

Horváth Krisztián¹ 

A lánctalpas futóművű járművek zaj- és rezgésszimulációja

Noise and Vibration Simulation of Tracked Vehicles

A lánctalpas járművek működése során keletkező zaj- és rezgéshatások jelentős szerepet játszanak a szerkezeti megbízhatóságban és az akusztikai jellemzőkben. Az ipar és a tudományos élet egyre nagyobb figyelmet fordít a kapcsolt multifizikai szimulációs módszerekre. Ezek a módszerek integrálják a mechanikai, akusztikai és dinamikai modellezési technikákat, amelyek alkalmazhatók a zaj- és rezgésszintek pontos előrejelzésére. A jelenlegi kutatások a többtest-dinamika (MBD – multibody dynamics), a véges elemes módszer (FEM – finite element method) és a határelemes módszer (BEM – boundary element method) kombinációjára építenek, lehetővé téve a szerkezeti, kontakt- és akusztikai folyamatok együttes vizsgálatát. Jelen tanulmány bemutatja a lánctalpas járművek legmodernebb (state-of-the-art) zajszimulációs megközelítéseit, amelyek ötvözik az ipari és akadémiai fejlesztések legújabb eredményeit. A szimulációs eredmények alapján megállapítható, hogy a kapcsolt multifizikai modellek képesek előre becsülni a várható szerkezeti zajszinteket és azok terjedési jellemzőit. Ez biztosítani tudja a hatékonyabb zajcsökkentési stratégiák kidolgozását már a koncepcionális, tervezési fázisban, csökkentve ezzel a fejlesztési időt és költségeket.

Kulcsszavak: lánctalpas járművek, zajszimuláció, zaj- és rezgéscsökkentés, többtest-dinamika, véges elemes módszer, határelemes módszer

The noise and vibration effects generated during the operation of tracked vehicles play a significant role in their structural reliability and acoustic characteristics. Industry and academia are increasingly paying attention to coupled multiphysics simulation methods. These methods integrate mechanical, acoustic and dynamic modeling techniques, which can be used to accurately predict noise and vibration levels. Current research builds on the combination of multibody dynamics (MBD), finite element method (FEM) and boundary element method (BEM), allowing the simultaneous investigation of structural, contact and acoustic processes. This paper presents

¹ Széchenyi István Egyetem Járműfejlesztési Tanszék, e-mail: horvath.krisztian@ga.sze.hu

the state-of-the-art noise simulation approaches for tracked vehicles, which combine the latest results from industrial and academic developments. Based on the simulation results, it can be concluded that coupled multiphysics models are able to predict the expected structure-borne noise levels and their propagation characteristics. This can ensure the development of more effective noise reduction strategies already in the conceptual and design phase, thereby reducing development time and costs.

Keywords: tracked vehicles, noise simulation, noise and vibration reduction, multibody dynamics, finite element method, boundary element method

Bevezetés

A láncaltalpas járműveket széleskörűen alkalmazzák mind katonai, mind polgári területeken, beleértve a mezőgazdasági, építőipari és bányászati felhasználást is. A láncaltalpas járművek terepjáró képessége elengedhetetlen a nehéz terepi körülmények között való munkavégzéshez. A katonai alkalmazások során a láncaltalp fontos szerepet játszik a harcjárművekben és a logisztikai szállítójárművekben, míg a civil szektorban például a földmunkagépek és az erdészeti gépek között található meg.

Az ilyen típusú járművek működése során azonban jelentős vibrációval és zajjal lehet számolni. A túlzott, nem kívánatos rezgések nemcsak a jármű környezetének és kezelőszemélyzetének kényelmét befolyásolják, hanem hatással lehetnek a fedélzeti eszközök megbízhatóságára is.² A láncaltalpas járművekben keletkező szerkezeti vibráció fő forrásai a futómű komponenseiben fellépő dinamikus erők, mint például a láncaltalpak és a vezetőkerék, a támasztógörgők és a felfüggesztési rendszer kölcsönhatásai. Ezek a gerjesztő erők a jármű alvázat és karosszériáját különböző átviteli utakon (*transfer path*) keresztül vibrációra kényszerítik. A gerjesztett elemeken keresztül szerkezeti zajként továbbterjed a belső térbe, valamint a felületről lesugárzott zajt generál a külső környezetben.

Az elmúlt években a kutatások a numerikus szimulációs módszerek alkalmazására összpontosítottak az e típusú zajok előrejelzésére. A szimulációk lehetővé teszik a vibrációs viselkedés és a zajképző mechanizmusok megközelítő elemzését. A szimulációs módszerek lehetőséget biztosítanak a zajforrások még a tervezési fázisban történő korai azonosítására, amelyek segítségével zajcsökkentési stratégiák dolgozhatók ki. Ezen módszerek közül különösen fontos a többtest-dinamika (MBD-), a véges elemes (FEM-) és a határelemes (BEM-) módszer és ezek integrálása multifizikai szimulációkká a pontos modellezés érdekében. Az MBD segítségével modellezhető a láncaltalpas futómű dinamikája, míg a FEM- és a BEM-módszer az alváz szerkezeti és akusztikai jellemzőinek előrejelzésére alkalmazható.

Jelen cikk célja, hogy bemutassa a numerikus szimulációs technikák alkalmazását a láncaltalpas járművek zaj- és vibrációcsökkentésében, különös tekintettel az MSC ADAMS ATV

² KOVÁCSHÁZY 2017.

Toolkit (Advanced Tracked Vehicle Toolkit) eszközkészletre. A Toolkitet kifejezetten lánctalpas járművek MBD-szimulációjára fejlesztették.³

Az ATV Toolkit bemutatása

Az MSC ADAMS Tracked Vehicle (ATV) Toolkit fejlett eszközkészlet, amely kifejezetten lánctalpas járművek dinamikai szimulációjára szolgál. Az ATV-modul lehetővé teszi a lánctalpak, a futómű és az alváz közötti interakciók pontos modellezését, beleértve:

- a lánctalpak érintkezési modelljeit (például kemény és puha talajviszonyok között);
- a láncfeszítés hatásait és a lánctalpak deformációját;
- a támasztógörgők és lánckerekek érintkezési erőit és azok rezgésátviteli útjait;
- a jármű sebességének és a terep egyenetlenségeinek hatását a vibrációra.

Az ATV segítségével egyszerűbb és gyorsabb modellezés végezhető. Támogatja a Bekker-elmélet-alapú puha talajinterakciót és a 3D útfelületek definiálását az ADAMS/Tire formátumban. Az ATV biztosítja a lánctagok közötti erőalapú kapcsolatokat és az automatikus feszítést. A szimulációs modell akár külső vezérlőrendszerekkel is bővíthető, például aktív szabályozási struktúrákhoz illesztve. Továbbá natívan támogatja az OpenCRG útfájlokat, amelyekkel pontosabban kiszámíthatók a lánctalpas járművek érintkezési erői.

Az ATV Toolkit 2024.1 verziója továbbfejlesztett rugalmas lánctalpelemeket is tartalmaz, ami pontosabb érintkezési modellezést tesz lehetővé.⁴ Mindezek mellett a 2022.3 verzióban lehetővé vált a váltakozó bordázat kialakítása, amely javítja a tapadást és optimalizálja a mozgásdinamikát különböző felületeken.⁵

Numerikus modellezési módszerek

A lánctalpas járművek zaj- és vibrációanalíziséhez alkalmazott numerikus modellezési módszerek, az MBD, a FEM és a BEM összekapcsolása lehetővé teszi a futómű dinamikai viselkedésének, az alváz szerkezeti válaszáinak és a belső tér akusztikai jellemzőinek részletes elemzését.⁶

Többtest-dinamika (MBD)

A lánctalpas járművek futóművének modellezésében az MBD elengedhetetlen módszer. Az ilyen módszerű modellek lehetővé teszik a lánctalpak, a támasztógörgők, a lánckerék és az alváz közötti kölcsönhatások szimulációját. A modell többek között képes figyelembe venni a futómű komponenseinek érintkezési erőit, rugalmasságát és csillapítását.

³ Adams Tracked Vehicle (ATV) Toolkit [é. n.].

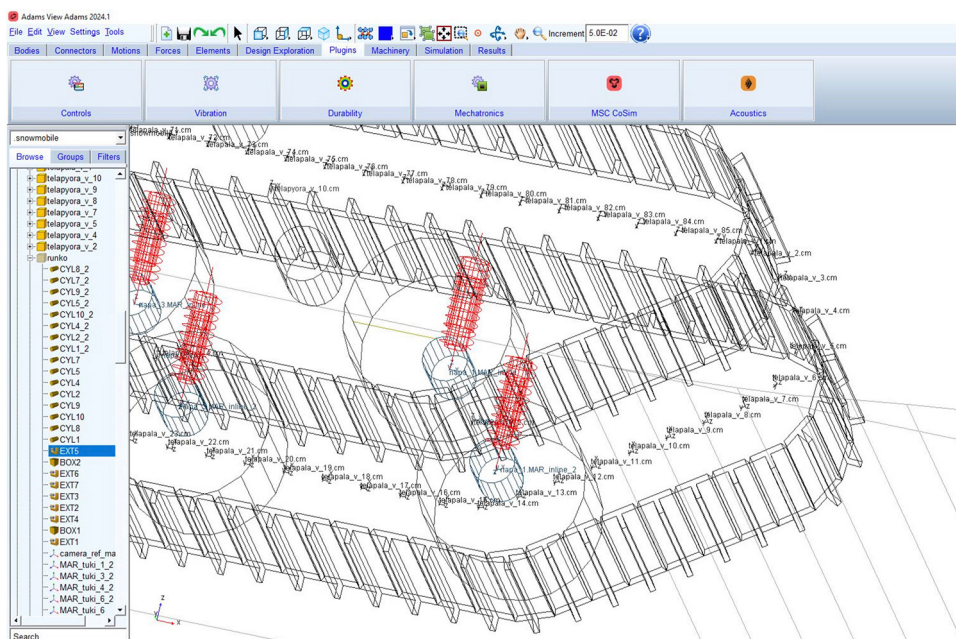
⁴ What's New in Adams Tracked Vehicle (ATV) Toolkit 2024.1 2024.

⁵ What's New in Adams Tracked Vehicle (ATV) Toolkit 2022.3 2022.

⁶ TRAN-PHAM 2023.

A vezető kereskedelmi MBD-szoftverek, mint például az MSC ADAMS⁷ segítségével létrehozott modellek pontosan reprezentálják a lánctalpak és az alváz közötti érintkezési hatásokat és a dinamikus reakciókat. Az érintkezési erők meghatározásához rugós-csillapítós modelleket alkalmaznak, amelyek az ütközési energiák csillapítását szimulálják. Ezek a modellek lehetőséget biztosítanak a talajjal való interakció vizsgálatára is, beleértve a puha talaj (homok, hó) hatásait.⁸ A páncélozott lánctalpas járművek rezgési forrásai elsősorban a futómű, a motor, a sebességváltó, a lánctalpak és az alváz szerkezeti merevségének kölcsönhatásaiból erednek.⁹

Az előre jelzett interakciós erők alapján a futómű és az alváz kapcsolatának rezgési válasza meghatározható, amely elengedhetetlen a zaj előrejelzéséhez.¹⁰ Leiviskä CV90 modellen végzett szimulációi szerint a láncfalpas járművek mozgása közben fellépő centrifugális erők és a láncfeszítés jelentősen befolyásolja az erőátvitelt és a vibrációs viselkedést.¹¹ A Nguyen és társai által kidolgozott matematikai modell részletesen elemzi a torziós rúd alapú felfüggesztés nemlineáris dinamikáját és annak hatását a jármű rezgéseire.¹² Az 1. ábra az MSC ADAMS View 2024.1 szoftverben létrehozott MBD-modellt mutatja be, amely tartalmazza a láncfalpak érintkezési pontjait, az alváz szerkezeti elemeit és a futómű komponenseit.



1. ábra: Lántalpas jármű MBD-modellje az MSC ADAMS környezetben
 Forrás: a szerző felvétele

⁷ ADAMS [é. n.].

⁸ QIAO-WANG-ZHAO 2022.

⁹ ZAFER-AYBAR 2023.

¹⁰ LIU et al. 2006.

¹¹ LEIVISKÄ 2021.

¹² NGUYEN-KIM-LEE 2019.

Véges elemes módszer (FEM)

A FEM kulcsszerepet játszik a lánctalpas járművek szerkezeti analizésében, például az alváz és a futómű vibrációs viselkedésének modellezésében is. A FEM lehetővé teszi az alváz és a karosszéria rezgési módusainak vizsgálatát különböző frekvenciatartományokban.¹³

A FEM-modellekben:

- a lánctalpas járművek szerkezeteit különböző hálózási technikákkal (héj- és gerendaelemekkel) modellezzik;
- anyagtulajdonságokat és szerkezeti csillapításokat állítanak be a pontos vibrációs előrejelzés érdekében;
- a statikus és dinamikus terhelések elemzése az alváz, a futómű és például a lánctalp egyéb szerkezeti elemeinek tartóssági viselkedésének optimalizálására összpontosít.

A dinamikai frekvenciaválasz-elemzések során az alváz deformációját és sebességeit a hallható frekvenciatartományban célszerű vizsgálni. A dinamikai módusok elemzése lehetővé teszi az alváz rezonanciáinak és ezek hatásainak azonosítását. Az ilyen típusú elemzéseket általában kereskedelmi szoftverekkel végzik.

Határelemes módszer (BEM)

A BEM az akusztikai zajszintek előrejelzésére szolgál. A BEM-modellek segítségével a külső és belső tér akusztikai nyomáseloszlása számítható ki a térben, amely a szerkezeti vibrációból származik. A modell alapja a Helmholtz-egyenlet, amely leírja az akusztikus hullámok terjedését a frekvenciatartományban.

A frekvenciaválasz-elemzésekből származó adatok a BEM-modell bemeneti feltételeiként szolgálnak. A FEM- és BEM-modellek kompatibilitását biztosítva lehetővé válik a pontos zajszint-előrejelzés az utastérben.¹⁴ Az alacsonyabb frekvenciákon a BEM-modellek pontosabb előrejelzést nyújtanak a zajszintekre, míg magasabb frekvenciákon a pontosság csökkenhet.

A BEM egyik nagy előnye, hogy csak a szerkezeti felületet kell hálózni,¹⁵ ami jelentősen csökkenti a számítási kapacitásigényt.¹⁶ A BEM alkalmazásával az optimális zajcsökkentési intézkedések meghatározhatók (például zajelnyelő, poroelasztikus anyagok [PEM] és akusztikai burkolatok beépítése a szerkezetek megfelelő pontjain).

Az MBD-, a FEM- és a BEM-módszer integrációja

Az MBD-, a FEM- és a BEM-módszer multifizikai integrációja kulcsfontosságú a lánctalpas járművek teljes zaj- és vibrációs viselkedésének megértéséhez. A kapcsolt szimulációk során az MBD-modellekből származó érintkezési erők a FEM-modellek számára szolgáltatnak

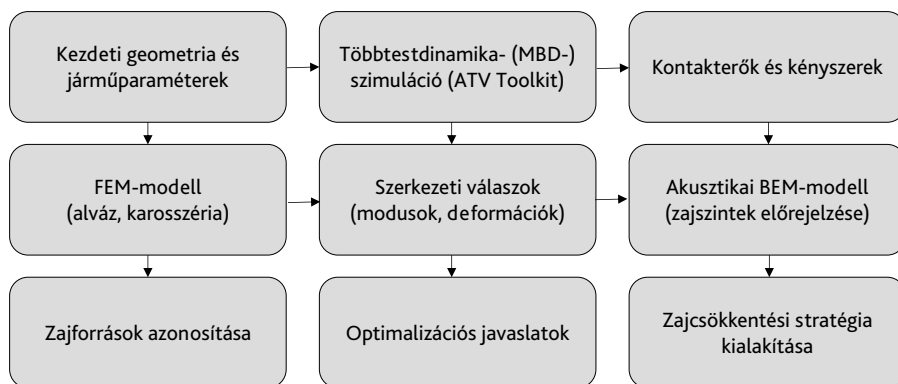
¹³ HOSEINI-FOROUZAN 2010.

¹⁴ LI-LI et al. 2015.

¹⁵ FENNER 1983.

¹⁶ FENG et al. 2013.

bemeneti adatokat, míg a FEM-modellek saját módusai biztosítják az MBD-modellek rugalmastest-tulajdonságait. Végül a dinamikai válaszok BEM-modellekben alkalmazhatók akusztikai elemzésekhez. Az így létrehozott kapcsolt, holisztikus modellek lehetővé teszik a láncotalpas járművek viselkedésének pontos szimulációját, illetve a későbbi zajscsökkentési stratégiák kidolgozását, optimalizálását. A szimuláció teljes folyamatát a 2. ábra szemlélteti, amely bemutatja a többtest-dinamikai, szerkezeti és akusztikai szimulációk egymásra épülő lépéseit.



2. ábra: A numerikus szimulációs folyamat fő lépései, az MBD-, a FEM- és a BEM-módszer integrációjával

Forrás: a szerző szerkesztése

Zajscsökkentési stratégiák

A láncotalpas járművek működése során keletkező zaj és rezgés jelentős hatással van a jármű akusztikai teljesítményére és szerkezeti integritására. A zajscsökkentési stratégiák kidolgozása érdekében különböző módszerek alkalmazhatók. Ezen módszerek célja a vibrációs szintek csökkentése és a szerkezeti zajterjedés minimalizálása. Az alábbi fejezetben bemutatjuk a legfontosabb megoldásokat.

A láncotalpak érintkezési zajának csökkentése

- Gumialapú burkolatok alkalmazása: A láncotalpakon elhelyezett speciális gumibetétek akár 6–8 dBA zajscsökkentést is eredményezhetnek, mivel csökkentik az érintkezési ütések erejét és az abból származó zajt.
- Geometriai optimalizáció: A láncotalpak érintkezési szögeinek és profiljának finomhangolása mérsékli a poligonhatást, amely a láncotalpak mozgása során keletkező periodikus zaj egyik fő forrása.

A hajtáslánc rezgéscsökkentése

- A nyomatékviteli elemek optimalizálása: A hajtómotor és a láncaltalpak közötti kapcsolódási elemek rugalmasságának növelése akár 10%-kal is csökkentheti a rezgési amplitúdókat, ezáltal mérsékelve a zajszinteket.
- Rezgéscsillapítók alkalmazása: A gumialapú és a viszkoelasztikus csillapítóelemek beépítése a hajtáslánc és az alváz között 10–15%-kal csökkentheti az RMS-vibrációs szinteket a 63–160 Hz frekvenciatartományban.

Szerkezeti módosítások

- Merevítők alkalmazása: Az alváz kritikus pontjainak megerősítése csökkentheti a rezonanciákból adódó zajterjedést.
- A láncaltalpak érintkezési erőinek csökkentése: Az anyagválasztás és a láncszemek optimalizált geometriája akár 8%-kal mérsékelheti az érintkezési erőket, ami jelentősen csökkenti a vibrációs amplitúdókat.

Akusztikai árnyékolás és abszorpció

- Hangszigetelő anyagok alkalmazása: Az utastér falainál a magas abszorpciós képességű anyagok alkalmazása 3–5 dBA zajcsökkenést eredményezett.
- Zajelnyelő panelek és bevonatok használata: Az alváz és a hajtáslánc környezetében elhelyezett speciális bevonatok további 3–5 dBA zajcsökkenést biztosítottak.

Digitális modellezési és optimalizációs megoldások

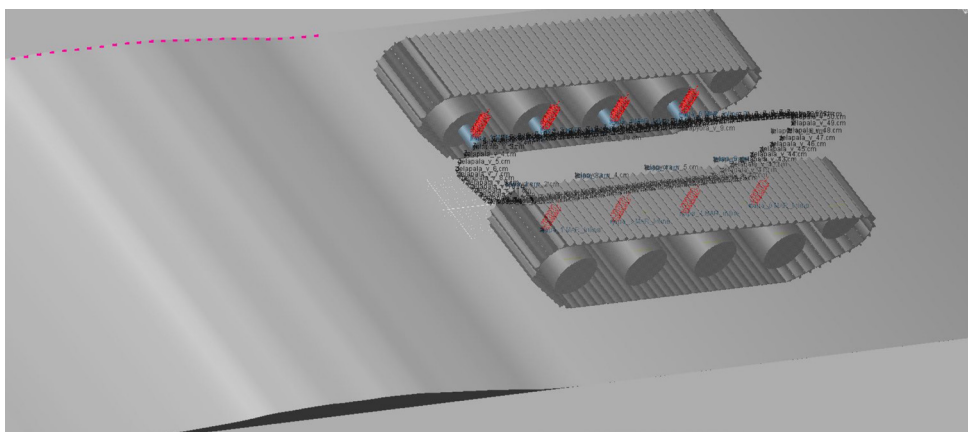
- Numerikus modellezés alkalmazása: Az MBD-, a FEM- és a BEM-módszer integrált használata lehetővé teszi a szerkezeti és akusztikai jellemzők pontos előrejelzését, segítve a zajforrások azonosítását már a tervezési fázisban.
- Gépi tanulás alapú prediktív modellezés: A mesterséges intelligencia és a digitális-iker-technológia alkalmazása elősegíti az optimális zajcsökkentési beállítások gyors meghatározását, valamint a fejlesztési idő csökkentését.

Az elhaladási zaj elemzése

A katonai és ipari alkalmazások során különösen meghatározó lehet az elhaladási zaj. A jármű mozgása során keletkező zajszintek jelentősen befolyásolhatják a környezeti zajterhelést vagy akár a jármű észlelhetőségét. A 3. ábra a láncaltalpas jármű terepi környezetben végzett szimulációját mutatja be.

Az elhaladási zaj fő forrásai

- A lánctalpak és a talaj kölcsönhatása: A lánctalpak és a talaj közötti dinamikus interakció a domináns zajforrás, különösen egyenetlen terepen. Az érintkezési erők ingadozása és a láncszemek ütközései közvetlen hatással vannak a zajszinthez.
- Polygonhatás és láncgeometria: A lánctalpak mozgásából adódó periodikus zajforrások frekvenciája a jármű sebességével arányosan növekszik, leginkább a középfrekvenciás tartományban (160–250 Hz) jelentkezve.
- A hajtáslánc által keltett rezgések: A hajtómotor és a lánctalpak közötti nyomaték-átvitel során fellépő rezgések különösen nagy sebességnél jelentősen hozzájárulnak az elhaladási zajszinthez.



3. ábra: Lánctalpas jármű dinamikai viselkedésének vizsgálata terepi környezetben

Forrás: a szerző felvétele

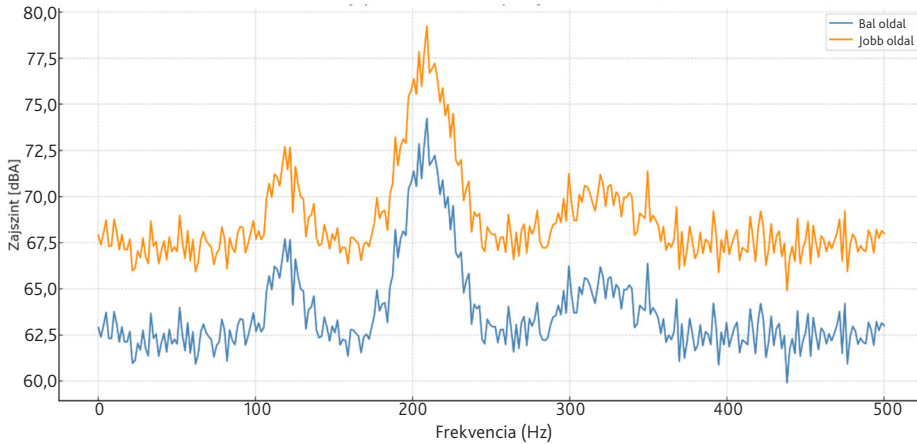
Szimulációs eredmények

A numerikus modell szimulációja során egy lánctalpas jármű előrehaladását vizsgáltuk egyenetlen terepviszonyok között. A többtest-dinamikai modell 3D lánctalpelemeket, felfüggesztést és rugalmas alvázat tartalmazott, míg az akusztikai elemzéseket a jármű alvázán keletkező gyorsulási adatok alapján végeztük.

A szimuláció alapján az elhaladási zaj spektruma főként a 120–250 Hz frekvenciatartományban mutatott kiugró értékeket, ami a lánctagok periodikus becsapódásából és a felfüggesztés sajátfrekvenciájából adódott. Az elhaladási zaj csúcspontja 210 Hz körül alakult, ahol a sugárzott hangteljesítmény elérte a 80 dBA értéket. Ezek az adatok összhangban állnak a terepi lánctalpas járműveknél tapasztalt jellemző zajprofilokkal.

Az oldalirányban rögzített akusztikai szintek ± 5 dBA eltérést mutattak a két oldal között, ami a lánctalpak aszimmetrikus terhelésére, illetve a talaj-lánctalp érintkezési zónák

különbségére vezethető vissza. Az alváz bal oldalán jellemzően magasabb zajszint jelentkezett, ami a futómű rugalmas reakcióinak következménye. A 4. ábra szemlélteti a szimuláció alapján kapott zajspektrumot, amelyen jól látható a 210 Hz körül jelentkező domináns csúcs.



4. ábra: Becsült elhaladási zajspektrum lánctalpas jármű esetén

Forrás: a szerző szerkesztése

Az eredmények igazolták, hogy az alkalmazott integrált MBD–FEM–BEM-modell képes előre jelezni a domináns zajforrásokat, illetve az oldalirányú zajszintek aszimmetriáját is megmutatta. A szimulációs modell kiváló kiindulási állapot nyújthat zajcsökkentési megoldások (például akusztikai burkolatok, a rugózás módosítása) javaslatához.

Összefoglaló

A tanulmány bemutatja a lánctalpas járművek zaj- és vibrációscsökkentésének numerikus modellezési megközelítéseit. Ismerteti a többtest-dinamika (MBD-), a véges elemes (FEM-) és a határelemes (BEM-) módszer integrációját. Az alkalmazott szimulációk pontos képet adnak a jármű futóművének dinamikai viselkedéséről, az alváz szerkezeti válaszairól, valamint a belső tér és az elhaladási zaj jellemzőiről.

Az MBD-modellek részletesen vizsgálják a lánctalpak és a talaj, valamint a jármű egyéb komponensei közötti érintkezési erőket, míg a FEM-modellek az alváz rezonanciáinak és vibrációs válaszainak meghatározására szolgálnak. A BEM-modellek lehetővé teszik a belső tér és az elhaladási zaj akusztikai nyomáeloszlásainak előrejelzését.

Az elhaladási zaj vizsgálata rávilágított arra, hogy a lánctalpak érintkezési dinamikája és a hajtáslánc által keltett rezgések a fő zajforrások. A hangcsillapítási stratégiák, mint például a gumialapú rezgéscsillapítók alkalmazása, az alváz merevítése és a lánctalpak geometriai finomhangolása, jelentős zajcsökkentést eredményezhetnek. Az elhaladási zaj szintjét akár 6–8 dBA-val lehetséges mérsékelni. A belső tér zajszintje átlagosan 3–5 dBA-val csökkenthető az akusztikai árnyékolás és abszorpciós anyagok alkalmazásával.

A kutatás eredményei alátámasztják, hogy a numerikus modellezési módszerek hatékony eszközként szolgálnak a láncaltapas járművek zaj- és vibrációcsökkentési stratégiáinak fejlesztésére. A jövőbeni kutatások a magasabb frekvenciatartományok pontosabb elemzésére, a terepi mérések integrációjára és a digitálisiker-technológia alkalmazására koncentrálhatnak, tovább növelve a modellek pontosságát és a fejlesztési folyamat hatékonyságát.

Felhasznált irodalom

- Adams [é. n.]. *Hexagon*. Online: <https://www.hexagon.com/products/product-groups/computer-aided-engineering-software/adams>
- Adams Tracked Vehicle (ATV) Toolkit [é. n.]. *Hexagon*. Online: <https://www.simcompanion.hexagon.com/customers/s/article/adams-tracked-vehicle--atv--toolkit-kb8015437>
- FENG, Jinlong et al. (2013): Low-Frequency Acoustic-Structure Analysis Using Coupled FEM-BEM Method. *Mathematical Problems in Engineering*. Online: <https://www.doi.org/10.1155/2013/583079>
- FENNER, R. (1983): The Boundary Integral Equation (Boundary Element) Method in Engineering Stress Analysis. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 18(4), 199–205. Online: <https://www.doi.org/10.1243/03093247V184199>
- HOSEINI, R. – FOROUZAN, M. R. (2010): Dynamic Analysis of a Modified Truck Chassis. *The International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering*, 14, 1–7. Online: <https://www.doi.org/10.21608/amme.2010.38107>
- KOVÁCSHÁZY Miklós (2018): A páncélozott harcjárművek vizsgálata, összehasonlítása és értékelése a mozgékonyaság tükrében című doktori (PhD) értekezés bemutatása. *Katonai Logisztika*, 26(1–2), 108–132. Online: <https://doi.org/10.30583/2018/1-2/108>
- LEIVISKÄ, Albin (2021): *Load Generation on a CV90 Track System Using Multibody Dynamics*. Thesis. Umeå University. Online: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1595832/FULLTEXT01.pdf>
- LI-LI, W. et al. (2015): Simulation and Experiment of Cabin Radiation Acoustic Field Using FEM/ BEM Methods. *Noise and Vibration Control*, 35(2), 24–27. Online: <https://www.nvc.sjtu.edu.cn/EN/10.3969/j.issn.1006-1335.2015.02.006>
- LIU, Z. S. et al. (2006): Prediction of Noise Inside Tracked Vehicles. *Applied Acoustics*, 67(1), 74–91. Online: <https://www.doi.org/10.1016/J.APACOUST.2005.05.003>
- NGUYEN, Quy Hung – FURCH, Jan (2019): *Mathematical Model for Vibration Analysis of Tracked Vehicle*. 2019 International Conference on Military Technologies (ICMT), IEEE. Online: <https://doi.org/10.1109/MILTECHS.2019.8870060>
- QIAO, Xin-Yong – JIN, Ying – GU, Cheng (2022): Vibration Response and Evaluation Method of High-Speed Tracked Vehicles Driving Off-Road. *Shock and Vibration*, 1, 1–18. Online: <https://doi.org/10.1155/2022/2866236>
- TRAN, Huu Nhan – PHAM, Ngoc Dai (2023): Application of Simulation Methods on Vibration Analysis of a Bus Driver Seat Using the Quarter Car 3DOF Model Subjected Under Harmonic Excitation. *VNUHCM Journal of Engineering and Technology*, 6(2), 1906–1916. Online: <https://www.doi.org/10.32508/stdjet.v6i2.1074>
- What's New in Adams Tracked Vehicle (ATV) Toolkit 2022.3 (2022). *Hexagon*, 2022. október 20. Online: <https://www.simcompanion.hexagon.com/customers/s/article/What-New-ATV-2022-3>
- What's New in Adams Tracked Vehicle (ATV) Toolkit 2024.1 (2024). *Hexagon*, 2024. augusztus 20. Online: <https://www.simcompanion.hexagon.com/customers/s/article/Whats-New-ATV-Toolkit-2024-1>
- ZAHER, Naci – AYBAR, Ufuk (2023): Vibration Analysis and Optimization of a Tracked Armored Vehicle. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 11, 3177–3184. Online: <https://www.doi.org/10.1007/s42417-022-00739-x>