.2., je charakteristika vykreslující průběh pružící síly v závislosti zdvihu pístu vzduchové pružiny. Jak vypadá stejná deformační charakteristika v závislosti na zdvihu kola lze zjistit pomocí MBS (Multi Body System) programu MSC Adams.

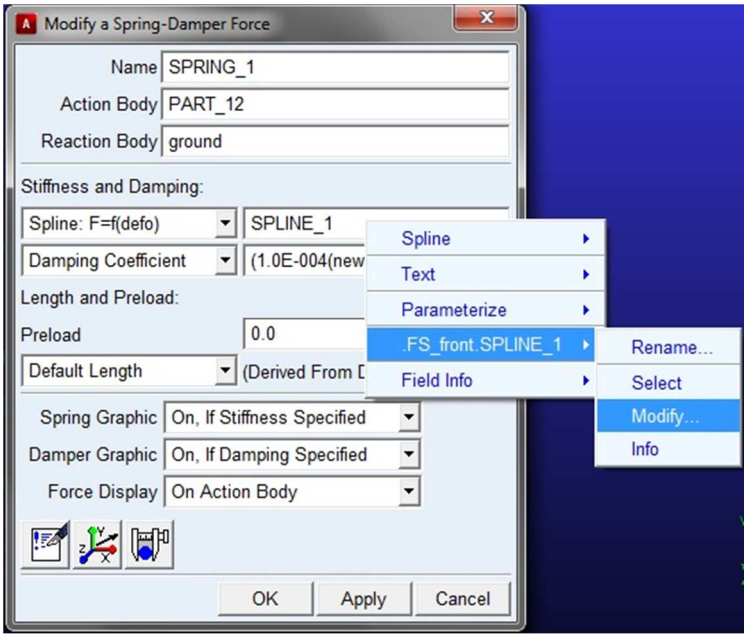
V tomto programu je možné sestavit model nápravy vozu Formula Student, zadat vstupy, measure prvky (prvky šloužící k měření sledovaných veličin) a po provedení simulace vykreslit grafy sledovaných veličin v postprocessoru, kde je možné si zvolit závislost sledované veličiny na čase či jiné sledované veličině. V tomto případě budeme sledovat závislost síly působící ve středu kola na zdvihu kola.

Průběh tvorby modelu, zadávání vstupů a measure prvků, simulaci a vykreslení grafu deformační charakteristiky si podrobně popíšeme u modelu přední nápravy. Základ modelu jsou kinematické body zavěšení. Podle těchto dat si v prostředí programu Adams vytvoříme soustavu bodů reprezentující body zavěšení nápravy, které poté pospojujeme prvky „*link*“, abychom vytvořili A – ramena, těhlici, tažnou/tlačnou tyč, vahadlo, táhlo stabilizátoru a řidicí tyč. K těmto prvkům ještě přidáme pružinu a jednotlivé části nápravy spojíme kinematickými vazbami tak, aby výsledný model měl správný počet stupňů volnosti.

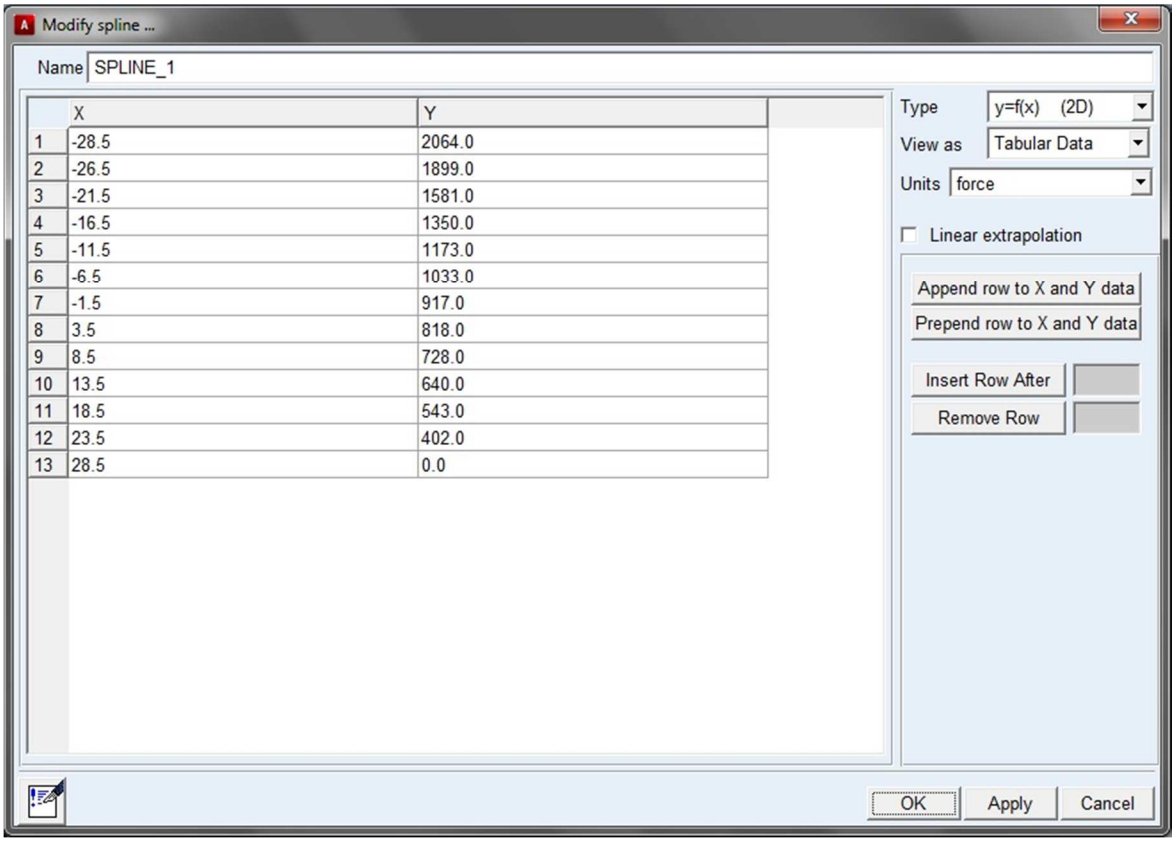


Obr.4.9. *Model přední nápravy v MSC Adams.*

Jako vstupy zadáváme deformační charakteristiku pružiny, kterou jsme si vypočítali v předchozí části a také pohyb, který má model nápravy v simulaci vykonat. Pružině lze přiřadit konstantní hodnota tuhosti, ale jelikož je tuhost pružiny v našem případě progresivní, tak je třeba zadat charakteristiku pružiny jako funkci pružící síly v závislosti na zdvihu. Tuto charakteristiku lze zadat pomocí bodů, které získáme odečtením hodnot z průběhů pružící síly (**obr.4.1.** a **obr.4.2.**). Těmito body je pak proložen spline. Jelikož je model nápravy vytvořen tak, že ve výchozí pozici je píst pružiny zasunut o plovinu svého zdvihu, což činí 28,5 mm, jsou hodnoty sil v tabulce pro tvorbu spline udávány v rozmezí od -28,5 mm do 28,5 mm s krokem 5 mm (**obr. 4.11.**), kde -28,5 mm je plné stlačení pružiny (L = 143 mm) a 28,5 mm je plné roztažení pružiny (L = 200 mm).

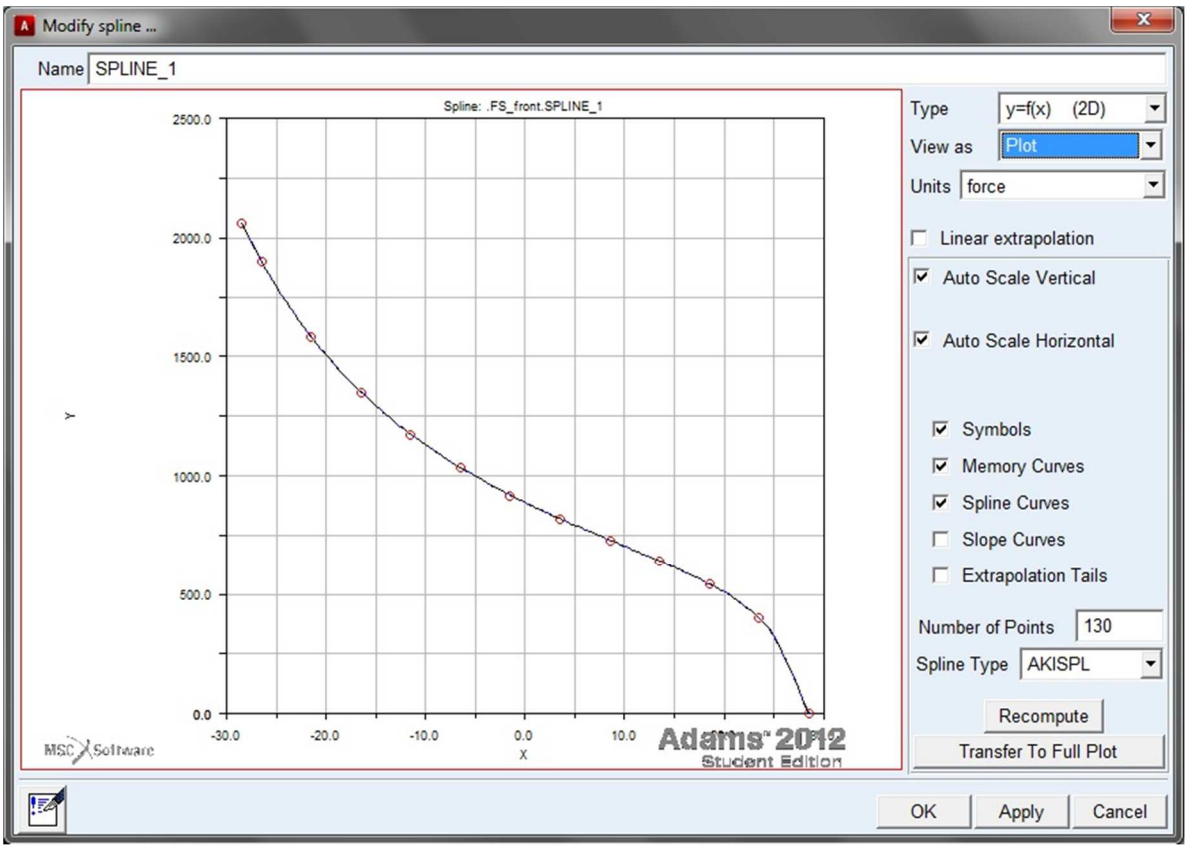


Obr.4.10. *Tabulka pro zadávání paramterů pružiny.*



	X	Y
1	-28.5	2064.0
2	-26.5	1899.0
3	-21.5	1581.0
4	-16.5	1350.0
5	-11.5	1173.0
6	-6.5	1033.0
7	-1.5	917.0
8	3.5	818.0
9	8.5	728.0
10	13.5	640.0
11	18.5	543.0
12	23.5	402.0
13	28.5	0.0

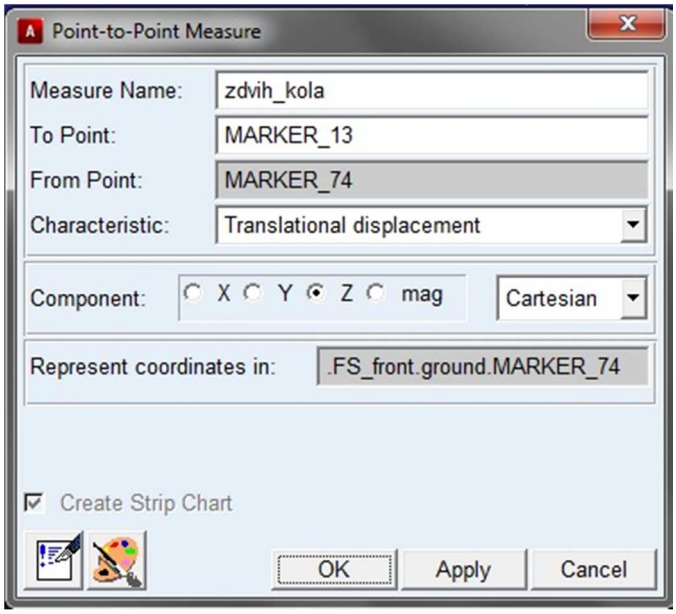
Obr.4.11. *Data pro vykreslení spline deformační charakteristiky pružiny.*



Obr.4.12. *Vykreslený spline deformační charakteristiky pružiny přední nápravy.*

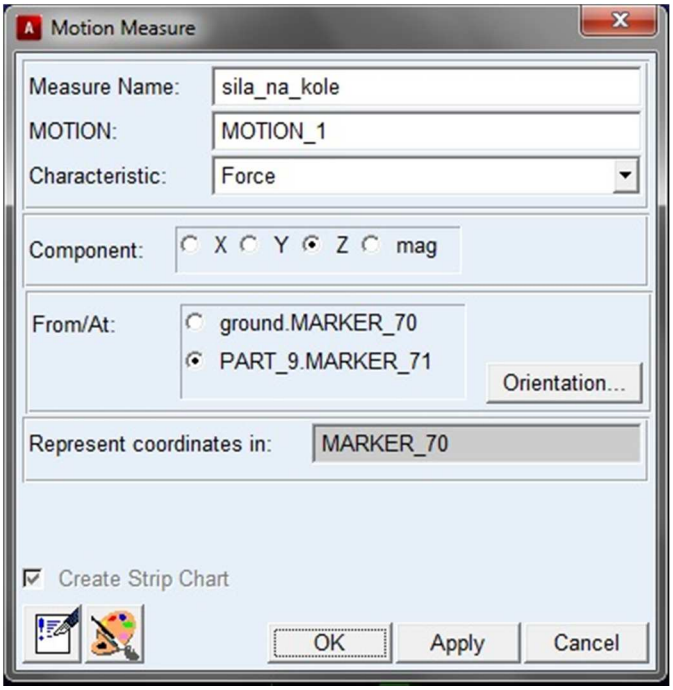
Abychom měli zajištěný požadovaný pohyb nápravy při simulaci, je nutné přiřadit jí generátor pohybu, který umístíme do bodu reprezentující střed kola a směr jeho působení zvolíme kolmý k zemi (v našem případě je to směr osy z). Pohyb se zadává jako funkce času a jelikož chceme, aby během simulace náprava provedla pouze jeden cyklus, musíme zadat odpovídající funkci pro pohyb.

Ke zjištění jakých hodnot během simulace nabývají sledované veličiny se používá prvků measure. Adams nabízí různé varianty těchto prvků podle toho, co jimi chce uživatel zjišťovat. Jedná se například o *„angle measure“*, *„point – to – point“* measure nebo *„computed measure“*. Pro naše účely budeme potřebovat *„point – to – point“* measure a *„computed measure“*. *„Point –to – point“* measure použijeme pro měření zdvihu kola. V tabulce (**obr.4.13.**) pro tvorbu measure tedy zadáme od kterého bodu (markeru) po který chceme měřit. V tomto případě máme jeden marker umístěný v bodě středu kola (MARKER_13) a druhý marker máme umístěny v prostoru tak, že má ve výchozí poloze stejnou vzdálenost v ose z jako bod středu kola a je nehybně spojen se zemí (MARKER_74). Jelikož měříme zdvih kola, tak si zvolíme, že chceme měřit pouze složku posuvu v ose z.



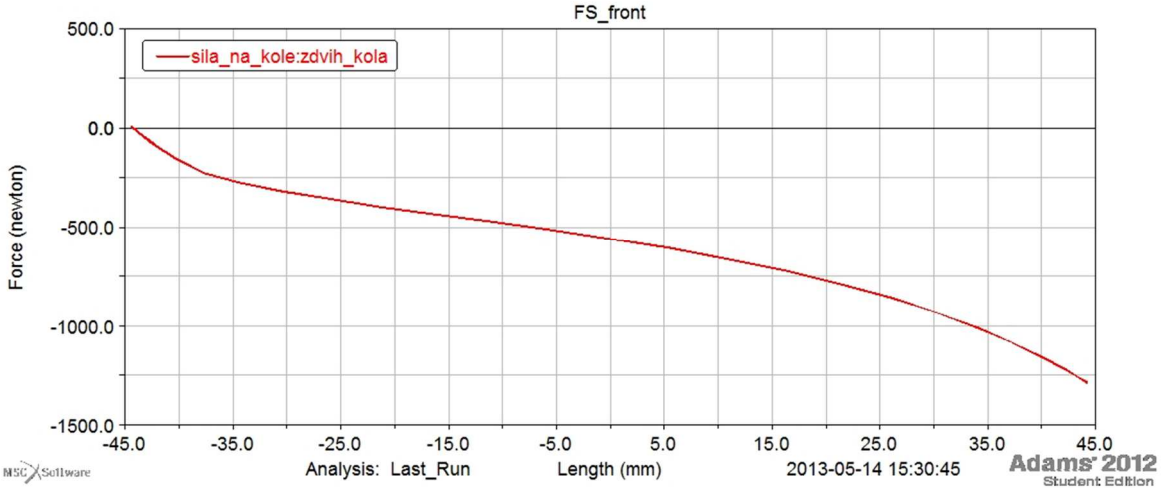
Obr.4.13. *Zadání „point – to – point“ measure.*

Pro zjištění deformační síly na kole použijeme další prvek measure. To uděláme tak, že v modelu klikneme pravým tlačítkem na generátor pohybu a ze zobrazeného výběru možností vybereme *„Measure“*. V tabulce (**obr.4.14.**) pak vybereme v poli *„Characteristic“* možnost *„Force“*.



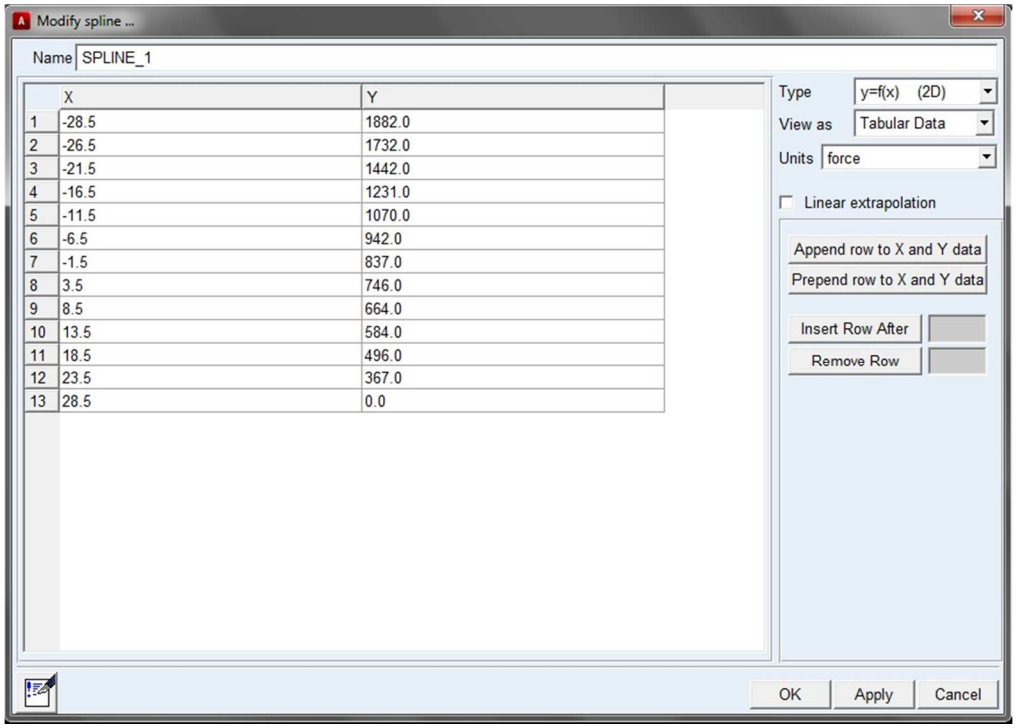
Obr.4.14. *Zadání measure pro generátor pohybu.*

Jelikož máme zadány všechny vstupy i prvky measure, tak můžeme spustit simulaci a zkontrolovat výsledky v postprocessoru. Vykreslování zjišťovaných veličin je v základu nastaveno jako závislost na čase a je třeba to změnit na závislost na zdvihu kola, který máme zjištěný díky prvku measure. Jako sledovanou veličinu si vybereme sílu působící na kole a vykreslíme ji do grafu (**obr.4.15.**). V grafu je úplné vyvěšení kola a tedy nulový zdvih pružiny reprezentován hodnotou -44,5 mm a maximální zdvih hodnotou 44,5 mm.

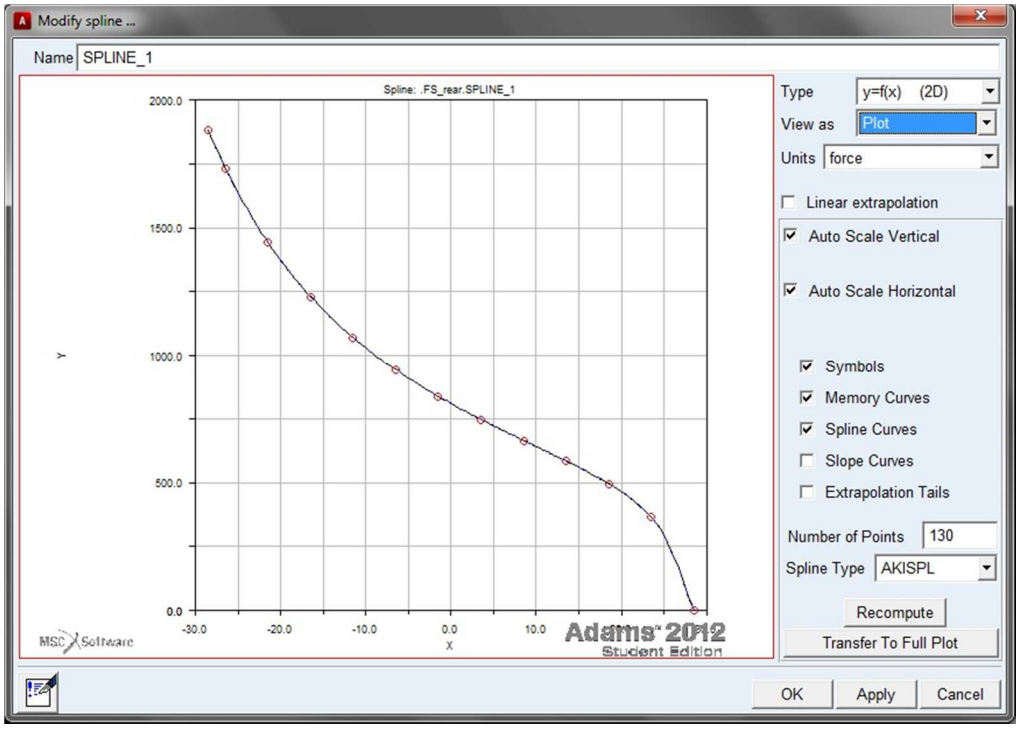


Obr.4.15. *Průběh síly na kole přední nápravy v závislosti na zdvihu kola.*

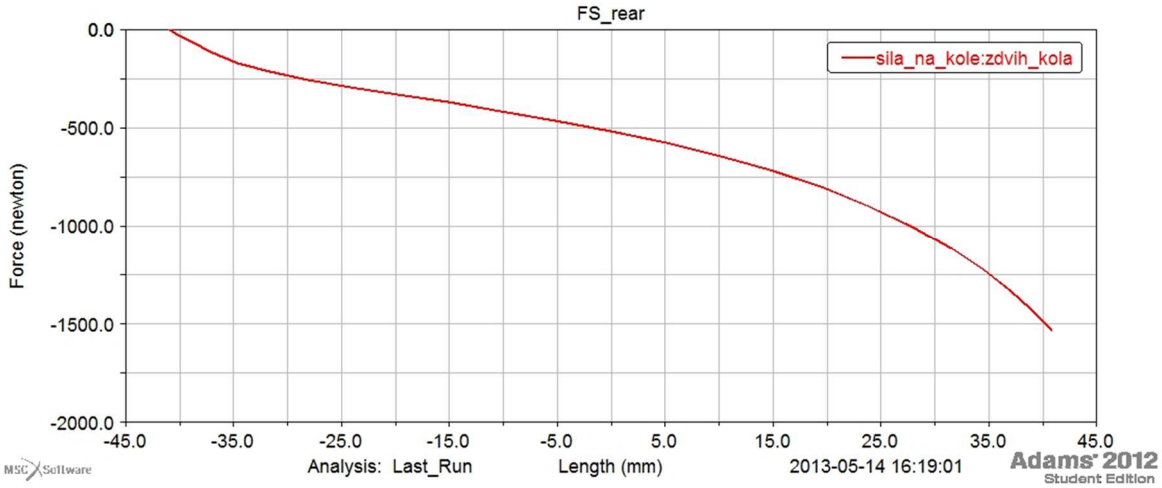
U zadní nápravy postupujeme stejně. Jen jsou zde jinak zadaná data pro vykreslení spline deformační charakteristiky pružiny, protože pružina použitá na zadní nápravě je nahustěna na menší tlak. Výsledkem je pak graf (**obr.4.18.**), kde je hodnota maximálního vyvěšení kola a nulového zdvihu pístu pružiny rovna -40,8 mm a maximální zdvih kola je 40,8 mm.



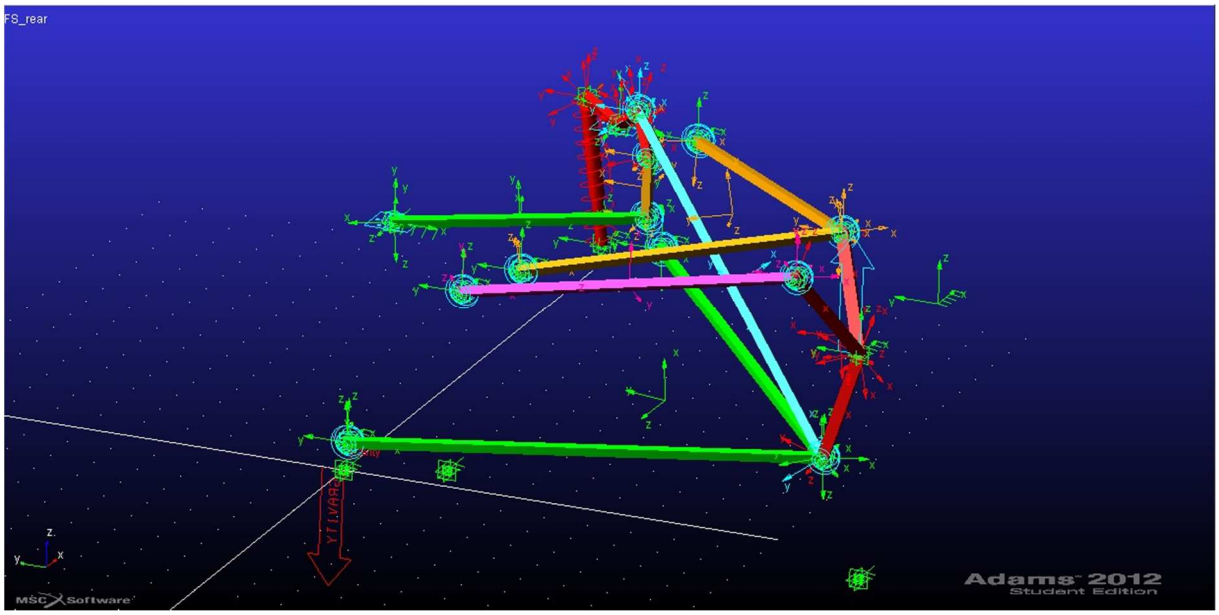
Obr.4.16. *Data pro vykreslení spline deformační charakteristiky pružiny zadní nápravy.*



Obr.4.17. *Vykreslený spline deformační charakteristiky pružiny zadní nápravy.*



Obr.4.18. *Průběh síly na kole zadní nápravy v závislosti na zdvihu kola.*



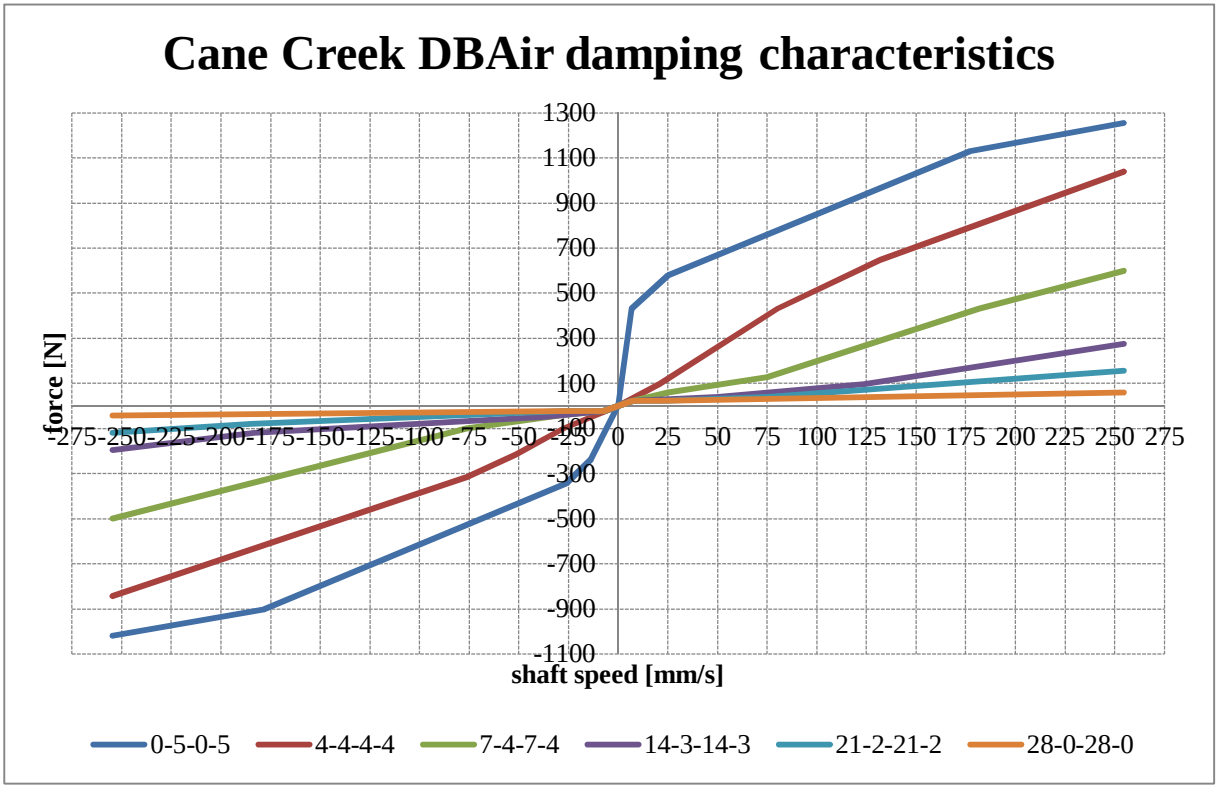
Obr.4.19. *Model zadní nápravy.*

5 SIMULACE

Nyní, když máme vzduchovou pružinu nastavenou pro přední i zadní nápravu, je třeba odsimulovat chování vozidla s touto pružící jednotkou. K tomu využijeme čtvrtinový model vozidla. Jeden pro simulaci přední nápravy a druhý pro simulaci zadní nápravy. Jelikož se v modelu vyskytuje nelineární pružina a nelineární tlumič, k simulaci použijeme opět Multi – Body System MSC Adams.

5.1 DATA PRO ZADÁNÍ TLUMENÍ

Data tlumení, které použijeme v simulačním modelu, se liší v závislosti na nastavení. Nastavení tlumení probíhá pomocí čtyřech šroubů, kde každý z nich reprezentuje jeden nastavovací parametr. Jsou jimi: tlumení pomalé komprese (LSC), tlumení pomalého vyvěšení (LSR), tlumení rychlé komprese (HSC) a tlumení rychlého vyvěšení (HSR)(**obr.3.5.** pozice 9). Výrobce dodává tabulky s charakteristikami tlumení pro dané nastavení, která jsou číselně reprezentována počtem „cvaknutí“ šroubů při jejich otáčení. Pro LSC a LSR jsou tyto „cvaknutí“ počítána od úplného zavření ventilu, které je označeno „0“, do plného otevření ventilu, které je označeno „28“. U HSC a HSR se začínají „cvaknutí“ počítat od plně otevřené polohy ventilu (označeno „5“) do plně zavřené polohy (označeno „0“). Na **obr.5.1.** jsou pak vykresleny charakteristiky tlumení jednotky Cane Creek DBAir (číselné hodnoty jsou v pořadí LSC – HSC – LSR – HSR).



Obr.5.1. *Charakteristiky tlumení Cane Creek DBAir.*

Pro větší přehlednost zde uvádím tabulky závislostí tlumicí síly na pístové rychlosti. Tyto data jsem pak použil i tvorbě simulačního modelu.

0 – 5 – 0 – 5

p.rychlost [mm/s]	síla [N]
-254,5	-1019,7
-178,4	-902,6
-26,1	-343,3
-13,6	-235,4
0	0
6,8	431,6
25	578,8
177,3	1128,8
254,5	1255,7

4 – 4 – 4 – 4

p.rychlost [mm/s]	síla [N]
-254,5	-843,7
-76,1	-313,9
-51,7	-215,8
-27,3	-98,1
0	0
21	98,1
80,1	431,6
131,8	647,5
254,5	1039,8

7 – 4 – 7 – 4

p.rychlost [mm/s]	síla [N]
-254,5	-500,3
-76,1	-98,1
-27,3	-39,3
-7,4	-21,6
0	0
7,4	21,6
25	58,9
75	127,5
181,8	431,6
254,5	598,4

14 – 3 – 14 – 3

p.rychlost [mm/s]	síla [N]
-254,5	-196,4
-183	-117,7
-36,4	-49,1
-7,4	-21,6
0	0
7,4	21,6
50	41,3
123,9	98,1
254,5	274,7

21 – 2 – 21 – 2

p.rychlost [mm/s]	síla [N]
-254,5	-117,7
-184,7	-78,4
-27,3	-21,6
-7,4	-21,6
0	0
7,4	21,6
23,3	21,6
75	41,3
254,5	157

28 – 0 – 28 – 0

p.rychlost [mm/s]	síla [N]
-254,5	-43,1
-27,3	-21,6
-7,4	-21,6
0	0
7,4	21,6
23,3	21,6
254,5	60,8

5.2 SIMULAČNÍ MODEL

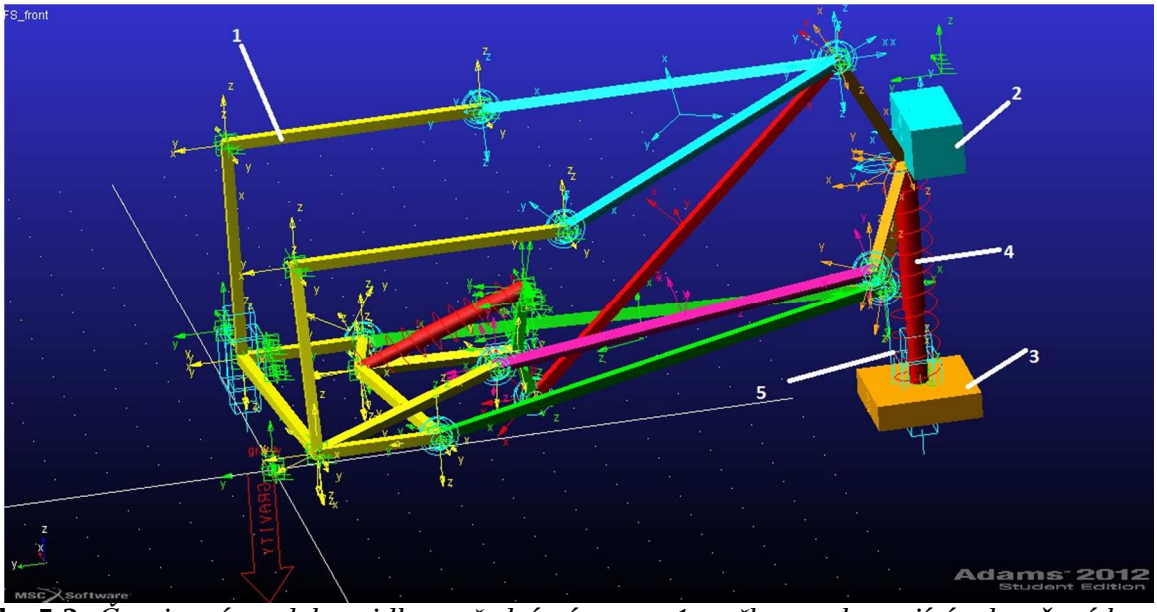
Při tvorbě simulačního modelu bylo vycházeno z předchozího modelu, na kterém byla zjišťována velikost pružicí síly na kole. Tento model byl modifikován tak, aby splňoval podmínky čtvrtinového modelu vozidla. To znamená, že byl doplněn o tělesa reprezentující odpružené na neodpružené hmoty, které připadají na jednu čtvrtinu vozidla. Jako náhradu pneumatiky byla použita pružina, která byla spojena s bodem reprezentujícím střed kola a s tělesem, které má simulovat vozovku. Pružině byla přiřazena hodnota tuhosti pneumatiky k_t = 100 N/mm a nízká hodnota tlumení. Ramena zavěšení a řídicí tyč byla spojena s tělesem opružených hmot pomocí sférických vazeb. Těleso neodpružených hmot bylo k těhlici připojeno pomocí pevné vazby. Aby byl zaručen pouze svislý pohyb (posuv v ose z) celého modelu, tak byly tělesům reprezentujícím odpružené hmoty a vozovku přiřazeny posuvné kinematické vazby se zemí. Pro simulaci nerovností vozovky pak byla použita periodická funkce, která byla zadána tak, aby se vzrůstajícím časem vzrůstala i frekvence kmitání. Funkce tedy vypadá takto:

$$h = H \cdot sin(\omega \cdot t), \omega = k \cdot t \qquad (5.1.)$$

$$h = H \cdot sin(k \cdot t^2)\,, \qquad (5.2.)$$

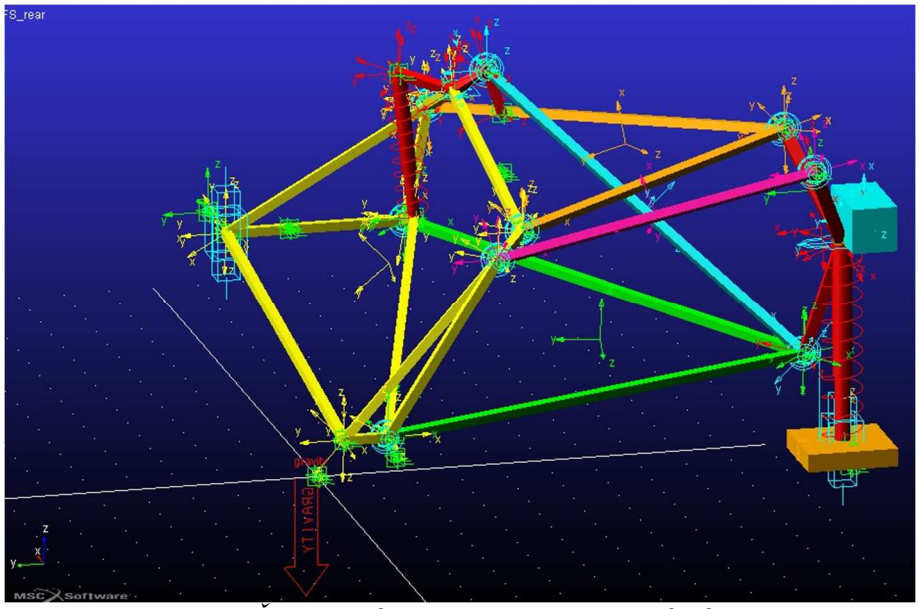
kde *h* je aktuální výška nerovnosti, *H* je amplituda nerovnosti, *ω* je úhlová rychlost kmitání a *k* je konstanta. Jako *H* byla zvolena hodnota 7,5 mm, která reprezentuje běžné buzení nápravy na závodní trati.

Tato funkce pak byla zadána jako generátor pohybu přiřazený k posuvné vazbě mezi tělesem vozovky a zemí. Celý čtvrtinový model pro simulaci chování přední nápravy je pak i s popisky uveden na **obr.5.2.**.



Obr.5.2. *Čtvrtinový model vozidla – přední náprava: 1 – těleso nahrazující odpružené hmoty vozidla; 2 – těleso nahrazující neodpružené hmoty vozidla; 3 – těléso nahrazující vozovku; 4 – náhrada kola pružinou; 5 – posuvná vazba se generátorem pohybu.*

Čtvrtinový model pro simulaci chování zadní nápravy je principielně stejný, proto není třeba popisků k jeho obrázku (**obr.5.3.**).



Obr.5.3. *Čtvrtinový model vozidla – zadní náprava.*

5.3 SLEDOVANÉ VELIČINY

Při simulacích chování náprav vozidla jsme se zaměřili především na zjištění hodnot zrychlení odpružených hmot nápravy a na sílu, kterou je pneumatika přitlačována k vozovce. Zrychlení odpružených hmot je veličina, která nejvíce ovlivňuje řidiče a jeho komfort. Přítlačná síla pneumatiky k vozovce je pak důležitá pro ovládání vozidla a přenos podélných a bočních sil.

Obě veličiny opět sledujeme pomocí prvků measure. Zrychlení pomocí *„point – to – point“* measure mezi bodem na tělese odpružených hmot a referenčním bodem spojeným se zemí. Sílu na pneumatice, která je reprezentována pružinou, pak sledujeme pomocí *„computed“* measure umístěném na pružině.

5.4 SIMULACE MODELU PŘEDNÍ NÁPRAVY

Pro simulaci chování přední nápravy jsem si vybral tři možná nastavení tlumení. Zvolil jsem si konfiguraci **0 – 5 – 0 – 5**, při které jsou ventily pro tlumení pomalé komprese a vyvěšení uzavřeny a tlumič vyvozuje velké tlumící síly, protože průtok tlumícího oleje je umožněn pouze přes ventily pro tlumení rychlé komprese a vyvěšení. Ty jsou v této konfiguraci plně otevřeny a tak proudící olej nemusí mít tak vysoký tlak, aby přetlačil pružinky těchto ventilů. Nicméně i přes to je tlumič v tomto nastavení citlivý spíše k vyšším pístovým rychlostem.

Další zvolenou konfigurací je **4 – 4 – 4 – 4**. V tomto případě jsou oba typy ventilů částečně otevřeny (ventily pro tlumení rychlé komprese a vyvěšení jsou otevřeny ze 4/5 a ventily pro tlumení pomalé komprese a vyvěšení jsou otevřeny z 1/7) a z **obr.5.1.** je vidět, že tlumič pracuje už i při malých pístových rychlostech a vyvozuje menší tlumicí síly než při předchozím nastavení.

Poslední zvolenou kofigurací tlumení je **7 – 4 – 7 – 4**, kdy jsou ventily pro tlumení rychlé komprese a vyvěšení otevřeny stejně jako v předchozím případě a ventily pro tlumení pomalé komprese a vyvěšení jsou z 1/4 otevřeny. Tlumící síly jsou tedy ještě menší než u předchozího nastavení. Další varianty nastavení nabízejí nižší hodnoty tlumících sil, ale to se v dané aplikaci jeví jako nevhodné.

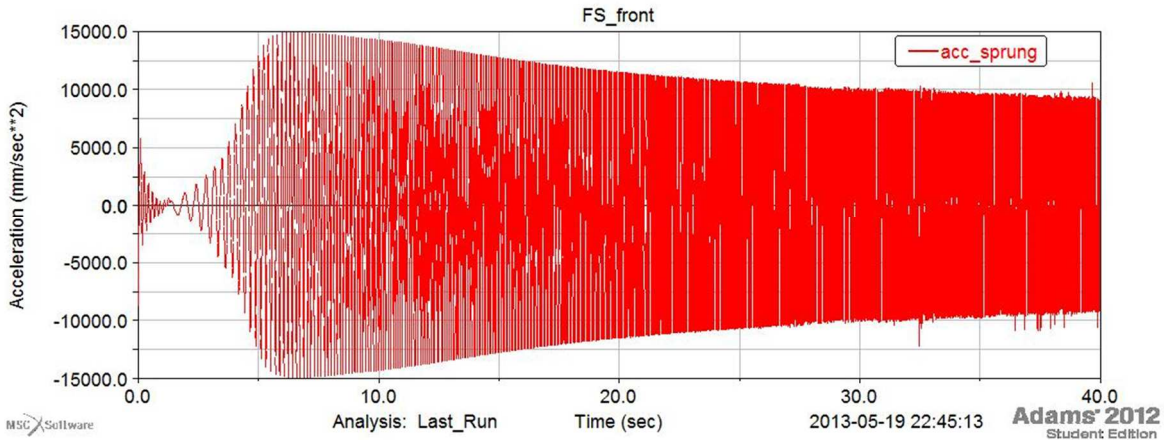
5.4.1 SIMULACE S NASTAVENÍM TLUMENÍ 0 – 5 – 0 – 5

Pro simulaci nerovností vozovky jsem použil výše zmíněný vztah (5.2.), do kterého byly v případě přední nápravy dosazeny následující hodnoty:

$$h = 7{,}5 \cdot sin(3 \cdot t^2) \qquad (5.3.)$$

Pro zvolený čas simulace t = 40 s, který byl rozdělen na 20000 kroků, vychází spojitá změna frekvence budícího sinusového signálu od 0 Hz do 40 Hz.

Výstupem jsou pak průběhy zrychlení odpružených hmot v ose z (kolmo na vozovku) a přítlačné síly kola k vozovce.



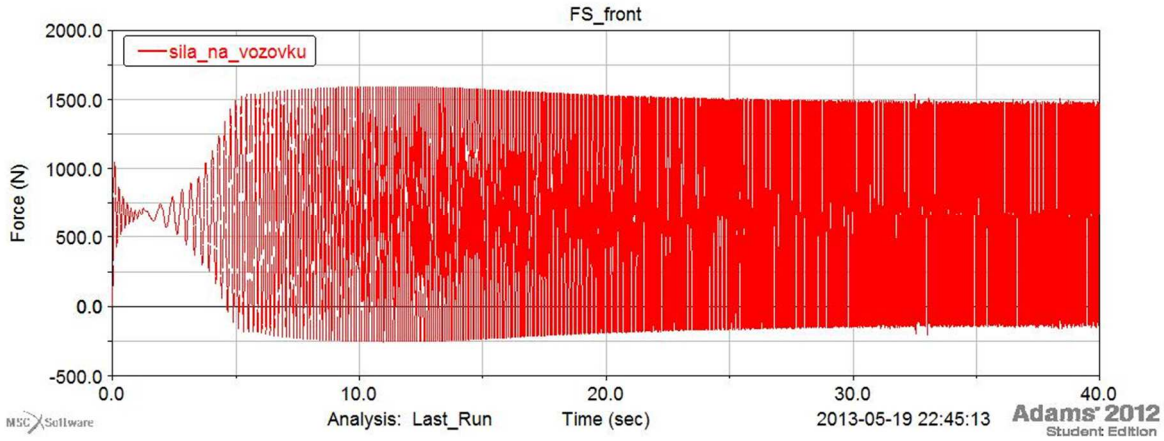
Obr.5.4. *Zrychlení odpružených hmot.*

Maximální hodnota zrychlení je rovna a_{max} = 14,9 ms^{-2} při frekveci 6,1 Hz. Jelikož se jedná o harmonické kmitání, můžeme určit efektivní hodnotu zrychlení, která se vypočítá podle vztahu [17]:

$$a_{ef} = \frac{a_{max}}{\sqrt{2}} \tag{5.4.}$$

Efektivní hodnota zrychlení je tedy rovna a_{ef} = 10,5 ms^{-2}.

Rozkmit na počátku simulace je způsoben uvedením modelu do pohybu a na výsledné hodnoty nemá vliv.



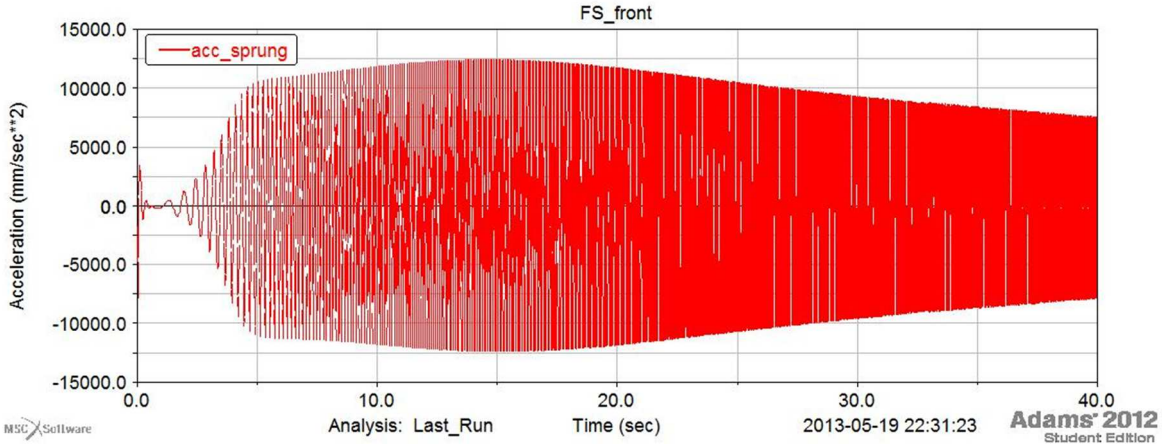
Obr.5.5. *Přítlačná síla kola na vozovku.*

Maximum přítlačné síly kola k vozovce je F_{max} = 1593,9 N při frekvenci 10,64 Hz. Minimum je pak v hodnotě F_{min} = -255,5 N při frekvenci 10,42 Hz.

5.4.2 SIMULACE S NASTAVENÍM TLUMENÍ 4 – 4 – 4 – 4

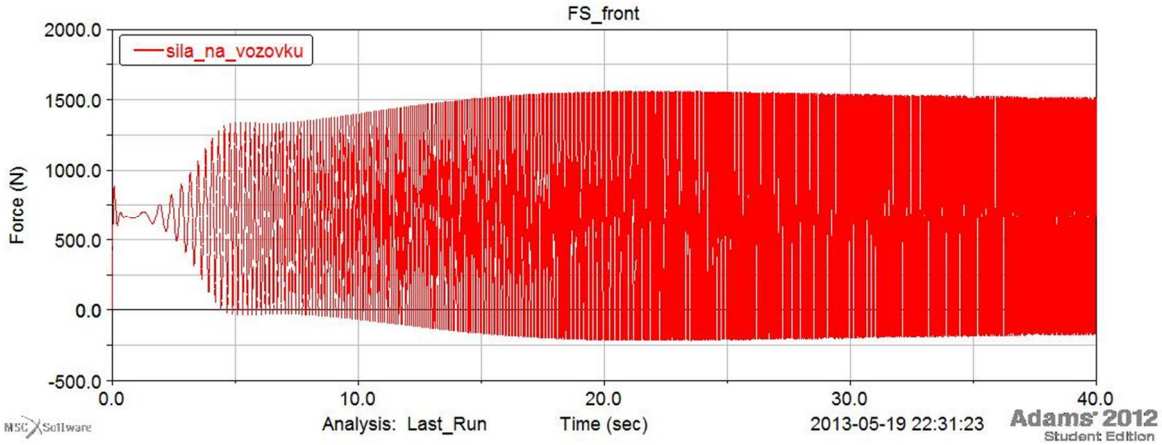
V této konfiguraci je tlumení nastaveno tak, že díky částečnému otevření ventilů pro tlumení pomalé komprese a vyvěšení vyvozuje menší tlumící síly a reaguje na menší nerovnosti než tlumení s nastavením 0 – 5 – 0 – 5, které je primárně určeno k tlumení rázů vzniklých

přejezdem větších diskrétních nerovností. Průběhy zrychlení odpružené hmoty a přítlačné síly kola na vozovku jsou pak následující:



Obr.5.6. *Zrychlení odpružených hmot.*

Maximální hodnota zrychlení při tomto nastavení dosáhla hodnoty a_{max} = 12,4 ms^{-2} při frekvenci 13,9 Hz, efektivní hodnota je pak a_{ef} = 8,77 ms^{-2}.

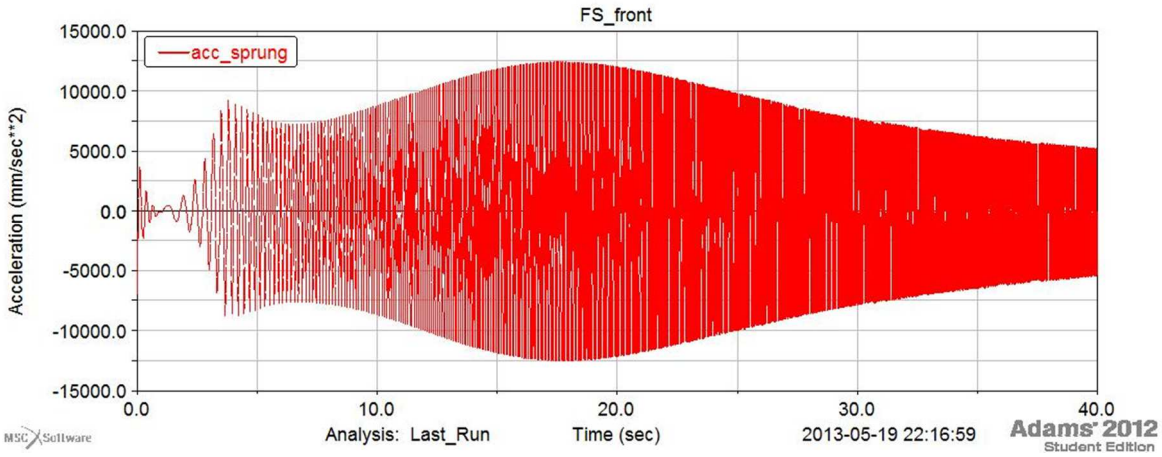


Obr.5.6. *Přítlačná síla kola na vozovku.*

Maximální hodnota přítlačné síly je rovna F_{max} = 1559,1 N při frekvenci 20,8 Hz, minimální hodnota je pak rovna F_{min} = -215,5 N při frekvenci 22,7 Hz.

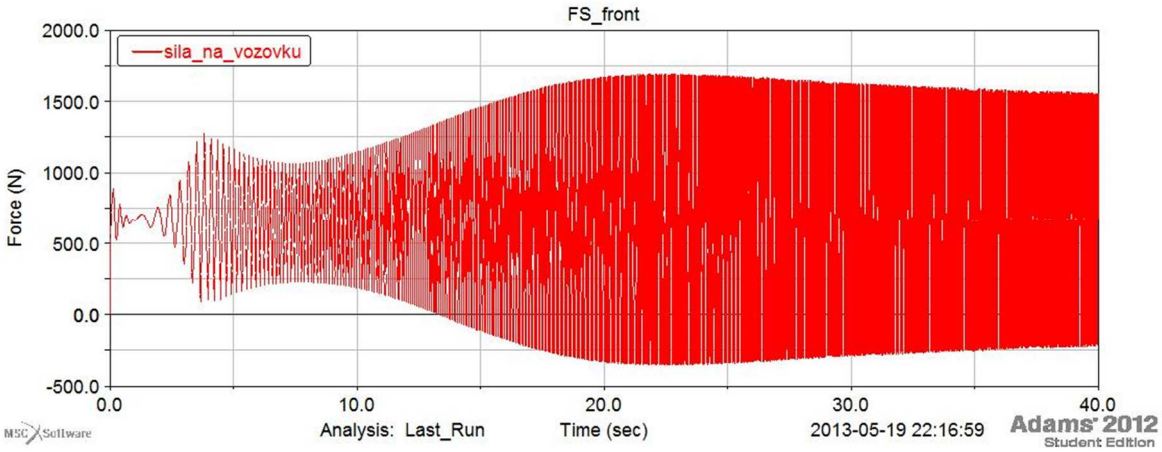
5.4.3 SIMULACE S NASTAVENÍM TLUMENÍ 7 – 4 – 7 – 4

V této konfiguraci je tlumič nastaven na svou nejcitlivější hodnotu (vyvozuje nejmenší tlumící síly) z vybraných variant nastavení tlumení pro simulace čtvrtinového modelu vozu. Výstupem jsou pak následující průběhy (**obr.5.7.** a **obr.5.8.**).



Obr.5.7. *Zrychlení odpružených hmot.*

Zde je hodnota maximálního zrychlení rovna a_{max} = 12,53 ms^{-2} při frekvenci 16,7 Hz. Efektivní hodnota zrychlení je pak rovna a_{ef} = 8,86 ms^{-2}.



Obr.5.8. *Přítlačná síla kola na vozovku.*

Maximální přítlačná síla je zde rovna hodnotě F_{max} = 1690,9 N při frekvenci 21,74 Hz. Minimum leží na hodnotě F_{min} = -350,4 N při frekvenci 21,74 Hz.

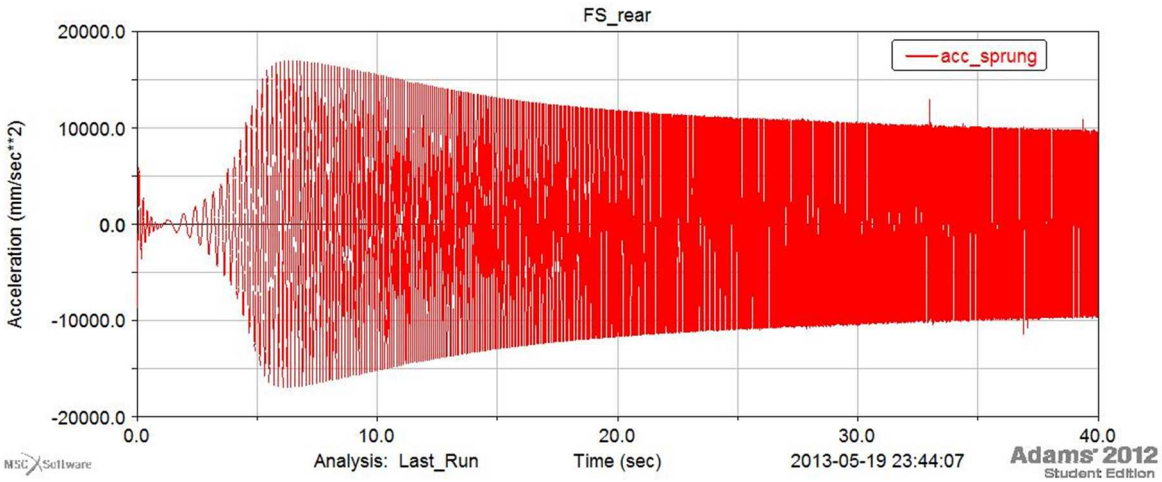
5.5 SIMULACE MODELU ZADNÍ NÁPRAVY

Simulace čtvrtinového modelu vozidla pro zadní nápravu je podobná jako pro nápravu přední. Jsou zde stejné nastavení tlumení i sledované veličiny. Odlišnost je ve tvaru modelu a v zadání charakteristiky pružiny. Rozdílná je i distribuce hmotnosti odpružených a neodpružených hmot. U modelu přední nápravy činily neodpružené hmoty na jedno kolo 10,35 kg a odpružené hmoty 57,9 kg. U zadní nápravy mají neopružené hmoty hmotnost 10,75 kg a odpružené hmoty 57,5 kg. Model použitý k simulaci je na **obr.5.3.**.

5.5.1 SIMULACE S NASTAVENÍM TLUMENI 0 – 5 – 0 – 5

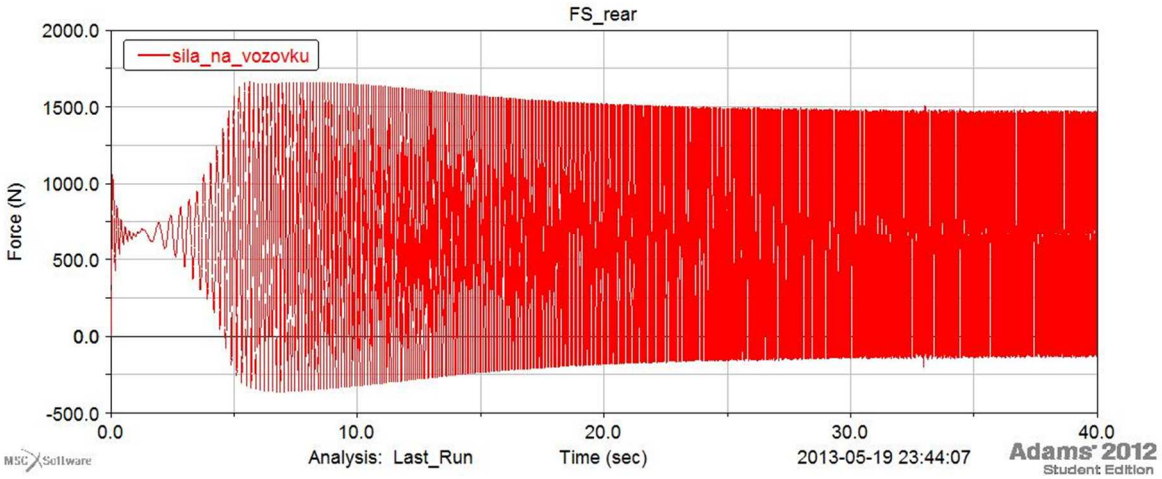
U zadní nápravy použijeme stejnou funkci pro buzení jako u nápravy přední, abychom zde vytvořili stejné podmínky simulace a výsledky byly navzájem porovnatelné.

Výsledné charakteristiky sledovaných veličin jsou pak následující (**obr.5.9.** a **obr.5.10.**).



Obr.5.9. *Zrychlení odpružených hmot.*

Maximální hodnota zrychlení odpružených hmot je rovna a_{max} = 16,96 ms^{-2} při frekvenci 5,7 Hz, její efektivní hodnota pak a_{ef} = 11,99 ms^{-2}.

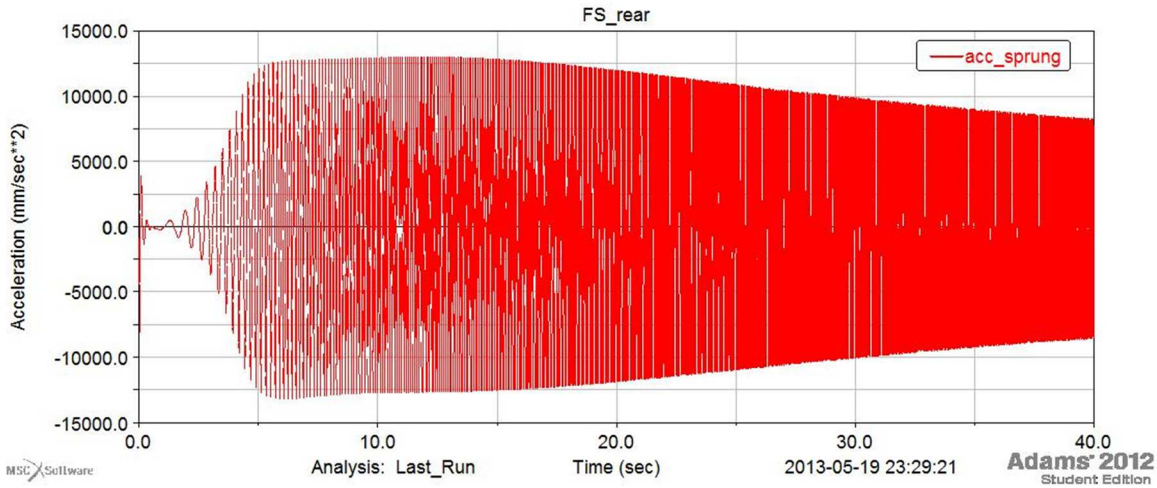


Obr.5.10. *Přítlačná síla kola na vozovku.*

Hodnota maxima síly, kterou kolo působí na vozovku je rovna F_{max} = 1663,6 N při frekvenci 5,1 Hz. Minimum síly pak dosáhne hodnoty F_{min} = -360,5 N při frekvenci 6,4 Hz. Hodnoty zrychlení i síly jsou při tomto nastavení tlumení vyšší než u stejně nastavené přední nápravy a to především z toho důvodu, že na zadní nápravě je pružina s menší tuhostí. Kvůli tomu dochází při stejné amplitudě buzení ke většímu stlačení a roztažení pružiny a tedy ke vzniku větších pružících sil, které mají vliv na výsledná zrychlení.

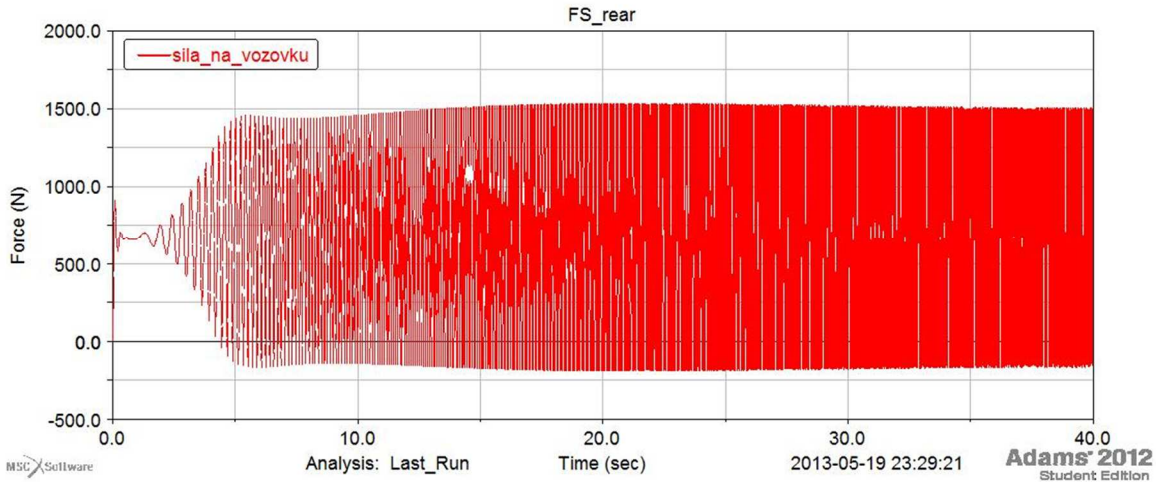
5.5.2 SIMULACE S NASTAVENÍM TLUMENÍ 4 – 4 – 4 – 4

Výsledné průběhy zrychlení odpružených hmot a přítlačné síly na vozovku při nastavení tlumení 4 – 4 – 4 – 4 jsou následující:



Obr.5.11. *Zrychlení odpružených hmot.*

Zde je maximum zrychlení rovno a_{max} = 13,2 ms^{-2} při frekvenci 5,7 Hz a jeho efektivní hodnota je rovna a_{ef} = 9,3 ms^{-2}.

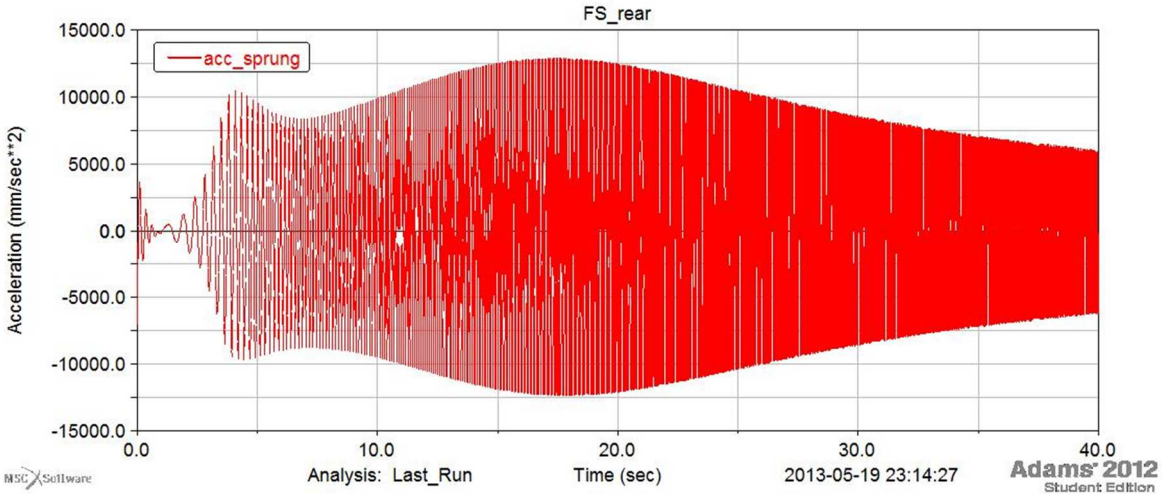


Obr.5.12. *Přítlačná síla kola na vozovku.*

Maximální přítlačná síla působící při tomto nastavení je rovna F_{max} = 1533,9 N při frekvenci 19,2 Hz. Minimální přítlačná síla je F_{min} = -190,5 N při frekvenci 20,8 Hz.

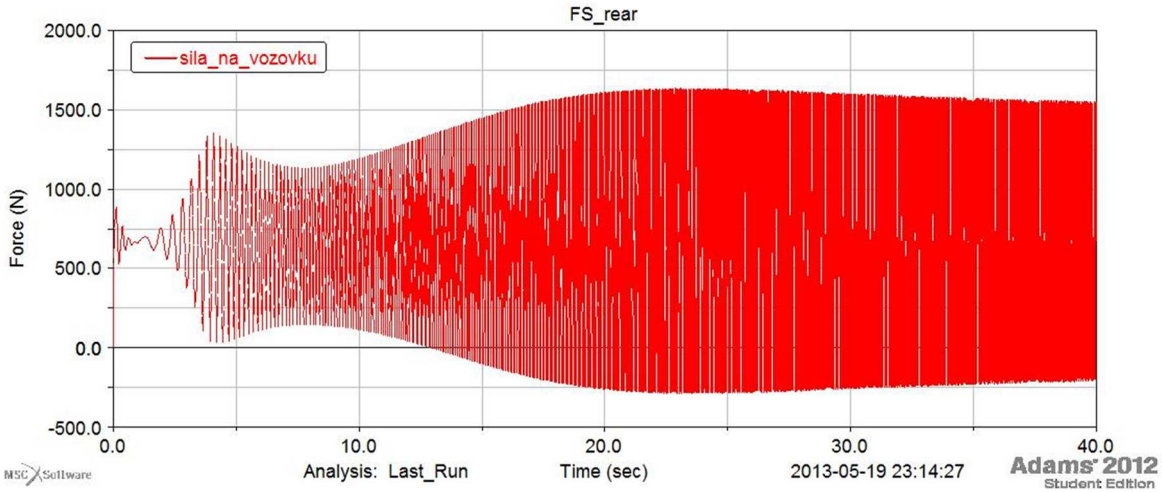
5.5.3 SIMULACE S NASTAVENÍM TLUMENÍ 7 – 4 – 7 – 4

Výsledné průběhy zrychlení odpružených hmot a přítlačných sil kola na vozovku jsou na následujících obrázcích (**obr.5.13.** a **obr.5.14.**).



Obr.5.13. *Zrychlení odpružených hmot.*

Maximální hodnota zrychlení odpružených hmot čtvrtinového modelu pro zadní nápravu je rovna a_{max} = 12,87 ms^{-2} při frekvenci 16,7 Hz a efektivní hodnota tohoto zrychlení je rovna a_{ef} = 9,1 ms^{-2}.



Obr.5.14. *Přítlačná síla kola na vozovku.*

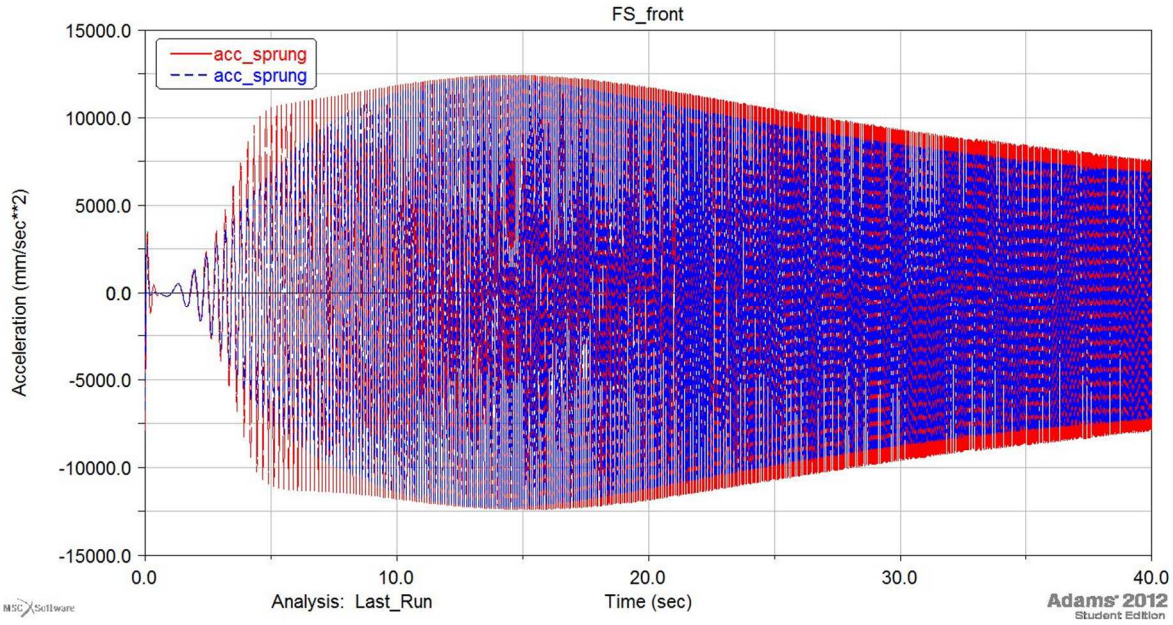
Maximum síly, kterým kolo působí na vozovku má hodnotu F_{max} = 1633,9 N při frekvenci 21,74 Hz a minimum F_{min} = -288,8 N při frekvenci 21,74 Hz.

5.6 POROVNÁNÍ SE STÁVAJÍCÍ PRUŽÍCÍ JEDNOTKOU

Jelikož mají Öhlins TTX25 MkII a Cane Creek DBAir stejný systém nastavení tlumení, ulehčuje nám to výběr parametrů pro co nepřesnější porovnání. Jako výchozí nastavení tlumení si tedy u obou pružících jednotek vybereme například variantu 4 – 4 – 4 – 4. U Öhlins TTX25 MkII jsou ale při tomto nastavení vyvozovány menší síly při stejných pístových rychlostech. Tento rozdíl je způsoben tím, že vzduchová pružina Cane Creek DBAir díky své progresivní charakteristice při stejných stlačeních vyvozuje vyšší pružící síly než vinutá pružina u Öhlins TTX25 MkII, a proto je třeba větších tlumících sil. Tlumící charakteristika pro dané nastavení jednotky Öhlins byla zadána podle grafů průběhů tlumících charakteristik, které jsou dostupné na internetových stránkách výrobce.

Tuhost vinuté pružiny byla zvolena podle pružin, které jsou použity na současném voze Formula Student. Jedná se o pružiny s tuhostí 200 lb/in (35 N/mm).

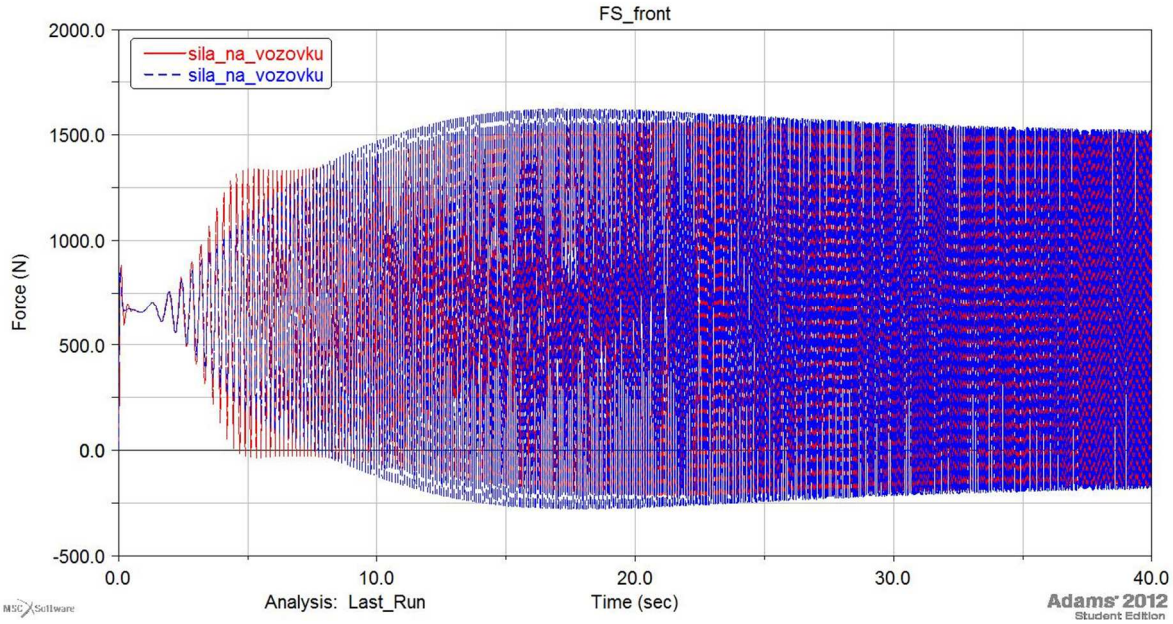
Simulační podmínky byly stejné jako u předchozích simulací. Byla tedy použita budící funkce (5.3.) v rozsahu frekvencí od 0 do 40 Hz. Porovnání bylo provedeno na čtvrtinovém modelu vozu pro přední nápravu. Výsledné průběhy zrychlení odpružených hmot a přítlačné síly kola na vozovku jsou pak zobrazeny na následujících obrázcích (**obr.5.15.** a **obr.5.16.**), kde jsou červeně zobrazeny průběhy sledovaných veličin pro pružící jednotku Cane Creek DBAir a modře jsou zobrazeny průběhy sledovaných veličin pro pružící jednotku Öhlins TTX25 MkII.



Obr.5.15. *Zrychlení odpružených hmot.*

U Cane Creek je maximální hodnota zrychlení opružených hmot a_{max} = 12,4 ms^{-2} při frekvenci 13,9 Hz (efektivní hodnota je a_{ef} = 8,77 ms^{-2}). U Öhlins při stejných podmínkách simulace je maximální hodnota rovna a_{max} = 12,2 ms^{-2} při frekvenci 12,8 Hz (efektivní hodnota je a_{ef} = 8,6 Hz).

Z grafu je vidět, že při použití Öhlins je nástup zrychlení do maximálních hodnot pozvolnější než u Cane Creek. Po dosažení maximální hodnoty zrychlení odpružených hmot klesají hodnoty zrychlení dříve než u Cane Creek.



Obr.5.16. *Přítlačná síla kola na vozovku.*

U Cane Creek je maximum přítlačné síly kola na vozovku rovno F_{max} = 1559,1 N při frekvenci 20,8 Hz a minimum F_{min} = -215,5 N při frekvenci 22,7 Hz. U Öhlins se maximum přítlačné síly nachází při frekvenci 16,1 Hz a má hodnotu F_{max} = 1624,2 N, minimum je pak rovno F_{min} = -279 N a vyskytuje se při frekvenci 17,9 Hz.

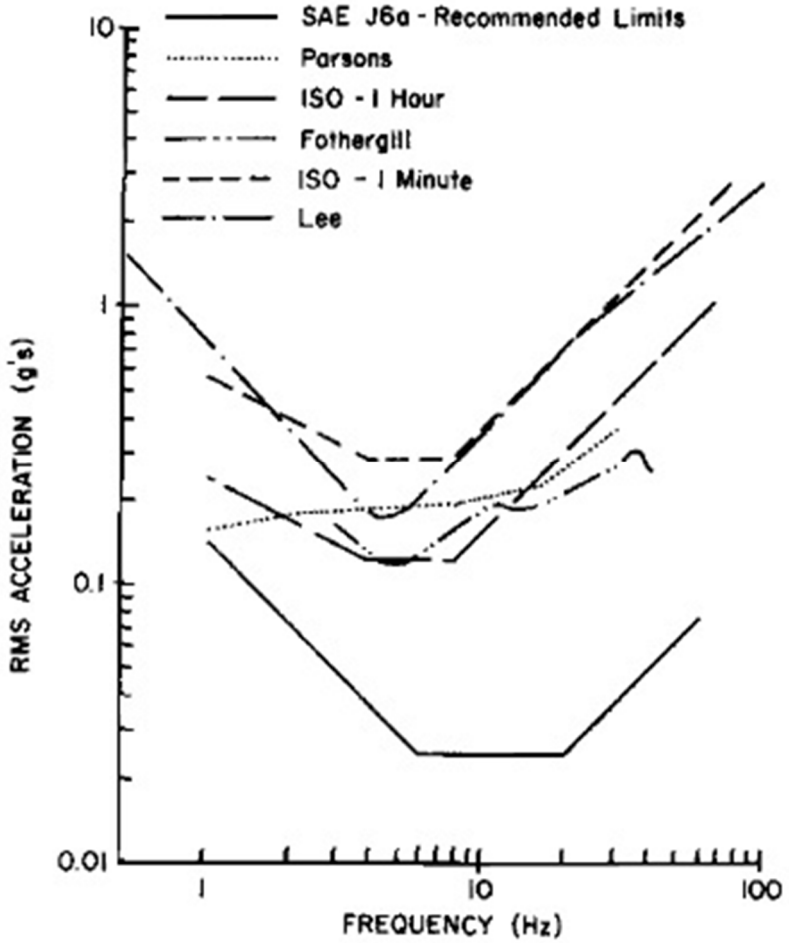
Z grafu je patrné, že u odpružení s Cane Creek dojde k výskytu vyšších přítlačných sil při nižších frekvencích než u odpružení s Öhlins. Ovšem u odpružení s Öhlins dochází k vytváření vyšších přítlačných sil, které se v maximu líší o 65,1 N od maximálních hodnot při použití jednotky Cane Creek. U minima přítlačné síly kola na vozovku je rozdíl hodnot roven 63,5 N.

5.7 VLIV NA ŘIDIČE

Vibrace vznikající při přejezdu nerovností mají negativní vliv na řidiče. Způsobují především únavu a s ní spojenou zhoršenou reakční schopnost. V případech, kdy dosáhnou vibrace hodnot vlastních frekvencí důležitých orgánů, může dojít až k ohrožení zdraví řidiče [17].

U motorových vozidel lze za rozhodující považovat svislé kmitání. V tomto směru jsou hodnoty vlastní frekvence lidského organismu od 4 Hz do 6 Hz, kdy dochází k rezonanci horní části trupu, obratlů a žaludku. K vodorovnému kmitání je lidské tělo náchylnější. Rezonanční kmitání se objevuje kolem frekvencí 1 Hz až 3 Hz [17].

Účinek kmitání na člověka se hodnotí podle efektivní hodnoty zrychlení. Vzorec pro její výpočet je uveden ve vztahu (5.4.). Dále je potřeba znát frekvence a doba působení kmitů. Hodnocení účinku kmitání se provádí podle normy ISO 2631 [17].



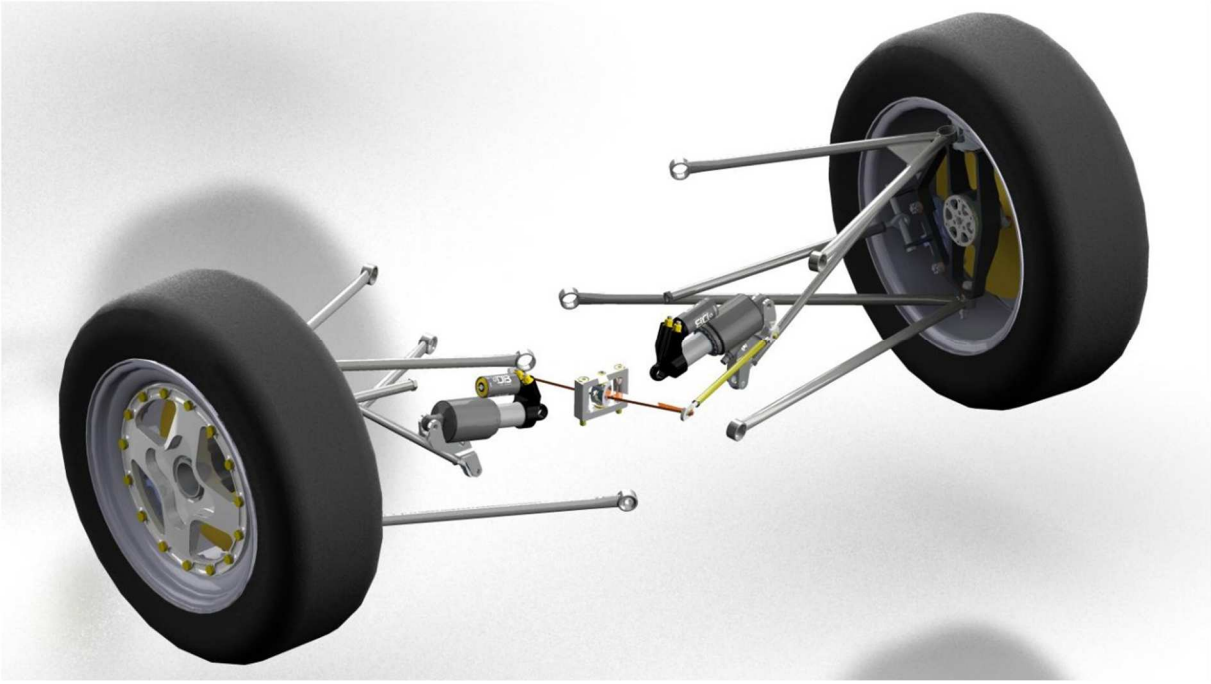
Obr.5.17. *Hodnocení vlivu kmitání na člověka podle norem [18].*

Na **obr.5.17.** jsou zobrazeny limitní křivky působení svislých vibrací na lidské tělo podle různých norem. Během simulací jsme se pohybovali v rozmezí frekvencí od 0 Hz do 40 Hz a dosáhli jsme nejvýše efektivní hodnoty zrychlení odpružených hmot a_{ef} = 11,99 ms^{-2} (přibližně zrychlení 1,22 g) při frekvenci 5,7 Hz. To znamená, že se ve většině případů pohybujeme v oblasti nad či kolem křivek i těch nejméně přísných kritérií. V praxi, na závodní trati Formula Student, nelze očekávat takový sled nerovností, který by byl podobný budící funkci, která byla použita u simulace čtvrtinového modelu vozu, takže je nepravděpodobné, že by byl řidič vystaven takovým vibracím po takovou dobu, aby u něj došlo k ohrožení zdraví.

6 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Co se týče konstrukčního řešení zástavby nové pružící jednotky do náprav vozu Formula Student, tak není potřeba provádět žádné konstrukční úpravy. Nová pružící jednotka byla vybrána tak, aby měla stejné rozměry a pracovní zdvih jako stávající pružící jednotka. To především z toho důvodu, aby se nemusely měnit navrhnuté kinematické body zavěšení a s nimi související prvky, jako například převodový poměr vahadla. Dalším důvodem, kvůli kterému byla zvolena pružící jednotka se stejnými zástavbovými rozměry a pracovním zdvihem, je ten, aby byla možnost výměny jedné jednotky za druhou, například při testování.

Nastavení jízdní výšky vozu s pružící jednotkou Cane Creek DBAir je možné třemi způsoby. Prvním je změna tlaku vzduchu v pracovní komoře pozitivní pružiny, ale tento způsob s sebou přináší nevýhodu ve změně tuhosti pružiny a tím i vlastních frekvencí odpružených a neodpružených hmot. Nehledě na to, že v tomto případě se lze dostat do situace, kdy bude tlak v pracovní komoře vzduchové pružiny tak velký, že nedojde k požadovanému zanoření pístu pružiny statickou silou, čímž dojde ke zkrácení dráhy kola při vyvěšení na takovou hodnotu, která je nevyhovující pravidlům soutěže Formula Student. Dalším způsobem je konstrukční úprava úchytového oka na těle pružící jednotky tak, aby byla nastavitelná celková délka jednotky beze změny pracovního zdvihu. Posledním způsobem, jak měnit jízdní výšku vozu, je změna délky tažné (pro zadní nápravu tlačné) tyče odpružení.



Obr.6.1. *3D CAD model přední nápravy s pružící jednotkou Cane Creek DBAir.*

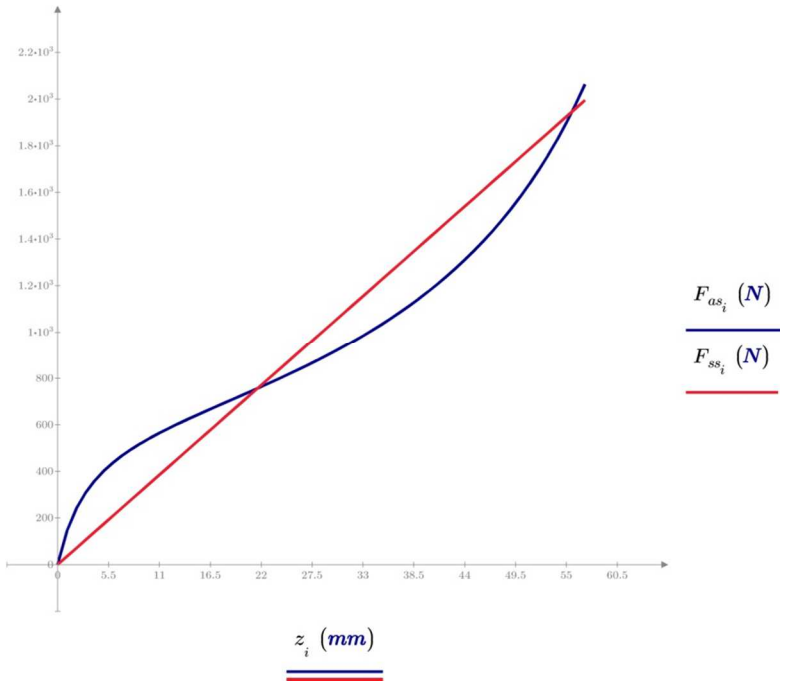
ZÁVĚR

Jako předmět zkoumání využití vzduchových pružin u závodního vozu byla použita pružící jednotka Cane Creek DBAir, která byla zkoumána pro použití na voze pro soutěže Formula Student. U této pružící jednotky bylo pomocí výpočtu nalezeno nastavení tlaku vzduchu v pracovní komoře tak, aby pružící charakteristiky odpovídaly požadovaným kritériím. Na základě tlaku v pracovní komoře byly vypočteny další parametry vzduchové pružiny (tuhost, vlastní frekvence odpružených a neodpružených hmot). Pomocí simulace v MBS programu Adams byl zjištěn průběh pružící síly na kole v závislosti na zdvihu kola. Dále byl simulační model doplněn o tlumící charakteristiku, odpružené a neodpružené hmoty a nechali jsme jej budit periodickou harmonickou funkcí, která simulovala nerovnosti vozovky. Výstupem pak byly průběhy zrychlení odpružené hmoty vozu a přítlačná síla kola k vozovce. Tyto výstupy pak byly porovnány s výstupy simulačního modelu se stávající pružící jednotkou využivající vinutou pružinu. Při obdobném nastavení tlumení se nevyskytly žádné markantní rozdíly, a proto o využití této pružící jednotky na voze Formula Student lze rozhodnout na základě níže uvedených výhod a nevýhod.

Vzduchová pružina má oproti vinuté pružině několik výhod, které z ní dělají vhodnější pro aplikaci u závodního vozu Formula Student. Ovšem každé výhody jsou vykoupeny nevýhodami a u vzduchové pružiny mohou být takové nevýhody rozhodujícím faktorem, zda je vhodná pro danou aplikaci.

Začneme – li výhodami, tak můžeme na prvním místě zmínit tu nejpatrnější a tou je hmotnost. V této oblasti mají vzduchové pružiny jasnou převahu. Systém vzduchové pružiny má menší hmotnost než vinutá ocelová pružina. U vinutých pružin lze tento handicap snížit použitím pružiny z titanu, ale za cenu vyšších pořizovacích nákladů. Jak je v práci uvedeno, stávající pružící jednotka Öhlins TTX25 MkII váží přibližně 950 g a její alternativa Cane Creek DBAir má hmotnost 500 g. Při použití čtyř pružících jednotek je váhová úspora na voze 1,8 kg, což je nezanedbatelná hodnota u monopostu, který má hmotnost slabě nad 200 kg.

Další výhodou vzduchové pružiny je přirozená progresivita pružení. Mírné progresivity lze docílit i u vinutých pružin, ale jsou nutné konstrukční upravy. Například vytvoření více bodů na uchycení pružící jednotky k vahadlu odpružení, čímž dosáhneme nastavitelného převodového poměru a tím i změně síly působící na pružinu. Co se týče tuhosti pružiny, tak díky svému progresivnímu charakteru je vzduchová pružina (**obr.4.1.**) ve zdvihu od 15 mm do 30 mm svým průběhem podobná lineární charakteristice vinuté pružiny, ale křivka zde má menší směrnici (tzn. tuhost pružiny). To znamená, že v těchto oblastech je vzduchová pružina citlivější a při větších zdvizích je díky své progresi dostatečně tuhá, čímž zabraňuje jít pístu až do svého dorazu při velkých pružících silách. Jako ilustrace k tomuto porovnání slouží následující obrázek,



kde je modře vyznačena pružící charakteristika vzduchové pružiny, která je nastavena podle výpočtů a červeně je zde vyznačena charakteristika vinuté pružiny o tuhosti 35 N/mm (tuhost pružiny na voze Formula Student). U modelu Cane Creek DBAir je pak ještě možné dokoupit speciální distanční podložky, které se umísťují do komory vzduchové pružiny. Slouží ke zmenšení objemu pracovního prostoru, což má za následek progresivnější průběh pružící charakteristiky při stejném tlaku vzduchu v pracovní komoře.

Výhodou je také to, že pokud hledáme vhodnou tuhost pružiny pro dané použití či závodní okruh, tak si vystačíme pouze s hustilkou, protože tuhost vzduchové pružiny je závislá na tlaku v pracovní komoře. Pokud je zároveň pružící jednotka dobře dostupná, tak lze nastavení tlaku a tím i tuhosti provádět bez demontáže. Té se nevyhneme u vinuté pružiny, kde sice máme k dispozici sady pružin, ale jejich výměnou dosáhneme vždy jen změny o určitou hodnotu, zatímco u vzduchových pružin lze tuhost měnit téměř spojitě.

Nevýhodou vzduchové pružiny jsou fyzikální vlastnosti pracovního média. Během stlačení pístu pružiny probíhají dva termodynamické děje. Při pomalém stlačování se jedná o izotermický děj, kdy se teplota pracovní látky nemění. Při rychlém stlačování pístu se jedná o děj adiabatický, při kterém vzniká teplo. Toto teplo je samozřejmě odváděno přes stěny komory vzduchové pružiny a zároveň se pracovní látka ochlazuje odvodem tepla při adiabatickém roztažení. Pokud ale dochází ke zvýšenému namáhání vzduchové pružiny (mnoho pracovních cyklů v krátkém časovém intervalu), může dojít ke kumulaci tepla a ohřevu pracovní látky. Se zvýšením teploty v konstantním objemu dochází podle izochorického zákona ke zvýšení tlaku. A vyšší tlak znamená vyšší tuhost pružiny, což má za následek změnu chování vozu při přejezdu nerovností. Z toho vyplývá, že tento děj je naprosto nežádoucí.

Právě tato nevýhoda je klíčovým faktorem při rozhodování zda použít vzduchové pružení či ne. Je ale nutné si uvědomit, že výše popsaný děj nenastává vždy, protože při některých disciplínách či použitích vzduchové pružiny nedochází k takovému namáhání, které by

způsobilo znatelný ohřev pracovní látky a s tím spojené změny charaktersitik pružení. Ke zjištění teplotního namáhání vzduchové pružiny nejlépe poslouží jízdní test, který bude simulovat například závodní podmínky. Pokud se během testu chování odpružení znatelně nezmění nebo se teplota pláště komory vzduchové pružiny příliš neliší od teploty před testem, znamená to, že z hlediska teplotního namáhání vzduchová pružina vyhovuje dané aplikaci.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

[1] VLK, F., *Podvozky motorových vozidel*. Nakladatelství Vlk, Brno 2006. ISBN 80 – 239 – 6464 – X.

[2] REIMPELL, J.; STOLL, H.; EDWARD, A., *The automotive chassis – engineering principles*. Arnold, London 1996. ISBN 0 – 340 – 61443 – 9.

[3] http://www.kingshocks.com/products/airshocks/overview-air-shocks/

[4] http://www.ridefox.com/product.php?m=offroad&t=shocks&p=3358&ref=filter

[5] http://www.ridefox.com/product.php?m=atv&t=shocks&p=1140&ref=filter

[6] http://students.sae.org/competitions/bajasae/

[7] http://www.airrexsuspension.com/

[8] http://www.airsociety.net/wp-content/uploads/2011/12/mini-cooper-race-bagged-air-suspension-airrex-rex-003.jpg

[9] http://www.ohlinsusa.com/ohlins-ttx-25-fsae

[10] http://www.sram.com/rockshox/products/vivid-air-r2c

[11] http://www.ridefox.com/product.php?m=bike&t=shocks&p=99201&ref=shbadge

[12] http://www.canecreek.com/products/suspension/db-air/features

[13] http://www.pinkbike.com/news/Tech-Tuesday-negative-spring-air-shocks-2012.html

[14] http://www.ohlinsusa.com/files/files/Schematic.pdf

[15] http://www.canecreek.com/resources/products/suspension/double-barrel/DB_owners-manual2013_AAD0154.pdf

[16] http://students.sae.org/competitions/formulaseries/rules/2013fsaerules.pdf

[17] VLK, F., *Dynamika motorových vozidel*. Nakladatelství Vlk, Brno 2000. ISBN 80 – 238 – 5273 – 6.

[18] GILLESPIE, T. D., *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, 1992. ISBN 1 – 56091 – 199 – 9.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a_{ef}	[m/s^2]	efektivní hodnota zrychlení
a_{max}	[m/s^2]	maximální hodnota zrychlení
F	[N]	statické zatížení pružiny
F_{max}	[N]	maximální přítlačná síla kola na vozovku
F_{min}	[N]	minimální přítlačná síla kola na vozovku
F_p	[N]	pružící síla
f_s	[Hz]	vlastní frekvence odpružených hmot
f_u	[Hz]	vlastní frekvence neodpružených hmot
h	[mm]	aktuální výška nerovnosti
H	[mm]	amplituda nerovnosti
k_s	[N/mm]	tuhost pružiny
k_{su}	[N/mm]	tuhost nápravy
k_t	[N/mm]	tuhost pneumatiky
L_0	[mm]	délka pružící jednotky v nezatíženém stavu
L_p	[mm]	délka pružící jednotky při přepouštění vzduchu z poz. do neg. komory
m_s	[kg]	hmotnost odpružených hmot
m_u	[kg]	hmotnost neodpružených hmot
n	[-]	polytropický koeficient
p_n	[MPa]	tlak v negativní komoře vzduchové pružiny
p_p	[MPa]	tlak v pozitivní komoře vzduchové pružiny
q	[-]	převodový poměr vahadla
RR	[N/mm]	celková tuhost pneumatiky a pružiny
S_n	[mm^2]	plocha pístu negativní pružiny
S_p	[mm^2]	plocha pístu pozitivní pružiny
t	[s]	čas simulace
V_n	[mm^3]	objem komory negativní pružiny
V_p	[mm^3]	objem komory pozitivní pružiny
z	[mm]	zdvih pístu pružiny
z_0	[mm]	nulový zdvih pístu pružiny
z_p	[mm]	zdvih pístu vzd. pružiny při přepouštění vzduchu z poz. do neg. komory
z_{prac}	[mm]	zdvih pístu pružiny při statickém zatížení
ω	[rad/s]	úhlová frekvence buzení

SEZNAM PŘÍLOH

P1 Výpočet tlaku a charakteristik vzduchové pružiny 11 stran