

Rezgésdiagnosztikai módszerek elemzése IoT hajtóművek fejlesztésének megvalósításához

Analysis of vibration diagnostic methods for the development of IoT gearboxes

LISZI Luca Éva¹, szakmai asszisztens, Dr. KOCSISNÉ PFEIFER Éva¹, egyetemi adjunktus

liszi.luca.eva@mk.uni-pannon.hu

¹Pannon Egyetem, Mérnöki Kar, Géptan Intézeti Tanszék
H-8200 Veszprém, Egyetem utca 10, Magyarország, Tel.: +36-88-624-462, info@uni-pannon.hu
<https://uni-pannon.hu/>

Abstract

During the operation of gear engines, the occurring vibrations not only generate noise but also have a significant impact on the performance and service life of the engine. The aim of the article is to review the dynamic effects that excite vibrations and to present the most commonly-used vibration diagnostic methods for both conventional and planetary gear systems. In IoT-based gear drives that facilitate vibration diagnostics, the type of sensors fundamentally determines the reliability of condition monitoring systems. Another objective of the article is to establish a basis for selecting the optimal type of sensor applicable to the vibration diagnostic system of an IoT-based test bench to be implemented a research project.

Keywords: gear, planetary gear, vibration, IoT-based engine, vibration monitoring sensor

Kivonat

A fogaskerekes hajtóművek működése közben fellépő rezgések a zajkeltés mellett jelentős hatással vannak a hajtómű teljesítményére és élettartamára is. A cikk célja a rezgéseket gerjesztő dinamikai hatások áttekintése és a főbb rezgésdiagnosztikai módszerek bemutatása mind a hagyományos, mind a bolygóműves hajtórendszerek esetében. A rezgésdiagnosztikát megkönnyítő IoT-alapú hajtóművekben az érzékelők megfelelő kiválasztása alapvetően meghatározza az állapotfelügyeleti rendszerek megbízhatóságát. A cikk további célja egy kutatás keretében megvalósítandó IoT-alapú tesztpad rezgésdiagnosztikai rendszeréhez alkalmazható optimális szenzortípus kiválasztásának megalapozása.

Kulcsszavak: fogaskerék, bolygómű, rezgés, IoT hajtómű, rezgésdiagnosztikai szenzor

1. BEVEZETÉS

A fogaskerekes hajtóművek a gépészeti rendszerek egyik legelterjedtebb és legfontosabb elemei, mivel hatékonyan képesek erő-, nyomaték- és energiaátvitelre, miközben nagy terhelések mellett is megbízhatóan működnek. A széles körű felhasználás következtében a hajtóművek üzembiztonsága, élettartama és zaj-, illetve rezgésviselkedésének megfigyelése kiemelt mérnöki jelentőséggel bír.

A fogaskerekek működése során fellépő rezgések nem csupán akusztikai gondokat okozhatnak, hanem jelentős hatással lehetnek a hajtómű megbízhatóságára, teljesítményére és élettartamára is. A dinamikus terhelések gyorsítják a fogfelületek kopását, elősegítik a repedések kialakulását, valamint növelik a csapágyak és egyéb szerkezeti elemek meghibásodásának kockázatát [1]. Ennek következtében a rezgésjelenségek vizsgálata nemcsak a zajcsökkentés szempontjából fontos, hanem alapvető szerepet játszik a hajtómű megfelelő teljesítményének fenntartásában. A modern IoT-alapú („Internet of Things”) hajtóművek esetében a rezgésadatok valós idejű gyűjtése és feldolgozása lehetővé teszi a diagnosztikát, a megelőző karbantartást és a teljesítményromlás korai felismerését.

Ismertetésre kerülnek a főbb gerjesztési okok a hagyományos és bolygóműves hajtóművek esetén, a mozgás leírására leggyakrabban alkalmazott numerikus módszerek, valamint az IoT-alapú rendszerekben használt rezgésdiagnosztikai szenzorok több tudományos cikk feldolgozása alapján.

2. A LEGGYAKORIBB REZGÉST KIVÁLTÓ HATÁSOK ÉS DIAGNOSZTIKAI MÓDSZEREIK

2.1. A fogaskerekes hajtóművek dinamikájából adódó rezgések

A fogaskerekes hajtóművek dinamikai viselkedése alapvetően meghatározza a rendszer rezgési jellemzőit. A hajtómű nem merev mechanikai rendszerként viselkedik, hanem rugalmas elemek csoportjaként, amelyben a fogaskerek, tengelyek, csapágyak és a hajtóműház egyaránt hozzájárulnak a dinamikai válasz kialakulásához. A forgómozgás során fellépő időben változó erőhatások következtében a rendszer sajátfrekvenciái és csillapítási tulajdonságai meghatározó szerepet játszanak abban, hogy a rezgések milyen amplitúdóval és frekvenciatartományban jelennek meg [2].

A hajtóművek egyik legjelentősebb dinamikai sajátossága a fogaskerék-kapcsolódási merevség időbeli változása. A fogak kapcsolódása során nem állandó számú fogpár vesz részt a terhelésátvitelben, így a fogkapcsolati merevség periodikusan ingadozik. Ez az időben változó merevség („Time-Varying Mesh Stiffness” – TVMS) nem külső erőként, hanem a rendszer egyik paraméterének periodikus változásaként hat, amely a klasszikus rezgéstani értelemben változó gerjesztést hoz létre. Különösen kritikus jelenség, amikor a fogaskerék kapcsolódási frekvencia vagy annak többszöröse egybeesik a rendszer valamely sajátfrekvenciájával, ami dinamikus instabilitáshoz vagy rezonanciaszerű állapothoz vezethet. A dinamikai modellezés lehetővé teszi a kritikus fordulatszám-tartományok előrejelzését, a rezonanciák elkerülését, valamint a hajtóművek tervezésének optimalizálását [3].

2.2. Terhelésből és geometriai hibákból adódó rezgések

A fogaskerekes hajtóművek rezgéseit gerjesztő hatások közül az egyik legdominánsabb tényező a terhelés mértéke. Valós ipari körülmények között a hajtóművek nem konstans terheléssel működnek, hanem időben változó terhelés- és sebességprofiloknak vannak kitéve, ezért az ipari rezgésdiagnosztikában idő-frekvencia elemzési technikákat is alkalmaznak („Short Time Fourier Transform” – STFT és Smoothed Wigner-Ville Disztribúció). Chaari F., Bartelmus W., Zimroz R., Fakhfakh T. és Haddar M. 2012-es tanulmányában az amplitúdómoduláció (AM) és frekvenciamoduláció (FM) modellt javasolják a hatások pontosabb leírására [4]. Ezek a numerikus módszerek lehetővé teszik az amplitúdó- és frekvenciamodulációk azonosítását és elkülönítését, így a szerzők képesek megkülönböztetni egymástól a rezgéseket okozó hatásokat.

A forgó gépek sajátfrekvenciája által gerjesztett vibráció mellett számos olyan rezgési probléma is jelentkezhet, amelyek alapvetően a mechanikai komponensek hibáiból, kopásából vagy szerelési pontatlanságokból erednek. A fogaskerekes hajtóműveknél általánosan megjelenő probléma a gödrösödés, ami az üzemi működés periodikus terhelésének hatására alakul ki a fogak felületén. A gödrösödés gerjesztő hatására rezgések lépnek fel a hajtóművekben, amelyek szintén időben változó kapcsolódási merevséget eredményeznek. Ezeknek a mozgásoknak a leírására az úgynevezett TVMS-modell alkalmazható, amit Liang, X., Zhang, H., Liu, L. és Zuo, M. J. 2016-os tanulmányában használt különböző mértékben gödrösödött hajtásrendszerek dinamikai vizsgálatához [5]. A modellben a gödrösödést lokális merevségcsökkenésként kell beépíteni a fogkapcsolatba, majd megvizsgálni az időben változó fogazati merevséget és ezen keresztül a fogaskerék dinamikáját.

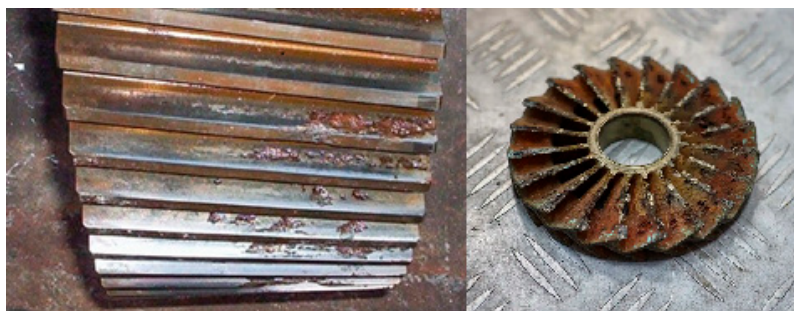
A fogaskerekes hajtóműveknél gyakran előforduló jelenség a foggyökrepedés, ami csökkenti a fog hajlítási merevségét.

A csökkenés következtében a TVMS-görbe hirtelen esik, a periodicitást egy impulzusszerű merevségmoduláció töri meg. A „megrogyás” következtében a rezgés egyre nagyobb és szabálytalanabb lesz.

Chen Z. és Shao Y. 2011-es tanulmányában [6] a repedést tartalmazó fog rugalmas deformációjának meghatározását az úgynevezett végeselem-módszer („Finite Element Analysis” – FEA) segítségével valósította meg. Ez egy olyan numerikus eljárás, ami a valós fog alakját sok kis elemmé bontja, és mindegyik elemén kiszámolja a feszültséget és elmozdulást a terhelés alatt.

A szilárdtest mechanika egyensúlyi egyenleteinek és a lineáris rugalmassági anyagtörvénynek alkalmazásával a kontinuum probléma algebrai egyenletrendszerre, alakítása után a merevségi mátrix tartalmazza a geometria és az anyagtulajdonságok hatását. Ha a fogban repedés van, a FEA-analízis megmutatja, hogyan változik a rugalmasság és a terhelés viselkedése a repedés jelenlétében. A szerzők a fogra ható erő hatására számított elmozdulásból határozták meg a fogkapcsolati merevséget.

A fogaskerekek kenőolajában, ha a fogak érintkezésekor a nyomás hirtelen lecsökken, gőzbuborékok képződhetnek. Amikor a fog újra nagyobb nyomás alá kerül, ezek a buborékok hirtelen összeomlanak, ami további vibrációt, kopást és zajt okoz a rendszerben. A nemlineáris hatású jelenséget kavitációnak nevezzük, ami komplex módon befolyásolja a hajtóművek rezgéseit. A kavitáció által okozott dinamikai változások leírására a végeselem-módszer mellett CFD („Computational Fluid Dynamics” – CFD) szimulációs modelleket használnak. Ouyang T., Wang J., Mo X. és Li Y. 2023-as tanulmányában a Rayleigh–Plesset buborékdinamikai egyenlettel követik le a kavitáció által okozott hatásokat. Ez egy olyan nemlineáris differenciálegyenlet, amely a folyadékban lévő gőzbuborék sugarának időbeli változását írja le nyomásváltozás hatására [7].



1. ábra. A gödrösödés és a kavitáció jelensége miatt károsodott alkatrészek [8]

3. BOLYGÓMŰVEK EGYEDI REZGÉSDIAGNOSZTIKÁJA

3.1. A bolygóművek felépítése és dinamikája

A bolygóművek olyan összetett fogaskerekes hajtóműrendszerek, amelyekben több fogaskerék egy közös tengelyrendszer körül „keringő” mozgást végez. A keringő elemek a bolygókerékek, amelyek napkerék körüli pályáját a gyűrűkerék határol. Jellegzetességük a bonyolult felépítés, emiatt a terhelések több ágra történő megosztása, amely kedvezően hat az élettartamra és a teherbírásra. Hatékony energiaátviteli képességük miatt leggyakrabban váltórendszerekbe építve alkalmazzák ezt a kialakítást. A bolygóművek kinematikai viselkedése lényegesen összetettebb a hagyományos tengelyes fogaskerekes rendszerekhez képest, mivel a bolygókerékek nemcsak saját tengelyük körül forognak, hanem a napkerék körül is keringenek. A precízebb szerkezet következtében a rezgéseket kiváltó lehetséges források száma is megnövekszik, nagyobb a hibalehetőség.

3.2. A bolygóművekben fellépő rezgéseket kiváltó tényezők és rezgésdiagnosztikai módszerek

A fogaskerekes hajtóművekre általánosan jellemző, rezgéseket gerjesztő hatások a bolygóműves hajtóművekre szintén vonatkoznak. A bolygóművek bonyolultabb szerkezetéből adódóan azonban felléphetnek további egyedi gerjesztő hatások is. A rendszerben az elemek külön-külön is mozoghatnak, ezért a hajtómű sajátfrekvenciája több különböző mozgásból adódó gerjesztés hatására módosulhat.

Az egyik szerkezeti sajátosságból adódó tényező a bolygóművek ciklikus szimmetriája, ami azt jelenti, hogy a szerkezet invariáns adott szögelfordulásra. Lin és Parker 1999-es tanulmánya [9] bizonyítja, hogy az ideális bolygóművek ciklikus szimmetriája alapján meghatározhatók a rendszer szabadrezgési tulajdonságai. A szimmetria következtében a sajátrezgések móduscsaládokra bonthatók, és több sajátfrekvencia degenerált módon jelenik meg, vagyis több különböző rezgési alak tartozik azonos frekvenciához. A bolygók rezgései fáziseltolással kapcsolódnak egymáshoz, ami körkörös terjedő hullámszerű módusokat eredményez.

Kim J. S., Park N., és Lee H. 2016-os tanulmánya [10] alapján a bolygóművek dinamikai modellezésére és rezgési természetének leírására az egyik leggyakrabban használt módszer a transzfer mátrix módszer („Transfer Matrix Method” – TMM).

A modell lényege, hogy a teljes rendszert sorba kapcsolt elemeire bontjuk, amelyekhez külön-külön lokális transzfer mátrixokat rendelünk, ezek írják le, hogyan alakul át az állapotvektor az elem bemenetéről a kimenetére. A lokális mátrixok összeszorzásával áll elő a globális transzfer mátrix, amely a rendszer bemeneti és kimeneti állapotát közvetlenül összekapcsolja. A megfelelő határfeltételek alkalmazása után ebből a globális

mátrixból meghatározhatók a rendszer sajátfrekvenciái, rezgési módusai és dinamikai jellemzői. A FEA módszerrel ellentétben a TMM módszer komplexitása nem nő több bolygó- vagy csomópont esetén sem, ezért egy könnyebben kezelhető numerikus eljárásnak tekinthető bolygóművek esetén.

A bolygóművek összetett szerkezete nagymértékben függ az üzemi paraméterektől, többek között a forgási sebességtől, fogházagtól, csillapítástól. A paraméterek megváltoztatásával felléphet számos nemlineáris behatás is, amik nagymértékben megnehezítik a rezgésdiagnosztikát. Ilyen nemlineáris tényezők meghatározását vizsgálta Xiang L., Gao N. és Hu, A. 2017-es cikkében [11]. A bolygóművek vibrációs jelenségei lehetnek periodikus, kvázi-periodikus és kaotikus rezgések is. Ezeket a rezgéstípusokat a szerzők a Lyapunov-exponens („Largest Lyapunov Exponent” – LLE) segítségével tudták meghatározni. A Lyapunov-exponens egy olyan matematikában és a fizikában használt mennyiség, amely azt méri, hogy egy dinamikai rendszer két egymáshoz közeli pályája milyen ütemben távolodik (divergál) vagy közeledik (konvergál) az idő múlásával.

Ha az érték pozitív, akkor a pályák távolodnak, ami kaotikus mozgást jelez. Gao B., Wang Y. és Yu, G. 2023-as cikkében hívják fel a figyelmet, hogy a gyakorlati alkalmazások dinamikai modellezései során figyelembe kell venni a Coriolis-, centrifugális- és egyéb tehetetlenségi erők jelentős behatását, ugyanis a bolygóműveket leggyakrabban járművek energiaátviteli rendszerében alkalmazzák [12].

4. IOT HAJTÓMŰVEK REZGÉSIDIAGNOSZTIKÁJÁBAN ALKALMAZOTT SZENZOROK

Az IoT hajtómű egy olyan korszerű erőátviteli rendszer, amely a hagyományos mechanikai működést digitális állapotfelügyeleti megoldásokkal egészíti ki annak érdekében, hogy folyamatos monitorozást és előrejelző karbantartást tegyen lehetővé. A hajtómű alapvető feladata a bemenő fordulatszám és nyomaték átalakítása a kívánt kimeneti paraméterekre. Az IoT-megoldás esetében ezekhez az elemekhez szenzorokat és adatgyűjtő egységet is integrálnak.

A rendszer működése során a beépített érzékelők folyamatosan mérik az üzemi jellemzőket, majd az adatokat egy helyi előfeldolgozás után a hálózaton keresztül egy központi vagy felhőalapú rendszerbe továbbítják. Az ipari és az egyetemi környezetben alkalmazott érzékelők típusa részben eltér a mérési cél, a költségkeret és a kutatás célja szerint. A rezgésdiagnosztikában a harmonikus rezgőmozgás leírását a gyorsító erők vizsgálatára vezetik vissza, ami a dinamika alapegyenletére épül. Ha a szenzor gyorsulást mér, a kapott jel közvetlenül reprezentálja a rendszer inerciahatását, vagyis azt az erőt, amellyel a tömeg ellenáll a rezgésnek. Ez lehetővé teszi, hogy a mért gyorsulás alapján a struktúra dinamikai egyenleteiben, azaz

$$F(t) = mx'' + cx' + kx \quad (1)$$

alakban a terhelés időbeli változása egyenlő legyen az inerciális erő (mx''), a csillapító erő (cx') és rugalmasság (kx) összegével.

Az ipari gyakorlatban legelterjedtebbek a piezoelektromos gyorsulásérzékelők, különösen az IEPE („Integrated Electronics Piezo-Electric” – IEPE) kivitelű szenzorok. Ezek nagy dinamikatartománnyal, széles frekvenciasávval (akár több tíz kHz-ig) és jó jel-zaj viszonytal rendelkeznek, így alkalmasak csapágyhibák, fogaskerék-sérülések és kiegyensúlyozatlanság kimutatására.

A fogaskerék-diagnosztikai szakirodalomban, az ezekhez hasonlóan nagy felbontású gyorsulásmérési eszközöket részesítik előnyben a terhelés periodicitásának AM-FM vizsgálatához [4]. Hasonlóképpen, Chen Z. és Shao Y. TVMS-modelljéhez a foggyök-repedések dinamikai hatásait nagy pontosságú gyorsulásmérőkkel validálta [6]. Ipari környezetben gyakori továbbá a sebességérzékelők (vibrométerek) alkalmazása középfrekvenciás tartományban, valamint nagy fordulatszámú gépeknél az örvényáramú elmozdulásérzékelők használata tengelyrezgések mérésére.

Egyetemi és kutatólaboratóriumi környezetben a mérőrendszerek jellemzően rugalmasabb kialakításúak.

Gyakran alkalmaznak MEMS-alapú („Micro-Electro Mechanical Systems” – MEMS) triaxiális gyorsulásmérőket oktatási célokra, mivel ezek költséghatékonyak és könnyen integrálhatók adatgyűjtő rendszerekbe. A MEMS triaxiális szenzorok kis méretű, mikroelektromechanikai eszközök, amelyek három egymásra merőleges irányban képesek mérni a gyorsulást. A működésük alapja egy mikroszkopikus tömeg és rugórendszer, ahol a gyorsulás hatására a tömeg elmozdul. A deformáció kapacitás-, piezoelektromos vagy

piezorezisztív elven alakítódik át elektromos jellé. Mivel minden tengelyhez külön érzékelőelem tartozik, a szenzor egyszerre adja az x -, y - és z -irányú gyorsuláskomponenseket, amelyekből kiszámítható a sebesség és az elmozdulás is. A kapacitív érzékelés alapja a lemezkondenzátor felületétől (A) és a fegyverzetek közötti távolságtól (d) is függ. A 2. ábra egy differenciálkondenzátort szemléltet, ahol a két kapacitás (C_1 és C_2) különbségét lehet mérni.

$$\Delta C = C_1 - C_2 \quad (2)$$

C_1 és C_2 kifejezhető, és behelyettesíthető a 3-as egyenlet alapján,

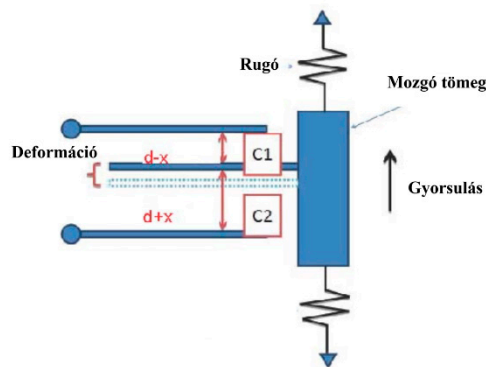
$$\Delta C = \frac{\varepsilon A}{d-x} - \frac{\varepsilon A}{d+x} \quad (3)$$

ahol ε a dielektromos állandó.

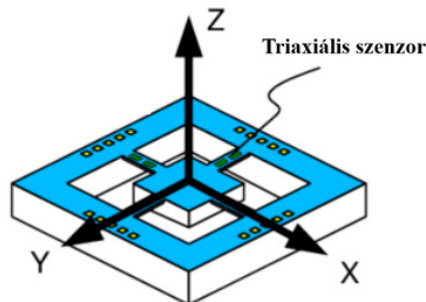
Közös nevezőre hozás után a 4-es egyenletet kapjuk, aminek átrendezésével az elmozdulás (x) is kiszámítható.

$$\Delta C = \frac{2\varepsilon Ax}{d^2 - x^2} \quad (4)$$

A gyorsulás a kapacitáskülönbség nagyságából mérhető.



2. ábra. A kapacitív MEMS-alapú szenzorok működési alapja [13]



3. ábra. Egy triaxiális MEMS-alapú szenzor vázlatos szemléltetése [13]

Huang L. és Chang J. 2023-as tanulmányában [14] a MEMS-alapú gyorsulásmérők hatékonyságát vizsgálta egy egyetemi körülmények között megvalósított bolygóműves hajtóművet vizsgáló tesztpadon. A kutatás egyik fontos megállapítása az volt, hogy a MEMS gyorsulásmérő által rögzített jel tartománya és sáv szélessége elegendőnek bizonyult a hibára utaló modulációs jelenségek felismerésére. Bár a nagy frekvenciás tartományban a MEMS szenzor érzékenysége elmaradhat a precíz piezoelektromos érzékelőktől, a bolygómű diagnosztikájához szükséges főbb komponensek megbízhatóan kimutathatók voltak (3. ábra).

5. KONKLÚZIÓ

A Pannon Egyetem keretei között megvalósuló IoT tesztpad rezgésdiagnosztikai szenzorának kiválasztásakor figyelembe kell venni az alkalmazás területét, valamint méretéből és terhelési viszonyaiból adódó sajátosságait. A tesztpad célja egy bolygóműves hajtómű ipari körülmények közötti üzemelésének

szimulálása, és monitorozása, viszont a rendkívül nagy felbontású, prémium kategóriás ipari mérőrendszerek alkalmazása nem feltétlenül indokolt. Célszerű költséghatékony, mégis ipari környezetbe is integrálható megoldást keresni.

A tesztpad rezgésdiagnosztikai rendszerébe a legcélszerűbb megoldást egy IoT-kompatibilis, MEMS-alapú háromtengelyű gyorsulásmérő alkalmazása jelentheti. Huang L. és Chang J. 2023-ban publikált tanulmányának [14] eredményei alapján a korszerű MEMS szenzorok meghatározott alkalmazási tartományban képesek közel azonos diagnosztikai teljesítményt nyújtani, mint a lényegesen költségesebb piezoelektromos érzékelők. Ez különösen releváns olyan esetekben, ahol a mérési cél nem extrém nagy dinamika- vagy frekvenciatartomány elérése, hanem megbízható állapotfelüyeleti vizsgálat megvalósítása. A MEMS szenzorok kis méretük és kis teljesítményigényük miatt jól illeszkednek a tesztpad tulajdonságaihoz, miközben megfelelő mérési felbontást biztosítanak a hajtómű dinamikai vizsgálatához.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

2024-1.1.1-KKV_FÓKUSZ-2024-00057 azonosítószámú projekt az NKFI Hivatal és a Nemzeti Innovációs Ügynökség konzorciumában, a Magyar Állam támogatásával társfinanszírozásával valósul meg.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Xu, J., Li, X., Chen, R., Wang, L., Yang, Z., & Yang, H. (2021). Dynamic Characteristics Analysis of Gear-Bearing System Considering Dynamic Wear with Flash Temperature. *Mathematics*, 9(21), 2739.
- [2] Radzevich, S. P., & Dudley, D. W. (1994). *Handbook of Practical Gear design*. CRC Press.
- [3] Fogaskerék alapismeretek [Online előadásanyag]. Széchenyi István Egyetem, Géptan Tanszék. Elérhető: https://gtt.sze.hu/images/Mechatronika/eroatvitel/Fogaskerek_alapismeretek.pdf [Letöltve: 2025]
- [4] Chaari, F., Bartelmus, W., Zimroz, R., Fakhfakh, T., & Haddar, M. (2012). Gearbox vibration signal amplitude and frequency modulation. *Shock and Vibration*, 19(4), 635-652.
- [5] Liang, X., Zhang, H., Liu, L., & Zuo, M. J. (2016). The influence of tooth pitting on the mesh stiffness of a pair of external spur gears. *Mechanism and Machine Theory*, 106, 1-15.
- [6] Chen, Z., & Shao, Y. (2011). Dynamic simulation of spur gear with tooth root crack propagating along tooth width and crack depth. *Engineering failure analysis*, 18(8), 2149-2164.
- [7] Ouyang, T., Wang, J., Mo, X., & Li, Y. (2023). Vibration and cavitation in high-speed gears caused by faults. *International Journal of Mechanical Sciences*, 250, 108322
- [8] <https://armoloy.com/cavitation-causes-effects-and-solutions/>
- [9] Lin, J., & Parker, R. G. (1999). Analytical characterization of the unique properties of planetary gear free vibration. *Journal of Vibration and Acoustics*, 121(3), 316-321.
- [10] Kim, J. S., Park, N., & Lee, H. (2016). Vibration analysis of a planetary gear system based on the transfer matrix method. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30(2), 611-621.
- [11] Xiang, L., Gao, N., & Hu, A. (2017). Dynamic analysis of a planetary gear system with multiple nonlinear parameters. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 327, 325-340.
- [12] Gao, B., Wang, Y., & Yu, G. (2023). Research progress on the dynamic characteristics of planetary gear transmission in a Non-Inertial system. *Machines*, 11(7), 751.
- [13] Deng, L., Kundur, V., Naga, N. S. J., Ozel, M. K., Yilmaz, E., Ozev, S., & Dar, T. (2013, March). Electrical calibration of spring-mass MEMS capacitive accelerometers. *Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*(pp. 571-574). IEEE.
- [14] Huang, L., & Chang, J. (2023). Vibration Characterization and Fault Diagnosis of a Planetary Gearbox with a Wireless Embedded Sensor. *Applied Sciences*, 13(2), 729.