

# A mechanikai hullámterjedést befolyásoló tényezők vizsgálata gépjárműkarosszériákban

## Investigation of factors influencing mechanical wave propagation in vehicle bodies

ÁRVAI Tamás<sup>1</sup>, Dr. JÁLICS Károly<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Miskolci Egyetem, Gép és Terméktervezési Intézet, 3515 Miskolc-Egyetemváros, karoly.jalics@uni-miskolc.hu

### Abstract

*The propagation of vibration waves in vehicle bodies originating from a mechanical defect is affected by the structure of the body elements, the applied joint types, techniques and other connecting elements made of elastomeric materials, such as rubber mounts. This publication provides an overview of the effects on mechanical wave propagation in vehicle bodies, which are supported by our own measurements performed on a real vehicle.*

**Keywords:** Wave propagation, vehicle body, mechanical defect, measurement

### Kivonat

*Járműkarosszériákban egy mechanikai hibából kiinduló rezgéshullám terjedésére hatással vannak a karosszériaelemek felépítése, az alkalmazott kötéstípusok, technikák és egyéb elasztomer anyagból készült kapcsolóelemek, mint pl. gumibakok és „szilentek”. Jelen publikáció a karosszériákban történő mechanikai hullámterjedésre gyakorolt hatásokra nyújt kitekintést, amelyeket egy valós járművön elvégzett saját mérésekkel támaszt alá.*

**Kulcsszavak:** hullámterjedés, járműkarosszéria, mechanikai hiba, mérés

## 1. BEVEZETÉS

Gépészeti berendezésekben klasszikus rezgésdiagnosztikai módszereket már régóta alkalmaznak mechanikai hibák helyének és okának feltárására. Ezen módszerek ugyan sok esetben használható eredményeket adnak, sokszor azonban nem képesek a hiba okának, helyének feltárására. Ez elsősorban akkor van így, ha pl. a hiba által keltett akusztikus jel (zaj vagy rezgés) szinképében nem találhatók diszkrét, a meghibásodott alkatrészekre jellemző frekvenciák.

Különösen igaz ez pl. gépjárművek esetén, ahol a rezgés és zaj alapú diagnosztika alkalmazása ez idáig alárendelt szerepet játszik. Ennek leginkább az az oka, hogy egy működő gépjármű rendkívül összetett szerkezet, ahol egyidejűleg sok rezgésgerjesztő mechanizmus van jelen. Ennek megfelelően csak viszonylag kevesen foglalkoztak gépjármű rezgésdiagnosztikával. Néhány szerző munkásságát kiemeljük a továbbiakban.

Bánlaci [1] értekezésében gépjármű hajtáslánc fődarabok rezgés- és zajdiagnosztikai végellenőrző rendszereinek továbbfejlesztésével foglalkozik. Belsőégésű benzinmotorok melegteszti vizsgálatára újramintavételezéses order analízis algoritmuson alapuló zaj- és rezgésdiagnosztikai módszert dolgozott ki. Kimutatta, hogy a jármű belső szögjeladó jele az order analízis során közvetlenül nem alkalmazható, mivel a jeladó szöghelyzetreferenciajele nagy járulékos alapzajt okoz a mérendő hasznos jel mellett.

Puchalski [2] tanulmányában szikragyújtású motor rezgésjeleit tanulmányozta különböző szeleprendszer állapotok mellett. Az általa javasolt diagnosztikai módszer LQ (lower triangular-orthogonal factorisation) és SVD (singular value decomposition) matematikai algoritmusokon alapul. A módszerrel az időjelből szög-újramintavételezés után a frekvenciatartományba történő transzformáció nélkül állíthatók elő statisztikai vektorok, amelyek érzékenyek az adott hibára.

Dömötör [3] dízelmotor és Otto-motorok tesztjét végezte el különböző sebességek és működési feltételek mellett, miközben a rezgésebességet mérte a motorok különböző pontjain 2-300 Hz között.

Mesterséges hibákat idézett elő, úgy, mint túlfeszített ékszíj, eldugult levegőszűrő, elégtelen kenés, eldugult kipufogórendszer. Azt találta, hogy a klasszikus rezgésspektrumok a legtöbb esetben nem adnak értékelhető információt a problémákról, kivéve az eldugult kipufogórendszer esetén, ahol a spektrum változása megfigyelhető.

Modgil és szerzőtársai [4] rezgés mérésen alapuló járműmotor tesztrendszert és hozzá tartozó grafikus felhasználói felületet (GUI) fejlesztettek ki. A mérőrendszer a rezgésjel négyzetes középértékének felhasználásával dönt a motor állapotáról. A diagnosztikai rendszer alapvetően két részből áll: a valós idejű jelfeldolgozás során a motoron elhelyezett rezgésmérő szenzorokkal állapotvizsgálatot végeznek; az utóvizsgálati részben a rezgésadat mélyebb elemzése és mechanikai hibadetektálás lehetséges hagyományos rezgésanalízisekkel.

Közös a szerzők munkásságában, hogy egy bizonyos rezgésforrással (pl. motor) foglalkoztak, és a motorokon, ill. az adott rezgésforráson végeztek méréseket, tudva, hogy a hibát ott kell keresni. Vizsgálataink távlati célja azonban az, hogy nem ismert hibaforrás esetén is megállapítsuk a hiba okát, ill. helyét.

További nehézséget jelent, hogy a gépek, berendezések, valamint a gépjárműkarosszéria is összetett szerkezetek, amelyekben egy inhomogén hullámterjedés megy végbe a mechanikai hiba forrásától a jel mérésének pozíciójáig. Egy karosszériában sok-sok alkatrész kerül összeépítésre, különböző kötési eljárásokkal (ponthegeztés, ragasztás, csavarozás stb.), valamint a mechanikai hullámokat általában gerjesztő egységek (pl. motor, hajtómű, futómű stb.) rugalmas ágyazással vannak a szerkezettől elválasztva, amely ágyazások is befolyásolják a mechanikai hullám terjedését visszaverődések, energiadisszipáció (csillapítás) által.

Jelen publikáció célja tehát az, hogy betekintést nyújtson a mechanikai hullámterjedést befolyásoló tényezőkbe járműkarosszériák esetén, ill. bemutassa azt, hogy ennek milyen hatása lehet a rezgésdiagnosztika eredményeire.

## 2. JÁRMŪKAROSSZÉRIÁK FELÉPÍTÉSE

A rezgésterjedés személygépjárművekben egy nagyon összetett probléma, hiszen minden jármű más felépítésű. A személygépjárművek karosszériájuk felépítésében, felfüggesztésük felépítésében különböző típusúak, és attól függően, milyen megoldást alkalmazott a gyártó, anyagválasztásukban is nagyban eltérőek lehetnek. A karosszéria és felfüggesztés típusától és anyagválasztástól függően különbözhetnek még az alkalmazott kötések is. Fontos tehát részletezni és kategorizálni ezeket.

A létező karosszéria felépítések két fő csoportja:

- a vázra szerelt karosszéria,
- az „unibody”, vagyis egybe épített önhordó karosszéria.

A vázra szerelt karosszériás típuson belül több alcsoport jelenik meg, például a létrakeretes, az X-keretes, a padlókeretes, és a gerinccső kivitel.

Ezeknél tipikusan az alsó vázszerkezet hegesztett acélszerkezet. A vázszerkezet profiljaiban eltérő lehet, tehát például bizonyos esetekben zártszelvényű, C szelvényű, kalap szelvényű is lehet. Az alsó vázszerkezethez a felső karosszéria csavarozva van, gumibakokkal csillapítva, így a hullámterjedés itt általában ezeken a csatlakozási pontokon át halad. Gépjármű típusától függően változó felépítmények is lehetnek. Pickup terepjáróknál például hátsó „kádás” felépítmény, vagy zárt egyterű felépítmények is léteznek. Különböző gépjárműveknél más mennyiségű felfüggesztő csavarral van rögzítve a felső bódé.

Az önhordó karosszériák általában ponthegeztett, formára préselt lemezalkatrészekből egységet alkotó, egybe épített vázszerkezet és bódé.

Fontos megemlíteni, hogy anyaghasználatukban mindkét karosszériatípus nagyon eltérő lehet. A vázra szerelt esetében az alsó váz általában acélszerkezet, a felépítményben viszont már nagyobb variáció jelenik meg. Az önhordó karosszériáknál is megjelenik ez, viszont ott attól függően, hogy milyen szerepet tölt be egy elem a nagy összképben, más anyagból készülhet. Például más anyagból készülnek a feszültséggyűjtő pontok, az ütközési zónák, és az utasok biztonságáért felelős fő egység.

Összességében tehát a fő kötések a ponthegeztések és csavarkötések, ezek a leggyakoribbak. Ezekon túl megjelennek a ragasztások, például külső panelek rögzítésére, ablakok rögzítésére stb. Kivételes esetekben alkalmazott a szegecseles is, viszont ez relatíve ritka.

Természetesen a két kategória nem fedi le az összes személygépjármű karosszéria típust. Léteznek teljesen alumínium karosszériás járművek, amelyeknél a szegecseles és ragasztás dominál, illetve olyan vázak, amelyek csőszerkezetűek és a külső karosszéria egy fix vázra van „rárakva”, a váz közel hasonló a bódé sziluettjéhez.

A járművek felfüggesztése is nagy szerepet tölt be a hullámterjedésben. Attól függően, hogy milyen típusú, más és más mennyiségű felfogatási ponton csatlakoznak a karosszériához. Megemlíthető felfüggesztéstípusok például a McPherson, ahol a kerékfelfüggesztés egy rugóstaggal és egy keresztlengőkarral történik, illetve a kettős keresztlengőkaros felfüggesztés. Ezek a leggyakoribb felfüggesztés típusok első kerekeknél, hátsó kerekeknél a régebbi járművekben alkalmazott hátsó hidas megoldást az újabb autókban különálló hátsó felfüggesztésre cserélték a tervezők.

A felfüggesztések felfogatásai általában csavarkötésekkel, gumi csillapítókkal (szilentekekkel) történik. A gumi szilentekek is eltérőek lehetnek kialakításukban, így hullámterjedésükben is.

Fontos hullámterjedést befolyásoló elemek a motorbakok. Gépjárműtípustól függően lehetnek például gumi-fém bakok, hidraulikus/hidrocsapágyas bakok, illetve elektronikusan vezérelt, aktív motorbakok.

### 3. AZ ELVÉGZETT MÉRÉSEK ALAPVE

Egy jármű üzemelése közben folyamatosan különböző gerjesztő hatások lépnek fel, például a gumibroncsok és az útfelület érintkezéséből, valamint a belső égésű motor működéséből eredően. Ezek a hatások meghatározott terjedési útvonalakon keresztül jutnak el a karosszériához, majd az utastérben zajként és rezgésként válnak érzékelhetővé. A normál működésből származó hangok- és rezgéseken kívül a meghibásodásokból fakadó jelenségek is hasonlóan terjednek. Ezért a csatlakozó elemek azonosítása és vizsgálata rendkívüli jelentőségű az energiaátadás vonatkozásában. Egy gépjármű esetében az alábbi főbb átviteli helyek különíthetők el.

Rezgésátvitel szempontjából:

- a futómű és a karosszéria kapcsolódási pontjai (rugók, lengéscsillapítók, lengőkarok szilentblokkjai),
- a motor-sebességváltó egység rögzítési pontjai (kialakítástól függően 3–4 helyen),
- a kipufogórendszer felfüggesztési elemei.

Léghangátvitel szempontjából:

- motorzaj (a motortérből a tűzfalon és a szélvédőn keresztül),
- szívási zaj (a levegőszűrő térségében),
- kipufogási zaj (a szabadba távozó égéstermékneként).

Léteznek olyan mérési eljárások és azt követő elemzések, amelyek alkalmasak annak megállapítására, hogy egy adott átviteli út milyen arányban járul hozzá egy kiválasztott mérési ponton tapasztalható zaj- vagy rezgésszinthez. Az ilyen vizsgálat meglehetősen időigényes, mivel számos mérést foglal magában üzemi állapotban, illetve mesterséges gerjesztés alkalmazásával (például impulzuskalapács használatával). Ezt a vizsgálatot összefoglaló néven Transfer Path Analysis-nak (TPA) hívják [5].

A folyamat egyik meghatározó része a karosszéria átviteli jellemzőinek feltárása, amelyet általában impulzuskalapácsos gerjesztéssel hajtanak végre. A mesterséges gerjesztést azokon a csatlakozási pontokon kell alkalmazni, ahol a rezgési energia a szerkezetbe jut. Az adott ponton három, egymásra merőleges irányban történik a gerjesztés, miközben az impulzuskalapács rögzíti az ütéskor fellépő erő nagyságát. A létrehozott erőhatás következtében a kiválasztott mérési pontra – a karosszéria átviteli sajátosságainak megfelelően – akusztikai energia jut el. Ezt a mérési ponton elhelyezett gyorsulásérzékelő vagy mikrofon érzékeli és rögzíti. Az alkalmazott gerjesztőerő és a rendszer válaszában hányadosa adja az átviteli függvényt, azaz a H-val jelölt Frequency Response Functiont (FRF), amely számításának egy módját az alábbi összefüggés mutatja:

$$H(\omega) = \frac{a(\omega)}{F(\omega)} = \frac{a(\omega) \cdot a^*(\omega)}{F(\omega) \cdot a^*(\omega)}$$

ahol  $a(\omega)$  a rezgési gyorsulás spektruma,  $F(\omega)$  a gerjesztőerő spektruma,  $a^*(\omega)$  a rezgési gyorsulás spektrumának komplex konjugáltja és  $F^*(\omega)$  a gerjesztőerő spektrumának komplex konjugáltja. Alapesetben  $H(\omega)$  a rezgési gyorsulás és a gerjesztőerő hányadosa. Mérések során azonban a rezgési gyorsulás autoteljesítmény-spektruma ( $a(\omega) \cdot a^*(\omega)$ ) és a gerjesztőerő és a rezgési gyorsulás kereszteljesítmény-spektrumának ( $F(\omega) \cdot a^*(\omega)$ ) hányadosából képezzük [6].

A további, elsősorban diagnosztikai jellegű mérésekhez nem indokolt a teljes TPA mérési és elemzési eljárás lefolytatása. Ilyen esetben elegendő annak ellenőrzése, hogy a karosszérián a kijelölt pontokon elhelyezhetők-e gyorsulásérzékelők. Ehhez csupán az FRF meghatározása szükséges a motor rögzítési pontjai

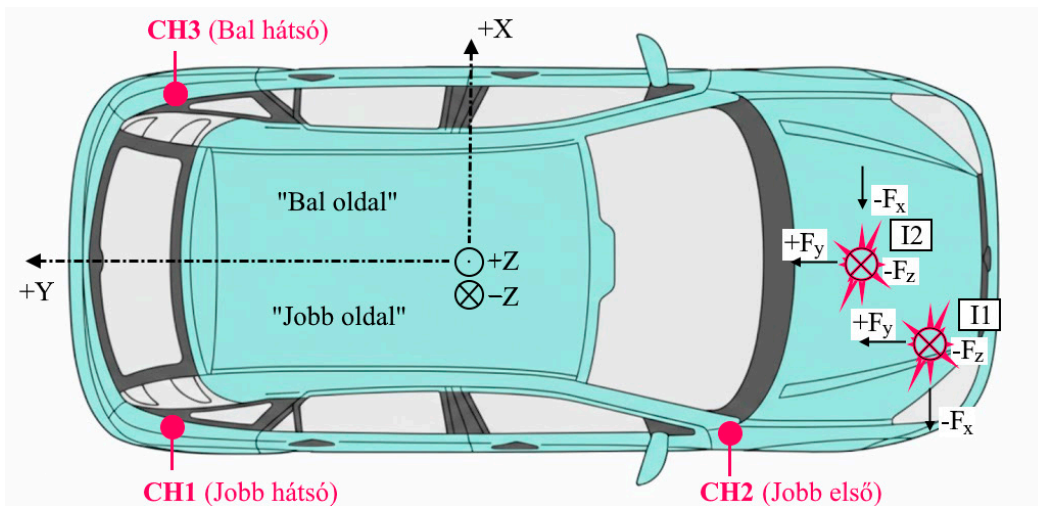
és a kiválasztott értékelési helyek között. Az így nyert adatok alapján megítélhető, hogy a motor és a vizsgált pontok között megfelelő mértékű-e a gerjesztés továbbítása.

A mérések során gerjesztési pontként a motorfelfüggesztéseket választottuk, mivel a vizsgált jármű elsőkerék-hajtású kialakítású. A hajtáslánc esetleges hibáiból származó zaj- és rezgésjelenségek ezen a rögzítési rendszeren keresztül jutnak el a karosszériához, így ezen az úton biztosított az energia továbbterjedése a jármű szerkezetébe.

#### 4. AZ ELVÉGZETT MÉRÉSEK FELÉPÍTÉSE

Jelen publikációban egy első generációs Ford Focus járművön vizsgáltuk a karosszéria rezgésátviteli képességét. A kísérletek során az alkalmazott 3 db egytengelyű rezgésérzékelőt (gyorsulásérzékelő, Brüel&Kjaer 4382) helyeztünk el a karosszérián, amelyeket a mérések során CH1, CH2 és CH3 jelöléssel láttunk el. Az érzékelők helyzetét a karosszérián az 1. ábra mutatja. Az érzékelők helyzetét úgy választottuk, hogy azokat a karosszéria megbontása nélkül, kényelmesen (gondolva a későbbi könnyű alkalmazásra) fel lehessen helyezni. Így esett a választás a jobb első, bal hátsó és jobb hátsó sárvédő lemezre. Ezekre a helyekre az egyszerű felhelyezhetőség miatt az érzékelőket mágnessel rögzítettük. A mágnesek frekvenciaátviteli korlátozott, kb. 6-7 kHz tartományig alkalmasak a mérések elvégzésére, ezt a kiértékelések során figyelembe kell venni. A bemutatott mérések kiértékelése 1000 Hz -ig történt, ezért a mágnesek rezgésátviteli csökkentő hatását elhanyagoltuk. A gerjesztés hatására adott válaszokat a gyorsulásérzékelők a felhelyezési pontra érvényes felületi normális irányába mérték. A mérések során a mintavételezési frekvencia 16384 Hz volt, amellyel a Shannon-Nyquist mintavételezési elv alapján az alkalmazott adatgyűjtő 6400 Hz-ig teszi lehetővé a frekvenciaanalízist. Mivel az alkalmazott szenzorok mérési tartománya az adatlapjuk szerint 8400 Hz-ig terjed, ezért a választott mérési tartomány bőven a szenzorok képességein belülre esik, ill. a rögzítő mágnesek frekvenciaátvitelét is figyelembe véve a beállítás megfelelőnek tekinthető. A mérésekhez a frekvenciafelbontást 1 Hz-re állítottuk be, amellyel egy mintavétel ideje 1 s-re adódik. Az impulzuskalapácsos gerjesztés alkalmazásakor egymás után 4 ütést hajtottunk végre (mintavétel 4 -szer), és az ütésekre adott válaszok átlagolása történt.

A gerjesztés helyei a motorblokkon voltak, a vízpumpa rögzítési pontja és az olajteknő, a járműhöz rendelt koordináta rendszer szerint -X, +Y, és -Z irányokban. Ezek elhelyezkedését felülnézetben szintén az 1. ábra mutatja. Azt próbáltuk ezzel szimulálni, hogy valami mechanikai károsodás jelenik meg a motorban és az ez által előidézett mechanikai hullámok hogyan továbbítódnak a motortömbön, a motor rugalmas felfüggesztésén át, a karosszéria-elemeken keresztül a kijelölt mérési pontokig. A cél tehát, hogy megmutassuk, hogy az alkalmazott mérési pontokba megfelelő intenzitással eljut a jármű motortér környezetéből származó testhang gerjesztés.



1. ábra. A mérési és gerjesztési pontok elhelyezése a karosszérián

#### 5. A MÉRÉSI EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA

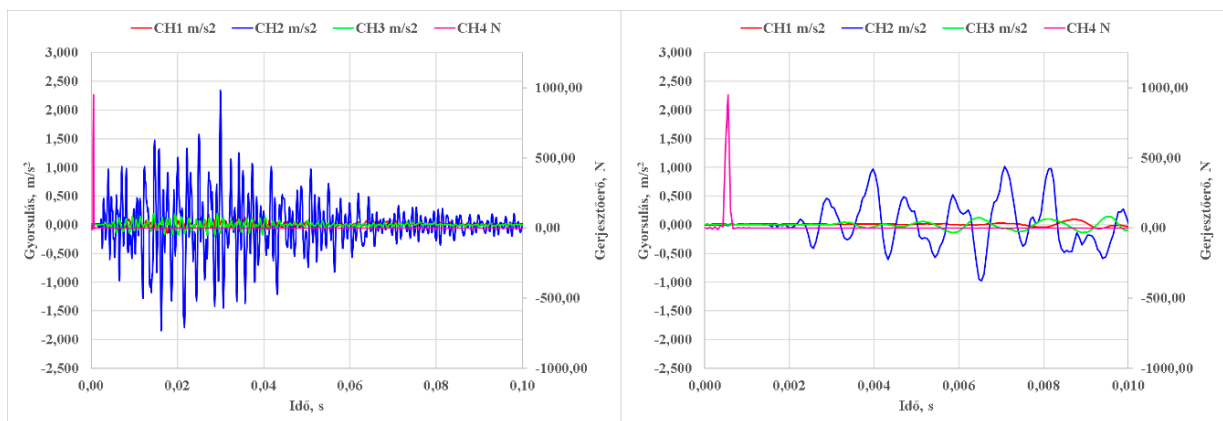
A kiértékeléshez először vizsgáljuk a gyorsulásérzékelők által regisztrált időjeleket a gerjesztés után (2. ábra). Az ábrából látható, hogy az időjelek amplitúdói eltérőek. A CH2 -vel jelölt helyen (jobb első sárvédő) mért értékek jóval magasabbak a másik kettőnél. Ez érthető, hiszen a gerjesztési helyhez ez a pozíció van a

legközelebb, tehát itt csillapodik a rezgési energia a legkevésbé. Másrészt az is látható, hogy a CH2 pozícióba lényegesen hamarabb érkezik a gerjesztéstől kiinduló hullámcsomag (2. ábra kiemelés), mint a további mérési pontokba. A beérkezési időkülönbségek ismeretében az úgynevezett Time Delay of Arrival (TDoA) módszer alkalmazásával meghatározható egy hiba pozíciója a karosszériában [7]. Természetesen ehhez még a bevezetésben is tárgyalt befolyásoló tényezők vizsgálatára is szükség van.

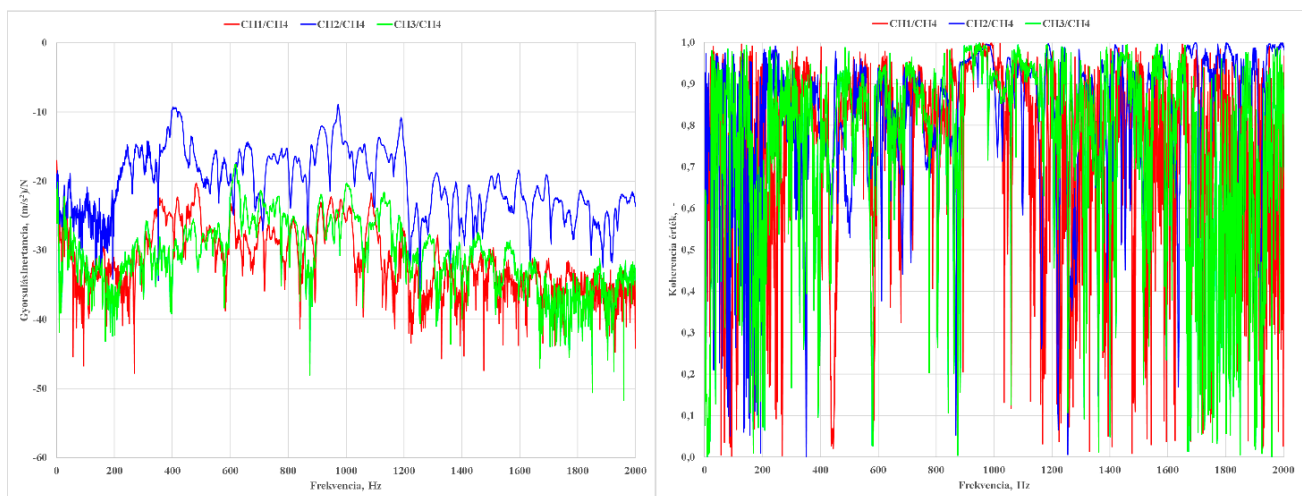
A frekvencia válaszfüggvények trendjének vizsgálatából az látszik (3. ábra), hogy függetlenül a frekvenciától a CH2-be történő átvitel a legerősebb, a piros görbe értékei a legmagasabbak. Ugyanakkor azt is elmondhatjuk, hogy a CH1 és CH3 pozíciókban mért válaszfüggvények amplitúdói ugyan kisebbek, de a görbék „elzajosodása” magasabb frekvenciákon nem rosszabb, mint a CH2 esetén. Ezt a jobb oldali ábrán látható koherenciafüggvények is mutatják, amelyek gyakorlatilag nagyon hasonlóak. Ez gyakorlatilag azt mondatja velünk, hogy a motorból induló hullámcsomag terjedése még a motortartó elasztomer bakokon keresztül sem jelent olyan mértékű energia csökkenést a hullámban, ami megakadályozná a karosszériaelemen elhelyezett gyorsulásérzékelő használatát diagnosztikai céllal.

Kiterjesztve a frekvenciatartományt azt is láthatjuk, hogy az átvitel erőssége 1000 Hz felett romlik. Ez a hatás némileg erősebb az Y és Z irányú gerjesztések esetén, ahol 1000 Hz fölött látványosan csökkennek az amplitúdók. Ez a jövőben tervezett vizsgálatok szempontjából nem jelent problémát, mivel egy járműben a rezgésjelenségek zöme 1000 Hz alatt történik.

FRF görbék összevetéséből elmondható, hogy minél közelebb van a gerjesztés (a hiba) a mérési ponthoz, annál stabilabb az FRF görbe jellege a vizsgált frekvencia tartományban.



2. ábra. A gerjesztés után a gyorsulásérzékelőkbe beérkező időjelek (CH1: zöld; CH2: piros; CH3: kék; CH4: lila): bal 0,1 s-ig; jobb: nagyítás 0,01 s-ig



3. ábra. A frekvencia válaszfüggvények a három mérési pontban (CH1: zöld; CH2: piros; CH3: kék) a bal oldalon és a hozzájuk tartozó koherenciafüggvények a jobb oldalon

## 6. KÖVETKEZTETÉSEK

Az átviteli utak csillapításainak figyelembevételével a kialakuló rezgésállapot a gerjesztés helyétől és irányától függ. A járműszerkezetben a rezgések minden irányban közel egyformán terjednek, az FRF nem mutat jelentős gerjesztési iránytól függő eltéréseket. Amennyiben feltételezzük, hogy a gerjesztés a jármű egy bizonyos részéről érkezik, akkor nyilvánvalóan az annak közelében elhelyezett szenzor a legalkalmasabb ezeknek a rezgéseknek a felvételére (most pl. a CH2). A vizsgálataink során a többi csatorna FRF görbéje egy nagyságrenddel ez alá esik, habár ez nem feltétlenül jelenti azt, hogy diagnosztikai céllal nem használhatók.

Az egyes szenzorokra levetítve a két gerjesztési pont között túlzott amplitúdó különbség 1500 Hz-ig nincs, emiatt feltételezhető, hogy a motor egyik oldalán vagy ha úgy tetszik, a jármű egyik felén mérni a rezgésyorsulást elegendő. Ezt támasztja alá az is, hogy a bal hátsó és jobb hátsó szenzorpozíciókban a rezgésátvitel a jármű elejétől nagyon hasonlóan megy végbe. Mindazonáltal ez a változás nem tekinthető olyan mértékűnek, amely egy komoly meghibásodás detektálást megakadályozná.

Összességében megállapítható, hogy a járműszerkezethez rögzített koordináta-rendszerben értelmezett X, Y és Z irányú gerjesztések minden irányban közel azonos átviteli jellemzőkkel terjednek. A szenzorok elhelyezésének megválasztásakor a gerjesztés helyét célszerű nagyobb súllyal figyelembe venni, mivel ez akár nagyságrendi amplitúdókülönbséget is eredményezhet. A vizsgálat során feltételeztük, hogy a detektálandó abnormális gerjesztés a motortér környezetéből származik. Ebben az esetben a motorhoz legközelebb elhelyezett CH2 érzékelő biztosítja a legkedvezőbb átvitelt. Ez azonban nem jelenti azt, hogy a hátsó rezgésyorsulás-szenzorok ne lennének alkalmasak hibadetektálásra. Ezeknél a mérési pontoknál a gerjeszthető frekvenciatartomány korlátaival (a hiba helyétől függően legfeljebb kb. 2 kHz) kell számolni, ugyanakkor súlyos meghibásodások észlelésére megfelelőek.

Mind keresztirányban, mind hosszirányban kedvezőnek tekinthető a rezgésátvitel. Az eredmények alapján elméletileg elegendő lenne a jármű egyik oldalán mérést végezni a megfelelő diagnosztikához, ez azonban nem javasolt, mivel a rezgésyorsulás-szenzor pozíciójából adódó jel-zaj viszony segítségével következtetni lehet a meghibásodott elem helyére.

## IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Bánlaci P.: Gépjármű hajtáslánc fődarabok rezgés- és zajdiagnosztikai végellenőrző rendszereinek továbbfejlesztése, BME KJK Gépjárművek és Járműgyártás Tanszék, Budapest 2014
- [2] Puchalski A.: 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>
- [3] Dömötör F., Szabó J.Z.: 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
- [4] Modgil G., Orsagh R.F., Roemer M.J.: 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>
- [5] van der Seijs M.V., de Klerk D., Rixen D.J.: General framework for transfer path analysis: History, theory and classification of techniques, Mechanical Systems and Signal Processing, Volumes 68-69, 2016, p.217-244, ISSN 0888-3270, <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.08.004>
- [6] Heylen W., Lammens S., Sas P.: Modal Analysis Theory and Testing, Katholieke Universiteit Leuven, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Division of Production Engineering, Machine Design and Automation, 1998, ISBN 90-73802-61-X
- [7] Jálícs K., Kriston J.B.: Investigation of the time delay of arrival (tdoa) method for diagnostic purposes on motor vehicles, GÉP 2024/3-4, <https://doi.org/10.70750/GEP.2024.3-4.12>