

GÉPJÁRMŰ SEBESSÉGVÁLTÓ MEGHIBÁSODÁSÁNAK REZGÉSJELEKEN ALAPULÓ VIZSGÁLATA

VIBRATION SIGNAL BASED INVESTIGATION OF MOTOR VEHICLE TRANSMISSION FAILURE

Kriston J. Balázs, PhD hallgató & Dr. Jálics Károly, egyetemi docens

ÖSSZEFOGLALÁS (ABSTRACT) This study is concerning with vibration signal analysis of a faulty gearbox in a motor vehicle. The failure method is tooth breakage on the last gear of the final drive. Noise and vibration measurements were performed on the real vehicle during various driving conditions. The purpose of the analysis is to find evidence to the malfunction in spectrums and spectrograms.

1. BEVEZETÉS

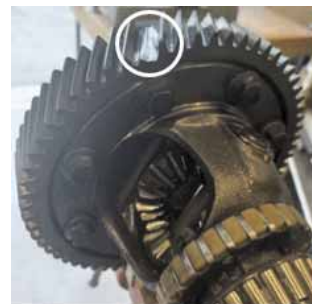
A gépjárművek erőátviteli rendszerében a legfontosabb elem a sebességváltó, fogaskerekeinek legkisebb meghibásodása is súlyos károkat okozhat, ezért állapotfelügyeletük kiemelten fontos.

Zakrajsek [1] egy felületén kipattogzott egyenes fogazatú fogaskerékpárt vizsgált különböző statisztikai módszerekkel, majd összehasonlította őket. Azt találta, hogy az egyes paraméterek önállóan is képesek detektálni a hibát, azonban a hiba mértékétől függően érdekesebb a paramétereket összehangoltan használni. Népszerű módszer fogaskerék-hajtások diagnosztikájához a TSA (Time Synchronous Average), amely lehetővé teszi egy periodikus jel kiemelését és a zavaró jel kiszűrését egy külső jelből [2]. A cepstrum módszer is széles körben használt fogaskerék hajtóművek rezgéselemzéséhez, hiszen segítségével a spektrum periodikus komponensei és a hozzájuk tartozó modulációs oldalsávok kiemelhetők [3].

A gépjárművek rezgésdiagnosztikai vizsgálata még gyerekcipőben jár, de vannak erre vonatkozó kísérletek [4]. A jelenlegi fejlesztések célja egy megbízható, folyamatos ellenőrzést és pontos hibaképet adó diagnosztikai eljárás létrehozása.

2. MÉRÉS LEÍRÁS

A vibroakusztikus mérések egy első generációs Ford Focus (1998 -as évjárat) gépjárművön kerültek elvégzésre. A mérések célja a sebességváltó meghibásodásának rezgésdiagnosztikai analízise. Ebből a célból a sebességváltó végáttételének kihajtó fogaskerekéről el lett távolítva egy fog, ezzel mesterségesen előidézve egy lehetséges fogtörést.



1. ábra Lemunkált fog a végáttétel kihajtó fogaskerekéről

Az így előidézett meghibásodás az emberi fül számára nem érzékelhető. A mérések kettes és hármas fokozatokban konstans és változó sebességgel lettek elvégezve. A mérések helyszíne egy gyér forgalmú közút volt. A rezgés gyorsulás érzékelők a sebességváltó házán és a karosszéria jobb első és hátsó oldalán lettek elhelyezve. Az idő jelet egy 4 csatornás mérőkeret vette fel, később ezek az adatok kerültek feldolgozásra akusztikai kiértékelő szoftverben. Ezen kívül egy mikrofon is elhelyezésre került az első utasülésen fejmagasságban, lásd a 2. ábrán. A mérések során nem volt lehetőség a fordulatszám külön csatornán való mérésére, így a frekvencia analízishez szükséges fordulatszám görbe offline lett elkészítve kapcsolt idő – frekvencia tartománybeli orderek segítségével. Minden mérést többször

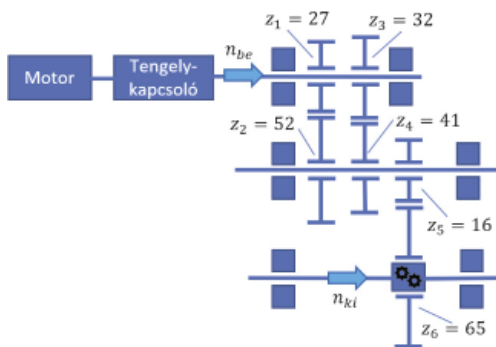
ismételtünk meg, az eredmények megfelelő reprodukálhatóságának érdekében.



2. ábra Szenzorok mérési pontjai

3. KIÉRTÉKELÉS

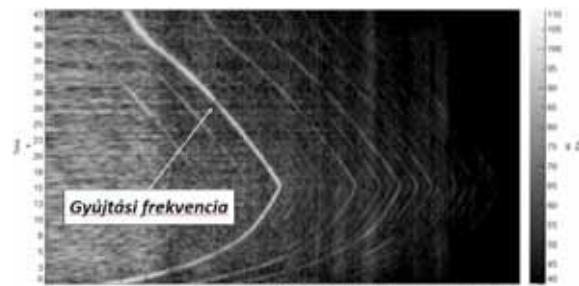
A kiértékelés Fourier transzformáció által nyert spektrumok és spektrogramok elemzésére terjed ki. A cél, hogy a rezgésadatokban egyértelmű utalást találjunk a hiba jelenlétére. A spektrumok 20 Hz felül áteresztő szűrővel 1 Hz felbontással készültek. A gépjárművekhez hasonló komplex szerkezetek időtartománybeli vizsgálata a jel bonyolultsága miatt általában nem célravezető. Az eredmények kiértékeléséhez szükséges ismerni a sebességváltó felépítését, ezt a 3. ábra mutatja a kettes és hármas sebességi fokozatokhoz tartozó fogaskerékpárok figyelembevételével.



3. ábra Sebességváltó 2. és 3. fokozatának sematikus ábrája

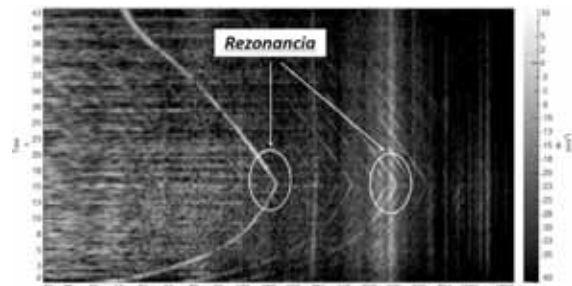
A 4 mérési pont eredményeit tekintve mind állandó és mind változó sebességű mérések esetén látszik, hogy az autó karosszériáján és utasterében az alacsony frekvenciájú rezgések dominálnak, amelyek a motor forgásával közvetlen kapcsolatban lévő gyújtási frekvenciából és az útviszonyoknak megfelelő széles sávú lökészerű jelenségekből származtathatóak. Az utasterben elhelyezett mikrofon mérési adataiból készített

színtérkép (4. ábra) mutatja be a jelenséget a legszemléletesebben változó sebességű mérés (1000 – 5000 – 1000 1/min) esetén kettes fokozatban. A kapcsolt idő – frekvencia diagramban jól látszik, hogy a gépjármű kb. 16 másodpercig gyorsult, továbbá, hogy kb. 1200 Hz alatti rezgések jellemzőek legfőképpen az utaster belső részére. Látható, hogy ebben a tartományban elsődlegesen a gyújtási frekvencia felharmonikusai és 50 Hz alatti ismeretlen eredetű rezgések dominálnak.



4. ábra Mikrofon színtérképe 20 – 1500 Hz tartományban

A fentebb elhangzott kijelentést erősíti meg a karosszéria hátsó részére elhelyezett rezgésgyorsulás érzékelő adata is (5. ábra).



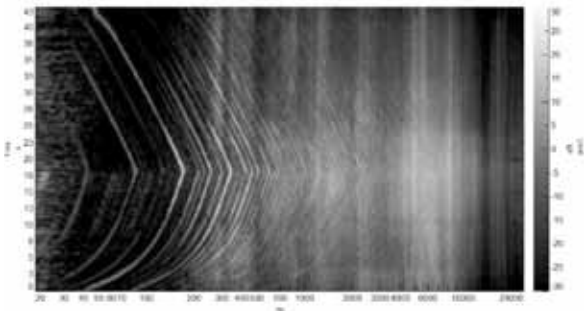
5. ábra Színtérkép (jobb hátsó rezgésy.) 20 – 1500 Hz tartományban

Ezen a spektrogramon már jól kivehető a rezonancia jelensége is. A hiba helyéből adódóan a továbbiakban csak a sebességváltóra helyezett gyorsulásérzékelő adatainak elemzésével foglalkozunk.

3.1 Változó sebességű mérések

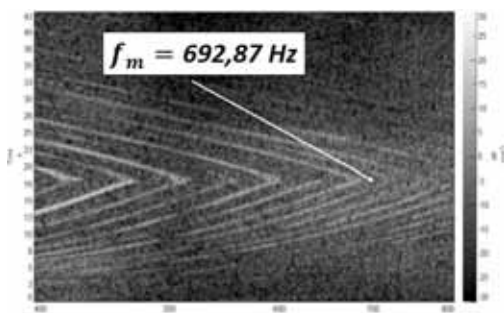
A változó sebességű mérések során a gépjárművet 1000 1/min motorfordulatról 5000 1/min-re gyorsítottuk, majd 1000 1/min -re lassítottuk le. A jármű sebességének változása jól nyomon követhető a spektrogramban kitűnő motor orderek

alakjából. Ezen eredmények alapján az mondható el, hogy 4700 – 5200 Hz és 7800 – 8600 Hz tartományokban megnövekedik a rezgésszint. Ezen kívül néhány rezonanciára utaló diszkrét frekvencia sáv tagozódás is megfigyelhető. Feltehetően a fogsám változás miatt a rezonancia jelensége más tartományokban történik meg. A mechanikai zaj szintje a fordulatszámmal arányosan növekszik, ezért a fogkapcsolódás vivőfrekvenciáját, annak felharmonikusait és lehetséges modulációit 5000 1/min fordulat mellett keressük kettes fokozatban, hiszen ekkor nagyobb a terhelés.



6. ábra Hibás sebességváltó spektrogramja

A sebváltó sematikus ábrájából kiindulva az áttételek számíthatóak, így a végáttétel kihajtó fogaskerékpárjának kapcsolódási frekvenciája $f_m = 693$ Hz-re adódik, amely éppen a kettes fokozat kihajtó tengely frekvenciájának 16. felharmonikususa. A kapcsolódási frekvencia közvetlen közelében lévő frekvenciatartományban a normál állapothoz képest sem megnövekedett rezgésszint, sem moduláció nem látható (7. ábra).

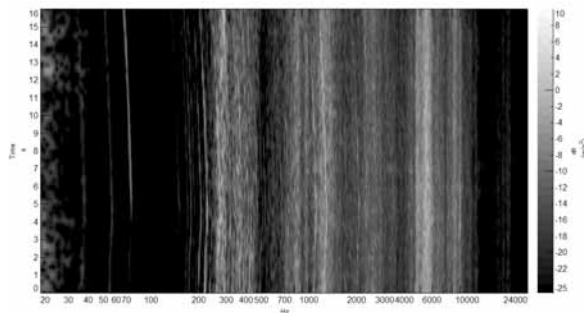


7. ábra Rezgéskép 400 – 800 Hz között defektes fogaskerék esetén

Ugyan ez a megállapítás igaz a felharmonikusaira is magasabb frekvencia tartományokban.

3.2 Állandó sebességű mérések

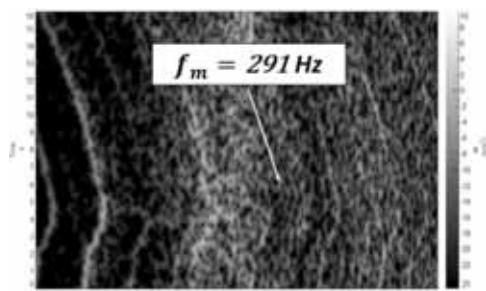
A konstans sebességen történő mérések kettes fokozatban 2000 és 3000 1/min, valamint hármas fokozatban 2000 1/min motorfordulatszámon történtek. Az előbbiekhöz hasonlóan a csatolt idő – frekvencia tartomány ebben az esetben is vizsgálatra került. A közölt eredmények a szintértékek kapcsán kettes fokozatban 2000 1/min fordulatszámra vonatkoznak. Hasonló megállapítások tehetőek az előző analízishez hasonlóan: a rezgés szempontjából kritikus frekvencia sávok átrendeződtek, a megnövekedett rezgésszint 2000 – 3000 Hz és 5200 – 5800 Hz tartományaira tehető (8. ábra). Természetesen a gyújtási frekvencia ezekben a mérési sorozatokban is feltűnik. Állandó fordulatszámmal készített spektrogramban a rezonanciák teljes bizonyossággal nem mutathatók ki, mivel az egyes diszkrét frekvencia komponensek éppen úgy



8. ábra Spektrogram hibás állapotban

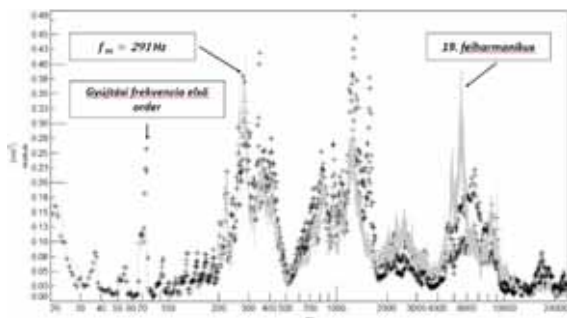
jelennek meg benne, mint a rezonancia frekvenciák. Érdekes fordulatszám – frekvencia kapcsolt analízist használni, amennyiben a cél a rezonanciák felderítése. A mérési eredmény ebben az esetben is azt mutatja, hogy a rezgésszint a meghibásodás ellenére nem nő meg a kapcsolódási frekvencián ($f_m = 291$ Hz), illetve oldalsávok megjelenése sem látható. A 9. ábrán látható, hogy a spektrumvonalak nem tökéletesen egyenesek. Ez azt jelenti, hogy a mérés során a fordulatszámot nem sikerült teljesen egyenletesen tartani. Emiatt a keresett, hibára utaló frekvenciák kiszámítása során ugyan csekély, de némi bizonytalanságha ütközünk. Azonban ennél sokkal jobban nehezíti a kiértékelést, hogy szemmel láthatóan a motor

működéséből származó frekvenciák dominálnak a kapcsolódási frekvenciák 1. és 2. orderei körül.



9. ábra Rezgéskép 200 – 400 Hz defektes fogaskerék esetén

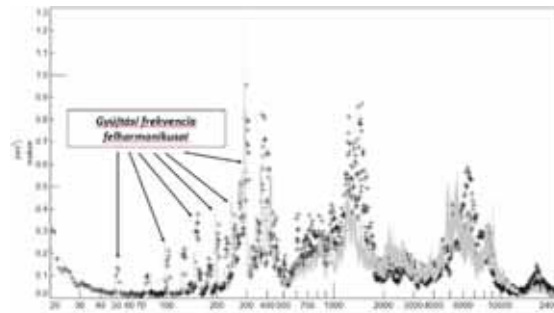
További vizsgálatokra az átlagolt spektrum ad lehetőséget (10. ábra). A pontokkal megjelenített spektrumvonalak tartoznak a normál állapothoz, míg a folytonos vonal a meghibásodott állapotban felvett spektrumot mutatja.



10. ábra A normális és hibás működés spektrumai kettes fokozatban 2000 1/min-nél.

A megjelenített eredmény jó korrelációt ad a szintérrképpel az egyes frekvencia tartományok rezgésszintjére vonatkozólag. Jól látható, hogy a kapcsolódás frekvenciáján a két állapot között a rezgésszint különbség nem számottevő. Az 5200 – 5800 Hz tartományban lévő frekvencia csúcs a hibás fogkapcsolat 19. ordere. A kiértékelés során figyelembe kell venni, hogy nem csak a hibás fogaskerékpár, de az autó minden összetevőjének rezgése megjelenik ebben a spektrumban, emiatt könnyen lehet, hogy a kapcsolódási frekvenciának vélt diszkrét frekvenciájú csúcs a gyújtási frekvencia újabb felharmonikusa vagy egy másik gépelem rezgése. Ennek ellenőrzésére szükség van a 3000 1/min fordulaton történt mérés kiértékelésére is. Figyelembe véve a két különböző fordulaton végzett mérést konzekvensen nem jelenthető ki, hogy a végáttétel

kihajtó kerekének kapcsolódási frekvenciája és orderei egyértelműen azonosíthatók hibás működés esetén. Ezzel ellentétben a motor gyújtási frekvenciái az alacsony frekvencia tartományban kristály tisztán látszódnak (11. ábra).



11. ábra A normális és hibás működés spektrumai kettes fokozatban 3000 1/min-nél.

KONKLÚZIÓ

- Az eredmények alapján egyértelműen nem lehet a fogtörés hibajelenségét azonosítani.
- A fogtörés hibajelensége az emberi fül számára észlelhetetlen a gépjárműben.
- A rezgésjel bonyolultsága miatt szükséges olyan módszereket alkalmazni (TSA, cepstrum), amelyekkel az érdekelt frekvencia komponensek kiemelhetők.
- Az út - abroncs gerjesztésének kizárására a vizsgálatokat laboratóriumi körülmények között, görgős futópádon érdemes elvégezni.
- A fogtörés miatt a gépjármű rezonancia általi gerjesztése megváltozik.
- Az utastérben és a karosszéria elemeken nem a fogaskerék gerjesztése a számottevő.

6. IRODALOM

- [1] J.J. Zakrajsek and D.P. Townsend.: An analysis of gear fault detection methods as applied to pitting fatigue failure data. 47th Mechanical Failure Prevention Group Virginia Beach. Virginia, April 13-15, 1993.
- [2] Eric Bechhoefer and Michael Kingsley: A review of Time Synchronous Average Algorithm. Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society 2009.
- [3] Robert B. Randall: A history of cepstrum analysis and its application to mechanical problems. Mechanical Systems and Signal Processing 76-77 (2016) 242-264. Mechanical Systems and Signal Processing 97 (2017) 3-19.
- [4] Szabó, J.Z., Dömötör, F. (2023). Comparative Testing of Vibrations in Vehicles Driven by Electric Motor and Internal Combustion Engine (ICE). In: Jármű, K., Cservenák, Á. (eds) Vehicle and Automotive Engineering 4. VAE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15211-5_72