

SIMULATION MODEL OF CAR WHEEL SUSPENSION

F. Pražák*, I. Mazůrek*

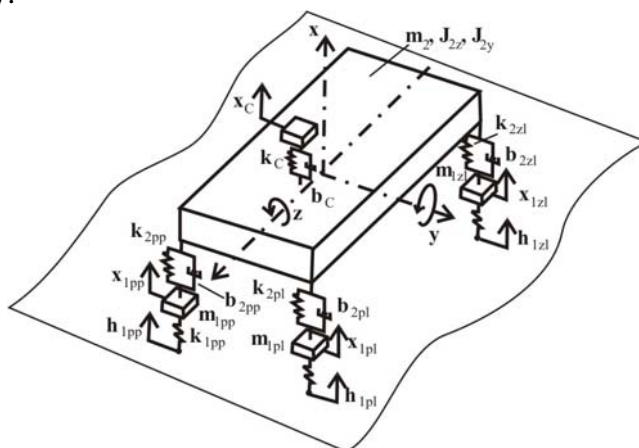
Summary: *This article concerns the modern attitude to diagnostics of car suspension with the use of mathematical simulation. To obtain the accurate results of the mathematical model, this computer model provides the real data input such as shocks absorber or tyre characteristics. The following concern is how to obtain specific parameters that influences dynamic behavior of car suspension. In the end of this article the various programs suitable for mathematical modeling are compared.*

1. Úvod

Při vývoji podvozků automobilů či ladění podvozků sportovních vozů se konstruktéři čím dál častěji upínají k matematickým simulačním modelům. Výsledky z počítačových simulací dávají konstruktérovy lepší pohled na sledovanou mechanickou soustavu, tedy na automobil jako celek nebo jeho dílčí mechanické podskupiny. Úspora času a finančních nákladů spojené s experimenty a testováním jsou nepřehlédnutelné výhody vyplývající při použití matematického modelování.

2. Matematický a fyzický model závěsu kola

Na Ústavu konstruování VUT v Brně se zabýváme diagnostikou závěsu kola, kde jsme se zaměřili na chování závěsu při snížené funkčnosti tlumiče odpružení. K lepšímu pohledu na tuto problematiku jsme použili matematického modelování. Celkový matematický model automobilu (obrázek 1) je pro pozorování jednotlivých členů ovlivňující dynamiku jednoho závěsu kola nevhodný.

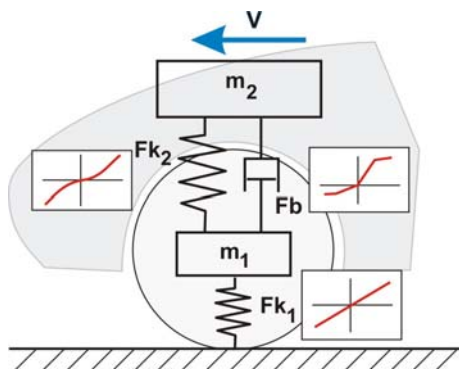


Obrázek 1: Celý model automobilu s osmi stupni volnosti

* Ing. František Pražák, Doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.: Vysoké učení technické v Brně, Ústav konstruování, Technická 2896/2, 616 69, Brno; tel.: +420 54114 3232, fax: +420 54114 3231; e-mail: fany00@centrum.cz

V našem případě jsme použili tzv. čtvrtinového modelu automobilu [1]. Jedná se o soustavu s dvěma stupni volnosti popsány následujícími rovnicemi a obrázkem 2.

$$\begin{aligned} m_2 \cdot \ddot{x}_2 + Fb(x_2) + Fk_2(x_2) &= Fk_2(x_1) + Fb(\dot{x}_1) \\ m_1 \cdot \ddot{x}_1 + Fb(\dot{x}_1) + Fk_1(x_1) + Fk_2(x_1) &= Fk_2(x_2) + Fb(\dot{x}_2) + Fk_1(h(t)) \end{aligned} \quad (1)$$



Obrázek 2: Čtvrtinový model automobilu
 m_1 – neodpružená hmota, m_2 – odpružená hmota,
 Fk_1 – charakteristika radiální tuhost pneumatiky,
 Fk_2 – charakteristika tuhost vozidlové pružiny,
 Fb – charakteristika tlumiče odpružení, $h(t)$ – nerovnost vozovky

K verifikaci výsledů matematických simulací byl vyroben Experimentální přívěsný vozík [2] (obrázek 3), jenž je fyzický model čtvrtinového modelu automobilu. Návrh základních dynamických parametrů vozíků v měřítku odpovídají přednímu závěsu vozu Škoda Felicie. Kyvná vidlice imituje zadní vlečnou nápravu nebo zadní vidlici motocyklu. Na vozíku je možné nastavit veškeré parametry ovlivňující dynamické chování závěsu (odpruženou a neodpruženou hmotu, tuhost vozidlové pružiny). Stavba vozíku je uzpůsobena k uchycení nejrůznějších konstrukčních typů tlumičů odpružení. Vidlice je navržena pro bantamové kolo 12x4, kde charakteristika pneumatiky (radiální tuhost pneumatiky) se mění změnou tlaku plynného média v pneumatice.



Obrázek 3: Experimentální přívěsný vozík

Při testech s Experimentálním vozíkem a při matematickém simulování se odzkoušely tři typy testů užívané pro bezdemontážní diagnostiku tlumičů (impulsní dokmitový, rezonanční adhezní a přejezdový test).

3. Parametry vkládané do matematického modelu závěsu kola

Výsledky ze simulace matematického modelu by měly plně korespondovat s mechanickou soustavou, ale vzhledem k jistým nelinearitám v systému, tření či materiálové pružnosti, jsme nuceni vytvářet jistá zjednodušení. Právě tato zjednodušení se projeví v rozdílnosti namodelovaných a experimentálně zjištěných výsledků. I přes tato zjednodušení je nutné do modelu vkládat veličiny a charakteristiky odpovídající reálným hodnotám.

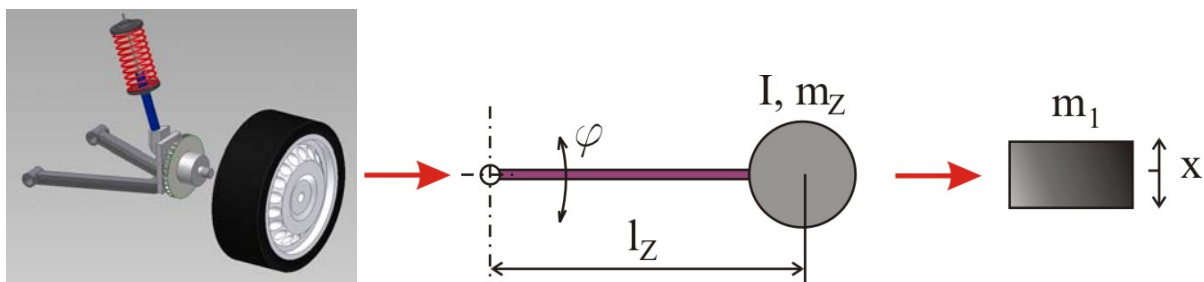
3.1 Neodpružená hmota

Podle konstrukce nápravy je závěs kola sestavený z mnoha prvků jako například rameno nápravy, těhlice, brzdový systém, kolo s pneumatikou. Tento složitý mechanický celek je třeba vyjádřit jako těleso m_1 , jak je zobrazené ve čtvrtinovém modelu automobilu. U Experimentálního vozíku jsme hmotu m_1 odvodili z momentu setrvačnosti kyvné vidlice, kde moment setrvačnosti byl stanoven „odkýváním“ závěsu z doby kyvu (tzv. matematické kyvadlo, obrázek 4).

$$I = m_z g l_z \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 \quad (2)$$

$$m_1 = \frac{I}{l^2} \quad (3)$$

kde m_z je odkývaná hmotnost závěsu kola
 l_z je vzdálenost od středu kývání k těžišti závěsu
 l je vzdálenost od osy kývání k ose modelu
 T je doba kyvu
 I je moment setrvačnosti závěsu



Obrázek 4: Odvození hmoty m_1 představující závěs kola

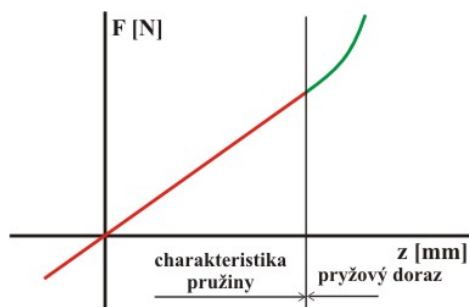
3.2 Odpružená hmota

Hmotnost příslušící odpružené hmotě m_2 se získává výpočtem z experimentálně zjištěných hodnot momentu setrvačnosti a hmotnostního rozložení karosérie [3]. Vzhledem k pozorované situaci (sledování svislého pohybu závěsu kola), kde se neuvažuje naklání nebo kolébání karosérie je dostačující za hmotu m_2 považovat statickou hodnotu hmotnosti působící na daný závěs kola. V případě Experimentálního vozíku, z hlediska jeho konstrukce byla odpružená hmota stanovena stejnou metodou u jako u neodpružené hmoty.

3.3 Vozidlová pružina

Dalším komponent ovlivňující dynamické naladění závěsu kola je vozidlová pružina. Naměřené charakteristiky bývají zpravidla lineárního charakteru. Naměřenou charakteristiku lze tak do modelu popsat pomocí rovnice.

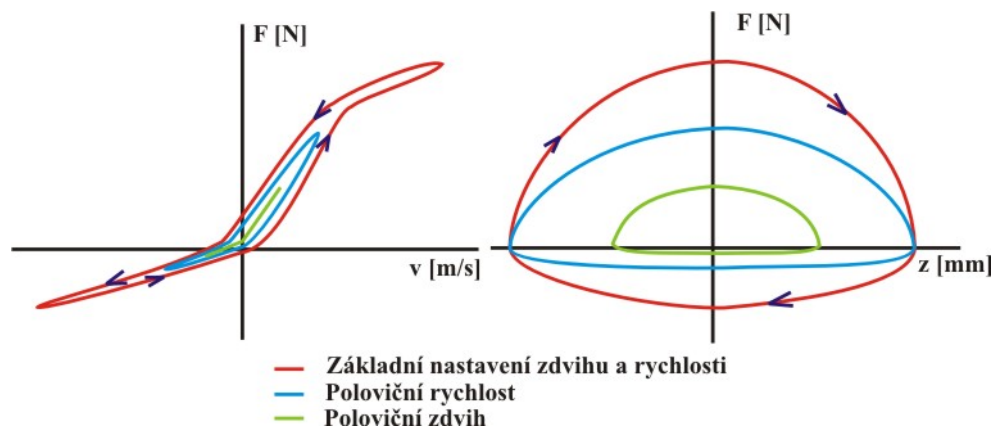
Závěs kola bývá vybaven pružnými dorazy. Charakteristiku dorazů, jenž mají degresivní charakter, je nutné vhodně programově vložit do programu nebo vložit jako reálnou charakteristiku naměřenou společně s pružinou.



Obrázek 5: Charakteristika pružiny s pryžovým dorazem

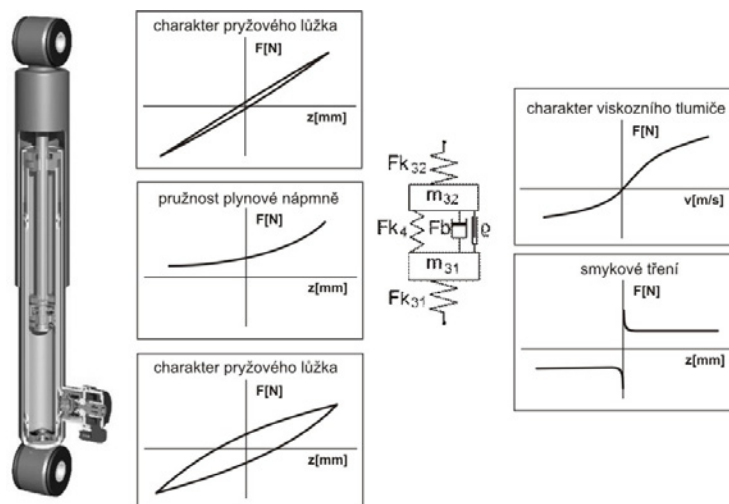
3.4 Tlumič odpružení

Tlumič odpružení je nejpodstatnějším prvkem závěsu kola automobilu, kde jeho funkčnost výrazně ovlivňuje bezpečnost automobilu. Laboratoře Ústavu konstruování disponují testerem tlumičů Gillop 1.4, který umožňuje naměřit charakteristiku tlumiče.



Obrázek 6: Charakteristika tlumiče odpružení při různé rychlosti a zdvihu tlumiče

Jak je patrné z obrázku 6, charakteristika tlumiče je závislá jak na rychlosti pohybu tlumiče tak na jeho zdvihu. Navíc má hysterezi tvar, tedy tlumič při roztahovací (stlačovací) fázi a při dané rychlosti má dvě hodnoty síly. Takovou charakteristiku je obtížné do modelu vložit. Jedním z řešení je vytvoření podmodelu tlumiče odpružení (obrázek 7), který se skládá z vlastní tlumicí charakteristiky F_b , charakteristiky smykového tření ρ , vnitřní pružnosti F_{k4} a pružnosti uchycení tlumiče F_{k31} a F_{k32} , hmotnosti pístnice m_{32} a hmotnosti vedení pístu m_{31} [4].



Obrázek 7: Matematický model tlumiče odpružení [4]

Výhodou tohoto přístupu je možnost namodelování nejrůznějších závad tlumiče. Vložením podmodelu tlumiče do čtvrtinového modelu automobilu však vzniká výpočtově složitější situace, která se projeví především v zvýšení času pro výpočet. Další nevýhodnou možností je divergence matematické metody.

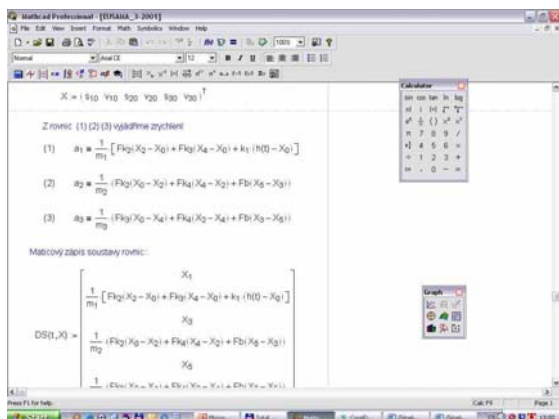
3.5 Pneumatika

Posledním komponentem ovlivňujícím chování závěsu je pneumatika. Charakteristika radiální tuhosti pneumatiky se zjišťuje staticky [5, 6], tedy sledováním přítláčecí síly pneumatiky k vozovce v závislosti na její stlačení. Při testech s experimentálním vozíkem (v rámci grantového projektu BD 135 3030 [1]) a následným porovnáním dat s daty nasimulovanými se ukázaly jisté rozdílnosti. Z určitých výpočtových experimentů se ukázalo, že staticky zjištěná radiální tuhost bantamové pneumatiky použité u vozíku je nedostačující. Jistý vliv na výslednou charakteristiku budou mít tangenciální síly vznikající mezi pneumatikou a vozovkou při jejím stlačování. Tyto tangenciální síly jsou také závislé i na rychlosti stlačování [7, 8].

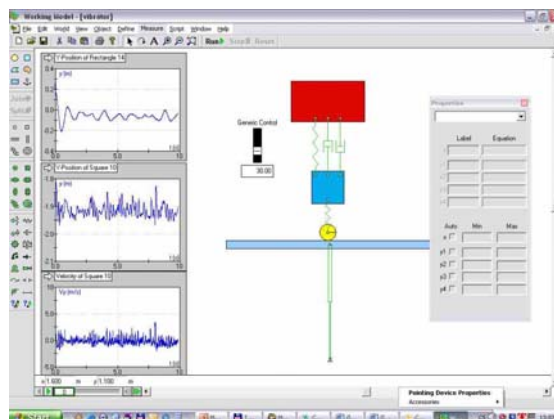
4. Programové prostředí

K samotné simulaci matematického modelu patří jak volba programového prostředí, tak i výběr vhodné matematické metody. Pro výpočet diferenciálních rovnic popisující zmiňovanou mechanickou soustavu se používají různé modifikace Eulerovy numerické metody, kde nejčastější volba připadá na metodu Runge-Kutta 4. řádu. Počítačový trh nabízí

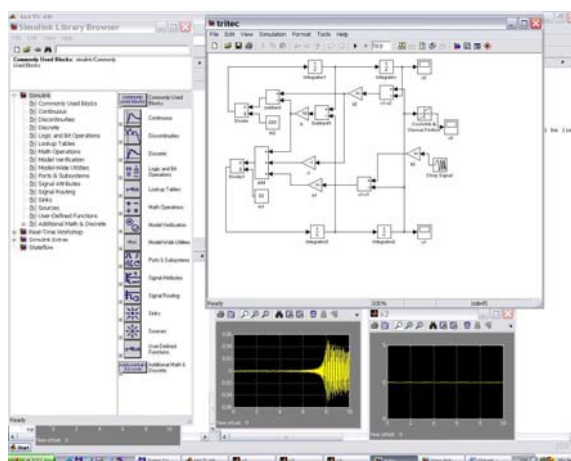
celou řada počítačových programů. Při našem výzkumu byly odzkoušeny programy MathCad, Working Model 2D, Adams a MathLab.



Obrázek 8a: MathCad



Obrázek 8b: Working Model 2D



Obrázek 8c: MathLab

Software MathCad (verze 2001, obrázek 8a) umožňuje popsat model pohybovými rovnicemi tak, jak by to zapsal vědecký pracovník na papír, popis modelu je tak přehledný. Pro výpočet diferenciálních rovnic MathCad disponuje metodou Runge-Kutta. Naprogramování modelové situace je ovšem časově náročné. Samotný výpočet je také časově delší než u dalších zkoumaných programů.

Další možností jak zapsat modelovou situaci je pomocí objektivě orientovaných programů, tzv. multibody systémů. Takovými představiteli jsou programy Working Model 2D a Adams. Working Model (obrázek 8b) je program umožňující sestavit model ve 2D prostředí, k výpočtům využívá Eulerovy metody. Vzhledem k možnostem programu a získaných výsledků ze simulací se tento program hodí spíše pro rychlý náhled na pozorovanou situaci. Výhody programu Adams je v možnosti „trojrozměrného programování“. Zde není nutné zjednodušovat model na čtvrtinový model automobilu, ale zavěšení kola lze přímo namodelovat. Vzniká tak možnost vložit do modelu i matematicky špatně popsatelné vlastnosti jako tření či materiálovou pružnost. Nutností pro použití Adamu je mít k dispozici výkonnější hardwarové vybavení. Nezbytností u obou programů je jejich dobrá znalost, jelikož nejsou dostatečně viditelné určité vlastnosti naprogramovaného modelu

(výpočtová metody, vzorkovací frekvence, vnější vlivy působící na soustavu, vlastnosti modelu).

Posledním programem, který jsme vyzkoušeli pro modelování výše popsané situace, je MathLab, konkrétně nástavba Simulink (obrázek 8c). Program je graficky orientovaný, tedy každá operace v pohybové rovnici má svůj funkční blok. Graficky se však jedná o dosti nepřehlednou situaci. Výhodou programu je naopak rychlé sestavení modelu a velmi rychlý výpočet simulace. Jelikož je tento program ve světě velmi používaný, patří mezi jeho další výhody možnost lepší spolupráce s jinými výzkumnými týmy. Pro výpočet je připraveno mnoho matematických metod jako například Adamsova, Dormand-Priceova, Bogacki-Shamineova.

5. Závěr

V rámci výzkumu v oblasti diagnostiky závěsu kola bylo ověřeno použití matematického modelování. V souvislosti s modelováním se otestovala použitelnost několika počítačových programů. K ověření výsledků simulace se je vyroben Experimentálního vozíku jenž je náhradním mechanismem jednoho závěsu kola. Další výzkum bude soustředěn na zpřesnění namodelovaných výsledků, kde nejvíce pozornosti bude věnováno lepšímu popsání pneumatiky při jejím dynamickém stlačování.

6. Literatura

- [1] Cambiaghi D., Gadola M., Manzo L., Vetturi D., Racecar aktive suspension: Hints on a quarter car model, Università di Brescia, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, <http://bsing.ing.unibs.it/~gadola/papers/iftomm95/iftomm1.htm>, 1995
- [2] PRAŽÁK F.: Analýza kmitočtových vlastností nápravy, grant fondu vědy FSI, BD 135 3030, 2005
- [3] Vlk F: Dynamika motorových vozidel, Nakladatelství a zasilatelství vlk, Brno 2001, ISBN 80-238-5273-6
- [4] Mazůrek, I., Dočkal, A., Pražák, F.: Diagnostic model of a shock absorber. In: Engineering Mechanics, 2005, vol. 12, no. A1, p. 71-76. ISSN 1210-2717.
- [5] DIXON J.C.: The Shock Absorber Handbook, Society of Automotive Engineers, 1999, ISBN 0-7680-0050-5
- [6] DIXON J.C.: Tires, Suspension and Handling, Society of Automotive Engineers, druhé vydání, 1996, ISBN 1-56091-831-4
- [7] TAILOR R.K., BASHFORD L.L., SCHROCK M.D.: Methods for measuring vertical tire stiffness, Transaction of the Asie 43, Amer Soc Agricultural Engineers, 2000, ISSN 0001-2351
- [8] COSSALTER V., a kol.: Dynamic Properties of Motorcycle and Scooter Tire, Vehicle System Dynamic 36 (5), Swets Zeitlinger Publisher, 2003, ISSN: 0042-3114