

MODELOVÁNÍ VZDUCHOVÝCH PRUŽIN

MODELLING OF AIR SPRINGS

Jan PEJŠA¹

Abstrakt

Článek pojednává o problematice modelování vzduchových pružin pro využití v MBS výpočtech. Věrohodnost výsledků výpočtových simulací zcela závisí na správném nastavení parametrů ve výpočtových modelech. U výpočtových modelů vzduchových pružin to jsou hlavně parametry, které určují jejich dynamické chování. Za účelem měření dynamických vlastností vzduchových pružin byl ve VÚKV navržen a postaven měřicí stav. Představení a popis měřicího stavu jsou součástí tohoto článku. Konec článku je věnován implementaci naměřených dat do výpočtového modelu vzduchové pružiny a jeho validaci.

Klíčová slova

vzduchová pružina, MBS, výpočtový model, kolejová vozidla, dynamické vlastnosti, svislý směr, měřicí stav, přídatný vzduchojem, škrtící clonka, propojovací potrubí, měření, validace

Abstract

The article deals with the issue of modelling air springs for use in multibody simulations. The reliability of the results of simulations fully depends on the correct parameter settings in simulation models. To set simulation models of air springs it is necessary to take into account mainly the parameters that determine their dynamic behaviour. In order to measure the dynamic properties of air springs, a test bench was designed and built in VÚKV. The introduction and the description of the test bench are parts of this article. The end of the article deals with the implementation of measured data into the simulation model of air spring and its validation.

Keywords

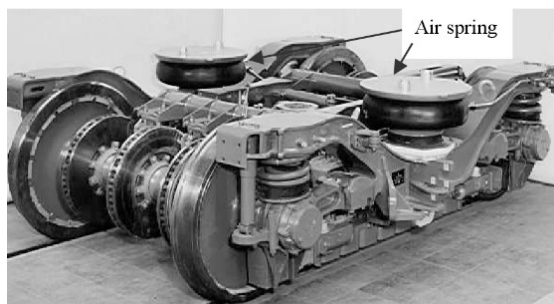
air spring, multibody simulation, simulation model, rail vehicles, dynamic characteristics, vertical direction, test bench, additional air reservoir, orifice, surge pipe, measurement, validation

1 ÚVOD

Vzduchové pružiny v kolejových vozidlech se v dnešní době těší stále větší oblibě. Uplatnění nachází hlavně v sekundárním vypružení vozidel osobní dopravy. Díky svým dynamickým a vibračním hlukovým isolačním vlastnostem významně přispívají k dosažení velmi dobrého jízdního komfortu pro cestující. Avšak aby byl dobrý jízdní komfort zajištěn, musí být vypružení vozidla správně naladěno. Vlastní frekvence pohybů vozové skříně by se proto měly nacházet v oblastech, které nejsou pro člověka rušivé nebo nepříjemné. Ve svislém směru, kterým se tento text zabývá, je pro člověka z fyziologického hlediska nejpříznivější rozmezí frekvence od 1 do 2 Hz. Proto je vhodné do tohoto rozmezí naladit vlastní frekvenci houpání vozové skříně. Pro vozidla, kde cestující tráví delší

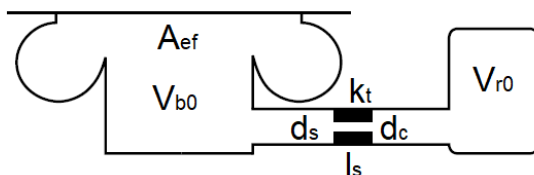
¹ Ing. Jan Pejša, VÚKV a.s. Bucharova 1314/8, 158 00 Praha 5 – Stodůlky. Tel.: +420 736 519 962, e-mail: pejsa@vukv.cz

pobyt, se doporučuje naladit vlastní frekvenci houpání blíže k 1 Hz. Vlastní frekvence houpání vozové skříně je dána z velké části tuhostí použitého sekundárního vypružení. Jestliže je v sekundárním vypružení použita vzduchová pružina, je tedy pro správné naladění vlastních frekvencí vozové skříně nutné znát její dynamickou charakteristiku.



Obr. 1 Sekundární vypružení realizované vzduchovými pružinami [1]

Pro systémy vzduchových pružin je charakteristické jejich různorodé dynamické chování. Dynamické vlastnosti systémů vzduchových pružin totiž silně závisí na mnoha různých parametrech. Ty nejdůležitější jsou zobrazeny na obr. 2, kde A_{ef} je efektivní plocha pružiny, V_{b0} je objem měchu pružiny, V_{r0} je objem přídavného vzduchojemu, d_s je průměr propojovacího potrubí, l_s je délka propojovacího potrubí, d_c je průměr škrťací clonky a k_t je koeficient odporu proudění vzduchu v propojovacím potrubí.



Obr. 2 Schéma systému vzduchové pružiny se základními fyzikálními parametry

Připojení přídavného vzduchojemu k měchu může být realizováno pomocí potrubí nebo přímým napojením přídavného vzduchojemu na vzduchovou pružinu. V obou případech propojení může být mezi vzduchojem a měch vložena škrťací clonka. Clonka zvyšuje odpor proudění vzduchu a tím významně ovlivňuje dynamickou charakteristiku vzduchové pružiny.

Při vhodném nastavení parametrů systému vzduchového vypružení zejména volbě velikosti přídavného vzduchojemu a odporu proudění vzduchu v propojovacím potrubí, dokáže vzduchové vypružení svým vlastním útlumem nahradit svislé tlumiče sekundárního vypružení.

2 STATICKÉ VLASTNOSTI

V oblasti statických deformací je proudění vzduchu mezi měchem a přídavným vzduchojemem pomalé a tuhost pružiny proto není ovlivněna odporem vzduchu v propojovacím potrubí. Statická tuhost vzduchové pružiny ve svislém směru je tedy závislá na přetlaku v pružině, na celkovém objemu pružiny, na efektivní ploše pružiny a na polytropickém exponentu. Statická tuhost vzduchové pružiny ve svislém směru je vyjádřena rovnicí

$$k_z = \frac{n A_{ef}^2 p_p}{V_c}, \quad (1)$$

kde k_z je tuhost ve svislém směru, n je polytropický exponent, A_{ef} je efektivní plocha pružiny, p_p je přetlak v pružině, V_c je celkový objem vzduchu v pružině.

Efektivní plocha pružiny je parametr, který určuje velikost plochy, přes kterou působící přetlak v pružině vytváří svislou sílu. Efektivní plocha pružiny se může měnit se stlačením pružiny. Výpočet efektivní plochy A_{ef} udává rovnice

$$A_{ef} = \frac{F_z}{p_p}, \quad (2)$$

kde F_z je svislá síla působící na pružinu a p_p je přetlak v pružině.

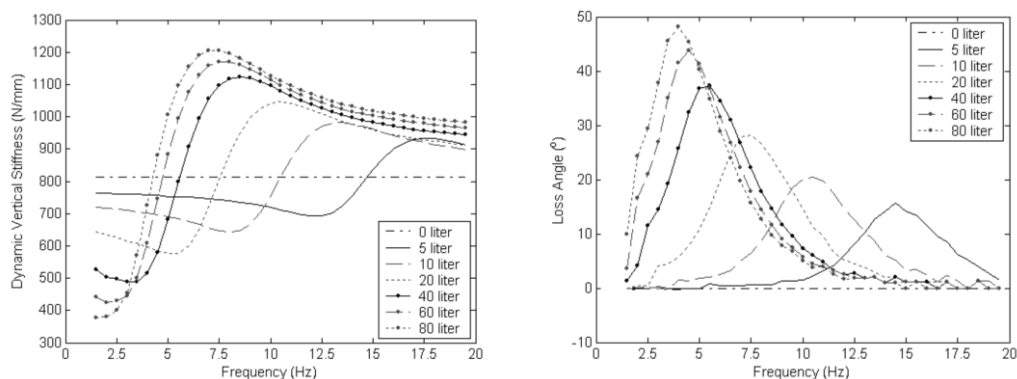
3 DYNAMICKÉ VLASTNOSTI

V oblasti dynamických deformací, kde jsou rychlosti proudění vzduchu v propojovacím potrubí vyšší, již odpor proudění vzduchu mezi měchem a přídavným vzduchojemem významně ovlivňuje charakteristiku pružiny. Dynamickou charakteristikou je myšlena dynamická tuhost a fázový posun mezi budící výchylkou a silou. Fázový posun je veličina vyjadřující velikost tlumení.

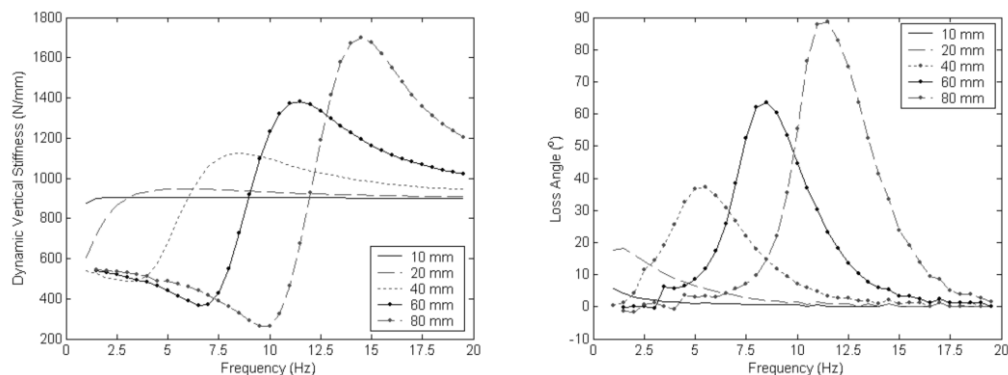
Dynamická charakteristika je závislá na stejných parametrech jako statická tuhost a na mnoha dalších parametrech. Ty nejdůležitější z nich jsou objem přídavného vzduchojemu, průměr clonky, průměr propojovacího potrubí, délka propojovacího potrubí a odpor proudění v propojovacím potrubí.

Z pohledu buzení jsou dynamické charakteristiky závislé na budící frekvenci, na budící amplitudě a na zatížení pružiny.

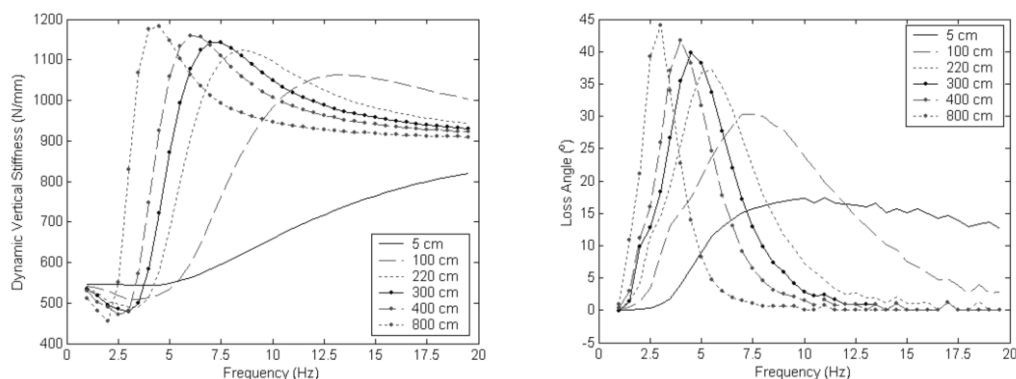
Průběhy dynamické tuhosti a fázového posunu pro různé velikosti přídavného vzduchojemu jsou zobrazeny na obr. 3, pro různé průměry propojovacího potrubí jsou zobrazeny na obr. 4 a pro různé délky propojovacího potrubí jsou zobrazeny na obr. 5.



Obr. 3 Dynamická tuhost a fázový posun pro různé velikosti přídavného vzduchojemu [2]



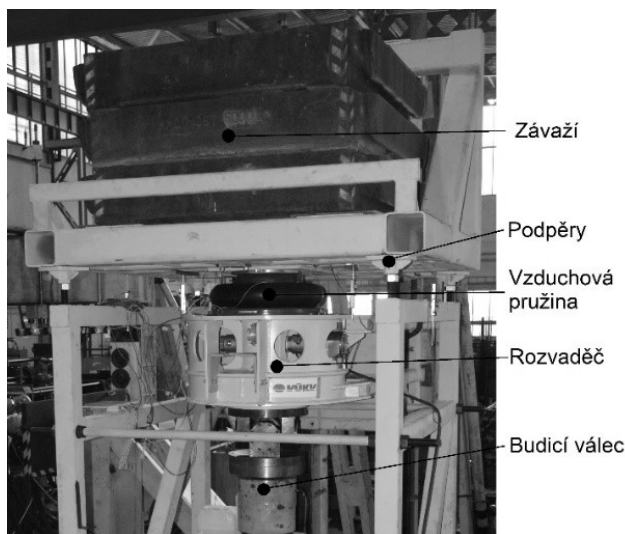
Obr. 4 Dynamická tuhost a fázový posun pro různé průměry propojovacího potrubí [2]



Obr. 5 Dynamická tuhost a fázový posun pro různé délky propojovacího potrubí [2]

4 MĚŘICÍ STAV VZDUCHOVÝCH PRUŽIN

Měřicí stav vzduchových pružin, který byl ve VÚKV navržen, slouží k měření dynamických charakteristik. Měřicí stav se skládá z nosné konstrukce, z budícího válce, z rozvaděče a ze závaží. Nosná konstrukce zajišťuje vedení pohybů pohyblivých částí, nese závaží a slouží také k případnému podepření závaží pomocí podpěr. Vzduchová pružina je přes nosnou konstrukci umístěna mezi závažím a rozvaděčem. Rozvaděč obsahuje přídavný vzduchojem měnitelné velikosti, je v něm umístěn slot na škrťací clonky a umožňuje pomocí libovolného potrubí propojit měch pružiny s přídavným objemem. Rozvaděč je spojen s budícím válcem pomocí sférické vazby a ve svislém směru se pohybuje společně s budícím válcem.



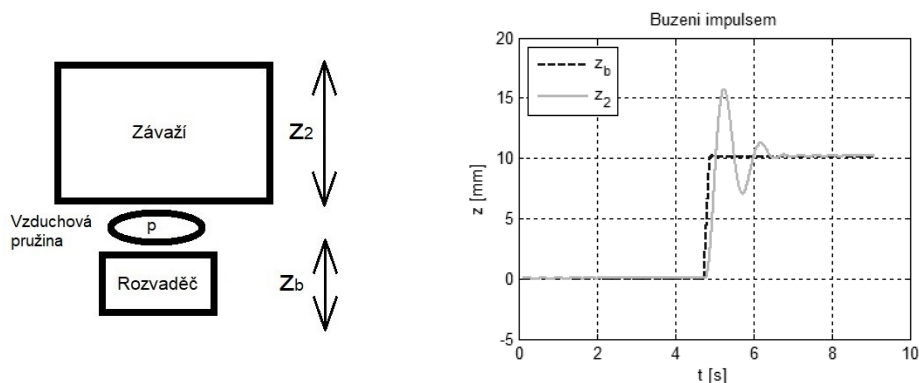
Obr. 6 Měřicí stav vzduchových pružin

Měřicí stav díky použitému budícímu válci umožňuje měřit v širokém budícím spektru frekvencí a amplitud. Zároveň měřicí stav umožňuje jednoduše měnit nastavení vzduchové pružiny, tzn. měnit velikost přídavného vzduchojemu, měnit škrťací clonku, měnit délku, měnit průměr potrubí a změnou hmotnosti závaží měnit zatížení pružiny. Díky těmto schopnostem je na měřicím stavu možné měřit dynamické charakteristiky vzduchových pružin při různých nastaveních.

Měřicí stav umožňuje měření pružin ve třech režimech.

4.1 Buzení impulsem

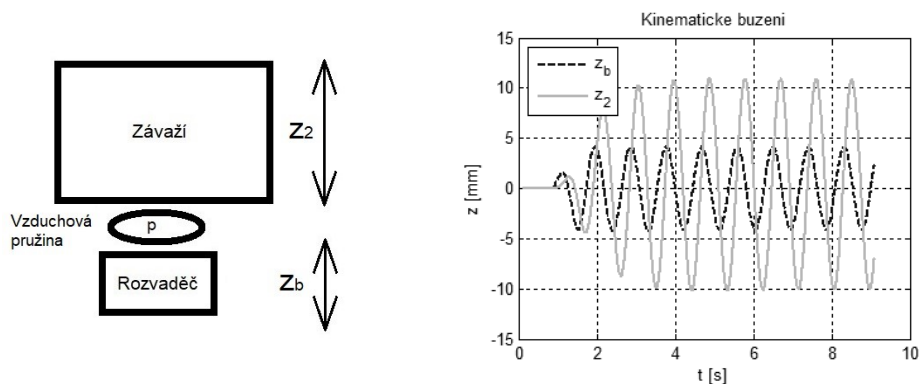
V tomto režimu měření je závaží pomocí budicího válce vybuzeno impulsem o zvolené amplitudě (obr. 7). Impuls rozkmitá závaží a z průběhu ustalující se výchylky závaží lze zjistit vlastní frekvenci, dynamickou tuhost a poměrný útlum (tlumení).



Obr. 7 Buzení impulsem

4.2 Buzení kinematické

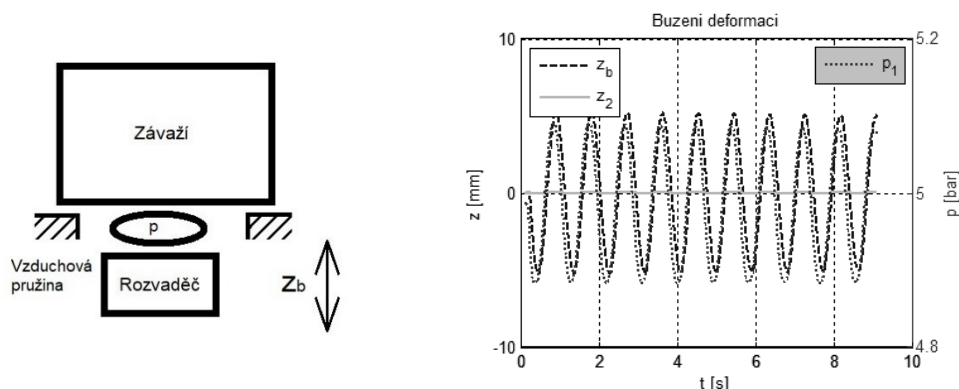
V tomto režimu měření je závaží pomocí budicího válce buzeno periodickým průběhem s vybranou amplitudou a vybranou frekvencí (obr. 8). Závaží po odeznění přechodového jevu kmitá budicí frekvencí avšak zpravidla jinou amplitudou. Z poměru amplitudy kmitání závaží a budicí amplitudy lze vykreslit přenosové funkce.



Obr. 8 Buzení kinematické

4.3 Buzení deformací

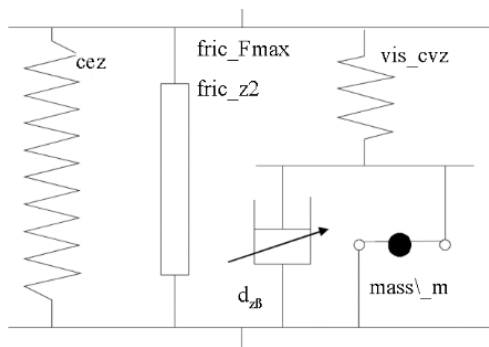
V tomto režimu měření je závaží podepřeno podpěrami a jeho pohyb je zablokován (obr. 9). Stlačování pružiny je realizováno pomocí budicího válce, který pružinu periodicky stlačuje vybranou amplitudou a vybranou frekvencí. Výstupem tohoto měření je průběh dynamické tuhosti a fázového posunu (tlumení) v závislosti na budicí frekvenci a amplitudě.



Obr. 9 Buzení deformací

5 VÝPOČTOVÝ MODEL PRUŽINY

Pro vytvoření MBS modelu vzduchové pružiny byl použit program Simpack. Simpack nabízí možnost vytvoření pokročilého modelu vzduchové pružiny. Tento prvek vzduchové pružiny používá v simulačních výpočtech Bergův náhradní model vzduchové pružiny (obr. 10). Nastavení tohoto prvku je možné buď pomocí fyzikálních parametrů vzduchové pružiny (objem měchu, objem přídavného vzduchojemu, efektivní plocha pružiny, průměr potrubí, délka potrubí, koeficient odporu vzduchu v potrubí atd.), nebo přímo pomocí parametrů Bergova náhradního modelu vzduchové pružiny (parametry uvedené na obr. 10). V obou případech je nejobtížnější a nejméně přesné stanovení parametrů reprezentujících odpor proudění vzduchu v propojovacím potrubí. Právě stanovení těchto parametrů je naprosto stěžejní pro jeho správnou dynamickou odezvu a pro věrohodnost modelu pružiny.



Obr. 10 Bergův náhradní model vzduchové pružiny [4]

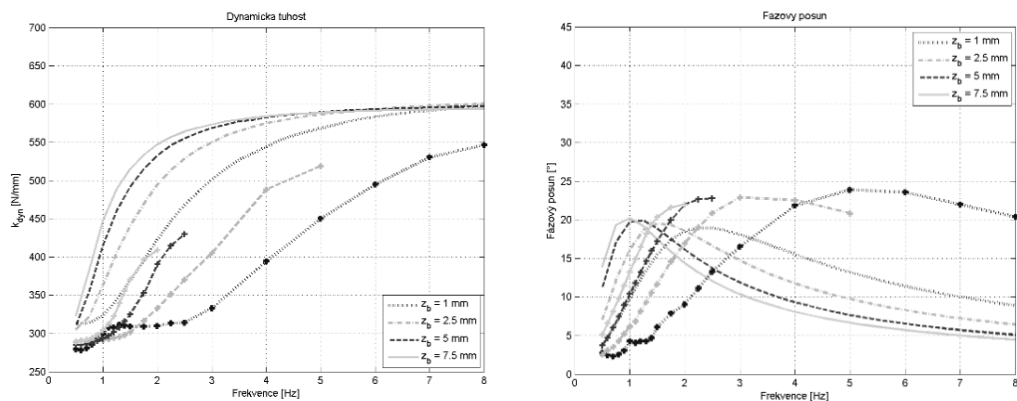
Parametry reprezentující odpor proudění vzduchu v propojovacím potrubí v Bergově náhradním modelu vzduchové pružiny jsou vis_cvz , $d_{z\beta}$ a $mass_m$ (obr. 10). Tyto parametry významně ovlivňují výsledné dynamické chování Bergova modelu vzduchové pružiny. Statické chování Bergova modelu vzduchové pružiny určují parametry cez , $fric_Fmax$ a $fric_z2$ (obr. 10).

5.1 Původní model vzduchové pružiny

Před měřením na měřicím stavu byl vytvořen výpočtový model pružiny, ve kterém byly parametry reprezentující odpor proudění vzduchu v propojovacím potrubí nastaveny pomocí výpočtu celkového koeficientu odporu vzduchu. Celkový koeficient odporu v potrubí byl složen z odporu clonky a odporu

propojovacího potrubí. Na základě výpočtových simulací provedených s tímto modelem pružiny byly vytvářeny průměry a tvary clonek vhodné pro měření na měřicím stavu. Vlastnosti reálné vzduchové pružiny s těmito clonkami byly následně na měřicím stavu změřeny.

Na obr. 11 je zobrazena dynamická tuhost a fázový posun jednoho vybraného nastavení pružiny. Na zmíněném obrázku jsou pro porovnání tečkovaně vyznačeny průběhy, které byly v tomto nastavení pružiny na měřicím stavu naměřeny.

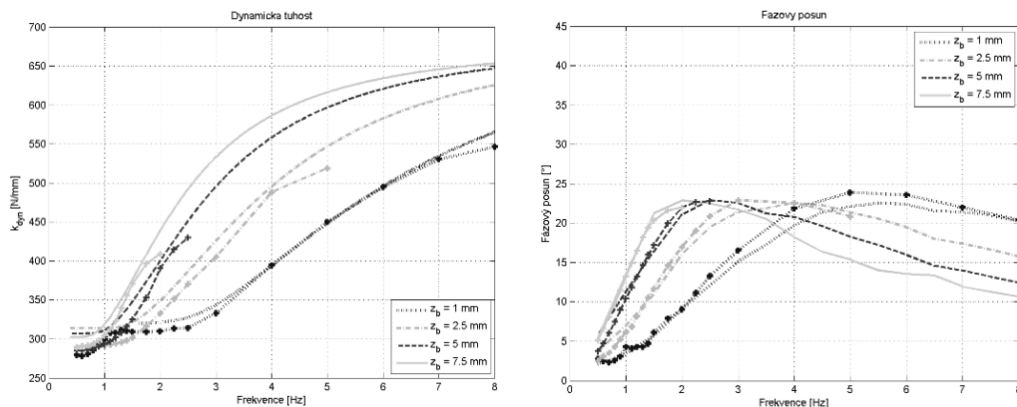


Obr. 11 Dynamické charakteristiky původního modelu vzduchové pružiny

Z obr. 11 je patrné, že dynamické charakteristiky původního modelu vzduchové pružiny se s naměřenými charakteristikami neshodují. Podobné neshody se vyskytovaly i v dalších nastaveních vzduchové pružiny.

5.2 Validace modelu vzduchové pružiny

Na základě naměřených dat byly parametry původního modelu vzduchové pružiny upraveny. Nejvíce úprav bylo dle předpokladů nutné udělat v parametrech reprezentujících odpor vzduchu v propojovacím potrubí, tzn. *vis_cvz*, *dz β* a *mass_m* (obr. 10). Výsledná dynamická charakteristika validovaného modelu vzduchové pružiny je zobrazena na obr. 12. Pro porovnání jsou opět v obrázku tečkovaně vyznačeny naměřené průběhy. Dynamická charakteristika upraveného modelu se s naměřenými daty dobře shoduje. Proto lze tento model považovat za validovaný.



Obr. 12 Dynamické charakteristiky validovaného modelu vzduchové pružiny

6 ZÁVĚR

Výpočtové simulace jsou v dnešní době nedílnou součástí návrhu vypružení kolejových vozidel. Aby byly výsledky výpočtových simulací věrohodné, je nutné mít správně nastavené/validované výpočtové modely. V případě vyhodnocování jízdního komfortu má na výsledky zcela zásadní vliv navržené sekundární vypružení. Jestliže je v sekundárním vypružení použita vzduchová pružina, je tedy nutné znát dynamickou charakteristiku použité vzduchové pružiny.

Dynamická charakteristika vzduchové pružiny je závislá na mnoha parametrech (objem měchu pružiny, objem přídavného vzduchojemu, průměr a délka propojovacího potrubí, průměr clonky, zatížení pružiny) a některé z nich je velmi obtížné určit (parametry reprezentující odpor proudění vzduchu v propojovacím potrubí).

Za účelem měření dynamických charakteristik byl vytvořen měřicí stav vzduchových pružin. Před měřením vzduchové pružiny na měřicím stavu byl vytvořen výpočtový model vzduchové pružiny, ve kterém byly parametry reprezentující odpor proudění vzduchu v propojovacím potrubí určeny pomocí koeficientů odporu uváděných v literatuře. Ukázalo se, že dynamická charakteristika tohoto modelu vzduchové pružiny nevykazovala dobrou shodu s naměřenou dynamickou charakteristikou skutečné pružiny.

Pomocí naměřených dat z měření na měřicím stavu byl validován původní model vzduchové pružiny. Po úpravě parametrů modelu bylo dosaženo mnohem lepší shody dynamické charakteristiky s naměřenými daty. Nejvíce úprav bylo nutné udělat v parametrech reprezentujících odpor proudění vzduchu v propojovacím potrubí.

Do budoucna by měl měřicí stav vzduchových pružin posloužit k měření dalších vzduchových pružin v různých nastaveních. Na základě dalších naměřených dat se očekává přesnější a věrohodnější určování koeficientu odporu vzduchu v propojovacím potrubí. Případně navržené takových parametrů systému vzduchového vypružení, při kterých by vzduchové vypružení díky svému vlastnímu útlumu mohlo být provozováno bez svislých tlumičů sekundárního vypružení.

Vývoj měřicího stavu byl podporován Technologickou agenturou ČR v rámci projektu TN01000026 „Národní centrum kompetence Josefa Božka pro pozemní dopravní prostředky“.



Literatura

- [1] DOCQUIER, N. *Multiphysics modelling of multibody systems: application to railway pneumatic suspensions* [online]. Louvain-la-Neuve, Belgium, 2010 [cit. 16. 06. 2021]. Dostupné z: <https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/object/boreal:33474>. Disertační práce. Université catholique de Louvain.
- [2] SAYYAADI, H., SHOKOUHI, N. Effects of air reservoir volume and connecting pipes' length and diameter on the air spring behavior in rail-vehicles. *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B: Engineering* [online]. 2010, **34**(B5), 499–508 [cit. 16. 06. 2021]. Dostupné z: https://ijstm.shirazu.ac.ir/pdf_916_157948bcc403bde6684123802e17f1d1.html
- [3] PRESTHUS, M. *Derivation of air spring model parameters for train simulation* [online]. Luleå, Sweden, 2002 [cit. 16. 06. 2021]. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1023208/FULLTEXT01.pdf>. Disertační práce. Luleå University of Technology.
- [4] *Simpack Assistant*. Dassault Systèmes Simulia Corp., 2019.2.