

URČENIE DYNAMICKÝCH CHARAKTERISTÍK PNEUMATIKY EXPERIMENTÁLNYM MERANÍM

THE TYRE DYNAMIC CHARACTERISTICS DETERMINATION USING THE EXPERIMENTAL MEASUREMENT

Daniel KOVÁČ¹

Abstrakt

Práca sa zaoberá určením dynamických charakteristík pneumatiky. Stanovenie týchto charakteristík je založené na experimentálnom meraní pomocou meracieho systému PULSE6. Cieľom je určenie tuhosti pneumatiky a jej tlmenia v závislosti na zaťažení pneumatiky. Pre určenie uvedených charakteristík sa využíva experimentálne určenie prenosovej funkcie.

Kľúčové slová: mechanická sústava, funkcia frekvenčnej odozvy, identifikácia parametrov.

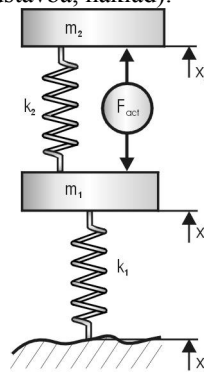
Abstract

This paper deals with the identification of the tyre dynamic characteristics. An identification is based on the experimental measurement of the frequency response function using measuring system PULSE6. The aim is to determine a tyre stiffness and dumping in relation to its load.

Keywords: mechanical system, frequency response function, system identification.

ÚVOD

Pri analýze odpruženia motorových vozidiel sa veľmi často používa takzvaný štvrtinový model vozidla [1], ktorý je možno vidieť na obr.1. Ide v podstate o kmitajúcu dvojhmotovú sústavu, kde m_1 predstavuje hmotnosť neodpruženej časti vozidla (koleso a časť nápravy), m_2 je hmotnosť odpruženej časti vozidla (nadvstavba, náklad).



Obr.1 Štvrtinový model aktívneho odpruženia vozidla

Samotné odpruženie je simulované pružinou medzi hmotami m_1 a m_2 s tuhosťou k_2 . Radiálna tuhosť pneumatiky je pre jednoduchosť simulovaná pružinou s tuhosťou k_1 . Keďže v tomto konkrétnom prípade ide o takzvané aktívne odpruženie, v modeli je ešte medzi odpruženou a neodpruženou hmotou aktuátor produkujúci silu F_{act} ktorou aktívne zasahuje do

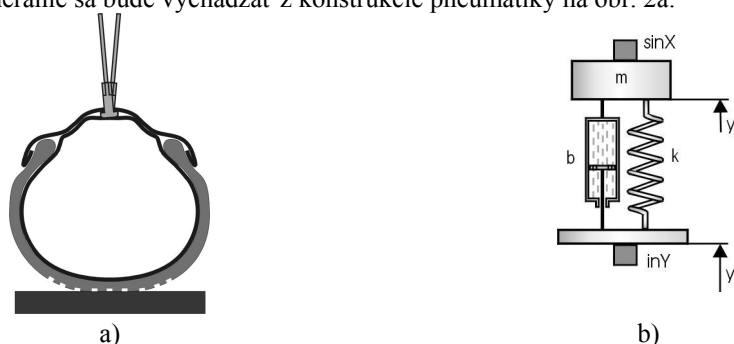
¹ Ing. Daniel KOVÁČ, KAMaM, Sjf TU v Košiciach, daniel.kovac@tuke.sk

Lektoroval: doc. Ing. Štefan SEGLA, CSc., KAMaM, Sjf TU v Košiciach, stefan.segla@tuke.sk

sústavy a teda ovplyvňuje jej charakteristiky. Štvrtinový model vozidla je teda veľmi zjednodušeným modelom, avšak na druhej strane je dostatočný na posúdenie zvislej dynamiky vozidiel. Kvôli svojej transparentnosti, je tiež vhodný na porovnanie napr. pasívneho odpruženia a odpruženia aktívneho, resp. semiaktívneho. Ako je vidieť z predchádzajúceho obrázka, je radiálna tuhosť pneumatiky kvôli jednoduchosti modelovaná ako pružina s konštantnou tuhosťou k_1 . Opodstatnenosť takéhoto postupu je často v tom, že sa hlavne sleduje správanie sa odpruženej hmoty, a preto je snaha popísať charakteristiku pneumatiky čo najjednoduchšie (dokonca aj bez uvažovanie jej tlmenia). Ak má však model presnejšie vystihovať realitu, je nevyhnutný aj presnejší model pneumatiky. Tuhosť pneumatiky už z podstaty jej konštrukcie nemôže byť zrejme konštantná a tiež je potrebné uvažovať aj z vlastným tlmením pneumatiky. Pre určenie týchto charakteristík je potrebné vykonať experimentálne meranie. V nasledujúcom texte je opísaný návrh experimentálneho určenia dynamických charakteristík pneumatiky spolu s praktickou ukázkou jedného merania pre určenie charakteristík pneumatiky bicykla.

NÁVRH EXPERIMENTÁLNEHO URČENIA DYNAMICKÝCH CHARAKTERISTÍK PNEUMATIKY

Pre meranie sa bude vychádzať z konštrukcie pneumatiky na obr. 2a.



Obr. 2 a) priečný rez pneumatiky b) mechanický model pneumatiky

Mechanický model pneumatiky je na obr. 2b. Tuhosť pneumatiky je modelovaná pružinou s tuhosťou k a tlmenie viskóznym tlmičom s koeficientom tlmenia b . Model uvažuje s konštantnými hodnotami tuhosti a koeficientom tlmenia. Ako však bolo spomínané, hodnoty týchto parametrov zrejme nebudú konštantné, ale budú sa meniť so zaťažením pneumatiky. Napriek tomu pri kmitoch s malou amplitúdou pri istom zaťažení pneumatiky možno tieto hodnoty považovať za približne konštantné. Pri rôznych zaťaženiach budú však rôzne.

Z tohto dôvodu bol navrhnutý nasledujúci postup. Model pneumatiky (obr.2b) síce uvažuje s konštantnými hodnotami tuhosti a koeficientu tlmenia, ale tieto budú určené pre rôzne zaťaženia pneumatiky. Týmto postupom sa určí závislosť tuhosti a koeficientu tlmenia pneumatiky v závislosti na jej zaťažení (resp. na jej radiálnej deformácii, ak by sa meranie doplnilo ešte o meranie tejto deformácie pri zaťažovaní). Preto v ďalšom stačí analyzovať uvedený jednoduchý lineárny model pneumatiky.

Matematický model mechanickej sústavy z obr.2b teda bude

$$m\ddot{y}_2 + b\dot{y}_2 + ky_2 = b\dot{y}_1 + ky_1, \quad (1)$$

kde m je hmotnosť zaťažujúca pneumatiku,

y_1 - výchylka podkladu pneumatiky,

y_2 - výchylka ráfika pneumatiky,

b, k - hľadané parametre koeficientu tlmenia a tuhosti pneumatiky.

Fourierovou transformáciou predchádzajúcej rovnice pre nulové počiatkové podmienky dostaneme

$$(-m\omega^2 + ib\omega + k)Y_2 = (ib\omega + k)Y_1. \quad (2)$$

Prenosová funkcia danej sústavy teda bude

$$H_{21}(\omega) = \frac{Y_2}{Y_1} = \frac{ib\omega + k}{ib\omega + k - m\omega^2}. \quad (3)$$

Meraním sa určia diskkrétne hodnoty prenosovej funkcie v tvare

$$H_{21\text{exp } j} = H_{21\text{exp } j}^{\text{Re}} + iH_{21\text{exp } j}^{\text{Im}}, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

Porovnaním rovníc (3) a (4) s využitím metódy najmenších štvorcov dostaneme

$$b \sum_{j=1}^n A_j^2 \omega_j^2 + k \sum_{j=1}^n A_j B_j \omega_j + m \sum_{j=1}^n A_j C_j \omega_j^3 = 0, \quad (5)$$

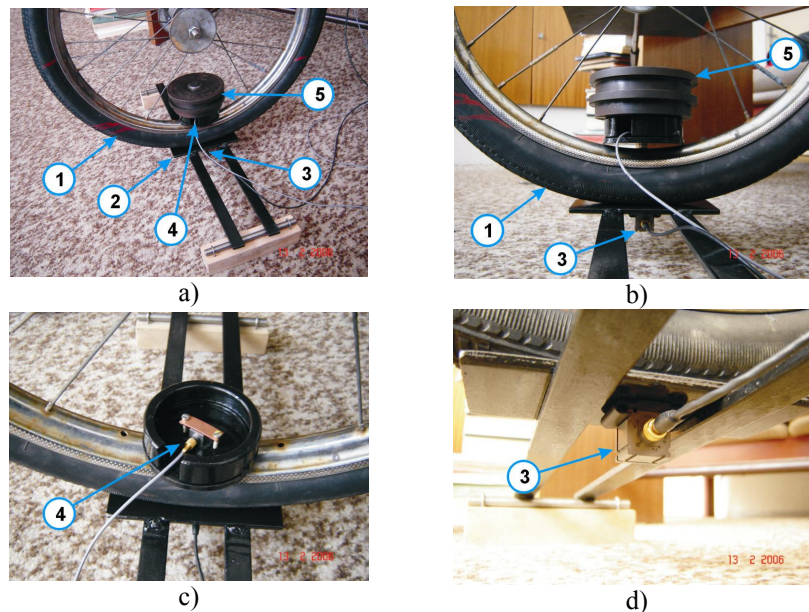
$$b \sum_{j=1}^n A_j B_j \omega_j + k \sum_{j=1}^n B_j^2 + m \sum_{j=1}^n B_j C_j \omega_j^2 = 0, \quad (6)$$

kde $A_j = 1 + H_{21\text{exp } j}^{\text{Im}} - H_{21\text{exp } j}^{\text{Re}}$, $B_j = 1 - H_{21\text{exp } j}^{\text{Re}} - H_{21\text{exp } j}^{\text{Im}}$, $C_j = H_{21\text{exp } j}^{\text{Re}} + H_{21\text{exp } j}^{\text{Im}}$.

Tieto rovnice predstavujú sústavu dvoch rovníc pre určenie dvoch parametrov b a k .

USPORIADANIE PRI MERANÍ

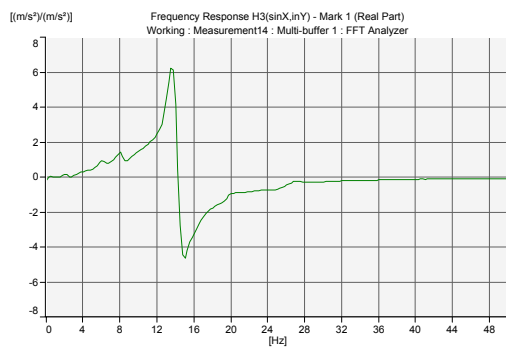
Usporiadanie pre samotné meranie je možné vidieť na obr. 3. Pneumatika 1 je uložená na pružne uloženej podložke 2. Na spodnej časti podložky je pomocou sponky upevnený snímač 3. Ide o trojosový snímač. Pre toto meranie bola využitá iba os Y. Snímač 4 merajúci zrýchlenie ráfika, je upevnený pomocou skrutiek v držiaku, na ktorý sa zároveň ukladajú aj závažia 5 pre zaťažovanie. Tento snímač je jednoosový. Pneumatika bola teda zaťažovaná závažiami, pričom boli použité hmotnosti 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5 kg. Skutočné zaťaženie pneumatiky bolo skontrolované vážením. Kmitanie bolo vyvolávané údermi kladiva na podložku 2.



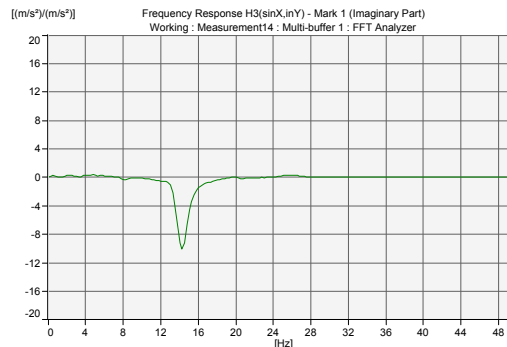
Obr. 3 Usporiadanie pri meraní

VÝSLEDKY MERANIA

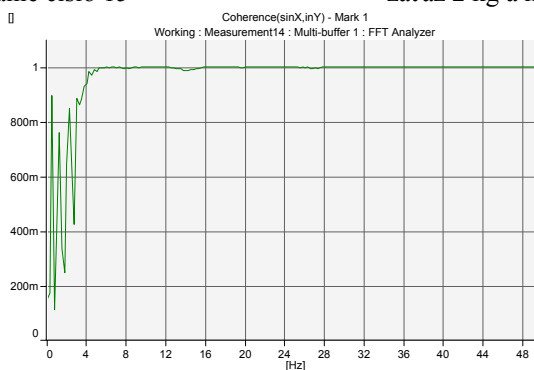
Pre každé zaťaženie pneumatiky bolo vykonaných po 15 meraní. Pre závažie 2 kg sú pre ilustráciu na nasledujúcich obrázkoch grafy prenosových funkcií (reálna časť, imaginárna časť a koherencia) pre vybrané merania.



Obr. 4 Reálna časť prenosovej funkcie pre záťaž 2 kg a meranie číslo 15



Obr. 5 Imaginárna časť prenosovej funkcie pre záťaž 2 kg a meranie číslo 15



Obr. 6 Koherencia pre záťaž 2 kg a meranie číslo 15

SPRACOVANIE NAMERANÝCH HODNÔT

Namerané prenosové funkcie boli vyexportované v podobe textových súborov a ďalej boli kvôli veľkému množstvu dát spracovávané v programe MATLAB. Výsledky výpočtov sú zhrnuté v nasledujúcej tabuľke. Z nameraných hodnôt boli vyselektované len tie body prenosovej funkcie, pre ktoré bola hodnota koherencie väčšia alebo rovná ako zvolená hodnota. Z týchto vyselektovaných hodnôt boli metódou najmenších štvorcov podľa rovníc (5) a (6) vypočítané hľadané parametre.

Výsledné hodnoty koeficientov tlmenia a tuhosti pneumatiky **Tabuľka 1**

Hmotnosť závažia [kg]	Skutočné zaťaženie [kg]	Zvolená hodnota koherencie	Počet vyselektovaných bodov	Koeficient tlmenia [N.s.m ⁻¹]	Tuhosť [N.m ⁻¹]
0,5	4	0,999	1620	38	42858
1	4,5	0,95	2731	19	47852
1,5	5	0,99	2446	2	55186
2	5,5	0,95	2662	20	51802
2,5	6	0,95	2686	31	50953
3	6,5	0,95	2548	43	53117
3,5	7	0,8	2828	32	57148

ZHODNOTENIE VÝSLEDKOV A ZOSTAVENIE MODELU PNEUMATIKY

V prvom rade treba povedať, že praktické skúsenosti z merania poukázali na nie príliš vhodný mechanický model (obr.2b). Nevhodnosť spočíva v tom, že uvedený model neuvažuje s hmotou sústredenou v strede kolesa. Ide o náboj, špice a držiak celého kolesa. Tieto hmoty by bolo potrebné tiež v modely zohľadniť a to pripojením k hmote m pomocou pružiny, ktorá by reprezentovala tuhosť výpletu.

Ďalším problémom pri meraní bola pružne uložená podložka, na ktorej bolo položené koleso. Pri prvých meraniach bola použitá podložka z plechu hrúbky 2 mm, ktorá sa pri rázovom buzení deformovala (vlnila). Preto bola použitá podložka s hrúbkou 5 mm. Aj napriek tomu spôsob upevnenia tejto podložky nevylučuje jej celkové natáčanie, s čím uvedený model neuvažuje. Toto môže byť tiež jeden z podstatných zdrojov chýb obzvlášť preto, že kmitanie kolesa bolo vybudzované údermi kladiva vedľa kolesa na podložku.

Aj napriek uvedeným nedostatkom, je možné použiť namerané hodnoty pre zostavenie nového modelu pneumatiky. Pre matematický popis tuhostnej charakteristiky bol použitý postup navrhnutý v práci [2]. V uvedenej práci je závislosť zaťažujúcej radiálnej sily od radiálneho stlačenia popísaná vzťahom

$$F = qx^e, \quad (7)$$

kde F je radiálna sila v pneumatike

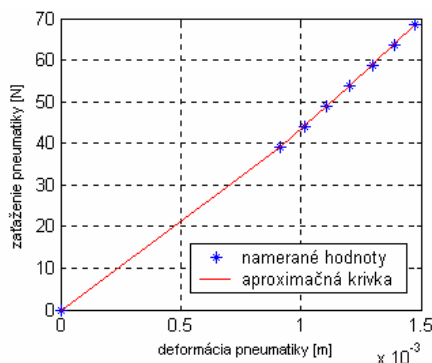
x – radiálne stlačenie pneumatiky

q, e – sú koeficienty určené experimentálnym meraním.

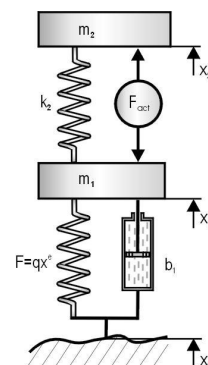
Za predpokladu, že koeficient e je číslo väčšie ako 1, rovnica (7) popisuje nelineárnu charakteristiku, kde sa so zväčšujúcim zaťažením resp. stlačením zvyšuje aj tuhosť pneumatiky.

Z hodnôt určených experimentálnym meraním boli pre danú pneumatiku metódou najmenších štvorcov určené koeficienty $q = 142344,79$ a $e = 1,17185$. Tuhostná charakteristika pneumatiky v tvare (7) spolu s nameranými hodnotami je znázornená na obr.7.

Pri určovaní vlastného tlmenia pneumatiky je situácia komplikovanejšia. Kvôli už spomínaným nedostatkom modelu a samotnej realizácii merania dochádza k veľkému kolísaniu hodnôt koeficientu tlmenia pre rôzne hodnoty zaťaženia. Z nameraných a vypočítaných hodnôt je preto veľmi ťažké nájsť podobnú závislosť ako v prípade tuhosti. Tlmenie pneumatiky je preto možné zohľadniť ako jednoduchý lineárny viskózný tlmič s konštantnou hodnotou koeficientu tlmenia, ktorý sa určí ako aritmetický priemer z vypočítaných hodnôt. Jeho hodnota je teda 26,4 N.s.m⁻¹.



Obr. 7 Tuhosť charakteristika pneumatiky



Obr. 8 Upravený štvrtinový model vozidla s uvažovaním charakteristík pneumatiky získaných meraním.

Štvrtinový model odpruženia na základe tohto merania je upravený podľa obr. 8.

ZÁVER

Článok sa zaoberá experimentálnym stanovením dynamických charakteristík pneumatiky. Jeho cieľom je spresnenie modelu pneumatiky používaného pre dynamickú analýzu odpruženia automobilu. Opisuje postup určenia tuhosti pneumatiky a koeficientu tlmenia v závislosti na zaťažení pneumatiky. Určenie týchto parametrov je založené na experimentálnom meraní prenosovej funkcie.

Postup tu opísaný je aplikovaný na určenie uvedených parametrov pre pneumatiku bicykla. Tiež je uvedené, ako možno z experimentálne určených hodnôt tuhosti a koeficientu tlmenia vytvoriť nový model, ktorý presnejšie vystihuje reálnu pneumatiku.

Autori ďakujú Vedeckej grantovej agentúre MŠ SR za podporu v rámci riešenia projektu č.1/2187/05.

LITERATÚRA

- [1] MÚČKA, P.: *Odozva modelu nákladného vozidla s aktívnym odpružením na osamelú prekážku*, Strojnícky časopis, 50, 1999, č.4, str. 265-277.
- [2] LEHTONEN, T.: *Measurement of Heavy Tyres Parameters*, Laboratory of Automotive Engineering, Helsinki University of Technology, WWW:< <http://www.tkk.fi/Units/Auto/>>.
- [3] SOUKUP, J.: *Identifikace soustav*. SNTL, Praha, 1990, s.64-67.
- [4] MILÁČEK, S.: *Modální analýza mechanických kmitů*. Ediční středisko ČVUT, Praha, 1992, s. 65.
- [6] BEARDS, C.F.: *Vibration Analysis and Control System Dynamics*. Ellis Horwood Limited, Chichester, 1981.
- [7] Transducer & Conditioning – Interactive CD-ROM 2.1, Brüel & Kjaer™.
- [8] TREBUŇA, F., ŠIMČÁK, F.: *Odolnosť prvkov mechanických sústav*. Košice, Emilena, 2004, 980 str., ISBN 80-8073-148-9