MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI-ÉS INFORMATIKAI KAR
GÉP-ÉS TERMÉKTERVEZÉSI INTÉZET

JÁRMŰHAJTÁSOK MECHANIKAI KÁROSODÁSÁNAK ELŐREJELZÉSE, ILLETVE HELYÉNEK MEGHATÁROZÁSA DIAGNOSZTIKAI MÓDSZEREKKEL

PHD ÉRTEKEZÉS

KÉSZÍTETTE:
Kriston József Balázs
okleveles gépészmérnök

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
GÉPEK ÉS SZERKEZETEK TERVEZÉSE TÉMATERÜLET
TERMÉKFEJLESZTÉS ÉS TERVEZÉS TÉMACSOPORT

DOKTORI ISKOLA VEZETŐJE:
Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella
DSc, egyetemi tanár

TÉMATERÜLET VEZETŐ:
Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella
DSc, egyetemi tanár

TUDOMÁNYOS TÉMAVEZETŐ:
Dr. Jálics Károly
intézetigazgató, egyetemi docens

Miskolc
2026

BÍRÁLÓBIZOTTSÁG

elnök:

titkár:

tagok:

HIVATALOS BÍRÁLÓK

TARTALOM

1. BEVEZETÉS 4

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS 5

3. ELVÉGZETT TPA KÍSÉRLET BEMUTATÁSA 6

4. A DIAGNOSZTIKAI MÉRÉSEK EREDMÉNYEINEK BEMUTATÁSA 7

4.1 VW TOURAN SEBESSÉGVÁLTÓ ZAJPROBLÉMA 7

4.2 AUDI HÁTRAMENETI FOKOZAT ZAJPROBLÉMA 8

4.3 KIA CEE'D HÁTSÓ LENGÉSCSILLAPÍTÓ ZAJPROBLÉMA 10

4.4 FORD FOCUS SEBESSÉGVÁLTÓ HIBA – FOGTÖRÉS 12

4.5 FORD FOCUS GYÚJTÁSKIMARADÁS PROBLÉMA 14

4.6 MAZDA CX-5 INDÍTÓMOTOR PROBLÉMA 16

4.7 VW GOLF DIFFERENCIÁLMŰ ZAJPROBLÉMA 17

4.8 DIAGNOSZTIKAI MÉRÉSEK EREDMÉNYEINEK ÖSSZEFOGLALÓJA 19

5. TDOA VIZSGÁLATOK 21

5.1 TDOA VIZSGÁLATI PARAMÉTEREK HATÁSA AZ EREDMÉNYRE 22

5.2 TDOA VIZSGÁLAT ACÉLLEMEZEN 24

5.3 TDOA VIZSGÁLAT HAJLÍTOTT ACÉLLEMEZEN 25

5.4 TDOA VIZSGÁLAT FORD FOCUS KAROSSZÉRIÁN 27

5.5 TDOA KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA 28

6. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK - TÉZISEK 29

7. KUTATÁS TÉMÁJÁHOZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK JEGYZÉKE 30

8. IRODALOMJEGYZÉK 31

1. BEVEZETÉS

A járművekben fellépő rezgések különböző forrásokból származhatnak, beleértve a motort, a felfüggesztés elemeit, a kereket és gumiabroncsot, valamint a hajtáslánc-elemeket. Ezek a rezgések kezdetben kisebb kellemetlenségként, pl. kormánykerék holtjátékának megnövekedésében nyilvánulhatnak meg, vagy később komolyabb aggályokként, mint például a kezelhetőség romlása, a járműalkatrészek felgyorsult kopása és az üzemanyag felhasználás és teljesítmény romlása. Annak érdekében, hogy a járművek biztonságosak és hatékonyak maradjanak, elengedhetetlen a vibrációs problémák diagnosztizálása és elhárítása.

A modern autódiagnosztikai műszerek és az autóipari fedélzeti számítógépek korában még mindig az emberi fül a mérce bizonyos zajjelenségek észlelésében és megítélésében. Az emberi hallószerv rendkívül érzékeny, sokoldalú „műszer", de nem ad később tárolható és feldolgozható információt. A hangérzékelés gyakran személyenként eltérő, még ugyanazon zaj/hang esetén is. Ezért nem lehet pusztán az emberi érzékelés segítségével meghatározni bizonyos hibákat, amelyek differenciáltabb akusztikai mintázatot szolgáltatnak. A kellemetlennek ítélt zaj azonban nem feltétlenül utal a jármű meghibásodására. Az emberi hangérzékelés erősen szubjektív. Egyes emberek számára egy adott zaj bosszantó, míg mások észre sem veszik. Az érzet számos paramétertől függ, úgy, mint a hang térbeli eloszlása, spektrális eloszlása, időtartama, energiaszintje stb.

A gépelemek működés közbeni esetleges meghibásodása és kopása miatt a kibocsátott zaj- és rezgésértékek a tervezett üzemi állapothoz képest megváltoznak. Ezen paraméterek nyomon követése - diagnosztikai céllal - segít a szakembereknek a karbantartási költségek csökkentésében, a tervezett élettartam megőrzésében és a karbantartási tevékenységek megtervezésében.

Vizsgálatunk célja - a fentiek figyelembevételével - egy olyan rezgés alapú mérőrendszer kifejlesztése, amely képes megkülönböztetni a normál és a hibás állapotot, valamint lokalizálni tudja a hibás alkatrészeket a jármű szerkezetében. Mivel az ipar olyan módszert kíván, amely gyors, egyszerű és költséghatékony, ezért a mérési módszerrel szemben fontos előfeltételt kell tennünk: a gépjármű szétszerelése nem megengedett. További cél, hogy a jármű bizonyos típusú hibáihoz olyan vibroakusztikus módszert rendeljünk, amely a legmegfelelőbb annak diagnosztizálására.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A kutatási trendeket felmérve elmondható, hogy legtöbb esetben a gépjárműveket nem kompletten, hanem részegységek szintjén vizsgálják laborkörülmények között. Az egyes komponensek vizsgálatához (motor, sebességváltó stb.) tesztpadokat használnak, így a kutatások egy része a vibroakusztikailag helyes tesztberendezés tervezését is magába foglalja (pl. terhelés alkalmazásához mágnesfék használata, rugalmas tengelykapcsoló stb.). A hibák legtöbb esetben mesterségesen előidézettek (pl. tartós járatással, öregítéssel vagy fizikai beavatkozással) és a jármű szerkezeti felépítése és üzemi körülményei minden esetben jól ismertek.

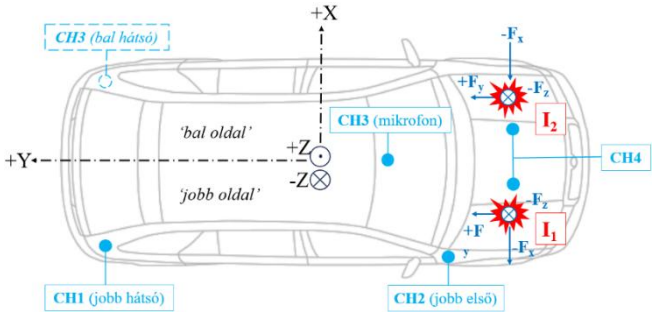
A kutatások arra összpontosítanak, hogy a járműhibákhoz megfelelő állapotjelző paramétert találjanak és bebizonyítsák ezek megbízható alkalmazhatóságát. Ugyanakkor, nagyon kevés esetben találni olyan munkát, amely statisztikailag elégséges adatbázissal dolgozik. Emiatt az eredmények csak bizonytalanul általánosíthatóak más típusú személygépjárműre.

A kutatott meghibásodások igen széles körűek, a teljesség igénye nélkül: fogaskerék meghibásodások, főtengely csapágy meghibásodások, motormeghibásodások, motor segédberendezéseinek meghibásodása, futómű meghibásodások stb. A tanulmányokban rávilágítanak, hogy az üzemi körülmények, azaz a jármű pillanatnyi állapota, fordulatszám-terhelés viszonyok, hőmérséklet stb. hatással vannak a mérési eredményekre és a különböző állapotjelző paraméterek hibákkal szembeni érzékenységére. A kutatások azt is megmutatják, hogy a szenzorok pozíciója és iránya döntő befolyású bizonyos hibák észlelésében. Az emberi füllel adható hibafelismerés mintájára nem túl nagy számban, de kísérletek vannak a pszichoakusztikai mutatószámok diagnosztikai célú alkalmazására.

A szakirodalmi források alapján nagyon sok esetben a hiba megléte megfelelően választott paraméterrel detektálható, azonban a pontos forrása és a gyökéroka nem minden esetben határozható meg közvetlenül. Komplex szerkezetekről lévén szó, a korrekt diagnosztikához mélyebb analízis kell, továbbá a szerkezet geometriájának, működési elvének és működési feltételeinek pontos ismerete. Szinte kivétel nélkül minden kutatás végén a szerzők a módszerek továbbfejlesztési lehetőségeiről és kiterjesztéséről értekeznek. Felismerhető, hogy a gépjármű rezgésdiagnosztika tudományterülete – noha az elmúlt évtizedekben dinamikusan fejlődött – még nem teljesen kiforrott, számtalan fejlesztési lehetőséget kínál [1-33].

3. ELVÉGZETT TPA KÍSÉRLET BEMUTATÁSA

Gépjárműszerkezet rezgésátviteli képességét egy első generációs Ford Focus járművön vizsgáltuk. A kísérletek során a 3.1 ábrának megfelelő pozíciókban helyeztük el a gyorsulás érzékelőket (CH1…CH3) a karosszérián. Ezen felül a frekvencia válasz függvények (FRF) előállításához a gerjesztési pontok mellett (CH4) is mértük a rezgésgyorsulást. A cél, hogy megmutassuk, hogy az alkalmazott mérési pontokba megfelelő intenzitással eljut a jármű motortér környezetéből származó testhang gerjesztés. A gerjesztések a motortartó bak I_1 és I_2 pontjaiban lettek leadva. A motor két oldalán ezekben a pontokban a tér mindhárom irányába adtunk le impulzusokat (a járműhöz rendelt koordináta rendszer szerint -X, +Y, és -Z irányokban) egy impulzusmérő kalapács segítségével.



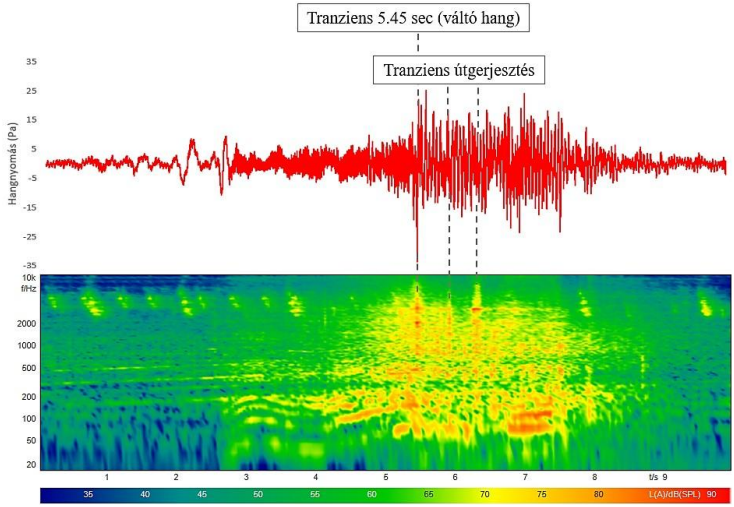
3.1 ábra. *A vizsgált jármű sematikus ábrája a gerjesztési és mérési pontok jelölésével*

Összességében elmondható, hogy az alkalmazott X, Y, Z-irányú gerjesztések a járműszerkezethez kötött koordináta rendszerben értelmezve minden irányban közel azonos átviteli tulajdonságok mellett terjednek. A kísérlet kedvéért feltételeztük, hogy a detektálni kívánt abnormális gerjesztés a motortér környezetéből fog származni. Ebben az esetben a motorhoz legközelebb eső CH2 érzékelő mutatja a legjobb átvitelt. Mindazonáltal ez nem jelenti azt, hogy a mikrofon és hátsó rezgésgyorsulás szenzorok ne lennének alkalmasak hibadetektálásra. Ezeknél a mérési pontoknál a gerjeszthető frekvencia tartomány korlátjával (hiba helyétől függően max. 2 kHz) kell számolni, de súlyos meghibásodások érzékelésére alkalmasak. A kapott eredmények alapján elméletileg a jármű egyik oldalán elegendő mérni a megfelelő diagnosztikához. Ez azonban mégsem ajánlott, hiszen a rezgésgyorsulás szenzor pozíciójából adódó hibajel-zaj viszonyból következtetni lehet a meghibásodott elem lokációjára.

4. A DIAGNOSZTIKAI MÉRÉSEK EREDMÉNYEINEK BEMUTATÁSA

4.1 VW TOURAN SEBESSÉGVÁLTÓ ZAJPROBLÉMA

Adott egy viszonylag új (gyártási év: 2019) turbó feltöltésű, közvetlen befecskendezéses, 1.5 liter benzin motoros gépjármű első kerék meghajtással és 6 sebességes manuális váltóval. Hat hónap használat után a tulajdonos panaszkodni kezdett egy bizonyos zaj miatt, amelyet az egyes, kettes és hármas sebesség fokozatok közti váltások közben tapasztal. A zaj jellege alapján ütődés/ütközés-szerűnek írható le, frekvenciatartalmát tekintve szélessávú zajként jellemezhető. A zaj a járművön belül és azon kívül is tisztán hallható volt sebességváltás közben.



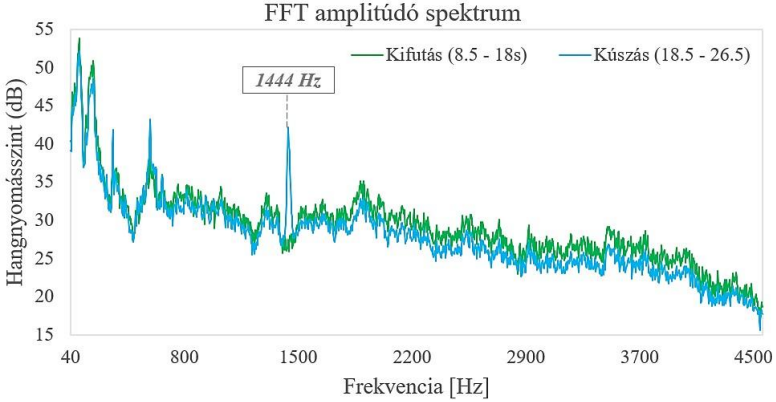
4.1.1 ábra. *Pass-by zajmérés időjele és nagy felbontású spektogramja*

Elsőkörben egy pass-by zajmérést végeztünk el, hogy meggyőződjünk a hiba jellegéről és meglétéről. Annak érdekében, hogy közelebb kerüljünk a problémához a jármű statikus állapotában is méréseket végeztünk. Ezen eredmények összefoglalásaként elmondható, hogy a vibroakusztikai módszerek nem minden esetben teszik lehetővé egy gépjármű erőátviteli rendszerében történő meghibásodás teljes körű lokalizálását. A hiba okozta zaj vagy rezgés frekvencia-karakterisztikájától nagy mértékben függ a hibás komponens megtalálásának eredményessége, hiszen széles sávú gerjesztés esetén nincs olyan szerkezeti jellemzőből eredő fundamentális frekvencia

komponens, amely segítségével azonosítani lehetne az egyes gépelemeket. A frekvencia analízisekhez szükség van a váltómű szerkezetének és működési körülményeinek ismeretére. Esetünkben a sebességváltó, mint a gépjármű egyik főegysége hibaforrásként azonosítható volt a megfelelő mérési pozíciók megválasztásával, de részletesebben a hibás elem vagy elemek nem voltak azonosíthatók a szerkezet belsejében.

4.2 AUDI HÁTRAMENETI FOKOZAT ZAJPROBLÉMA

Adott egy felső kategóriájú, használt, összkerék-meghajtású, dízel motoros gépjármű (kb. 200 000 km futásteljesítmény) automata sebességváltóval és hidrodinamikus nyomatékváltóval. A tulajdonos egy bizonyos fütyülő zajról panaszkodott hátrameneti fokozatban. A zaj gyorsítás közben, kúszáskor üresben és a jármű álló helyzetbe történő fékezése közben is hallható volt.



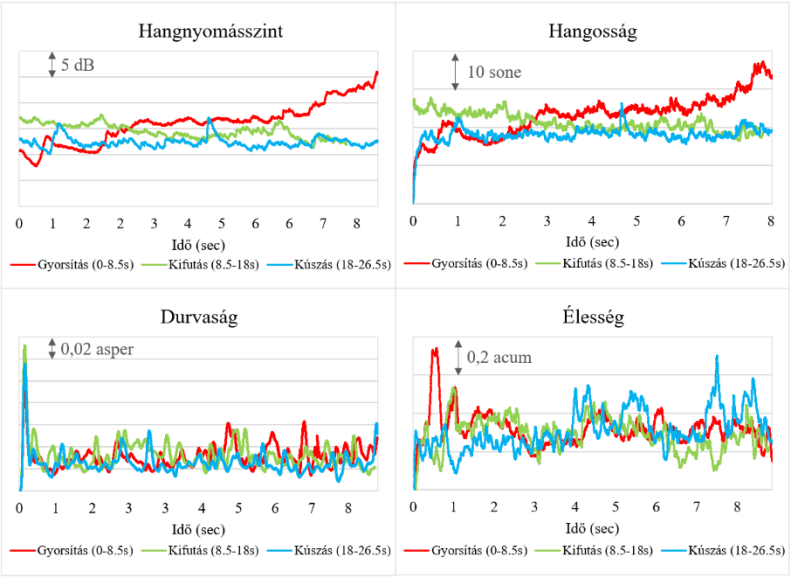
4.2.1 ábra. *FFT amplitúdó spektrum összehasonlítás a kifutás és kúszás állapotában*

A probléma szisztematikus kivizsgálásának érdekében mikrofonos zajméréseket végeztünk el olyan vezetési körülmények között, ahol a zaj fellépett. A mikrofon az elülső utasoldali ülésen fejmagasságban volt elhelyezve. A méréseket kizárólag hátrameneti fokozatban végeztük el, az alábbi vezetési fázisokat tartalmazva: gyorsítás, kifutás (motorfékes lassítás), kúszás és fékezés. A zaj megjelenésének üzemi állapotában látható egy 1444 Hz-es komponens az alapzaj-szint felett 18 dB-el. Ez a mértékű kiugrás a spektrális eloszlásban egy jól hallható, tónusos hangot eredményez, amely valószínűsíthető, hogy a felhasználó által hallott éles hangot eredményezi.

A pszichoakusztikai paraméterek vizsgálata is megtörtént. A hosszabb időjel miatt (30 s) kivágtuk a működési kondíciók szempontjából fontos időtartományokat:

- 1. Fázis 0 – 8.5 s: gyorsítás álló pozícióból
- 2. Fázis 8.5 – 18 s: motorfék max. sebességről kúszási sebességig
- 3. Fázis 18 – 26.5 s: kúszás üresjárati sebességen
- 4. Fázis 26.5 – 30 s fékezés

Referencia mérés hiányában két különböző tesztfázist hasonlítunk össze. A kifutás állapotában a zajprobléma nem jelentkezik, míg a kúszás során hallható. Ezekben a fázisokban a motor fordulatszám közel megegyező, az alapjárati fordulatszámmal egyenlő, így a spektrumok összehasonlítása lehetséges.



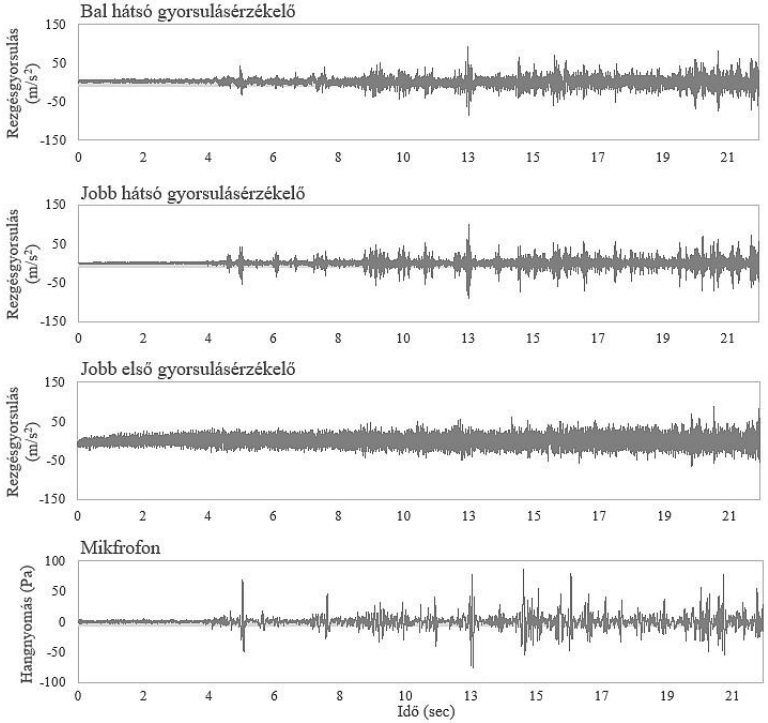
4.2.2 ábra. *Pszichoakusztikai jellemzők és hangnyomásszint a jármű három különböző működési állapotában*

Konklúzióként elmondható, hogy a zajprobléma az akusztikai analízis eredményeként felismerhető. A pszichoakusztikai paraméterek vizsgálatával megerősítést nyert, hogy a zaj az élesség tekintetében valóban zavaró hatásként léphet fel, azaz a tulajdonos állítása jogosnak bizonyult. Noha a zajprobléma kimutatható, ezen kutatómunka mégsem teljesen érte el célját, hiszen a sebességváltóval kapcsolatos fontos információk nem álltak rendelkezésre, amely alapján frekvencia elemzéssel vagy

más módszerrel egyértelműen azonosítani lehetne a zaj forrását jelentő meghibásodott gépelemet.

4.3 KIA CEE'D HÁTSÓ LENGÉSCSILLAPÍTÓ ZAJPROBLÉMA

Adott egy Kia Cee'd típusú személygépjármű, amelynél menet közben zörgő, kopogó zaj volt hallható az autó jobb hátsó része felől. A hibát javítás során feltárták, a problémát az okozta, hogy a lengéscsillapító rögzítő csavarok meglazultak a karosszériához képest. A csavarok meghúzása után az észlelt hangjelenség megszűnt. Kíváncsiak voltunk, hogy a vibroakusztikai módszerek milyen lehetőséget biztosítanak ilyen jellegű zajprobléma feltárásához, így egyszerű méréseket végeztünk el menet közben.



4.3.1 ábra. *Az egyes mérési pontokban a teszt során felvett időjelek*

A jármű jobb és bal hátsó részén, valamint a jobb első oldalán az ajtókilincsek magasságában a karosszérián mágneses rögzítésű piezoelektromos rezgésgyorsulás

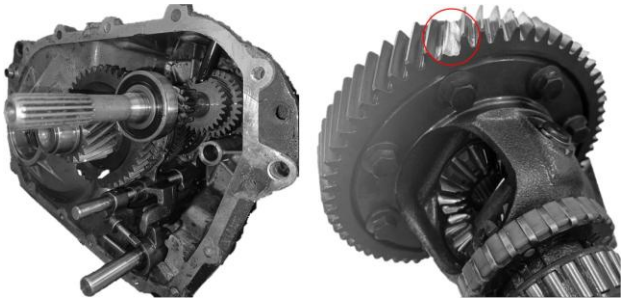
érzékelőket helyeztünk el. Továbbá az utastérben az utasoldali ülés fejmagasságában egy mikrofont is elhelyeztünk. A tesztek során a járművet 50 km/h-ig gyorsítottuk, majd ezen az állandó sebességen haladtunk vele, végül pedig állóra lassítottuk.

A zörgő, kopogó zajt tranziens rezgések okozták, amelyek széles frekvencia tartományban hatnak. Ezek a tranziensek a spektrumban átlagolódnak, ezért nem jeleníthetők meg diszkrét frekvencia komponensekként. Az ilyen jellegű meghibásodásoknál célszerűbb olyan analíziseket választani, amelyek valamilyen módon az idő tengelyt is megjelenítik. Kézenfekvő az időtartomány vizsgálata (4.3.1 ábra), amelyben láthatóak a gerjesztéshez tartozó amplitúdó csúcsok az alapzajtól jól elkülöníthetően.

Mivel a gerjesztés a motor fordulatszámától közvetlen értelemben független, ezért a frekvencia komponensek vizsgálata nem ad diagnosztikai szempontból hasznos információt. Szélessávú gerjesztés lévén egyedül a szenzorpozíciókból tudunk a hiba helyére következtetni. Alapvetően a „kopogással" járó tranziens gerjesztési események az idő függvényében figyelhetők meg jobban. Az időjel tipikus alakja ilyen esetekben az alapzaj felett lévő szabályosan vagy véletlenszerűen ismétlődő csúcsokkal jellemezhető. Ezt a mintázatot egyértelműen láthatjuk a mikrofon és hátsó rezgésgyorsulás érzékelők jelein. Az ütődések energiája gyakorlatilag az átviteli útvonalak csillapításától függően a szenzorok által felvett teljes frekvencia tartományban tárolódik. A szenzorpozíciók alapján a hiba helye a gépjármű hátsó részére határolható. A részletesebb lokalizációhoz személyes jelenlét szükséges, mivel a hang irányát binaurális mikrofon hiányában csak hallás alapján vagyunk képesek meghatározni. A kapott eredmények nem szolgáltatnak bizonyítékot arra, hogy a hiba a lengéscsillapító csavar lazulása. Hasonlóan a VW Touran zajproblémához – amely hasonló természetű hiba hasonló spektrális eloszlással – az analízisek alapján a meghibásodás megléte megállapítható, de hiba gyökéroka nem tárható fel.

4.4 FORD FOCUS SEBESSÉGVÁLTÓ HIBA – FOGTÖRÉS

A vibroakusztikus méréseket egy első generációs Ford Focus (1998-as évjárat) gépjárművön végeztük el. A sebességváltó végáttételének kihajtó fogaskerekéről eltávolítottunk egy fogat, ezzel mesterségesen előidézve egy lehetséges fogtörést. A mérések célja a sebességváltó meghibásodásának rezgésdiagnosztikai analízise volt.



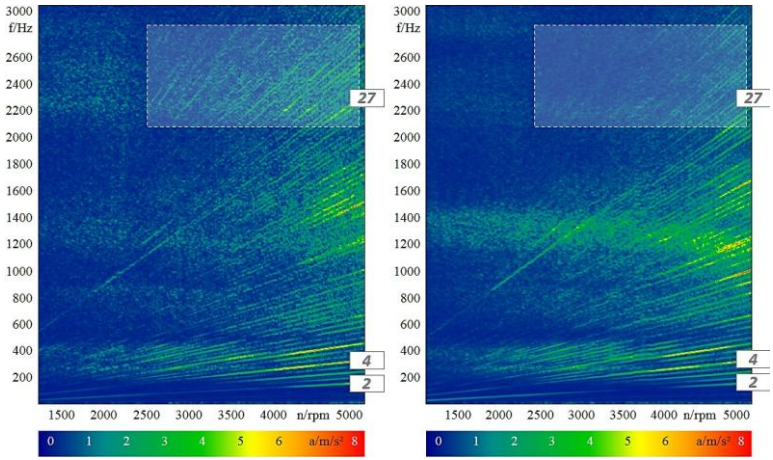
4.4.1 ábra. *Ford Focus 5 sebességes manuális sebességváltója és a végáttétel kihajtó fogaskerekéről lemunkált fog*

Az előidézett meghibásodás az emberi fül számára nem volt érzékelhető. A mérések kettes és hármas fokozatokban konstans és változó sebességgel lettek elvégezve. A mérések helyszíne egy gyér forgalmú közút volt. A közúti tesztek - a sebességhatár betartása végett - alapvetően meghatározták a mérések lehetőségeit és körülményeit. Felfutásos teszt során a jármű kettes fokozatban 1200 – 5000 1/min motorfordulaton üzemelt. Az állandó sebességű tesztek motor fordulatszám értékei kettes fokozatban 2000 1/min és 3000 1/min; hármas fokozatban pedig 2000 1/min voltak.

A kiértékelés Fourier transzformáció által nyert spektrumok és spektrogramok elemzésére terjed ki. A cél, hogy a rezgésadatokban egyértelmű utalást találjunk a hiba jelenlétére. Az eredmények kiértékeléséhez szükséges ismerni a sebességváltó felépítését. A motor bemenő fordulatszámának és az áttételek ismeretében a tengelyek és fogaskerekek kapcsolódási frekvenciáit kiszámítottuk a kettes és hármas fokozat, valamint a végáttétel kihajtó fogaskerékének figyelembevételével.

A sebességváltó több alkalommal, különböző helyszíneken is szét, majd össze lett szerelve. A felfutásos teszt spektogramján látható, hogy egyes rezonancia frekvenciák a meghibásodás állapotában jelennek meg (pl. 2200 - 2400 Hz között), míg más rezonancia frekvenciák szinte eltűnnek (pl. 1200 – 1400 Hz között). A rezonancia frekvenciák átrendeződése kapcsán a feltevés, hogy a szerelési műveletek során a

tengelyek, csapágyak és házfedél pozíciói, valamint az egyes alkatrész kapcsolatok változása a rendszer merevségének megváltozását okozta. Tehát a szerelési műveletek közben nem volt biztosított, hogy nem okozunk bármilyen féle, a mesterséges hibától független eltérést az eredeti állapothoz képest. A karosszéria jobb első részére helyezett és a mikrofon csatornán felvett jelekben főleg a motorból származó fundamentális frekvenciák jelennek meg, a sebességváltó topológiai frekvenciái nem ismerhetőek fel. Az utastérbe bejutó alacsony frekvenciák leginkább 1500 Hz alatt vannak, a karosszéria elemeken pedig még ennél is kisebb frekvenciák gerjesztenek. A sebességváltót illető problémák tehát csak a sebességváltó házára illesztett szenzor jeléből detektálhatók.



4.4.2 ábra. *Felfutásos teszt FFT vs. RPM diagramja (spektogram) 0–3000 Hz (bal: fogtörés, jobb: normál)*

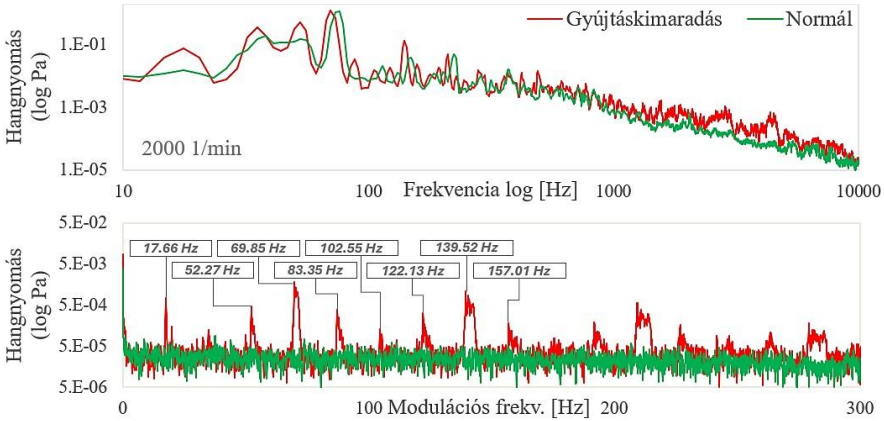
A szakirodalomban nagy számban található, fogkárosodás rezgésvizsgálatával foglalkozó publikációkban a rezgésspektrumokat laboratóriumi körülmények között, általában csak egy fogaskerékpár esetén vizsgálják. Ezzel szemben komplett gépjármű sebességváltó fogtörés problémája beépített állapotban, valós üzemi körülmények között történő rezgésvizsgálata során nem ismerhető fel az elméleti hibaspektrum. A rezgés és akusztikus spektrumokban nyoma sincs a hibás fogaskerékre jellemző frekvenciáknak vagy oldalsáv modulációknak, a megjelenő frekvenciák nem utalnak az előidézett problémára. A jó és rossz állapot a vizsgálati eredmények alapján élesen nem különíthető el egymástól, mivel a különböző sebességi fokozatokban végzett tesztek nem adnak egybehangzó értékelést a gépjármű viselkedéséről. Ezen felül, a végáttétel kihajtó fogaskereke 2000 1/min motorfordulat mellett alacsonynak mondható, kettes

fokozatban 255 1/min, míg hármas fokozatban 384 1/min sebességgel forog. Mint köztudott, a rezgésgyorsulás amplitúdója a fordulatszámmal egyenesen arányosan nő. A motor főtengelyből származó, a jármű rezgéskarakterisztikáját nagy mértékben meghatározó magas energiájú rezgések elnyomják és nem teszik a spektrumokban vizualizálhatóvá az alacsony fordulatú fogaskerék harmonikusokat.

4.5 FORD FOCUS GYÚJTÁSKIMARADÁS PROBLÉMA

A belső égésű motorok egyik leggyakoribb problémája az elöregedett gyújtógyertya, amely gyenge gyújtást vagy gyújtáskimaradást okoz, és megállíthatja a főtengely forgását. Létező diagnosztikai stratégia a hengernyomás vagy a főtengely fordulatszám-ingadozásának mérése. A gyújtáskimaradást mesterségesen, a gyújtótekercs kiiktatásával idéztük elő. A vibroakusztikus méréseket az előző fejezetben már bemutatott első generációs Ford Focus személygépkocsin végeztük el. A mérések során kiemelt követelmény volt a szenzorok rendkívül egyszerű, szétszerelés nélküli felszerelése az autóra. Ebből a célból egy egytengelyű gyorsulásérzékelő a karosszéria jobb első oldalán, egy a motorblokk és a váltóház közötti csatlakozó csavarfejhez, ill. egy kondenzátor mikrofon került az első utasülésre.

A méréseket többször megismételtük alapjárati fordulatszámon állandó, 2000 1/min és 3000 1/min motorfordulatszámon. Továbbá a zajt és a rezgést gyorsított üzemmódban (felfutás) mértük 1500 1/min-ről 5000 1/min-re. Elmondható, hogy az előidézett gyújtáskimaradás következményei észlelhetőek az akusztikus jelben. Az order spektrumból megállapítható, hogy gyújtáskimaradás esetén a motor főtengely első orderének és a szubharmonikusainak rezgésszintje megemelkedik. A spektrumokon végzett analízis azt mutatja, hogy 1000 Hz fölött megjelenik egy, a főtengely frekvenciájához köthető szubharmonikus modulációs család. Az utastérben és a karosszéria elemeken a gyújtási frekvencia általi gerjesztés dominánsan jelenik meg.

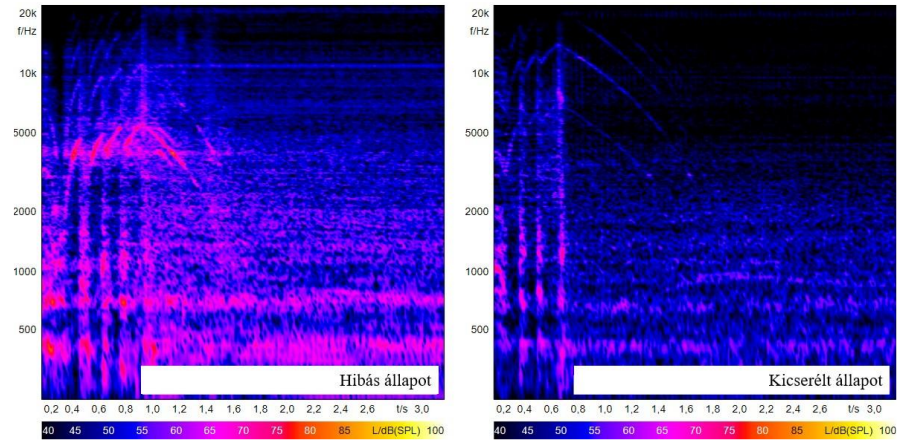


4.5.1 ábra. *A 2000 1/min fordulatszámokhoz tartozó amplitúdó – és modulációs spektrumok összehasonlítása*

A probléma pontos lokalizálása nem lehetséges, mivel a rezgésdiagnosztikai vizsgálatból nem derül ki, hogy melyik hengerben van a gyújtáskimaradás. Az időjel statisztikai mérőszámai képesek a jó és rossz állapotot szeparálni, azonban a meghibásodás jellegére, okára vagy helyzetére nem utalnak. A kapott akusztikai mintázatból a főtengely határozható meg a rendellenes rezgés forrásaként. Mesterségesen létrehozott hiba lévén tudjuk azonban, hogy a főtengely nem hibás gépelem, hanem a gyújtáskimaradás egyik tüneteként rezgésforrásnak észleljük a nyomaték ingadozását. Ezt tudomásul véve a konklúzió, hogy pusztán rezgésdiagnosztikai eszközeivel nem lehetséges sem a hiba teljes lokalizálása, sem gyökérokának megállapítása. Bármilyen meghibásodás, amely a főtengely egyenetlen járásához vezet nagyon hasonló spektrális képet fog mutatni, ezért egyértelműen a gyújtáskimaradás nem határozható meg kizárólagos hibaokként.

4.6 MAZDA CX-5 INDÍTÓMOTOR PROBLÉMA

Az indítómotor összetett rendszerében számos okból előfordulhatnak meghibásodások. Esetünkben a meghibásodást egy, a normál állapothoz képest hasonló jellegű, kicsit erősebb és hosszabb ideig tartó zaj kísérte. Az önindító komplett cseréje után a furcsa zaj megszűnt. Noha az indítási mechanizmust jól ismerjük, a hangjelenség természetét mégis nehéz volt leírni. Az analízis során a motor fölé helyezett mikrofon akusztikus jelére szorítkoztunk.



4.6.1. ábra. *Fourier spektogram összehasonlítás*

Az indulás pillanata az utolsó tranziens eseményhez köthető, amely után az indítómotor fordulatszáma hirtelen lecsökken. Hibás állapotban az order alakja alapján elmondható, hogy nyomatékátadás közben a fordulatszám esés magasabb. Az egyes fordulatszám esések között természetszerűleg egy ütésszerű jelenség látható, amelynek eredetét nem ismerjük. A frekvencia tartomány függvényében tekintve az ordereket az is elmondható, hogy hibás állapotban az indítómotor eleve nem képes olyan magas fordulatszámot elérni, mint normál működés közben. Feltehetően a nyomatékátadás elégtelensége okozza a problémát, ezért a robbanó motor kevésbé volt képes elérni a saját hajtásához szükséges fordulatszámot.

A fenti megállapításokhoz szükségszerű egy referencia mérés, amelyhez a spektrum képeket hasonlíthatjuk. A használt analízisekkel nem állapítható meg a hiba pontos oka, de a kapcsolt idő frekvencia analízisből következtetni lehet az indítómotor mechanikai viselkedésére. Azt is tudjuk, hogy az indítómotor cseréje után a szokatlan

jelenség megszűnt, tehát nem akkumulátor vagy üzemanyagellátó rendszer a probléma forrása. A robbanó motor beindulása után az indítómotor gond nélkül levált, tehát a Bendix-szerkezet mechanikai hibája szintén nem feltételezhető. Az indítás hangjának jellegéből (nem csiszol, nem darál), illetve abból, hogy az indítómotor funkcionális maradt megállapítható, hogy a meghibásodás nem volt nagy mértékű, inkább kezdődő jellegű. Az orderek viselkedéséből, valamint a tranziensek változásából ítélve kis mértékű súrlódásból vagy akadásból származhatott a hibajelenség. A nyomatékátadás elégtelenségét több minden is okozhatja. A by-pass gyújtásterminál vagy érintkező tárcsa kontakt hibája, szennyeződése, égése vagy korróziója megnehezítheti a nyomaték biztosításához szükséges feszültség felvételét az akkumulátorból. Lehetséges ok lehet még a szabadonfutó szerkezet görgőinek deformációja vagy bármilyen belső károsodása, kiszáradt csapágyak vagy meggörbült armatúra, illetve a gerjesztő tekercs huzaljainak hibája is. Az indítómotor komplett cseréje miatt a benne lévő meghibásodott elemet és annak hibáját nem tudtuk azonosítani, ezért sajnos a spektrális eloszláshoz nem tudjuk egyértelműen a hiba gyökérokát hozzárendelni.

4.7 VW GOLF DIFFERENCIÁLMŰ ZAJPROBLÉMA

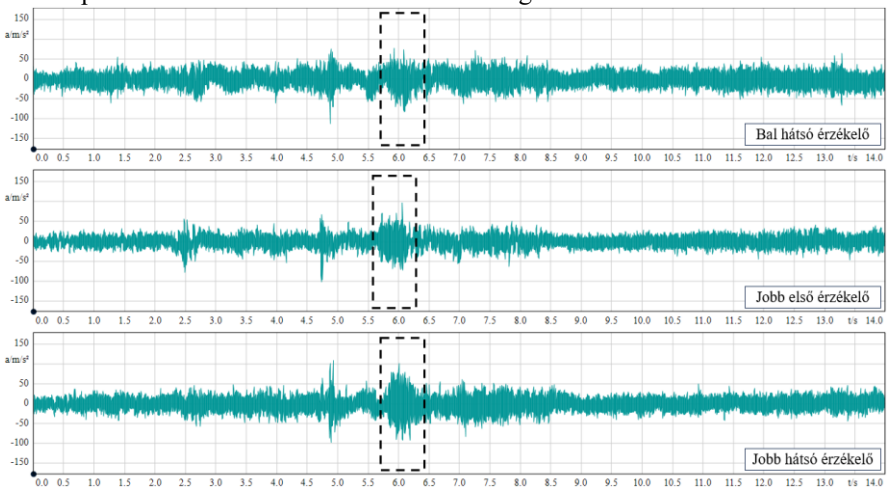
A vizsgált gépjármű VW Golf 1.5TSI típusú volt. A tulajdonos használat közben, ívmenetben kb. 60 km/h feletti sebességgel autózva az utastérben egy furcsa zajt hallott, amely a gépjárműben tartózkodók részére zavaróan hatott.

A rezgésgyorsulás érzékelők számára egy általános elrendezést választottunk, amely alapján lehetőséget láttunk arra, hogy a kialakuló komplex zaj-és rezgésállapotból adódó kihívásokat kezelni tudjuk. Három darab egytengelyű érzékelőt helyeztünk el mágneses csatlakozás segítségével a karosszéria felületén a jármű jobb első, jobb hátsó és bal hátsó oldalán a talajszinttől 0,8 m magasságban. A mérések helyszínéül a 2519-es és 2505-ös utak szolgáltak, ennek során a gépjármű összesen 42 km-t tett meg. A mérések helyszíneinek és útszakaszainak kiválasztásakor szempont volt, hogy az ott található kanyarokba legalább 60 km/h sebességgel 5. fokozatban tartós sebességgel lehessen haladni.

A rövid ideig tapasztalt hangjelenség a mérés 5.6 – 6 másodpercében hallható. A zajjelenség szempontjából meghatározó hullámcsomagok jelöléséből látható, hogy ezek egymáshoz képest kissé eltolva helyezkednek el. Ez azt jelenti, hogy a keresett gerjesztésből származó rezgés hamarabb érte el a jobb első tengely feletti szenzort, mint a másik kettőt. Ebből felfedezhető, hogy a zaj forrása a jobb első érzékelőhöz közelebb

helyezkedett el, mint a másik kettőhöz. Tehát a zajt okozó gépelem a jármű jobb első felében található.

A jobb első pozíciójú szenzor gerjesztési időkülönbségeinek reciprokával kiszámítható, hogy ennek a tranziens gerjesztésnek a frekvenciája hozzávetőlegesen 8 – 10 Hz. Az elvégzett vizsgálatok alapján a kifogásolt zaj rezgésméréssel kimutatható. A probléma nem tekinthető állandónak és szisztematikusnak, mivel 14 mérésből összesen 3 alkalommal volt hallható a zaj. Ez arra enged következtetni, hogy a járműszerkezeten kívüli tényezők is közrejátszanak a kialakuló zavaró hanghatás létrejöttében, mint például tapadásvesztés ívmenetekben adott minőségű utakon.



4.7.1 ábra. *Az egyes szenzorok mérés során felvett nyers rezgésjelei (0 -14 sec)*

A mérési adatokban azonosítani tudtuk az XDS rendszer működésére jellemző frekvenciát (8-12 Hz), így az XDS tekinthető a zavar forrásának. A zajjelenség azonban nem tekinthető meghibásodásnak, hiszen az XDS rendszer normál, korrigáló működéséből adódik. Le kell szögezni, hogy pusztán rezgésméréssel a járműrendszer működési elvének ismerete és egyéb tesztek nélkül a teljes körű hibafeltárás nem lett volna lehetséges. Első körben a Campbell-diagram és időjelek elemzése alapján a zajforrás hozzávetőleges helyét meg tudtuk határozni, valamint a zaj jellegét azonosítani tudtuk. Ezután a 10 Hz-es gerjesztő modulációs frekvencia célzott kutatásával bizonyítani tudtuk az XDS menetstabilizáló rendszerre vonatkozó hipotézisünket.

4.8 DIAGNOSZTIKAI MÉRÉSEK EREDMÉNYEINEK ÖSSZEFOGLALÓJA

A vibroakusztikai módszerek nem minden esetben teszik lehetővé egy gépjármű erőátviteli rendszerében történő meghibásodás teljes körű lokalizálását. A normál és rendellenes viselkedés közötti különbség rezgés- és akusztikai mérésekkel kimutatható, így a két állapot egymástól jól megkülönböztethető. Ennek ellenére, a legtöbb esetben a hibaforrás mély elemzéséhez és feltárásához kiegészítő tesztekre, valamint priori ismeretekre is szükség van.

A zaj vagy rezgés frekvencia-karakterisztikája befolyásolja a hibás komponens megtalálásának eredményességét, hiszen széles sávú gerjesztés esetén nincs olyan szerkezeti jellemzőből eredő fundamentális frekvencia komponens, amely segítségével azonosítani lehetne az egyes gépelemeket. A frekvencia analízisekhez szükség van a szerkezetek mechanikai felépítésének és működési körülményeinek ismeretére. A megfelelő mérési pozíciók megválasztásán szintén múlhat a gyökérok analízis eredményessége.

Másik nehézség, hogy a hangok szubjektív észlelése miatt a zajjelenségek leírása összetett feladat és megítélésük nem egyértelmű, emiatt sok esetben nem teljes bizonyossággal állítható, hogy az észlelt zaj valamilyen meghibásodás által jött létre vagy pedig a normális működésnek felel meg. Emiatt célszerű egy referencia mérést figyelembe venni a mérési eredmények kiértékelésekor.

Bizonyos műszaki problémák fennálláskor a meghibásodás csak adott körülmények között és adott üzemállapotok közben bocsát ki észlelhető zajt. Ez egyrészről hasznos diagnosztikai szempontból, mivel szűkíteni tudja a keresett meghibásodott komponenst, másrészről megnehezítheti a mérési tervek elkészítését. A jármű motorterében uralkodó komplex rezgésviszonyokon túl, a gumiabroncsok és út közötti kölcsönhatás, valamint a szélzaj széles sávú rezgéseket generál, amelyek nehezítik a diagnosztika során a kívánt jelek kiemelését.

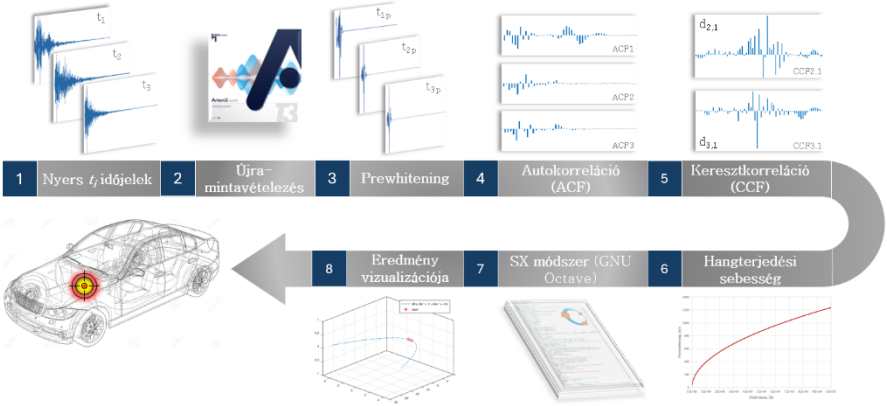
A vizsgált személygépjárművek rezgéskarakterisztikáját a legdominánsabb rezgésforrás, azaz a belső égésű motor határozza meg döntő mértékben. A motor főtengelyéből származó magas energiájú rezgések elnyomják az alacsonyabb fordulaton működő, pl. sebességváltó végáttételének fogaskerék harmonikusait, így nem vizualizálhatók a spektrumokban. Ez azt jelenti, hogy az általánosan alkalmazott mérési elrendezésnek - a járműben több forrásban fellépő gerjesztés miatt - korlátja van a megfelelő jel-zaj viszonnyal vizsgálható részegységeket illetően.

Mesterségesen előidézett hibák létrehozásakor azt tapasztaltuk, hogy az egyes tesztek között ellentmondásos, illetve egymással nem összefüggő, nem egy irányba mutató eredményeket kaptunk. Ennek nagy valószínűséggel az oka a műhelykörülmények között alkalmazott helytelen és eltérő szerelési módszer. Tehát mechanikai beavatkozások során fontos, hogy képesek legyünk a szereléseket és változtatásokat kellő precízséggel elvégezni, hogy a vizsgált berendezés mechanikai állapota, és ezáltal a rezgésállapota ne változzon számottevően.

A jármű bonyolult és összehangoltságot igénylő működése során a meghibásodások által létrehozott spektrális eloszlások különfélék lehetnek. Mindazonáltal, ugyanaz az akusztikai mintázat tartozhat több meghibásodáshoz is. Pl. a gyújtáskimaradásnál megfigyelhető akusztikai mintázat a főtengely egyenetlen járásából adódik, azonban ezt a hatást más károsodások is előidézhetik. Ez azt jelenti, hogy több hibaoknak is egyforma a spektrális eloszlása. Ebből következik, hogy az FFT spektrum analízis eredménye nem közvetlenül a gyökérokra, azaz a hibás komponensre mutat rá, hanem sokkal inkább a meghibásodás következményét (tünetét) tudjuk vele megfigyelni.

5. TDoA VIZSGÁLATOK

A TDoA módszerrel való kísérletezés elgondolása, hogy ne közvetlenül a meghibásodott komponensre és a meghibásodás típusára fókuszáljunk, hanem a hiba helyzetére. Tehát nem az a cél, hogy pl. a fogaskerék kapcsolódási frekvenciáján keresztül pontosan meghatározzuk a hibás alkatrészt, hanem hogy a meghibásodás geometriai helyét meghatározzuk a gépjárműhöz kötött koordináta rendszerben egy bizonyos távolságon belül. A koordináták ismeretében könnyedén azonosítani tudjuk az abnormális gerjesztést okozó komponenst.



5.1 ábra. *TDoA forráslokalizációs módszer rutinja*

A forráslokalizációs eljárás rezgésjelekre való adaptációja során kidolgoztuk a folyamat azon lépéseit, amelyek szükségesek a sikeres impulzusforrás meghatározásához. Legalább három különböző csatornán szinkronban mérni kell a rezgésjeleket (t_i). Ezután az időkésés helyes nagyságrendje miatt, valamint a zavaró magas frekvenciás komponensek eltávolítása miatt a nyers időjeleket 1 – 10 kHz tartományban újra kell mintavételezni. A nagyon magas frekvenciájú jelnek a keresztkorrelációs függvénye finom, gyorsan oszcilláló, emiatt a csúcsok nehezen azonosíthatók. A keresztkorreláció elvégzése előtt kihagyhatatlan lépés a prewhitening. A gépészeti rendszerek rezgésjeleiben gyakoriak az erősen domináns frekvenciakomponensek (pl. forgási harmonikusok, szerkezeti rezonanciák). A domináns frekvenciák túlsúlya miatt a keresztkorreláció eltorzul és nem a valódi

időkésés-információt tükrözi. A prewhitening kiegyenlíti a jel és a zaj spektrumát, így a keresztkorreláció nem egy-két frekvenciára lesz érzékeny.

Az időkésésen kívül, bemeneti paraméterként meg kell határozni a karosszéria elemekben terjedő hajlító hullám fázissebességét. Ezt a hajlító hullám fázissebességére érvényes összefüggéssel tesszük, amely függ a geometriától, anyagtulajdonságoktól és a frekvenciától. A sebesség számításához a mintavételezéshez használt frekvenciát vesszük alapul. A kalkulációk megkönnyítésére egy programkódot készítettünk el a GNU Octave programban. Ezzel lehetőség van a kifehérített időjelet beolvasni és előállítani a keresztkorreláció segítségével az időkéséseket. Ezután az SX módszer a szükséges bemeneti adatok függvényében (hanghullám terjedési sebesség, szenzorok pozíciója, időkésés) közvetlenül számítja a forrás koordinátáit. A megoldandó másodfokú egyenlet vizualizációja egy parabola, amelynek zérushelyeiben találhatóak a forrás x és y koordinátái.

5.1 TDOA VIZSGÁLATI PARAMÉTEREK HATÁSA AZ EREDMÉNYRE

A TDoA forráslokalizációs módszer által produkált eredmény befolyásolási tényezőinek vizsgálata a mérés pontosságát érintő paraméterek elemzésére vonatkozik. A fejezet célja, hogy megértsük, mi befolyásolhatja az algoritmus bemenetét képező mennyiségeket, és hogy ezek milyen hatással vannak a mérési eredményekre. A fejezet alapját főleg webes források képezik [34] – [37], amelyek alapján a módszer megbízhatóságát leginkább a felhasznált jelek több útvonalon való terjedése befolyásolja.

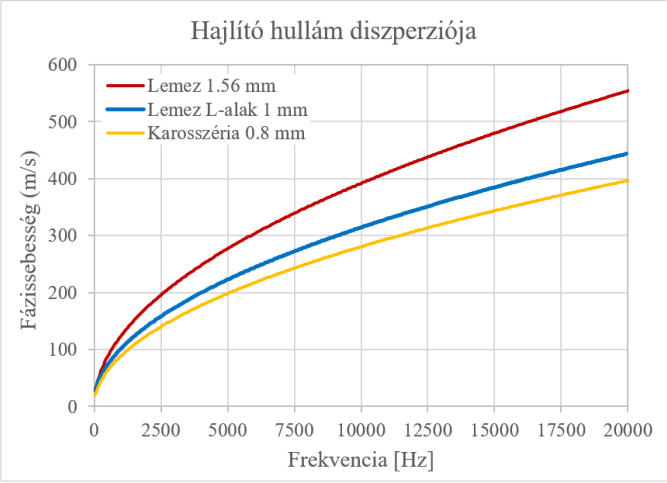
a. Hullámterjedés komplex szerkezetekben. Lemezszerű alkatrészekben - mint amilyenek a vizsgált karosszéria elemek is – a terjedési sebesség erősen frekvenciafüggő. A hang terjedési sebességének frekvencia függését diszperziónak nevezzük. A lemezszerű alkatrészekben létrejövő hullámok fázissebessége az alábbi módon számítható [38]:

$$c_B = \sqrt{\omega} \cdot \sqrt[4]{\frac{B}{\rho h}} \cdot \tag{1}$$

ahol

$$B = \frac{h^3}{12} \cdot \frac{E}{1-\nu^2} \tag{2}$$

a hajlítási merevség.



5.1.1 ábra. *Hajlító hullám terjedési sebességének frekvencia függése a vizsgálatokhoz használt lemez és karosszéria elemek esetén*

A számításokat elvégezve $h = 1.56$ és 0.8 mm; $E = 210 \cdot 10^3$ MPa; $\nu = 0.3$; $\rho = 7850\ \mathrm{kg/m^3}$ paraméterekkel a terjedési sebességre a 5.1.1 ábrán látható frekvencia függő görbe adódik.

b. Mintavételezési frekvencia fontossága. Tudjuk, hogy karosszéria elemekben 2000 Hz alatt meghatározó a gerjesztés, legyen annak forrása akár a motor vagy akár egy mesterséges impulzus. A 4096 Hz-es mintavételezés azt jelenti, hogy 1/4096 Hz, azaz $2.4 \cdot 10^{-4}$ másodperc alatt mintavételezünk egy adatpontot. Egy 4096 Hz-es hajlító hullám ez idő alatt 178 m/s terjedési sebességgel számolva 4.3 cm-t tesz meg, tehát ez a maximális térbeli felbontás, amely ezzel a mintavételezési frekvenciával elérhető. A mintavételezési sebességet megduplázva – megjegyzendő, hogy ekkor a hullám terjedési sebességére már 251 m/s adódik a diszperzió miatt – a térbeli felbontás 3.1 cm-re növelhető.

c. Geometriai feltétel. Amennyiben a forrás a szenzorok által körülhatárolt konvex alakzaton belül van, abban az esetben a lokalizáció várható pontossága magas lesz. Ha az emitter az egyik érzékelő mögött van, még ha ahhoz közel is, akkor a módszer bizonytalansága drasztikusan megnő. Másik kikötés, hogy a szenzorok nem helyezhetőek el úgy, hogy a forrással egy vonalra essenek. A módszer gyakorlati

alkalmazhatóságát komplex szerkezeten megnehezíti, hogy a szenzorok és gerjesztés között közvetlen rálátás (LOS – Line of Sight) szükséges.

d. Visszaverődés és háttérzaj hatása. Ha a közvetlen rálátás (LOS) feltétele nem teljesül, akkor a rezgéshullám a szenzorokba csak reflexió révén, egyszerre több útvonalon tud eljutni. Minden egyes visszaverődés egy újabb zajforrásnak tekinthető, amelyek az időjelben további csúcsokként jelennek meg, ezzel megnehezítve a pontos időkésések meghatározását. Visszaverődés akkor is történik, amikor a hanghullám egy másik közeg határához ér. A különböző közegekben a hang sebessége más és más, így homogén hullámterjedés - egy adott közegen belül állandó sebességgel - nem mehet végbe.

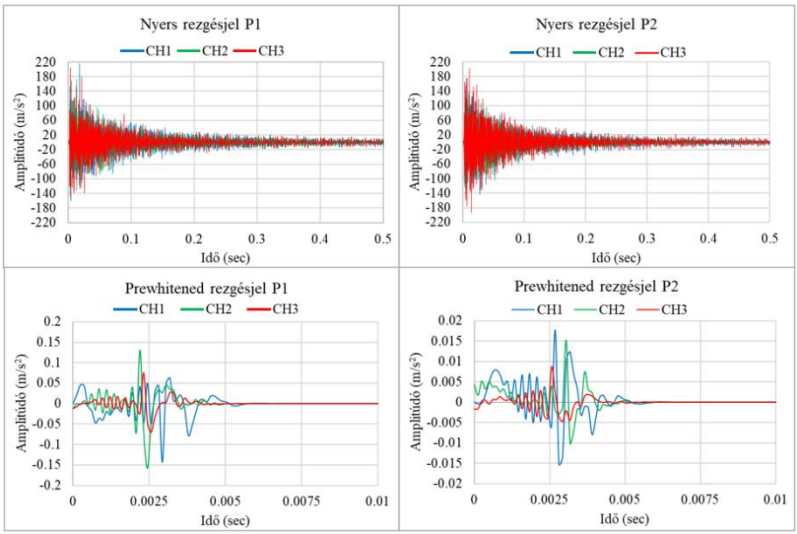
e. Modulált jelek. Annak érdekében, hogy a felvett időjelek egymáshoz képesti eltolódását, azaz a szenzorokba való beérkezésüknek időkülönbségét meghatározzuk, a jelnek nem szabad véletlenszerű struktúrával rendelkeznie. A rezgésforrások véletlenszerű fehér zajt is bocsátanak ki, amely struktúrája nem teszi lehetővé az eljáráshoz szükséges időkésések meghatározását. A jelben jelen levő ismétlődő mintázatokhoz több egymáshoz hasonló időpillanat is tartozik, amely miatt a korreláció számítás során nehéz meghatározni a szenzorok közötti pontos időeltolódást. A bemutatott prewhitening módszer kínál orvosságot az időjel belső függéseinek problémáira, azonban a jelben lévő periodicitást nem képes áthidalni.

5.2 TDOA VIZSGÁLAT ACÉLLEMEZEN

A vizsgálatok során az volt a célunk, hogy először egy egyszerű szerkezeten, például téglalap alakú lemezen végezzünk vizsgálatokat. Az egyszerűsített modell (2D) használatát az eljárás befolyásoló tényezőinek és lehetőségeinek feltárása miatt tartottuk fontosnak. A vizsgálatok ezen szakaszában mesterséges gerjesztést alkalmaztunk, a téglalap alakú lemezre impulzus kalapáccsal ütést mértünk felváltva a P1 és P2 pontokban. A téglalap alakú lemez méretei: 50 x 46 x 0.15 cm (hosszúság x szélesség x vastagság). A lemezt a vizsgálat során a négy sarkához illesztett szivacson helyeztük el.

A P1 (X30; Y15) helyen leadott impulzus koordinátája X-irányban 0,5 cm és Y-irányban 0.6 cm eltéréssel meghatározható a forráslokalizációs módszerrel. A P2 (X10; Y26) impulzushely koordinátái azonban teljesen pontatlanok. Ennek magyarázata a méréssel szemben támasztott geometriai követelmény, amely szerint a gerjesztés forrásának a vevő szenzorok által leírt geometriai háromszögön belül kell lennie.

Amennyiben ez a feltétel nem teljesül, úgy a forrás helyének meghatározása nem lehetséges.



5.2.1 ábra. *A P1 és P2 pontbeli gerjesztésre adott CH1, CH2, CH3 impulzusválaszok (kék, zöld, piros) nyers időjelei és a prewhitened rezgésjelek*

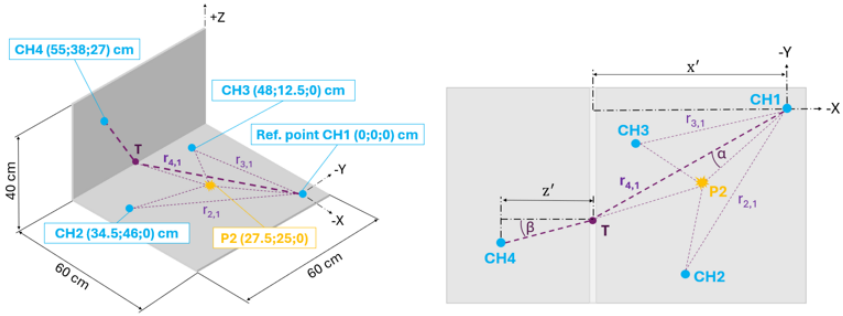
Egyszerűsített modellen tehát a TDoA módszer a rezgésjel megfelelő előkészítésével elfogadható hibahatáron belül képes megadni egy mesterséges, egyforrású impulzus-szerű gerjesztés eredetét az általunk felvett koordináta rendszerben.

5.3 TDOA VIZSGÁLAT HAJLÍTOTT ACÉLLEMEZEN

A vizsgálatok folytatásaként egy 90°-ban 60-40%-os arányban meghajlított L-alakú lemezt alakítottunk ki (lásd a 5.3.1 ábrát). A hajlítási sugár 2 mm (R). A lemez geometriai méretei a következők: szélesség W = 60 cm, magasság L = 100 cm, vastagság h = 1 mm. A lemez anyaga acél. A vizsgálat célja a TDoA módszer alkalmazhatóságának ellenőrzése 3D szerkezet esetén és a módosított algoritmus működő képességének igazolása.

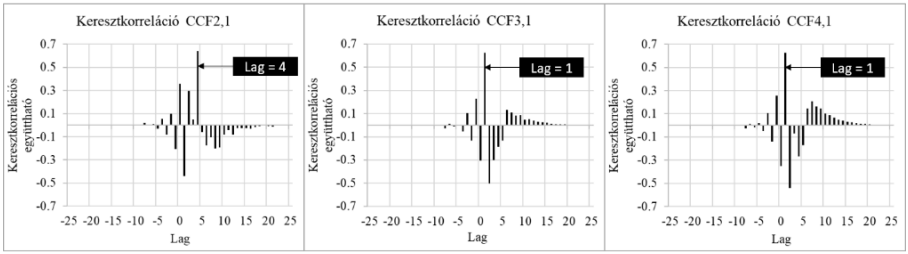
Az X irányban viszonylag nagy, 5 cm-es eltérés mutatkozik, míg Y irányban az eredmény elfogadható, 2.5 cm-en körül mozog. A síklemez modellhez képest tehát nagyobb eltérést tapasztaltunk a P2 forrás koordináta meghatározásakor. Az alkalmazott korrigált számítási módszer az eredeti összefüggésekhez viszonyítva mintegy 60%-os

javulást mutat a koordináták számított értékeiben. Figyelembe kell vennünk, hogy a szimmetria feltétel megsértése miatt használt koordináta korrekció a hullámtörési (T) pont feltételezett pozíciójából fakad, a valóságban azonban nem ismert a hullám pontos útja az ütési pont és szenzorok között.



5.3.1 ábra. *A mérési és gerjesztési pontok koordinátái a hajlított acéllemezen és a lemez kiterített nézete*

A mechanikai modell komplexitásának fokozásával megjelennek a módszer eredeti alkalmazásában nem jellemző, szilárd testekben lezajló fizikai hullámterjedéssel kapcsolatos problémák. Ennek orvoslására továbbfejlesztettük a jelenleg alkalmazott SX módszert. A matematikai háttérapparátus módosítása figyelembe veszi az eltérő hullám típusok különböző terjedési tulajdonságait, azonban a gyakorlati alkalmazhatóságot megnehezítő szimmetria feltétel bevezetésével.

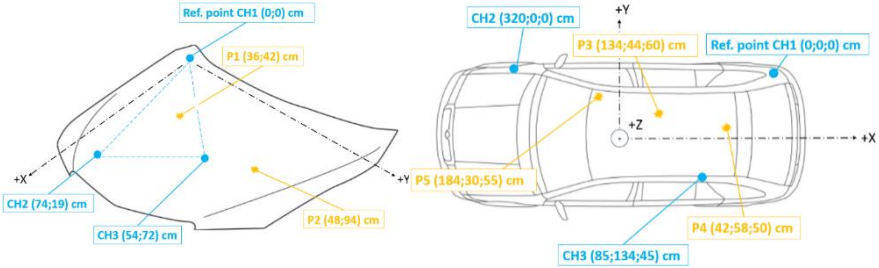


5.3.2 ábra. *Az L-alakú lemezen a P2 hely gerjesztése során a mérési pontokból (CH1 ...CH4) képzett keresztkorrelációs függvények*

Végeredményben, a vizsgált mechanikai modell bonyolultságának kismértékű változása is az általunk kifejlesztett TDoA forráslokalizációs rutin eredményének növekvő pontatlanságához is vezet, amely eltérést teljes mértékben a módszer jelenlegi formájában nem képes kiküszöbölni.

5.4 TDoA VIZSGÁLAT FORD FOCUS KAROSSZÉRIÁN

A jármű karosszéria vizsgálat során a TDoA méréseket a jármű teljes egészén, valamint külön a motorháztetőn is elvégeztük. A lemez méréshez hasonlóan P1, P2, P3, P4, P5 pontokban gerjesztjük egy impulzus kalapács segítségével a karosszéria elemeket. A rezgésgyorsulás érzékelőkkel (CH1, CH2, CH3) rögzítjük a nyers időjelet és erőgörbét. A jel újramintavételezése ebben az esetben 4096 Hz-el történt.



5.4.1 ábra. *Mérési és gerjesztési pontok koordinátái a motorháztetőn és teljes karosszérián*

A motorháztetőn végzett kísérletnél is alkalmaztunk olyan gerjesztési pontot, amely az objektumon elhelyezett rezgésgyorsulás érzékelők által körülhatárolt geometriai háromszögön kívül esik. Emiatt a P2 gerjesztési pont helyzetének meghatározása ebben az esetben sem volt lehetséges. Mindazonáltal, amennyiben a geometriai feltétel teljesül, akkor a forrásmeghatározás egészen pontos lehet. A P1 pont X-irányú pozícióját 1 cm, Y-irányú pozícióját pedig 0.8 cm pontossággal határoztuk meg.

A koordinátákban nagy eltérések mutatkoznak a valós gerjesztési pozícióhoz képest. Az X-koordinátára minden esetben 1.6 – 1.7 méter adódik, és az Y-koordináta is nagy pontatlansággal adja meg a gerjesztési pontok pozícióit. Az eltérések mértéke meglehetősen eltérő, a hiba nem mondható szisztematikusnak.

A keresztkorrelációs függvényekből nem származtatható egyértelműen az időkésés érték, mert a keresztkorrelációs együtthatónak több maximum helye is van. a szenzorok különböző karosszéria elemekre voltak elhelyezve, tehát a jelterjedés nem egy alkatrészen belül, egybefüggően történt. Emiatt a gerjesztési pontok és rezgésgyorsulás érzékelők között a homogén közegű hullámterjedés nem volt lehetséges. A rendszerhatárokon – azaz alkatrészeken – keresztül terjedő rezgéshullámok a szenzorokba több útvonalon jutottak el. A terjedési útvonalakon (pl. ponthegesztés vagy ragasztott kötésen keresztül az ajtózsanérokon át) a különböző

csillapítású komponensek a homogén és állandó sebességű hullámterjedést feltehetően nem tették lehetővé.

5.5 TDOA KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA

A forráslokalizációs eljárás rezgésjelekkel történő adaptációjára kidolgoztuk az elméleti hátteret, majd egy egyszerűsített mechanikai modellen, azaz sík fémlemezen bebizonyítottuk annak működőképességét. A mechanikai modell komplexitásának növelésével olyan jelenségek és problémák jelennek meg, amelyek a módszer eredeti alkalmazási tartományában nem voltak relevánsak, és elsősorban a szilárd testekben lejátszódó fizikai hullámterjedés sajátosságaihoz köthetők. Ezen hatások kezelésére a jelenleg alkalmazott SX módszer továbbfejlesztésére került sor. Lehetővé teszi az eltérő hullámtípusok különböző terjedési jellemzőinek figyelembevételét, ugyanakkor egy, a gyakorlati alkalmazhatóságot jelentősen korlátozó feltétel bevezetését teszi szükségessé. Eredményképpen azt találtuk, hogy a vizsgált mechanikai modell már kis mértékű bonyolultság növekedése is az általunk kidolgozott, TDoA-alapú forráslokalizációs eljárás pontosságának romlásához vezet, amely eltérés a módszer jelenlegi formájában nem küszöbölhető ki maradéktalanul. A lokalizációs eljárás egyik legfőbb kihívása, hogy NLOS (non-line of sight) környezetben is képes legyen a megfelelő helymeghatározásra.

A TDoA forráslokalizációs módszernek jelen állapotában számos továbbfejlesztési lehetősége van. A jel előkészítése során a simító eljárás jeltípustól függő helyes megválasztása és megfelelő beállítása, valamint az ARIMA modell parametrizálása további vizsgálatokra szorul. A prewhitening módszerrel kondicionált maradó jel minősége nagy mértékben befolyásolja a keresztkorreláció helyességét. A háromdimenziós alkalmazásokhoz négy szenzoros mérési elrendezés szükséges és az algoritmust ennek megfelelően módosítanunk kellett, azonban a kiterjesztett négy szenzoros kísérletek sem vezetettek pontosabb eredményre. A TDoA eljárás rezgésdiagnosztikai területre való kiterjesztése során felmerült a mikrofonokkal történő mérés lehetősége. Előnye, hogy a rezgéshullám diszperziója levegő közegben nem lépne fel. Hátránya, hogy sok esetben a meghibásodások okán hallható zajjelenség forrása nem esik egybe a hibás komponens helyével.

6. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK - TÉZISEK

T1. Az elvégzett vizsgálatokból megállapítottam, hogy a gépdiagnosztikában alkalmazott idő, frekvencia, kapcsolt idő-frekvencia tartománybeli módszerek a jármű szerkezetének megbontása nélkül csak korlátozottan alkalmasak egy gépjármű hajtásláncában fellépő mechanikai hibák, és azok helyének megállapítására. Az elvégzett vizsgálatok alapján megállapítom, hogy olyan vizsgálati módszer alkalmazása célszerűbb, amely nem a gerjesztő fundamentális frekvenciák felismerésével (pl. fogkapcsolódási frekvencia) azonosít egy hibás alkatrészt, hanem a hiba által létrehozott gerjesztés közvetlen helyét adja meg a gépjárműhöz kötött koordináta rendszerben.

T2. Gépjárművön elvégzett valós mérések segítségével megállapítottam, hogy a pszichoakusztikában alkalmazott mérőszámok referencia mérések birtokában alkalmasak egy gépjárműben fellépő hallható zajjelenség hibaként történő azonosítására, annak helyének és okának meghatározása nélkül.

T3. Valós próbatesteken és gépjármű karosszérián elvégzett mérésekkel bizonyítottam, hogy a TDoA módszer alkalmas lehet akár bonyolult szerkezeteken fellépő hibák által gerjesztett mechanikai hullámok kiindulási helyének megállapításra, ezzel a hiba helyének megfelelő pontosságú lokalizációjára. Mérések, ill. a mért rezgésgyorsulás jelek feldolgozásával megállapítottam, hogy a TDoA módszer gépjárműveken történő alkalmazása esetén a mért jelek analízis előtti előkondicionálására, azaz „kifehérítésére" szükség van, továbbá az algoritmus továbbfejlesztése is szükséges, amely a karosszérián belüli hullámterjedés során keletkező anomáliákat (pl. visszaverődéseket) is kezelni tudja, valamint célszerűnek látszik az algoritmus átalakítása a háromdimenziós hullámterjedést figyelemben véve.

T4. Próbatesten elvégzett mérés segítségével igazoltam, hogy a jelenleg SX módszeren alapuló forráslokalizációs rutin továbbfejlesztése szükséges, amennyiben bizonyos szerkezeti és geometriai kialakítások befolyásolják a rezgéshullámok terjedési tulajdonságait. Egy módosított algoritmust közöltem, amely képes korlátolt mértékben kompenzálni a módszer lokalizációs hibáit sajátos geometriai kialakítások esetén. A módosított matematikai apparátus azonban a gyakorlati alkalmazhatóságot korlátozó szimmetriafeltétel bevezetését igényli.

7. KUTATÁS TÉMÁJÁHOZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK JEGYZÉKE

[1] Kriston J. Balázs, Dr. Jálics Károly: **Meghibásodások lokalizálása vibro-akusztikus módszerekkel gépészeti szerkezetek esetén** - Localization of Failures with Vibro-Acoustical Methods in Case of Mechanical Structures, GÉP (0016-8572): 72 1-2 pp 31-35 (2021).

[2] B J Kriston and K Jálics: **Application of vibro-acoustic methods in failure diagnostics**, Journal of Physics: Conference Series, Volume 1935, 5th Agria Conference on Innovative Vehicle Technologies and Automation Solutions InnoVeTAS 2021 13 May 2021, Eger, Hungary. DOI 10.1088/1742-6596/1935/1/012002

[3] József Balázs Kriston, Károly Jálics: **Benefits and limitations of acoustic methods in the vehicle transmission diagnostics – a case study**, Design of Machines and Structures, Vol. 11, No. 2 (2021), pp. 28–35. DOI: https://doi.org/10.32972/dms.2021.012

[4] Kriston József Balázs, Jálics Károly: **Gépjármű sebességváltó meghibásodásának rezgésjeleken alapuló vizsgálata**, GÉP 73: 3-4 pp. 56-59., 4 p.(2022).

[5] Balázs J. Kriston and Károly Jálics: **Malfunction or Normal Operation? Evaluation of the Subjectivity of Noise and Vibration Phenomena Accompanying the Operation of Motor Vehicles**, LECTURE NOTES IN MECHANICAL ENGINEERING Vehicle and Automotive Engineering 4 pp. 848-860., 13 p. (2022). DOI: 10.1007/978-3-031-15211-5_70

[6] Kriston József Balázs, Jálics Károly: **Gépjármű meghibásodások vizsgálati lehetősége a time difference of arrival (TDOA) módszerrel**, GÉP 74: 4 pp. 102-105., 4 p.(2023).

[7] Jálics. K, KristonJ.B.: I**nvestigation of the time delay of arrival (tdoa) method for diagnostic purposes on motor vehicles**, GÉP 2024/3-4, pp. 57-60., https://doi.org/10.70750/GEP.2024.3-4.12

[8] J.B. Kriston, K. Jálics: **Failure detection of powertrain on motor vehicles with vibroacoustic methods**, Archives of Acoustics (Online First March 4, 2025). https://doi.org/10.24425/aoa.2025.153653

[9] Kriston Balázs J, Jálics Károly: **Efficiency test of the TDOA method on L-shape metal plate**, GÉP 76: 3-4pp. 80-83., 4 p.(2025) https://doi.org/10.70750/GEP.2025.3-4.19

8. IRODALOMJEGYZÉK

[1] dr. tech. Bánlaki Pál: Gépjármű hajtáslánc fődarabok rezgés- és zajdiagnosztikai végellenőrző rendszereinek továbbfejlesztése, BME KJK Gépjárművek és Járműgyártás Tanszék, Budapest 2014.

[2] Jian Chen, Robert Randall: Automated diagnostics of internal combustion engines using
vibration simulation, Proceedings of the ICSV20, Bangkok, 2013

[3] Andrzej Puchalski: A technique for the vibration signal analysis in vehicle diagnostics, Mechanical Systems and Signal Processing 56-57(2015) 173–180., http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2014.11.007

[4] Qingbo He, Ruqiang Yan, Fanrang Kong, Ruxu Du: Machine condition monitoring using principal component representations, Mechanical Systems and Signal Processing 23 (2009) 446– 466., doi:10.1016/j.ymssp.2008.03.010

[5] Ferenc Dömötör, József Zoltán Szabó: Vibration Diagnostics as an effective Tool for Testing Engines of Internal Combustion, PRODUCTION ENGINEERING ARCHIVES 16 (2017) 3-6. DOI: 10.30657/pea.2017.16.01

[6] Jian-Da Wua,*, Chao-Qin Chuang: Fault diagnosis of internal combustion engines using visual dot patterns of acoustic and vibration signals, NDT&E International 38 (2005) 605–614. doi:10.1016/j.ndteint.2005.02.007

[7] Maciej Tabaszewski, Grzegorz. M. Szymanski: Engine valve clearence diagnostics based on vibration signals and machine learning methods, Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2020;22(2):331-339, https://doi.org/10.17531/ein.2020.2.16

[8] Grzegorz M.Szymański, Franciszek Tomaszewski: Diagnostics of automatic compensators of valve clearance in combustion engine with the use of vibration signal, Mechanical SystemsandSignalProcessing68-69(2016)479–490, http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.07.015

[9] Girish Modgil, Rolf F. Orsagh, Michael J. Roemer: Advanced Vibration Diagnostics for Engine Test Cells, 2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings., Eksploatacja I Niezawodnosc – Maintenance and Reliability 2020; 22 (2): 331–339., http://dx.doi.org/10.17531/ein.2020.2.16.

[10] T.Pravenenkumar, B. Sabhrish, M. Saimurugan, K.I. Ramachandran: Pattern recognition based on-line vibration monitoring system for fault diagnosis of

automobile gearbox, Measurement 114. (2018) 233–242http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2017.09.041

[11] Sameh M. Metwalley, Nabil Hammad, Shawki A. Abouel-Seoud: Vehicle gearbox fault diagnosis using noise measurements, Volume 2, Issue 2, 2011 pp.357-366.

[12] P. Charles et al.: Detecting the crankshaft torsional vibration of diesel engines for combustion related diagnosis, Journal of Sound and Vibration 321 (2009) 1171–1185. doi:10.1016/j.jsv.2008.10.024

[13] J.Yang,L.Pu,Z.Wang,Y.Zhou,X.Yan: Fault detection in a diesel engine by analysing the instantaneous angular speed, Mechanical Systems and Signal Processing 15 (3)(2001)549–564(16).

[14] G.F. Mauer: Modelling and experimental validation of torsional crankshaft speed fluctuation: a model for dynamics of IC engine, SAE Technical Paper No. 940630, 1994.

[15] S.Delvecchio, O.Niculita, G.Dalpiaz, A.Rivola: CONDITION MONITORING IN DIESEL ENGINES FOR COLD TEST APPLICATIONS. PART II: COMPARISON OF VIBRATION ANALYSIS TECHNIQUES., inproceedings, https://api.semanticscholar.org/CorpusID:49237346}

[16] S.Delvecchio, P. Bonfiglio, F. Pompoli: Vibro-acoustic condition monitoring of Internal Combustion Engines: A critical review of existing techniques, Mechanical Systems and Signal Processing 99 (2018) 661–683. http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.06.033

[17] Rafał Burdzik: A comprehensive diagnostic system for vehicle suspensions based on a neural classifier and wavelet resonance estimators, Measurement 200 (2022) 111602
https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111602

[18] R. Jegadeeshwaran, V.Sugumaran: Fault diagnosis of automobile hydraulic brake system using statistical features and support vector machines, Mechanical SystemsandSignalProcessing52-53(2015)436–446
http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2014.08.007

[19] Grajales et al.: ENGINE DIAGNOSIS BASED ON VIBRATION ANALYSIS USING DIFFERENT FUEL BLENDS, DIAGNOSTYKA, 2017, Vol. 18, No. 4.

[20] MAMALA, J., PRAŻNOWSKI, K., GRABA, M.: Identification of the internal combustion engine malfunctions based on the vibrations of the vehicle body. Combustion Engines. 2019, 179(4), 176-181. DOI: 10.19206/CE-2019-429

[21] Makarova et al.: Improvement of the Vehicle Clutch's Diagnosing System with the Use of
Vibrodiagnostics, 2018 IEEE International Conference on Technology Management, Operations and Decisions (ICTMOD), 10.1109/ITMC.2018.8691270

[22] Irina Makarova, Eduard Mukhametdinov, Vadim Mavrin, Ksenia Shubenkova, Ravil Garipov: Improvement of the Vehicle's Onboard Diagnostic System by Using the Vibro Diagnostics Method, 2018 International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Diagnostika), 10.1109/DIAGNOSTIKA.2018.8526093

[23] Dariusz Bismor: System for Vehicle Sound and Vibration Monitoring using MEMS Sensors, 2019 Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA), 10.23919/SPA.2019.8936824

[24] Cody M. Walker, Alec B. Salakovich, David K. Irick, Jamie B. Coble, and Cyrus Smith:
Development of an accelerated degradation tested for integrated vibration monitoring and online oil analysis of vehicle differential bearings, https://eadn-wc01-4174605.nxedge.io/wp-content/uploads/2019/10/Walker_Cody_Degradation_Testbed.pdf

[25] Łukasz Jedliński, Jacek Caban, Leszek Krzywonos, Sławomir Wierzbicki, František Brumerčík: Application of vibration signal in the diagnosis of IC engine valve clearance, JVE INTERNATIONAL LTD. JOURNAL OF VIBROENGINEERING. FEB 2015, VOLUME 17, ISSUE 1. ISSN 1392-8716

[26] Eric Bechhoefer, Brent Butterworth: A Comprehensive Analysis of the Performance of Gear Fault Detection Algorithms, ANNUAL CONFERENCE OF THE PROGNOSTICS AND HEALTH MANAGEMENT SOCIETY 2019

[27] Wenguang Yang, Dongxiang Jiang and Te Han: Effects of Tooth Breakage Size and Rotational Speed on the Vibration Response of a Planetary Gearbox, Appl. Sci.2017,7(7), 678., https://doi.org/10.3390/app7070678

[28] S. Ciric-Kostic: Vibration and Noise Generation in Gear Units Caused by Gear Teeth Impacts, https://www.scribd.com/document/365528457/Ciric-Kostic-1

[29] T. Geramitcioski, Lj. Trajcevski, V. Mitrevski: Strategy for early gear tooth damage detecting based on statistical parameters of the vibration signal, International Conference on Gears 2010, Volume: VDI-Berichte Nr.2108.2

[30] Younes Kadmiri, Emmanuel Rigaud, Joël Perret-Liaudet, Laurence Vary: Experimental and numerical analysis of automotive gearbox rattle noise. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331 (13), pp.3144- 3157. ff10.1016/j.jsv.2012.02.009ff. ffhal-02068291f

[31] Dasheng Li et al.: Research on Gearbox Fault Diagnosis Based on Vibration Signal Hilbert Demodulation, J. Phys.: Conf. Ser. 1213 052089, 2019

[32] Xu Li et al.: Vibration characteristic analysis of spur gear systems under toot crack or fracture, Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control 2021, Vol. 40(1) 135–153. DOI: 10.1177/1461348419879550

[33] C. Brecher et al.: Benefit of psychoacoustic analysing methods for gear nois investigation, International Conference on Gears, Düsseldorf 2010. https://www.geartechnology.com/articles/20728-benefit-of-psychoachoustic-analyzing-methods-for-gear-noise-investigation

[34] https://www.crfs.com/blog/how-accurate-tdoa-geolocation

[35] https://www.decodio.com/media/downloads/TDOA_Localization_From_Theory_to_the_Field v1-0.pdf

[36] https://gpspatron.com/understanding-gnss-interference-localization-using-tdoa/

[37] Xiping Wen and Jinxia Wang: TDOA Location Accuracy Experiment, 2019 J. Phys.: Conf. Ser. 1237 032031.

[38] Frank Fahy: Foundations of Engineering Acoustics 2001, 10.6 fejezet