



26. MEDZINÁRODNÁ KONFERENCIA
„SÚČASNÉ PROBLÉMY V KOĽAJOVÝCH
VOZIDLÁCH - PRORAIL 2023“
20. – 22. septembra 2023, Žilina, Slovensko

<https://doi.org/10.26552/spkv.Z.2023.1.18>

VÝPOČTY A SIMULÁCIE VIAZANÝCH MECHANICKÝCH SÚSTAV KOĽAJOVÝCH VOZIDIEL S PODDAJNÝM TELESOM

COMPUTATIONS AND SIMULATIONS OF RAIL VEHICLES MULTIBODY SYSTEMS WITH A FLEXIBLE BODY

Vadym ISHCHUK, Ján DIŽO, Miroslav BLATNICKÝ, Denis MOLNÁR, Sebastián
SOLČANSKÝ^{*)}

1 ÚVOD

Koľajové vozidlá sú zložité mechanické systémy, ktoré pracujú v rôznych dynamických podmienkach, vrátane prechádzania oblúkov, prejazdu výhybiek a vplyvu nerovností na trati na koľajové vozidlá. Analýza týchto systémov musí byť presná a efektívna, aby sa zabezpečila ich bezpečná a spoľahlivá prevádzka. V poslednom čase rastie záujem o využívanie počítačových simulácií na štúdium dynamických vlastností a parametrov koľajových vozidiel. Konkrétne, implementácia poddajných telies v rámci simulácií systémov viacerých telies sa ukázala ako efektívna metóda na dostatočne presné zachytenie dynamických vlastností koľajových vozidiel [1-3].

Pri simuláciách koľajových vozidiel sa tradične používajú najmä modely tuhých telies, ktoré zjednodušujú simulovaný systém tým, že predpokladajú, že všetky telesá sú dokonale tuhé a nepoddajné [4-6]. Hoci sú modely tuhých telies relatívne ľahko implementovateľné a výpočtovo efektívne, majú určité obmedzenia, ktoré môžu ovplyvniť presnosť simulačnej analýzy. Jednou z hlavných nevýhod modelov tuhých telies je nemožnosť zohľadniť deformácie a vibrácie v poddajných komponentoch koľajového vozidla, ako je skriňa vozňa, rámy podvozkov, dvojkoľesia atď.

^{*)} **Ing. Vadym ISHCHUK**, Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta, Žilinská univerzita v Žiline, Univerzitná 1, 010 26 ŽILINA, Slovenská Republika, Tel.: +421(41)513-2563, e-mail: vadym.ishchuk@fstroj.uniza.sk, doktorand, zaoberajúci sa dynamikou koľajových vozidiel, 3D modelovaním, analýzou MKP a MBS.

doc. Ing. Ján DIŽO, PhD., Tel.: +421(41)513-2560, e-mail: jan.dizo@fstroj.uniza.sk, docent, zaoberá sa počítačovým modelovaním a analýzou dynamických vlastností vozidiel.

doc. Ing. Miroslav BLATNICKÝ, PhD., Tel.: +421(41)513 2659, miroslav.blatnický@fstroj.uniza.sk, docent, jeho oblasť výskumu je zameraná na funkčné a pevnostné výpočty a analýzy MKP v oblasti dopravných a manipulačných strojov, zdvíhacích zariadení a oceľových konštrukcií.

Ing. Denis MOLNÁR, Tel.: +421(41)513 2659, denis.molnar@fstroj.uniza.sk, doktorand, jeho vedecké záujmy sa zameriavajú na problematiku dopravných a manipulačných strojov, navrhovanie, 3D modelovanie, analýzy MKP, ako aj zváranie.

Ing. Sebastián SOLČANSKÝ, Tel.: +421(41)513-2563, e-mail: sebastian.solcansky@fstroj.uniza.sk, doktorand, zaoberajúci sa dynamikou koľajových vozidiel, CAD a MBS modelovaním.

Implementácia poddajných telies v simuláciách koľajových vozidiel odstraňuje tieto obmedzenia a ponúka niekoľko výrazných výhod.

Po prvé, implementácia poddajných telies do simulačného modelu umožňuje realističšie zobrazenie dynamických vlastností komponentov koľajových vozidiel. Deformácie a vibrácie, ktoré sa vyskytujú v poddajných telesách, majú významný vplyv na celkové prevádzkové vlastnosti a bezpečnosť železničných vozidiel vrátane pohybových vlastností, stability jazdy atď. Presným modelovaním poddajnosti môžu simulačné modely zachytiť účinky týchto deformácií a poskytnúť presné pochopenie dynamických vlastností simulačného systému [7, 8].

Po druhé, simulácie poddajných telies umožňujú skúmať javy, ktoré je ťažké alebo nemožné analyzovať len pomocou modelov tuhých telies. Napríklad, interakcia medzi koľajnicou a dvojkolesím, známa ako kontakt kolesa s koľajnicou, je komplexný jav ovplyvnený rôznymi faktormi, ako je profil kolesa a koľajnice, nerovnosti trate a vlastností vypruženia. Simulačne výpočty koľajového vozidla s poddajným členom umožňujú podrobnú analýzu tejto interakcie a skúmanie javov vyskytujúcich v mieste tohto kontaktu [9, 10].

Okrem toho simulácie s poddajnými telesami uľahčujú posudzovanie a optimalizáciu konštrukcií koľajových vozidiel. Analýzou dynamických vlastností modelov s poddajnými komponentami môžu inžinieri vyhodnotiť vplyv konštrukčných úprav na rôzne charakteristiky koľajových vozidiel. To zahŕňa analýzu vplyvu zmien vlastností materiálov, konštrukčných konfigurácií a konfigurácií vypruženia na celkovú odozvu systému. Takéto simulácie uľahčujú návrh bezpečnejších a spoľahlivejších koľajových vozidiel tým, že poskytujú cenné údaje a uľahčujú identifikáciu potenciálnych problémov v počiatočnej fáze návrhu koľajového vozidla [11-13].

Záverom možno konštatovať, že používanie simulačných modelov s poddajnými telesami pri analýzach koľajových vozidiel poskytuje významné výhody v porovnaní s tradičnými modelmi tuhých telies. Zohľadnením deformácií a vibrácií v poddajných komponentoch tieto simulácie poskytujú presnejšie zobrazenie dynamického správania koľajových vozidiel. Umožňujú skúmať komplexné javy a uľahčujú posudzovanie a optimalizáciu konštrukcií koľajových vozidiel. Cieľom tohto príspevku je v nasledujúcich častiach preskúmať výpočet a analýzu simulácie viacerých telies (MBS) koľajového vozidla s poddajným členom a poukázať na metodiky, výzvy a pokroky v tejto oblasti výskumu.

2 MATERIÁLY A METÓDY

Simpack je softvér na simuláciu systémov s viacerými telesami (MBS), často používaný na analýzu dynamiky zložitých mechanických a mechatronických systémov. Tento softvér nachádza široké využitie v oblasti koľajových vozidiel. Poskytuje pokročilé možnosti pre modelovanie a simuláciu správania rôznych komponentov koľajového vozidla, vrátane tuhých a poddajných telies, kontaktov a väzieb medzi týmito telesami atď. Simpack poskytuje intuitívne užívateľské rozhranie, efektívne riešiče a rozsiahle knižnice algoritmov, ktoré umožňujú simuláciu a analýzu rôznych inžinierskych problémov spojených s dynamikou koľajových vozidiel.

Skriptovací jazyk ANSYS APDL je súčasťou softvérovej sady ANSYS pre inžinierske simulácie. Umožňuje používateľom personalizovať a automatizovať simulácie, vykonávať parametrické štúdiá a interagovať s rôznymi modulmi ANSYS. APDL poskytuje široký rozsah možností pre spracovanie, riešenie a interpretáciu výsledkov simulácií. Je užitočný pre zložité úlohy modelovania a analýzy, ako je vytváranie a manipulácia s modelmi poddajných telies [14-16].

Simpack a ANSYS APDL sú užitočné nástroje pre inžinierov a výskumníkov, ktorí sa zaujímajú o dynamiku koľajových vozidiel. Špecializované moduly Simpack pre poddajné telesá umožňujú presné modelovanie a analýzu poddajných komponentov, zatiaľ čo ANSYS APDL poskytuje rozsiahle možnosti modelovania metódou konečných prvkov. Integrácia

softvéru ANSYS APDL s možnosťami simulačného softvéru Simpack umožňuje komplexné a presné analýzy MBS modelov koľajových vozidiel s poddajnými telesami [17-19].

CAD softvér CATIA sa použil na vytvorenie 3D modelov nápravy a rámu podvozku nákladného vozňa, ktoré zohľadňuje geometriu a vlastnosti materiálu.

```

/PREP7

ET, 1, solid186

MP, EX, 1, 2.1e11
MP, PRXY, 1, 0.33
MP, DENS, 1, 7830

TYPE, 1,

ESIZE, 0.01

VSWEEP, ALL

ET, 2, MASS21, , , 0
R, 1, 1e-9, 1e-9, 1e-9, 1e-9, 1e-9, 1e-9

TYPE, 2
REAL, 1

N, 200011, 0.0, 1.0, 0.0
EN, 200011, 200011
CERIG, 200011, 20000, uxyz
CERIG, 200011, 21010, uxyz

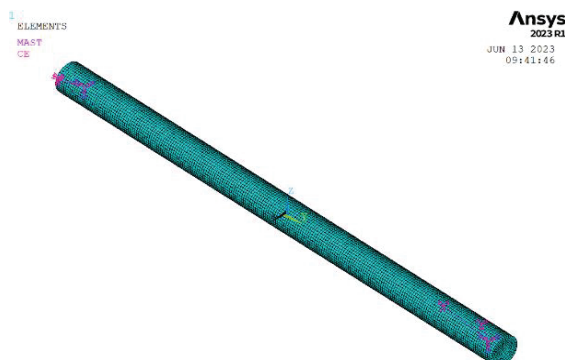
N, 200012, 0.0, -1.0, 0.0
EN, 200012, 200012
CERIG, 200012, 50, uxyz
CERIG, 200012, 51, uxyz

```

Obr. 1 Zdrojový kód na vytváranie uzlov

Fig. 1 A source code for creating nodes

teleso vloží do celkového modelu MBS. Toto vloženie zahŕňa definovanie mechanického a kinematického prepojenia medzi poddajným členom a ostatnými členmi, ako sú tuhé telesá



Obr. 2 Uzly na náprave

Fig. 2 Nodes on an axle

Model CAD sa potom vloží do softvéru FE ANSYS. Tento krok sa musí uskutočniť, aby sa vygeneroval osieťovaný model telesa, ktorý sa nasledovne vloží do MBS softvéru Simpack. V softvéri FE sa musí vygenerovať špeciálny vstupný súbor poddajného telesa (súbor "fbi").

Vytvorenie uzlov je tiež potrebné na nasledujúce vloženie modelu FE do softvéru Simpack. Tieto uzly slúžia ako spojovacie body medzi poddajným telesom a inými telesami v rámci softvéru Simpack. Uzly sa vytvárajú v rámci modelu FE, aby sa zabezpečila presná a efektívna interakcia medzi poddajným telesom a ostatnými časťami modelu MBS. Proces vytvárania uzlov v softvéri ANSYS APDL je znázornený na **obr. 1** a **obr. 2**. Model nápravy je zjednodušený za účelom predísť komplikáciám pri vytváraní MKP siete modelu.

Po vytvorení a vhodnom umiestnení uzlov sa poddajné alebo ďalšie poddajné telesá v rámci modelu MBS. Toto prepojenie je definované pomocou rôznych prvkov, ako sú kĺby, väzby, pružiny a tlmiče. S úspešnou implementáciou flexibilného telesa do modelu MBS sa môžu začať simulačne výpočty.

Analogickým spôsobom je pripravený model poddajného rámu podvozku. Poddajný rám podvozku je znázornený na **obr. 3 vľavo**.

Po vytvorení uzlov a vstupných súborov v softvéri ANSYS sa osieťované modely

poddajných komponentov vložia do MBS softvéru Simpack. Softvér Simpack automaticky vygeneruje uzly, pomocou ktorých budú poddajné telesá pripojené k zvyšku modelu. MBS model podvozku nákladného vagóna s poddajnými telesami je znázornený na **obr. 3 vpravo**.



Obr. 3 Poddajný rám podvozku (vľavo), MBS model podvozku nákladného vagóna s poddajnými rámom (vpravo)

Fig. 3 A flexible bogie frame (left), an MBS model of a freight wagon bogie with a flexible frame (right)

MBS model podvozku nákladného vagóna s uvažovanými mechanickými a kinematickými väzbami je opísaný diferenciálno-algebraickými rovnicami (DAE), ktorých maticový tvar je nasledovný:

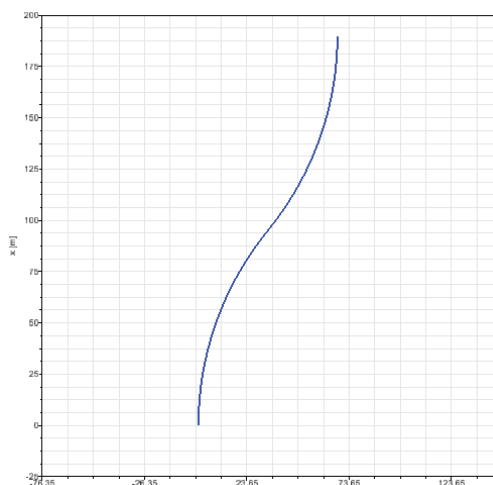
$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{D}^T \\ \mathbf{D} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \boldsymbol{\Lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ \boldsymbol{\gamma} \end{bmatrix} \quad (1)$$

kde \mathbf{M} je matica hmotnosti, \mathbf{D} je Jacobiho matica, $\boldsymbol{\Lambda}$ je vektor Lagrangeových multiplikátorov, \mathbf{F} je matica zaťažujúcich síl, \mathbf{q} je vektor výchyliek a $\boldsymbol{\gamma} = \mathbf{D} \cdot \ddot{\mathbf{q}}$, kde $\boldsymbol{\gamma}$ sú zrýchlenia v kinematických väzbách.

3 VÝSLEDKY

Po vytvorení poddajného MBS modelu podvozku nákladného vozňa môžeme vykonať rôzne simulácie (jazda v priamej trati, jazda v oblúku, trať s nerovnosťami, trať s reálnou geometriou, výpočty kritickej rýchlosti a iné) na overenie správnosti modelu.

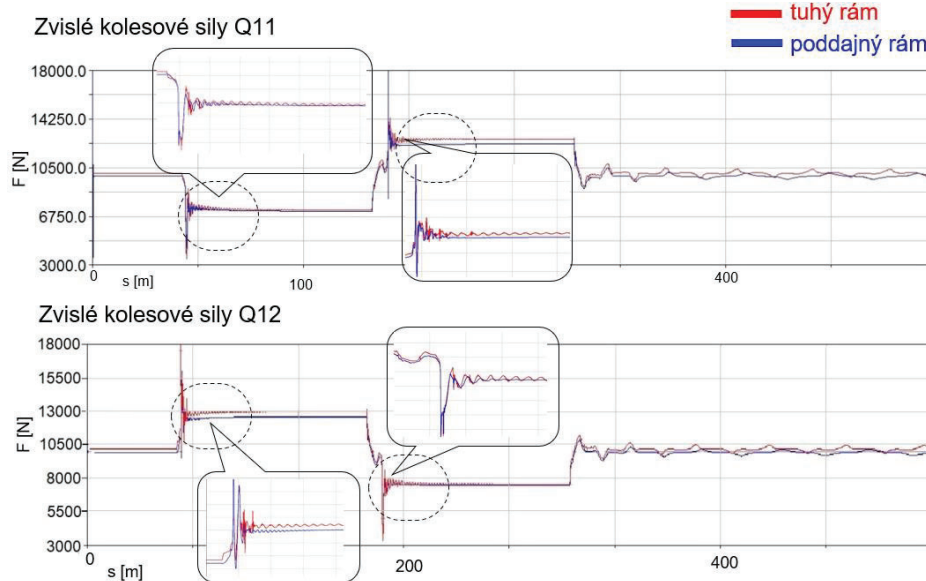
Ďalej na posúdenie jazdných vlastností modelu, môžeme porovnať výsledky simulačných analýz podvozku nákladného vozňa s poddajnými telesami s výstupmi dynamického správania podvozku nákladného vozňa s tuhými telesami atď.



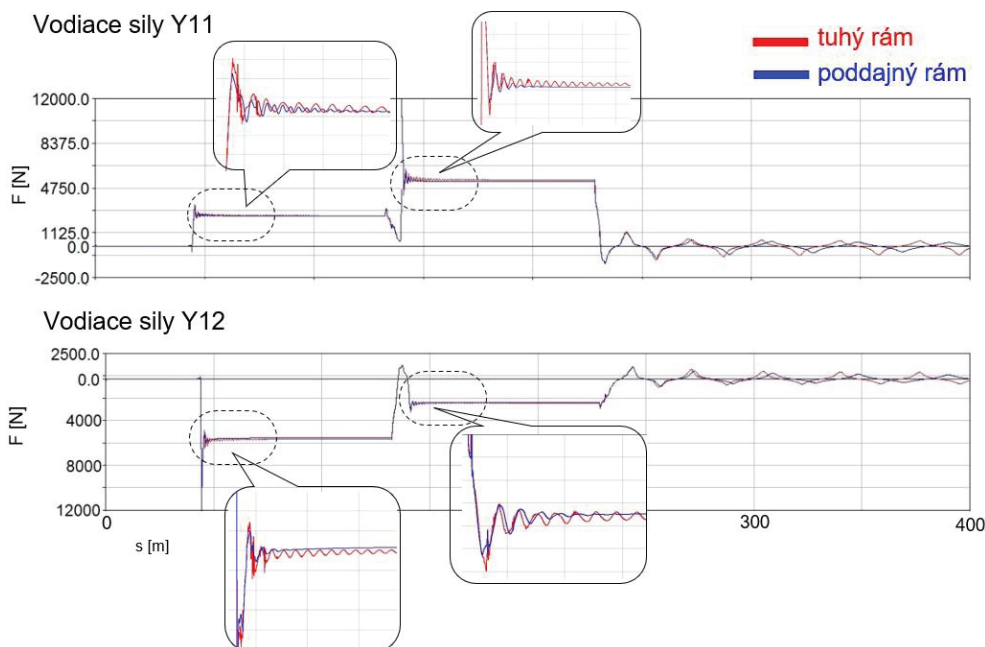
Obr. 4 Profil trate pre vykonanie simulačných analýz
Fig. 4 A track profile for performing simulation computations

Na vykonanie simulačných analýz sa použil jednoduchý model trate, jej začiatočná časť je znázornená na **obr. 4**. Trať má normálny rozchod 1435 mm s profilom koľajníc UIC60. Tento model trate nemá žiadne stavebné prevýšenie a nerovnosti (v zvislom ani v priečnom smere).

Všetky kolesá nákladného vozňa sú vybavené profilom S1002. Pri simulácii výpočtu kontaktu kolesa s koľajnicou bola použitá zjednodušená teória podľa Kalkera (FASTSIM). Tretí tlmič podvozka bol modelovaný pomocou špecializovaného modelovacieho prvku „Force element“, ktorý je dostupný v databáze použitého softvéru.



Obr. 5 Zvislé kolesové sily, predné dvojkolesie: Q11 - pravé koleso, Q12 - ľavé koleso
Fig. 5 Vertical wheel forces, a front wheelset: Q11 – a right wheel, Q12 – a left wheel



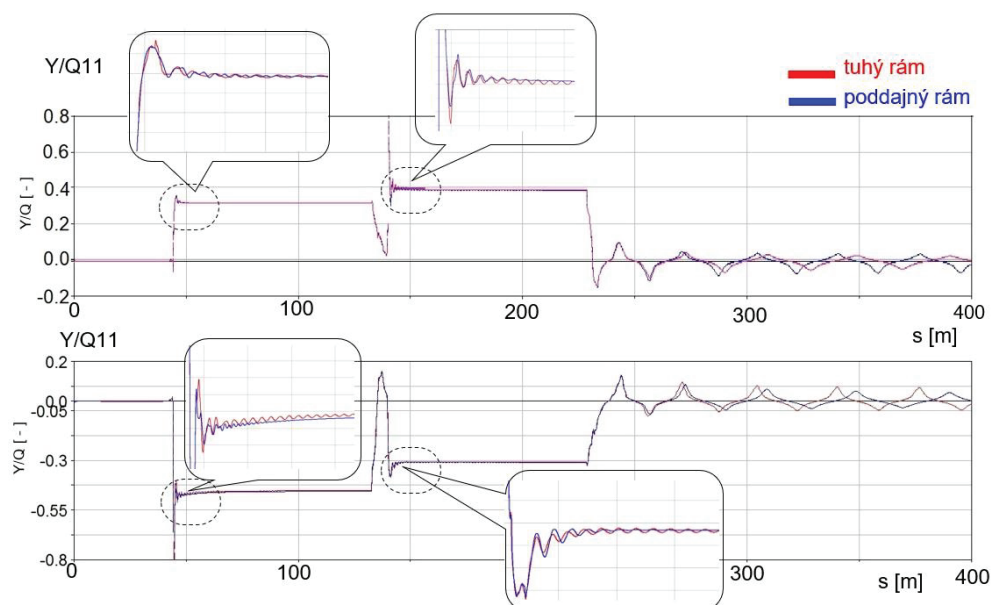
Obr. 6 Vodiace sily, predne dvojkolesie: Y11 - pravé koleso, Y12 - ľavé koleso
Fig. 6 Lateral forces, a front wheelset: Y11 - a right wheel, Y12 – a left wheel

Simulačné výpočty a analýzy sa vykonali pre jeden podvozok nákladného vozňa bez nákladu. Podvozok nákladného vozňa sa pohyboval konštantnou rýchlosťou 40 km/h. Na posúdenie jazdných vlastností podvozku nákladného vozňa s poddajným rámom podvozku sme vybrali priebehy zvislých síl (Q), vodiacich síl (Y) a bezpečnosti proti vykoľajeniu (Y/Q). Výsledky simulačných analýz sú znázornené na **obr. 5**, **obr. 6** a **obr. 7**.

Na **obr. 5** sú znázornené priebehy zvislých kolesových síl. Je možné vidieť, že pri pohybe podvozku v oblúku sa hodnoty zvislých síl kolies zväčšujú. V priamom úseku trate zvislé sily kolies zodpovedajú gravitačnému zaťaženiu podvozku.

Na **obr. 6** je znázornené, že vodiace sily sa zvyšujú rovnakým spôsobom, keď sa podvozok pohybuje v oblúku. V priamom úseku trate dosahujú vodiace sily veľmi malé hodnoty v porovnaní s hodnotami v oblúkoch.

Na **obr. 7** sú znázornené hodnoty bezpečnosti proti vykoľajeniu pre predné dvojkolesie (v smere jazdy). Bezpečnosť proti vykoľajeniu Y/Q predstavuje pomer vodiacej sily Y k zvislej sile Q . Bezpečnosť proti vykoľajeniu je dôležitým bezpečnostným ukazovateľom pri jazde koľajového vozidla oblúkom. Ako vidíme, maximálne hodnoty sú dosiahnuté pri jazde podvozku v oblúkoch. Vypočítané hodnoty pomeru Y/Q neprekračujú hodnotu 0,8. Simulácia potvrdila bezpečný prejazd podvozka úsekmi modelovej trate.



Obr. 7 Bezpečnosť proti vykoľajeniu, predné dvojkoľesie; $Y/Q11$ - pravé koleso, $Y/Q12$ - ľavé koleso

Fig. 7 Derailment quotient, a front wheelset: $Y/Q11$ – a right wheel, $Y/Q12$ – a left wheel

Z porovnania simulácie jazdy podvozku nákladného vozňa s tuhým a pružným telesom môžeme pozorovať vplyv poddajnosti rámu podvozku na sledované veličiny. Poddajnosť rámu podvozku spôsobuje väčšie tlmenie vibrácií v porovnaní s modelom podvozka, ktorý poostáva iba z tuhých telies.

4 ZÁVER

Štúdium a analýza MBS modelov koľajových vozidiel s poddajnými telesami majú veľký význam. Implementácia poddajných telies pri modelovaní sa ukázala ako účinná metóda na presnú reprezentáciu dynamického správania koľajových vozidiel. Táto metóda umožňuje presnú analýzu koľajových vozidiel v rôznych dynamických podmienkach, ako sú napríklad jazda oblúkmi, výhybkami a účinky nerovností trate. Výskumníci a inžinieri môžu bezpečne a efektívne skúmať dynamické vlastnosti a parametre koľajových vozidiel pomocou počítačových simulácií. Použitie poddajných telies v týchto simuláciách umožňuje realistickejšie zobrazenie správania koľajových vozidiel, čo vedie k väčšej presnosti simulačnej analýzy. Celkovo je implementácia poddajných telies do simulácií je cenným nástrojom na zabezpečenie bezpečnej a spoľahlivej prevádzky koľajových vozidiel.

Poďakovanie

Táto práca bola vytvorená vďaka podpore projektu KEGA 031ŽU-4/2023: Rozvoj kľúčových kompetencií absolventa študijného programu Vozidlá a motory a projektu VEGA 1/0308/24: Výskum dynamických vlastností mechanických systémov koľajových vozidiel s poddajnými komponentmi pri jazde v koľaji.

Literatúra

- [1] Liu, C., Wei, J., Li, Z.: Study on the dynamics of railway vehicle flexible bodies based on flexible multibody system, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2021. [2] Bárcena, E., Ortega, A., Cardona, A.: Flexible multibody modeling of railway vehicles, Journal of Multibody Dynamics, 2020. [3] Vatulia, G., Gerlici, J., Fomin, O., Lovska, A., Fomina, Y., Kravchenko, K.: Analysis of the strength of the supporting structure of a two sections hopper wagon under operating loading conditions, Applied Sciences-Basel, Vol. 13, No. 2, 2023. [4] Kostrzewski, M., Melnik, R.: Numerical dynamics study of a rail vehicle with differential gears, Procedia Engineering, Vol. 192, pp. 439-444, 2017. [5] Melnik, R., Kostrzewski, M.: Rail vehicles suspension monitoring system – analysis of results obtained in tests of the prototype, Structural Health Monitoring II – Key Engineering Materials, Vol. 518, pp. 281-288, 2012. [6] Hauser, V., Gerlici, J., Kravchenko, K., Lack, T., Loulova, M., Potapenko, O. A.: Definition of composite profiles for the needs of a dynamic analysis of a rail vehicle. MATEC Web of Conferences, Vol. 254, 2019. [7] Shabana, A.A.: Dynamics of Multibody Systems (3rd ed.), Cambridge University Press, 2011. [8] True, H., Chasalevris, A.: Simulation of flexible railway vehicles, Springer, 2012. [9] Gong, Y., Nishimura, K.: Analysis of flexible-body effects on wheel-rail contact dynamics in railway vehicle systems, 2019. [10] Cheli, F., Diana, G., & Bruni, S.: Multi-body dynamic analysis of railway vehicles with flexible bodies, Multibody System Dynamics, 2016. [11] Stastniak, P., Moravcik, M.: Development of two types of freight wagons with bogies for non-standard wheelbase or track wheelset, complying with the criteria for interoperability, environmental issues, safety and reliability, 23rd International Conference on Current Problems in Rail Vehicles, Ceska Trebova, Czech Republic, pp. 401-408, 2017. [12] Harusinec, J., Suchanek, A., Loulova, M.: Creation of prototype 3D models using RAPID PROTOTYPING, MATEC Web of Conferences, Vol. 254, 2019. [13] Fomin, O., Gorbunov, M., Gerlici, J., Vatulia, G., Lovska, A., Kravchenko, K.: Research into the strength of an open wagon with double sidewalls filled with aluminium foam, Materials, Vol. 14, No. 12., 2021. [14] Fomin, O., Gorbunov, M., Lovska, A., Gerlici, J., Kravchenko, K.: Dynamic and strength of circular tube open wagons with aluminum foam filled center sills, Materials, Vol. 14, No. 8, 2021. [15] Fomin, O., Lovska, A., Pistek, V., Kucera, P.: Determination of the vertical load on the carrying structure of a flat wagon with the 18-100 and Y25 bogies, Applied Sciences-Basel, Vol. 11, No. 9, 2021. [16] Kurcik, P., Gerlici, J., Lack, T., Suchanek, A., Harusinec, J.: Innovative solution for test equipment for the experimental investigation of friction properties of brake components of brake systems, Transportation Research Procedia, Vol. 40, pp. 759-766, 2019. [17] Stastniak, P., Moravcik, M., Smetanka, L.: Investigation of strength conditions of the new wagon prototype type Zans, MATEC Web of Conferences, Vol. 254, 2019. [18] Topczewska, K., Gerlici, J., Yevtushenko, A., Kuciej, M., Kravchenko, K.: Analytical model of the frictional heating in railway brake disc at single braking with experimental verification, Materials, Vol. 15, No. 19, 2022. [19] Yevtushenko, A., Kuciej, M., Topczewska, K.: Some theoretical model for determining the temperature field of a multi-disk brake, Advances in Mechanical Engineering, Vol. 12, No. 1, 2020.



Resumé

Obsah tohto článku je zameraný na základy modelovania MBS modelu pod systému železničného vozidla, ktorý zahŕňa poddajné teleso. MBS model je vytvorený v softvéri Simpack a poddajné teleso je vytvorené v softvéri ANSYS. Poddajný komponent bol vytvorené pre podvozok štvornápravového nákladného vozňa. Modelovaný a skúmaný podvozok je jednou z najdôležitejších častí železničného vozidla a hodnotenie vplyvu poddajnosti na výstupy je zaujímavé vzhľadom na dynamiku železničného vozidla. Boli vykonané simulačné analýzy zvolených parametrov počas jazdy na železničnej trati.

Summary

The aim of this paper is on the basics of MBS modelling of a railway vehicle subsystem model that includes a flexible part. The MBS model is created in Simpack software, and the flexible component is created in ANSYS software. The flexible member was created for the bogie of a four-axle freight wagon. The bogie modelled and investigated is one of the most important parts of the rail vehicle and the evaluation of the effect of flexibility on the outputs is of interest concerning the dynamics of the rail vehicle. Simulation analyses of the chosen parameters were performed during the running on the railway track.



