HAJDU FLÓRA[1]

Nemlineáris aktív és passzív futóművek számítógépes modellezése

1. BEVEZETÉS – A KUTATÁS ELŐZMÉNYEI

Napjainkban a számítástechnika fejlődésének köszönhetően numerikus módszerekkel gyorsan és pontosan vizsgálhatók bonyolult nemlineáris rendszerek. Lehetővé vált eddig nem vizsgálható jelenségek tanulmányozása is. A nemlineáris rezgések számtalan területen előfordulnak, mint például a járműdinamika[2] és a szerszámgépek.[3] Járművek esetén kritikusak lehetnek, hiszen hatással vannak a kényelemre[4] és a biztonságra[5], de akár az utasok egészségére is.[6]

Korábbi kutatások és a 2017/18-as ÚNKP pályázat során már vizsgáltunk egyszerű nemlineáris rendszereket idődiagramok, fázissík diagramok, bifurkációs diagramok, frekvencia spektrum diagramok és Poincaré leképezések segítségével.[7] A vizsgálatok során megállapítottuk, hogy a paramétereket változtatva kialakulhatnak harmonikus, szubharmonikus és kaotikus rezgések.[8] A vizsgálati módszereket párhuzamosítás segítségével gyorsítottuk,[9] és a vizsgálatokat

[1] SZE Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola, doktorjelölt; SZE Gépészmérnöki, Informatikai és Villamosmérnöki Kar, Mechatronika és Gépszerkezettan Tanszék, egyetemi tanársegéd. Témavezető: Dr. Molnárka Győző, SZE Gépészmérnöki, Informatikai és Villamosmérnöki Kar, Mechatronika és Gépszerkezettan Tanszék, egyetemi tanár.
[2] Stépán, G.: Delay-differential equation models for machine tool chatter, 1998, in *Dynamics and Chaos in Manufacturing Processes*, John Wiley and Sons Inc., New York, pp. 165–192.
[3] Takács, D. – Stépán, G.: Contact patch memory of tyres leading to lateral vibrations of four-wheeled vehicles, in *Philosophical Transactions of the Royal Society A – Mathematical Physical & Engineering Sciences*, 1993/371. no., Paper 20120427.
[4] Szauter F.: *Közúti Járművek Dinamikai Modellezése, Identifikációja és Rezgésanalízise*, Phd értekezés, Széchenyi István Egyetem, 2017, témavezető Péter T. és Szabó Z.
[5] Marzbanrad, J. – Keshavarzi, A.: Chaotic Vibrations of a Nonlinear air Suspension System under Consecutive Half Sine Speed Bump, in *Indian Journal of Science & Technology*, 2015/3. no., pp. 72–84.
[6] Hung, K. S. E – Chuan, T. T. – Ann, A. L.: Reducing Vibration in Armoured Tracked Vehicles, in *DSTA Horizons*, 2012, pp. 65–77.
[7] Hajdu F.: Numerical Examination of Nonlinear Oscillators, in *Pollack Periodica: An International Journal for Engineering and Information Sciences*, 2018/3. no., pp. 95–106.
[8] Hajdu F.: Nemlineáris mechatronikai rendszerek modellezése és numerikus vizsgálata, in *Új Nemzeti Kiválóság Program 2017/2018 Tanulmánykötet*, Széchenyi István Egyetem, 127–138. o.
[9] Hajdu, F. – Molnárka, Gy.: Parallelization of numerical examination of nonlinear systems using Maple, in Iványi, P. – Topping, B. H. – Várady, G. (eds.): *Proceedings of the Fifth International Conference on Parallel, Distributed, Grid and Cloud Computing for Engineering*, 2017, Pécs, Hungary, 30–31 May 2017, Civil-Comp Press, Stirlingshire, UK. Paper 30.; Hajdu, F. – Molnárka, Gy.: Parallel Numerical Creation of Phase-space Diagrams of Nonlinear Systems Using Maple, in *Acta Technica Jaurinensis*, 2018/3. no., pp. 132–149.

kibővítettük a kétparaméteres bifurkációs diagrammal.[10] Elkezdtük konkrét nemlineáris rendszerek vizsgálatát is, amelynek során elkészítettük egy tűzoltóautó futómű kezdeti modelljét.[11] A kutatás folytatásaként egyrészt a felépített tűzoltóautó futómű modellt tervezzük bővíteni, pontosítani. Másrészt további, elsősorban fél-aktív futóműveket is tervezünk modellezni, vizsgálni, amelyek szabályozásával elkerülhetők a káros kaotikus rezgések.

A tanulmányban elsősorban egy nemlineáris tűzoltóautó futómű modell felépítését, bővítését, valamint az ehhez kapcsolódó új szimulációs eredményeket ismertetjük. A tanulmány második felében röviden kitérünk egy jelenleg futó kutatási feladatra, a paraméterek érzékenységvizsgálatára is, amely a szabályozástechnikai feladatok fontos kiindulópontja lehet.

2. NEMLINEÁRIS TŰZOLTÓAUTÓ FUTÓMŰ MODELL

Nemlineáris futómű szimulációk célja lehet új modellek, elméletek megalkotása,[12] szabályozástechnikai feladatok megoldása[13] aktív és fél-aktív futóművek esetében, valamint az egyes futómű elemek szimulációs és laboratóriumi vizsgálata.[14] Legyen szó személygépjárműről vagy teherautóról, az egyik kiemelt feladat az utasok, sofőrök egészségének megóvása és a menetbiztonság javítása.[15] Nincs ez másképp egy tűzoltóautó esetén sem, ahol a speciális tűzoltó berendezés megóvása a fő célkitűzés. Ennek megfelelően egy nemlineáris fél-jármű modellből indultunk ki, és elsősorban a felépítményre ható rezgéseket vizsgáltuk.

Egy jármű futóművében számtalan nemlineáris elem található. Nemlineárisak a rugók karakterisztikái,[16] csillapító karakterisztikák[17] és a kerék-út kapcsolat

[10] Hajdu, F.: Parallel Numerical Creation of 2-parametric Bifurcation Diagram of Nonlinear Oscillators, in *Acta Technica Jaurinensis*, 2018/2 no., pp. 61–83.

[11] Hajdu, F. – Kuti, R.: Examination of chaotic vibrations during operation of a fire truck, in Vopava, J. – Douda, V. – Kratochvil, R.– Konecki, M. (eds.): *Proceedings of MAC 2018 in Prague Prag*, MAC Prague consulting, pp. 163–170.

[12] Litak, G. – Borowiec, M. – Friswell, M. I. – Szabelski, K.: Chaotic vibration of a quarter-car model excited by the road surface profile, in *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2008/7. no., pp. 1373–1383.

[13] Bhattacharjee, V. – Chatterjee, D. – Karabasoglu, O.: *Hybrid control strategy for a semi active suspension system using fuzzy logic and bio-inspired chaotic fruit fly algorithm*. https://arxiv.org/abs/1703.08878 (letöltve: 2019. február 27.).

[14] Cui, Y. – Kurfess, T. R – Messman, M: Testing and Modeling of Nonlinear Properties of Shock Absorbers for Vehicle Dynamics Studies, in *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2010 Vol II WCECS 2010*, October 20–22, 2010, San Francisco, pp. 949–954.

[15] Lakatos I.: *Futómű-diagnosztika*, 2002, Minerva-Sop Bt.

[16] Clavel, A. – Sorine, M. – Zhang, Q.: Modeling and Identification of a Leaf Spring System, in *IFAC Proceedings Volumes*, 2001/1. no., pp. 307–312.

[17] Lu, Y. – Li, S. – Chen, N.: Research on Damping Characteristics of Shock Absorber for Heavy Vehicle, in *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2013/3. no., pp. 842–847.

is.[18] Számtalan szakirodalmi forrás található az egyes nemlineáris elemek modellezésére, vizsgálatára, a terjedelmi korlátok miatt viszont nem térünk ki részletesen a különböző modellekre a tanulmányban. A tűzoltóautó modell esetében elsősorban a felépítményre ható rezgéseket vizsgáltuk, ezért olyan nemlineáris rugó és csillapító modelleket választottunk, amelyek numerikus szimulációkba egyszerűen beépíthetők. Mivel az egyes paraméterek hatását is tervezzük vizsgálni, ezért lényeges szempont volt, hogy a modellek könnyen módosíthatók legyenek. Ennek megfelelően egy viszonylag egyszerű, általános modellt választottunk a nemlineáris hatások figyelembevételére. A rugó, a csillapító és a kerék nemlineáris karakterisztikája az alábbi hatványfüggvénnyel lett modellezve, ahol a kitevő mutatja a nemlinearitást.[19]

$$F_k = k_i \cdot sgn(\Delta u_i)|\Delta u|^{n_i} \tag{1}$$

$$F_c = c_i \cdot sgn\big(\Delta(\dot{u}_i)\big)|\Delta(\dot{u}_i)|^{gi} \tag{2}$$

a képletekben F_k a rugóerő, k_i a rugóállandó, Δu_i a relatív elmozdulás, c_i a csillapítási tényező, n_i és g_i pedig a nemlineáris tényezők.

Vizsgálati modellünket egy konkrét, valós jármű, a Csepel CSD-755-10 tűzoltóautó alapján építettük fel, amely az 1. ábrán látható.

Korábban szimulációk alapján megállapítottuk, hogy felléphetnek káros, kaotikus rezgések.[20] Jelen tanulmányban a korábban használt modellt bővítettük és néhány új vizsgálatot is elvégeztünk. Megvizsgáltuk az úthibák hatását, valamint készítettünk egy bővített, 6 szabadságfokú modellt és egy 7 szabadságfokú teljes jármű modellt is.

1. ábra: A vizsgált Csepel CSD-755-10 tűzoltóautó

[18] Ran, S.: *Tyre Models for Shimmy Analysis from linear to nonlinear*, Phd dissertation, Eindhoven University of Technology, 2016, Nijmeijerb H. – Besselink I.

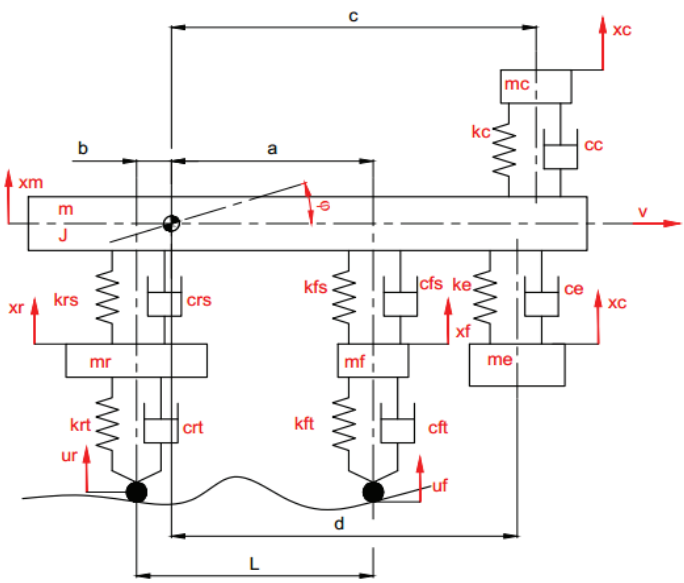
[19] Fakhraei, J. – Khanlo, H. M. – Ghayour, M.: Chaotic behaviors of a ground vehicle oscillating system with passengers, in *Scientia Iranica*, 2017/3. no., pp. 1051–1068.; Cui – Kurfess – Messman: i. m.

[20] Hajdu – Kuti: i. m. (2018).

2.1. Futómű modell bővítése

Nehéz kategóriájú járműveknél a kabin és a motor rezgései is jelentős hatással lehetnek a jármű viselkedésére.[21] A korábban használt nemlineáris futómű modellt kibővítettük a kabinnal és a motorral, ezzel egy 6 szabadságfokú modellt készítve. (2. ábra)

2. ábra: A motorral és kabinnal bővített 6 szabadságfokú futómű modell



A szimulációk esetén egy szinuszos bemenetet alkalmaztunk, ami egy hullámos út modelljének felel meg.[22] Néhány szimulációs eredmény a 3. ábrán látható.

Megállapítható, hogy a bővített modell esetén is kialakulhatnak káros, kaotikus rezgések. Megvizsgáltuk azt is, hogy egy nemlineáris rendszer esetében egy új elem beépítése hogyan hat a rendszer viselkedésére.[23] Ehhez összehasonlítottunk különböző szabadságfokú modelleket, amelyek különböző rendszerelemek hatását veszik figyelembe. Megállapítható, hogy a lineáris rendszerekkel

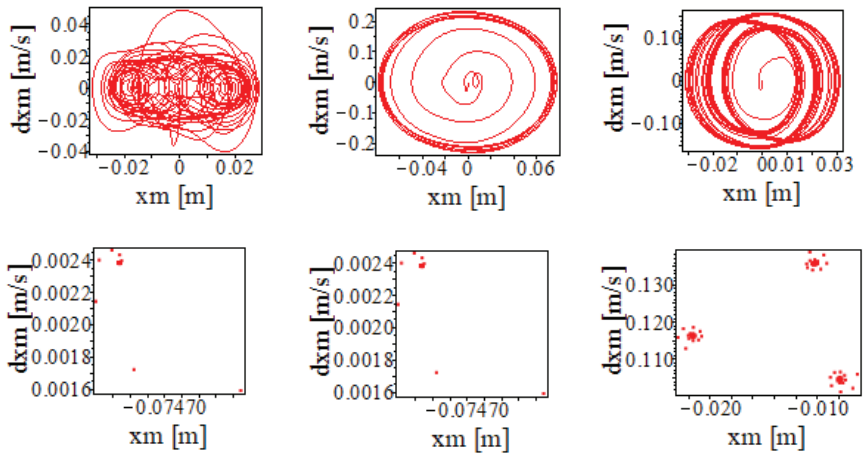
[21] Iersel, S. S. van: *Passive and semi-active truck cabin suspension systems for driver comfort improvement*, Msc. diplomamunka, 2010, Eindhoven University of Technology, témavezető: Nijmeijer H.

[22] Dixon, J. C.: *Suspension Geometry and Computation*, 2009, John Wiley & Sons Ltd.

[23] Hajdu, F.: Comparison of nonlinear fire truck suspension models, in Suresh, P. (ed.): *Proceedings of Researchfora International Conference*, Budapest, Hungary, 10th–11th February 2019, pp. 7–12.

ellentétben nemlineáris rendszereknél egy új elem beépítése megváltoztathatja a rendszer topológiáját is. Például nagy járműsebességek esetében 3 attraktor is létrejöhet a 6 szabadságfokú modellnél (3. ábra jobbra lent), míg ez a jelenség a 4 szabadságfokú modellnél nem volt jellemző.

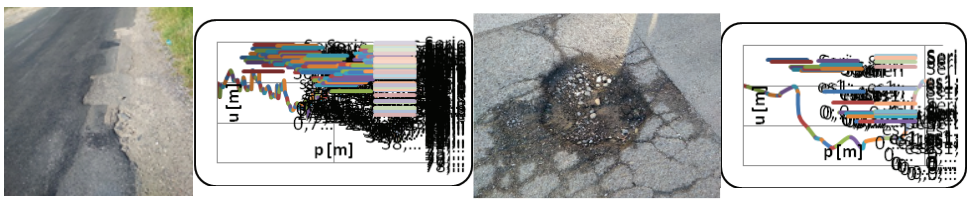
3. ábra: Fázissík diagramok és Poincaré leképezések egy hullámos út esetén a 6 szabadságfokú modellt használva (balra 10 km/m, középen 50 km/h, balra 110 km/h)



2.2. Úthibák hatásának vizsgálata

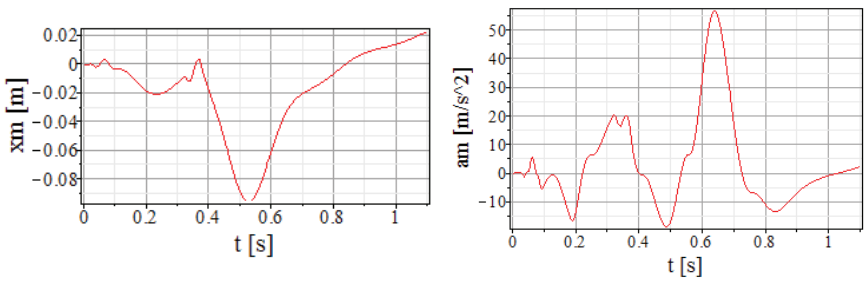
A futóművet elkezdtük az út oldaláról is megvizsgálni. Geodéziai magasságméréssel megmértünk különböző úthibákat, mint például rossz minőségű útburkolat, kátyú, nyomvályús út. Példa mért útprofilokra a 4. ábrán látható.

4. ábra: Mért úthibák



A mért úthibákat először időfüggvényekké alakítottuk, majd a szimulációba egy harmadfokú spline polinomként implementáltuk. A rossz minőségű út hatásának vizsgálatáról a 2.3. fejezetben még lesz szó a tanulmányban. Az úthibák közül a kátyú a futómű azonnali tönkremenetelét is eredményezheti,[24] ezért ennek hatását részletesebben is megvizsgáltuk. Példa szimulációs eredményekre az 5. ábrán látható.

5. ábra: Elmozdulás-idő (balra) és gyorsulás-idő (jobbra) diagramok kátyú esetén a bővített 6 szabadságfokú modellt használva

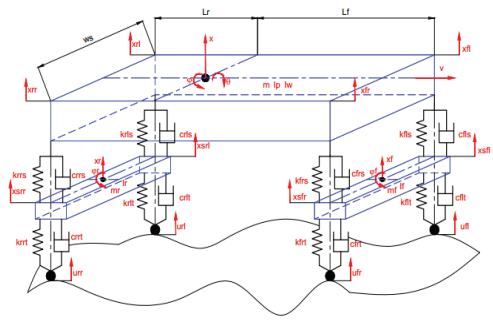


A numerikus szimulációk alapján megállapítható, hogy a kátyú káros hatása elsősorban a hidakat terheli, de nem elhanyagolható a felépítményre, ezáltal a felszerelésre gyakorolt káros hatása sem.

2.3. Teljes jármű modell

Eddig elsősorban a fél-jármű modellt és annak bővített változatait használtuk, de a még részletesebb vizsgálatokhoz mind a 4 kerék gerjesztésének a hatását is figyelembe kell venni. Ennek megfelelően elkészítettük a tűzoltóautó 7 szabadságfokú teljes jármű modelljét, amely az 6. ábrán látható.

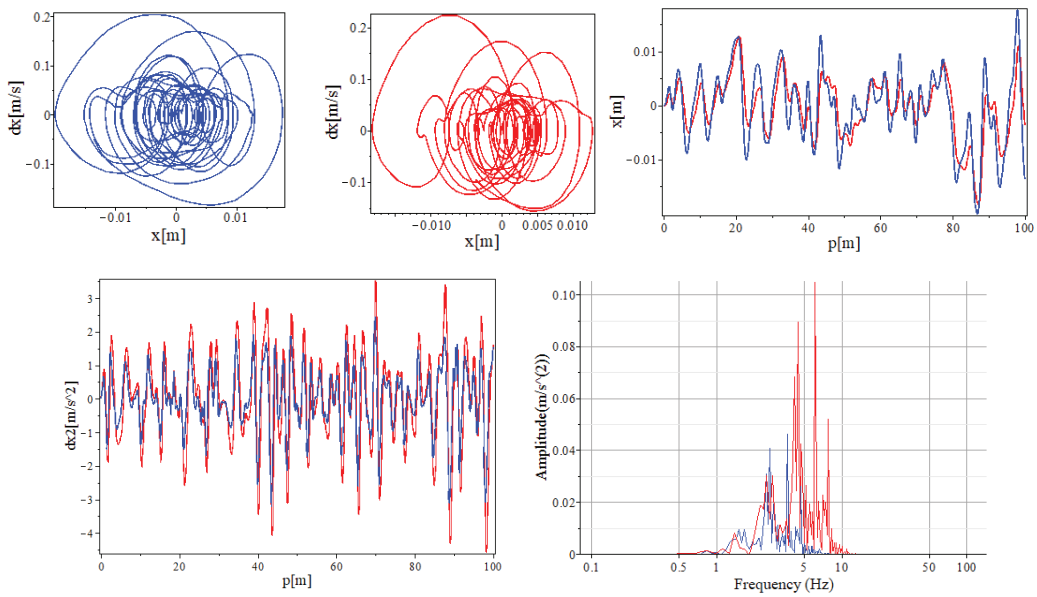
6. ábra: Tűzoltóautó futómű teljes jármű modellje



[24] Kamal, M. B. – Subramania, G. S. – Balabhadruni, N.: Prediction of Aluminum Wheel Distortion under Pothole Impact, in *2016 Science in the Age of Experience*, At Boston, MA, 23–27 May, pp. 1–9.

Szimulációs eredmények az 7. ábrán láthatók két különböző sebesség esetén a 2.2 fejezetben ismertetett rossz minőségű út esetében. A fázissík diagramokból megállapítható, hogy mindkét esetben hasonló jellegű rezgés alakul ki. Alacsonyabb sebesség esetén a felépítmény súlypontjának az elmozdulása nagyobb, viszont nagyobb sebesség esetén nagyobb gyorsulások, ezáltal nagyobb erők lépnek fel. A frekvencia spektrum diagramon látható, hogy 3-8 Hz frekvenciájú rezgések alakulnak ki, amely megfelel az irodalomban is található értékeknek tehergépjárművek esetében.[25]

7. ábra: Fázissík diagramok (balra fent), elmozdulás-idő diagram (jobbra fent), gyorsulás-idő diagram (jobbra lent) és frekvencia spektrum diagram (jobbra lent) rossz minőségű út esetén (kék 30 km/h, piros 50 km/h)



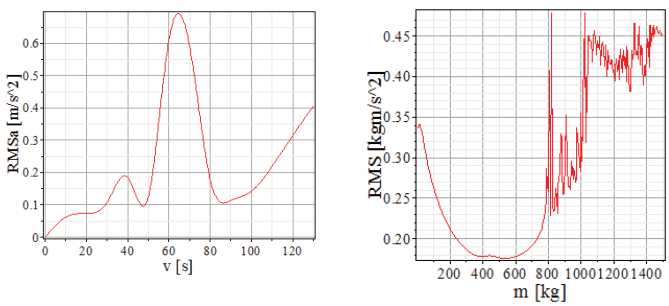
A szimulációkhoz kapcsolódóan valós, terepi méréseket is végeztünk gyorsulásadók segítségével. Jelenleg a mérési eredmények kiértékelése és szimulációval való összehasonlítása zajlik.

[25] Granlund, J.: *Vehicle and Driver Vibration*. https://www.roadex.org/wp-content/uploads/2014/01/7.-Johan-Granlund-Vehicle-and-driver-vibration.pdf, (letöltve: 2019. február 1.)

3. PARAMÉTEREK ÉRZÉKENYSÉGVIZSGÁLATA

A szabályozástechnikai feladatok hatékony megoldásához szükséges ismerni az egyes paraméterek változásának hatását a rendszer viselkedésére. Ehhez egy viszonylag egyszerű, gyakorlathoz is kapcsolható módszert alkalmaztunk. Az érzékenység jellemzésére első közelítésben a rezgéstani vizsgálatoknál is alkalmazott gyorsulás RMS (root mean square, azaz négyzetes középérték) értékét választottuk. (8. ábra)

8. ábra: Paraméterek érzékenységvizsgálata: RMS értékek egy paraméter változtatása függvényében (balra tűzoltóautó sebességének változtatása, jobbra fél-aktív futómű tömegének változtatása)



Megvizsgáltuk a korábban használt tűzoltóautó modell esetén a jármű sebességének hatását a gyorsulás RMS értékére.[26] Látható, hogy a legnagyobb RMS érték 66 km/h esetén lépett fel, így a választott úton ez tekinthető a legveszélyesebbnek. A rendszer 50 és 82 km/h esetén érzékeny a sebességváltozásokra, hiszen ebben a tartományban változik leginkább az RMS értéke. Az érzékenységvizsgálat tesztelésére, alkalmazhatóságára elkezdtük egy lényegesen egyszerűbb rendszer, egy korábban is vizsgált Duffing-típusú nemlineáris fél-aktív futómű érzékenységvizsgálatát is. A 8. ábrán a tömeg érzékenységvizsgálata látható. A diagramból megállapítható, hogy a rendszer 800 kg felett érzékeny a tömeg megváltoztatására, ekkor akár kaotikus rezgések is felléphetnek.

4. ÖSSZEFOGLALÁS, TOVÁBBI KUTATÁSI FELADATOK

A kutatás során elkészítettük egy valós tűzoltóautó modelljét nemlineáris rugó és csillapító karakterisztikákkal. Létrehoztunk egy 6 szabadságfokú fél jármű modellt, amely figyelembe veszi a kabin és a motor rezgéseit is. A numerikus szi-

[26] Hajdu, F. – Kuti, R.: Numerical examination of a nonlinear fire truck suspension, in *Proceedings of 6th Winter School of PhD Students in Informatics and Mathematics*, Szeged, Association of Hungarian PhD and DLA Students, 2019, p. 24.

mulációk során megállapítottuk, hogy a motor és kabin rezgéseinek nagy hatása lehet a jármű viselkedésére, másrészt pedig azt is, hogy egy nemlineáris rendszer esetén a modellbe egy új elem beépítése teljesen megváltoztathatja a rendszer viselkedését. Ezenkívül elkészült egy 7 szabadságfokú teljes jármű modell is, amelylyel mind a 4 kerék gerjesztése esetén vizsgálható a jármű viselkedése. Különböző úthibák hatását is megvizsgáltuk. Ehhez méréseket végeztünk az útprofilra, úthibákra vonatkozóan, amelyeket spline függvény segítségével implementáltunk a szimulációkba. Gyorsulásszenzorok segítségével valós terepi méréseket is végeztünk. A mérési eredmények kiértékelése a kutatás hátralévő részében lévő egyik fontos feladat. A kutatás további feladata még a paraméterek érzékenységvizsgálata elsősorban egy nemlineáris fél-aktív futómű alkalmazásával, valamint szakirodalom kutatása nemlineáris rendszerek szabályozástechnikai feladataival kapcsolatosan.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- Bhattacharjee, V. – Chatterjee, D. – Karabasoglu, O.: *Hybrid control strategy for a semi active suspension system using fuzzy logic and bio-inspired chaotic fruit fly algorithm*. https://arxiv.org/abs/1703.08878 (letöltve: 2019. február 27.)
- Clavel, A. – Sorine, M. – Zhang, Q.: Modeling and Identification of a Leaf Spring System, in *IFAC Proceedings Volumes*, 2001/1. no., pp. 307–312.
- Cui, Y. – Kurfess, T. R. – Messman, M.: Testing and Modeling of Nonlinear Properties of Shock Absorbers for Vehicle Dynamics Studies, in *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2010 Vol II WCECS 2010*, October 20–22, 2010, San Francisco, pp. 949–954.
- Dixon, J. C.: *Suspension Geometry and Computation*, 2009, John Wiley & Sons Ltd.
- Granlund, J.: *Vehicle and Driver Vibration*. https://www.roadex.org/wp-content/uploads/2014/01/7.-Johan-Granlund-Vehicle-and-driver-vibration.pdf, (letöltve: 2019. február 1.)
- Hajdu, F. – Kuti, R.: Numerical examination of a nonlinear fire truck suspension, in *Proceedings of 6th Winter School of PhD Students in Informatics and Mathematics*, Szeged, Association of Hungarian PhD and DLA Students, 2019, p. 24.
- Hajdu, F. – Kuti, R.: Examination of chaotic vibrations during operation of a fire truck, in Vopava, J. – Douda, V. – Kratochvil, R.– Konecki, M. (eds.): *Proceedings of MAC 2018 in Prague Prag*, MAC Prague consulting, pp. 163–170.

▪ Hajdu, F. – Molnárka, Gy.: Parallelization of numerical examination of nonlinear systems using Maple, in Iványi, P. – Topping, B. H. – Várady, G. (eds.): *Proceedings of the Fifth International Conference on Parallel, Distributed, Grid and Cloud Computing for Engineering*, 2017, Pécs, Hungary, 30–31 May 2017, Civil-Comp Press, Stirlingshire, UK Paper 30.
▪ Hajdu, F. – Molnárka, Gy.: Parallel Numerical Creation of Phase-space Diagrams of Nonlinear Systems Using Maple, in *Acta Technica Jaurinensis*, 2018/3. no., pp. 132–149.
▪ Hajdu, F.: Comparison of nonlinear fire truck suspension models, in Suresh P. (ed.): *Proceedings of Researchfora International Conference*, Budapest, Hungary, 10th–11th February 2019, pp. 7–12.
▪ Hajdu, F.: Nemlineáris mechatronikai rendszerek modellezése és numerikus vizsgálata, in *Új Nemzeti Kiválóság Program 2017/2018 Tanulmánykötet*, Széchenyi István Egyetem, pp. 127–138.
▪ Hajdu, F.: Numerical Examination of Nonlinear Oscillators, in *Pollack Periodica: An International Journal for Engineering and Information Sciences*, 2018/3. no., pp. 95–106.
▪ Hajdu, F.: Parallel Numerical Creation of 2-parametric Bifurcation Diagram of Nonlinear Oscillators, in *Acta Technica Jaurinensis*, 2018/2. no., pp. 61–83.
▪ Hung, K. S. E – Chuan, T. T. – Ann, A. L.: Reducing Vibration in Armoured Tracked Vehicles, in *DSTA Horizons*, 2012, pp. 65–77.
▪ Iersel, S. S. van: *Passive and semi-active truck cabin suspension systems for driver comfort improvement*, Msc. diplomamunka, 2010, Eindhoven University of Technology, témavezető: Nijmeijer H.
▪ Kamal, M. B. – Subramania, G. S. – BALABHADRUNI, N.: Prediction of Aluminum Wheel Distortion under Pothole Impact, in *2016 Science in the Age of Experience*, At Boston, MA, 23–27. May, pp. 1–9.
▪ Lakatos, I.: *Futómű-diagnosztika*, 2002, Minerva-Sop Bt.
▪ Litak, G. – Borowiec, M. – Friswell, M. I. – Szabelski K.: Chaotic vibration of a quarter-car model excited by the road surface profile, in *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2008/7. no., pp. 1373–1383.
▪ Lu, Y. – Li, S. – Chen, N.: Research on Damping Characteristics of Shock Absorber for Heavy Vehicle, in *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 2013/3. no., pp. 842–847.
▪ Marzbanrad, J. – Keshavarzi, A.: Chaotic Vibrations of a Nonlinear air Suspension System under Consecutive Half Sine Speed Bump, in *Indian Journal of Science & Technology*, 2015/3. no., pp. 72–84.
▪ Ran, S.*: Tyre Models for Shimmy Analysis from linear to nonlinear*, Phd dissertation, Eindhoven University of Technology, 2016, Nijmeijerb H. – Besselink I.
▪ Stépán, G.: Delay-differential equation models for machine tool chatter, 1998, in *Dynamics and Chaos in Manufacturing Processes*, John Wiley and Sons, Inc., New York, pp. 165–192.

▪ Szauter F.: *Közúti Járművek Dinamikai Modellezése, Identifikációja és Rezgésanalízise*, Phd értekezés, Széchenyi István Egyetem, 2017, témavezető Péter T. – Szabó Z.
▪ Takács, D. – Stépán, G.: Contact patch memory of tyres leading to lateral vibrations of four-wheeled vehicles, in *Philosophical Transactions of the Royal Society A – Mathematical Physical & Engineering Sciences*, 1993/371. no., Paper 2012.0427.