

Turbófeltöltő tengelyvég kitérésének vizsgálata: közelítésérzékelő szenzor- és gyorskamerás helyzet meghatározó mérés technikai módszertannal

Testing of turbocharger shaft end deflection: using displacement sensor- and high-speed camera position determining measurement methodology

BOROS Máté¹ – Tanszéki gyakornok, Kiss Norbert¹ – Tanszéki gyakornok, PESTHY Márk¹ – Tanársegéd

¹Széchenyi István Egyetem, Audi Hungaria Járműmérnöki Kar, Járműhajtás Technológia Tanszék, H 9026 Győr, Egyetem tér 1.

Tel.: +36 70/883-4180, e-mail: pesthy.mark@ga.sze.hu, honlap: <https://jhtt.sze.hu/kezdolap>

Tel.: +36 70/930-4917, e-mail: boros.mate@sze.hu, honlap: <https://jhtt.sze.hu/kezdolap>

Abstract

The mechanical effects and phenomena arising from the rotational speed range of turbochargers have a major impact on the stability of the system and even its lifetime. Due to the natural frequency characteristics of turbochargers, there are critical speeds where the magnitude of the deflection amplitude increases locally due to modal shapes and excitation. In this study, the shaft end deflection magnitude and its orbital motion characteristics at different speeds are analyzed. Measurement results were obtained using high-speed camera measurements, from which the data were further processed. The detection of a measuring point in turbochargers by the fast camera method opens up new measurement possibilities for rotordynamics research in practice.

Keywords: Turbocharger, Rotordynamics, Measurement method, Image detection

Kivonat

Turbófeltöltők forgási sebesség tartományából származó mechanikai effektusok és jelenségek nagyban befolyásolják a rendszer stabilitásának állapotát, illetve akár annak élettartalmát. Turbófeltöltő sajátfrekvencia adottságaiból adódóan vannak kritikus fordulatszámok, ahol a modális alakzatjainak és a gerjesztésnek köszönhetően, lokálisan lebonthatóan megnő a kitérés amplitúdó nagysága. Ebben a tanulmányban tengelyvég kitérésének mértéke kerül analízisre és annak körpályájának mozgási karakterisztikája, különböző fordulatszámokon. Mérési eredmények közelítésérzékelő szenzorral, illetve gyorskamerás méréssel kerültek kivitelezésre, melyekből származó adatok további feldolgozásra kerültek. Gyorskamerás módszer által mérési pont detektálása turbófeltöltőknél gyakorlatban új mérési lehetőségeket nyit meg rotordinamikai kutatások szempontjából.

Kulcsszavak: Turbófeltöltő, Rotordinamika, Mérési módszerek, Képfelismerés

1. BEVEZETÉS

Napjainkban a turbófeltöltők elterjedésével az autó- és repüléstechnikai iparágakban, rotordinamikai fejlesztések és azon belül felmerülő effektusok kutatása még relevánsabbá vált. Egyre szigorodó emissziós korlátozásoknak köszönhetően, turbófeltöltő használata nélkülözhetetlen egy tömeggyártásra szánt belsőégésű motor konstrukciónál [1]. Alkalmazási területtől függően különböző rezonancia jelenségek ébrednek, melyek mechanikai kitéréseket, modál alakzatokat és rezgési képeket eredményeznek. Ezen kutatási terület célja a rotordinamikai rendszerekben ébredő fizikai jelenségek leírása és azok megmagyarázása mindamellett, hogy hatásfok és élettartam növelése lehetséges, amennyiben a kritikus jelenségek és munkapontok kiaknázásra kerülnek. Ezen kutatási munka magasnyomású turbófeltöltő tesztpadon mért turbófeltöltő tengelyvég kitérésére korlátozódik és annak számszerűsítésére, illetve

karakterisztikájának/mozgási dinamikája mögött rejlő matematika feltárására. A mérési kísérletek valós körülményekhez hasonló eredményei hitelessége érdekében laboratóriumi, fékpadi környezetben kerültek elvégzésre. Tengelyvég kitérés minél pontosabb mérésére közelítésérzékelő szenzor került alkalmazásra, illetve formabontó, kísérleti mérési technológia a gyorskamerás kép analízis használata a kitérés karakterisztikájára nyújt betekintést. Utóbbi mérési eljárás magasfokú előkészületet igényel, illetve adatainak feldolgozása is finomhangolásra szorul, amely jelen esetben saját fejlesztésű Python alapú képfelismerő algoritmussal került kivitelezésre.

2. ALKALMAZOTT ESZKÖZÖK ÉS MÓDSZEREK

2.1. Alkalmazott közelítésérzékelő szenzor és adatainak feldolgozása

Turbófeltöltő tengelyvég kitérés nagysága az idő függvényében, Micro-Epsilon EU1 közelítésérzékelő szenzorokkal kerültek vizsgálatra, illetve a mérési struktúra megköveteli a két szenzor 90° fokban való elhelyezését egymástól. Szenzorok távolsága korlátozott a mérendő tengelyvég anyától, vagyis pontosan 1 mm távolságra kell elhelyezkedjen nyugalmi állapotban. Ezen tudományos munkában elvégzett kísérletekhez a szenzor érzékelési frekvenciája 50 kHz volt, ahol a sebesség mérő szenzor szintén ugyan ezen intenzitásra került beállításra [2]. Mérési protokoll (lásd 1. ábra) felépítésével kerültek vizsgálatra majd kiértékelésre közelítésérzékelő szenzorral rögzített adatok.



1. ábra: Mérési módszer ciklus-diagramja, közelítésérzékelő szenzor használata esetén

2.2. Gyorskamerás mérési analízis felépítése és alkalmazott algoritmusok

Ezen mérési módszer, kontakt-szenzormentes vizsgálatot biztosít újszerű gyorskamerás adatelemzés és képfeldolgozási módszerek használatával. Jelenlegi mérésekben alkalmazott Olympus I-Speed 2, gyorskamera képfelvételi felbontása és frekvencia tartománya szükséges a nagysebességgel forgó turbófeltöltő, kellően magas minőségben adatainak rögzítéséhez [3]. Utólagos képfeldolgozáshoz és adatelemzéshez szükséges matematika és algoritmus modell architektúrája, következőkben fontos jelentőséggel bír gyorskamerával begyűjtött nagymennyiségű adathalmaz feldolgozás és analízis keretein belül. Képanalízis vizsgálatára Python alapú programkód került létrehozásra OpenCV könyvtár segítségével [4]. Több szub-algoritmus is felhasználásra kerül használatkor, melyekből a legfontosabbak jelen esetben a Support Vector Machines (SVM), K-Nearest Neighbors (KNN), illetve Deep Learning Methods (DLM). Az algoritmusoknak kiindulásként a detektálandó mintavételi pont és avagy annak paraméterei számítanak. Jelen kutatásban RGB színskála általi parametrizálás került kivitelezésre adott pixelhalmaznyi adatra, melynek folyamata többféle képen kapható meg. Első használt módszer az Euklideszi távolságszámítási módszer [5-8]:

$$p(RGB_{target}) = \sqrt{(R - R_t)^2 + (G - G_t)^2 + (B - B_t)^2} \quad (1)$$

Ezen módszer ideális labor mérési eredmények között használható effektíven, azonban amennyiben ez nem áll fent KNN módszer alkalmazása a célszerűbb, ahol is megtalálja a legközelebbi eshetőséget az egész értelmezési halmazt analízálva:

$$p(RGB_{predicted}) = \frac{\sum_{i=1}^K w_i \cdot RGB_i}{\sum_{i=1}^K w_i}, \text{ ahol } w_i = \frac{1}{d_i + \epsilon} \quad (2)$$

Ahol a fenti egyenletrendszerben szereplő K azon hiperparaméter, amely megadja az összegét a vizsgált halmaz elemszámainak, d_i a távolság a teoretikus mintavételi pont és az i -edik elem között, melynek érték kiszámítására szintén Euklideszi, avagy Manhattan távolság számítási módszer alkalmazható:

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (3)$$

Ahol az x és y változók a teoretikus mintavételi pixel koordinátáját jelölik, illetve az indexelt változók az i -edik elem koordinátáját jelölik. w_i értéke egy súlyozott változó, melynek feladata meghatározni a behatás mértékét az adott i -edik elem behatására a végeredményre. Az ϵ kisértékű változó (többnyire 10^{-6} nagyságrendű), amely hozzáadásra kerül d_i értékhez, hogy nullával való osztás minden esetben elkerülendő maradjon (fennálhat átfedés esetén is) [9-10]. Végezetül utolsó és egyben kísérletileg alkalmazott algoritmus az SVM egy feltanítható szinte Machine Learning eljárás, ahol is különböző adatcsomagokat és szűrési

faktorokat kell definiálni. Előnye az előző algoritmusokhoz képest, hogy felmerülő zajokat képes detektálni és kiszűrni, azonban számos adatsomagot és számítógépes kapacitást igényel [11]. SVM optimalizálási probléma az osztályok közötti különbséget maximalizálására törekszik, miközben a téves besorolásokat minimalizálja, például egy adott adathalmaz esetében (x_i, y_i) , ahol $x_i \in R^n$ és $y_i \in \{-1, 1\}$ az optimalizálás a következő:

$$\min_{w, b, \xi} \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^m \xi_i \quad (4)$$

$$y_i(w^\top x_i + b) \geq 1 - \xi_i, \text{ ahol } \xi_i \geq 0 \quad (5)$$

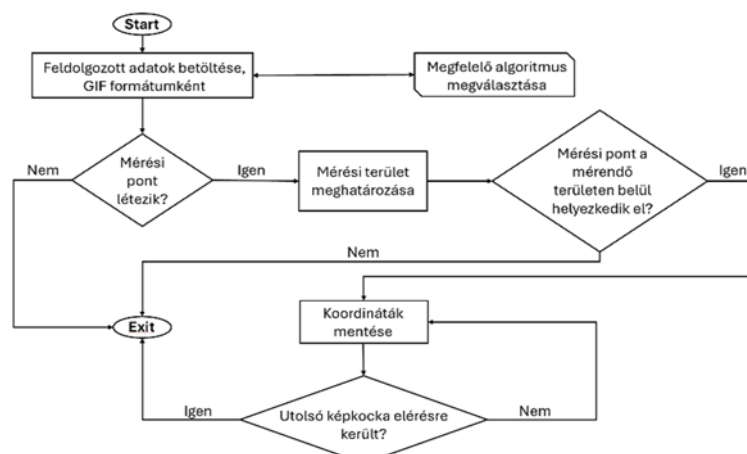
Ahol b az elfoglaltsági tényező, ξ_i változó, amely megengedi az enyhe különbségeket (átfedéseket), C paraméter feladata szabályozni az osztályozási hibák közötti kompromisszumot, illetve különbségek minimalizálása. Különböző Kernel tanítási metódusokkal nem lineáris problémák is megoldhatóak, azaz RGB adatok feltérképezéséhez koordináták magasabb térbeli dimenzióra való felemelésével lineáris megoldása problémának lehetséges. Gyakran alkalmazott Kernel függvény a Radial Basis Function (RBF), amely leírható:

$$K(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

Ugyanis Kernel megengedi az SVM-nek, hogy identifikáljon nem lineáris pontokat az RGB skála detektálási terében [12-14].

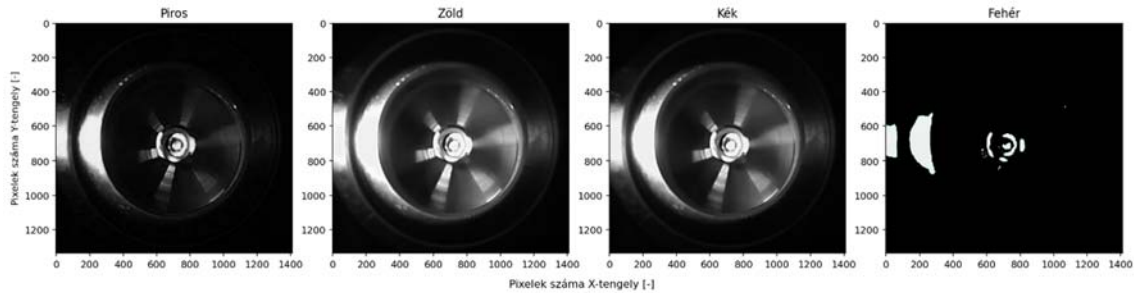
3. EREDMÉNYEK

Nyers képadatok feldolgozására és analizálására kiértékelő program került kifejlesztésre Python környezetben. Ezen program a már előző fejezetben tárgyalt algoritmusokat képes kezelni és felhasználni az előre definiált mintavételi pont kiinduló RGB színek alapján. Program logikai folyamatának sematikus architektúrájának (lásd 2. ábra) megalkotása fontos kezdeti szerepet játszik a további mérés sikerességének kimenetében.



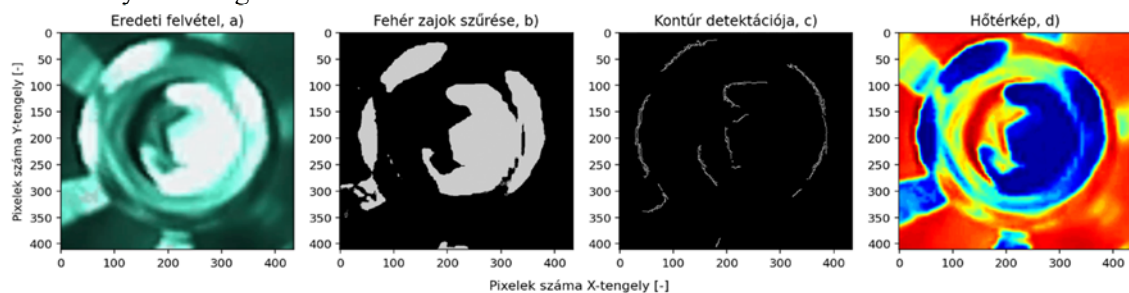
2. ábra: Kiértékelő program egyszerűsített logikai architektúrájának bemutatása

Detektálási terület szűkítésével számítási kapacitás, idő csökkentése és zajok kiszűrése lehetséges bizonyos mértékben, mint ahogyan a megfelelő paraméterű (színű) mintavételi pont megválasztásával is. Ennek megválasztásához a leginkább kiszűrésre képes színt érdemes felvenni, jelen esetben ez a színt tökéletes piros és fehér (RGB:255,0,0 RGB:255,255,255, avagy #FF0000, #FFFFFF) volt. Programcsomagban használt könyvtárak lehetővé teszik különböző színek dominanciájának vizsgálatát (lásd 3. ábra).



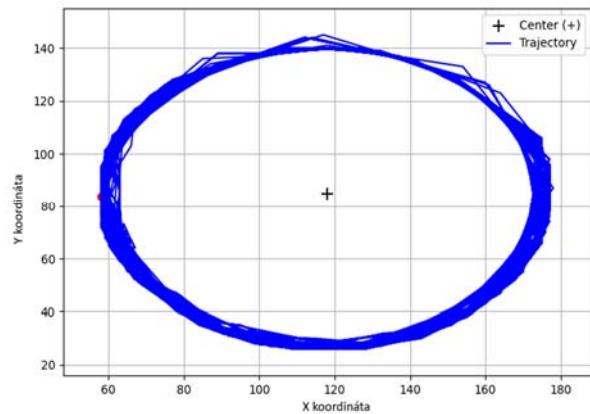
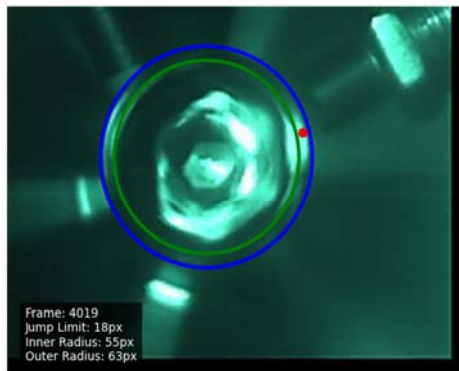
3. ábra: Program általi RGB színekre való detektálás és analízis, ahol piros, zöld, kék és fehér színekre került szűrés egyaránt az optimális mérési pont szín paraméterének kiválasztásához

Adott színkódú spektrumra való analízis során a program fehér, fekete és azok árnyalataira cseréli le az eredeti kép RGB színeit, ahol teljes fehér ad tökéletes egyezést (1 igaz), míg a fekete a tökéletesen hamis (0 hamis) logikai kapcsolatnak felel meg. Ezekből az adatokból, került megállapításra a piros és fehér szín, mint mintavételi pontra való alkalmazása. Fehér színnel való korai turbófeltöltő teszt-padi standard vizsgálatok során különböző zajok és kromatikus diszperziók jelentkeztek laborkörülmények ellenére, amelyek kiértékeléséből leszűrhető a keletkező zajok színkódjainak spektruma és lokális előfordulása. Különböző analitikus metódus (lásd 4. ábra) került alkalmazásra, melyek vizuális reprezentálása elősegíti a kutatás további irányának meghatározását.



4. ábra: Különböző zaj detektálási metódusok és annak vizuális megjelenítése, a) az eredeti vizsgált kép, b) fehér zajok, melyek hasonlóságot mutatnak fehér mérési ponttal, c) fehér mérési pont és a zajok által behatárolt kontúr, d) hőterkép, ahol hideg színek (kék) jelzi az előforduló zajok helyét

Ezen kiértékelési módszerekből, leszűrhető az a konklúzió, hogy a rendelkezésre álló mérési eszközök (gyorskamerával kompatibilis magas frekvenciájú megvilágítás) és laboratóriumi körülmények között, szinte tökéletes fehér színű mérési pont alkalmas további kutatásra, azonban a szükséges megfelelő mérési körülmények megteremtése rendkívül komplex és sok hibalehetőséget hordoznak magukban. Zajok helyének detektálása és előfordulásának sűrűsége indikátorként működik, további vizsgálandó terület szűkítése során. Jól látható, hogy a zajok többsége a képek jobb oldalán helyezkednek el, pontosan az ellentétes oldalon, mint ahol a megvilágítás helyezkedett el mérések során. További mérések során fémekre jellemző csillanás kiküszöbölése végett matt (fekete) festékkel került bevonva a tengelyvéganya és fehér, illetve piros mérési pont került alkalmazásra. Mérések kiértékelésére azonban összehasonlításra került piros és fehér (matt fekete alapon) színnel jelölt mérési pontok eredményei egyaránt, azonban szignifikáns különbség nem állt fent. Minden esetben a turbófeltöltő forgási sebessége 30.000 RPM volt laboratóriumi körülmények között vizsgálva és mérve. Mérési pont méretéből kifolyólag további simítások voltak szükségesek, mégpedig érzékelési szórás szűkítésével, ahol definiálásra került a megengedhető maximális mértékű pixel ugrás. Ezzel a módszerrel zajok redukálása és a detektálásra szánt ponton belüli érzékelés is pontosabb. Mérési pont detektálására, illetve a megtett mozgási karakterisztikáját a tengelyvég kitérésének, több megtett fordulat nyers adataként (lásd 5. ábra) a már említett egyedileg fejlesztett kiértékelő programmal került további feldolgozásra.



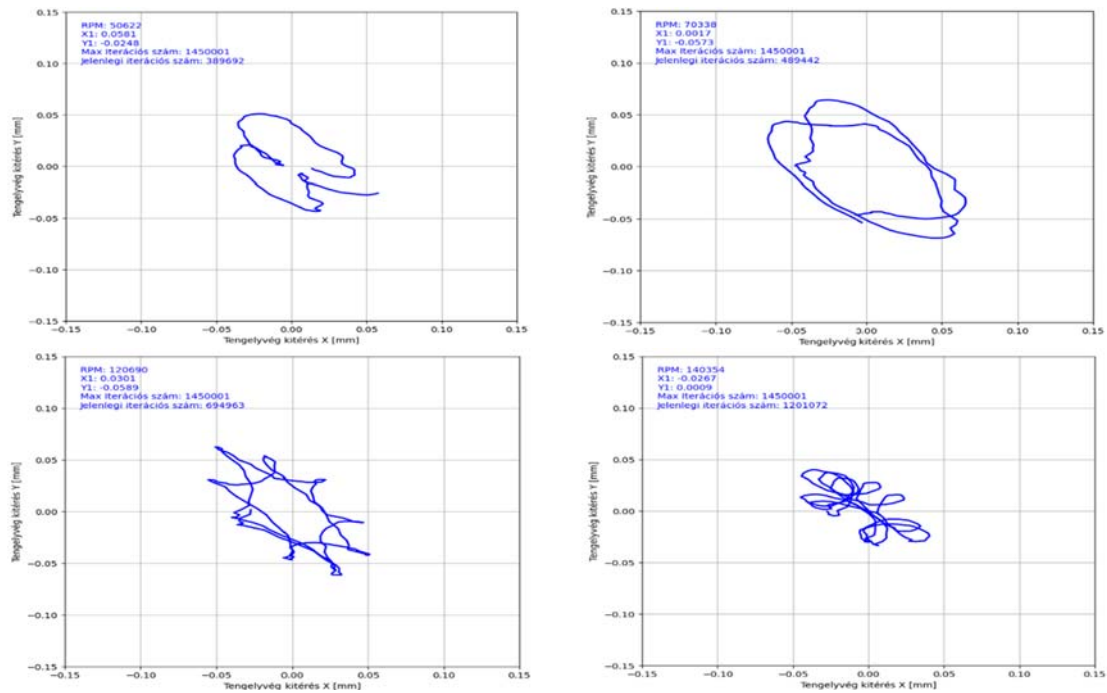
5. ábra: Fenti ábrákon fehérrel (matt fekete háttéren) jelzett mintavételi pont és a hozzátartozó kitérés térkép látható. Kitérés trajektória meghatározására több egymás után bekövetkező, azonos sebességű fordulat is egyszerre megjelenítésre került.

Külső és belső peremfeltételekként behatároló körök átmérőjét jelző pixel szám módosításával, vizsgált terület módosítható. Ezen értékek, illetve megengedhető maximális ugrási érték megadása tapasztalati úton került meghatározásra. Magasabb maximális ugrás esetén hibás karakterisztika mutatkozott és mérendő pont követésének pontossága is csökkent. Minden mérés során megközelítőleg 10.000 képkocka került rögzítésre, az adatok magasfokú hitelességének növelése érdekében, amely megközelítőleg 500 fordulatnak felel meg. Jelen peremfeltételek megadása mellett a szélessávon lefedett érzékelési tartományok érhetőek el, melynek leírására a 1. táblázat szolgál, melyben közelítésérzékelő szenzorok érzékelési tartománya is leírásra kerül.

1. táblázat: Gyorskamerás és távolság mérő szenzorral végzett mérési eljárásokhoz tartozó mérési tartományok lefedettségi tartománya, ahol a bázis a tökéletes és egyben teoretikus kitérésmentes trajektóriáját jelenti.

Tartományok	Gyorskamerás mérési tartományok [μm]	Távolság mérő szenzorok mérési tartománya [μm]
Bázis feletti tartomány	500	1000
Bázis alatti tartomány	1000	250

Gyorskamerás mérési módszer egyértelműen kisebb, egy érték rendel kisebb mérési pontosságot nyújt a közelítésérzékelő szenzorokkal szemben. Illetve magasabb fordulatszámokon való mérésekhez való használata, magasfokú laboratóriumi körülményeket követel meg az elmosódás és detektálható pont elnyúlása ellen. Adott alacsony fordulatszám tartományokon (< 40.000 RPM) turbófeltöltő végtengelyének mozgási trajektóriájának karakterisztikáját jól megközelíti, azonban további adatelemzésre alacsonyrendű pontossága végett számos hibalehetőséget hordoz magában, így analízise nem került további feldolgozásra ezen kutatásban. Magasabb fordulatszám tartományok (> 40.000 RPM) vizsgálata során, ahol már a különböző, tökéletes trajektóriától jelentősen eltérő karakterisztikájú kitérések jelennek meg, közelítésérzékelő szenzorok használatával kerül detektálásra. Vizsgálat során, olyan felfutási mérés került kivitelezésre, ahol 0 – 140.000 RPM-re lett felgyorsítva a turbófeltöltő. Vizsgált fordulatszámok (lásd 6. ábra) ezen cikkben 50.000, 70.000, 120.000 és 140.000, mivel ezen mérési pontok kellően disztingvált módon bemutatják a különféle kitérés képeket. Adat analízisre egyedileg fejlesztett Python alapú kiértékelő program került felhasználásra.



6. ábra: Közelítésérzékelő szenzorral mért tengelyvég kóválygás trajektóriája magasabb fordulatszámokon (< 50.000, 70.000, 120.000, 140.000 RPM). Karakterisztika különbségének bemutatása fordulatszám változás függvényében.

Fordulatszám módosulásával a várható tengelyvég kóválygás karakterisztikája a vizsgált turbófeltöltő esetében hurkokat eredményez, ahol feltételezett, hogy stabilitási pontból való kiválás miatt módus váltás történik, így egy instabil munkapontot vehet fel. További magyarázat hurkok megjelenésére, hogy kritikus frekvenciákon létrejövő különböző módusok olyan belső gerjesztéssel hatnak a rendszerre, amelyek az alacsony amplitúdójú hurkok megjelenését idézik elő.

4. KONKLÚZIÓ ÉS DISZKUSSZIÓ

Turbófeltöltő mechanikai mozgásleírásának és rezgéstani jelenségeinek feltárása fontos szempont marad még a következő években, mivel ez jelentős kapcsolatban van a turbófeltöltő rotor olajellátásával is, és a jelenlegi trendek a jövőben jelentősen megváltoztathatják a motorolajok összetételét és karakterisztikáját [15]. A bemutatott mérési módszerek előremutató és analízisre alkalmas adatokkal szolgálnak. Rögzített és megtisztított adatok későbbiekben matematikai háttér leírásának megerősítésére is alkalmazható. Gyorskamerás mérés technológia napjainkban fejlődő tendenciát mutat, azonban az általunk használt berendezés és laboratóriumi körülmények nem tették lehetővé magasabb fordulatszámok és precízebb pontosságú mérés megvalósíthatóságát. A rögzített adatok posztanalízis módszere azonban sikeresen felépítettnek mondható, mivel a rendelkezésre álló adatok használatával, olyan kiértékelő program került kifejlesztésre, amely használata alkalmas bármilyen gyorskamerával rögzített adat beolvasására és feldolgozására, majd kiértékelésére. Mérési módszer reprodukálható, azonban számos problémát és lehetséges hibalehetőséget hordoz magában, melyek jelen kutatásban is jelen voltak:

- Mérési terület megvilágításának nem megfelelő mértéke, árnyékok és egyéb pontatlanságok fényforrás kalibrálásánál.
- Gyorskamera Frame Per Second (FPS) és rögzítésre alkalmas pixelszám kapcsolatának limitációja.
- Turbófeltöltő fényes visszacsillanásának nem megfelelő kiszűrése, eliminálása.
- Magasabb fordulatszám és technikai korlátok miatt, melyek FPS-felbontás kapcsolatából ered, mérési pont elmosódását, illetve detektálásának megghiúsulását indikálhatja.
- Mérési pont méretéből adódó pixelek száma, vagyis mérési pont által lefedett terület.

Közelítésérzékelő szenzorokkal való mérésmélet alkalmazásával kiváló minőségben voltak alkalmazhatóak, mind alacsony, mint magas fordulatszám tartományokon adatok rögzítésére. Pontosságának és az előre kalibrált méréstartományának szinte teljes terjedelmének kihasználásával a kritikus munkapontokon mért kitérés adatok is kellő pontossággal rögzíthetőek és az alacsony amplitúdójú hurkok is kimutathatóak voltak. A 50 kHz mintavételezésnek köszönhetően, felvételi mérés során adatok mennyisége biztosítja a megtett út, illetve annak karakterisztikájának pontos leírását. Fentiekben említésre került, hogy szenzorok által rögzített adatok és kutatás képesek további, a rotordinamika mélyebb

matematikai hátterének felfedését segíteni és jelenségeire magyarázatot adni. Két mérési módszer összehasonlítása nem releváns eredménnyel szolgál, mivel mérési pontossága és tartománya jelentősen eltér. Azonban az megállapítható, hogy alacsony fordulatszám tartományban való mérés során a megfelelő infrastruktúra és mérési körülmények birtokában, mindkettő eljárással sikeres vizsgálat kivitelezése lehetséges. További kutatások a méréstechnika fejlődésével lehetővé tehetik gyorskamerás mérési módszer pontosságának fejlődését, illetve analízis módszer további finomhangolásával zajok szűrése is továbbfejleszthető. Közelítésérzékelő szenzorokkal való rezgéstani és rotordinamikai kutatások további kiterjesztett lehetőségekkel és potenciákkal bír, amelyek további feltérképezettlen jelenségekre képesek választ adni jövőbeli publikációkon keresztül.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Paulovics, L., Kuti, R., Rohde-Brandenburger, J., Tóth-Nagy, C., *Development of comparative investigation method for timing chain wear analysis using oscillating tribometer*. Acta Technica Jaurinensis, 14(4), 406–423, <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.00620>, 2021
- [2] Micro-Epsilon. *Eddy current displacement sensor datasheet eddyNCDT 3300*. Micro-Epsilon, n.d., 2024
- [3] Olympus Corporation, *i-SPEED 2 series datasheet*, 2024
- [4] Renas R. A., Rasan I. A., Zerevan A. A., Awaz A. S., *Image Processing with Python Libraries*, Academic Journal of Nawroz University (AJNU), Vol.12, No.2, DOI 10.25007/ajnu.v12n2a1754, 2023
- [5] What is OpenCV? A Guide for Beginners., Roboflow Blog: <https://blog.roboflow.com/what-is-opencv/>, (Feb 30, 2024)
- [6] Tanzil S., Samiul H. S., Ishrak I. Z., Sheikh I. A., Mohammad H. R., *Mapping and Localization in 3D Space for Vision-based Robot Manipulation*, Proceedings of the IEOM Society International, Bangladesh, 2021
- [7] Cover T., Hart P., *Nearest neighbor pattern classification*, IEET Transactions on Information Theory, 13(1), 21–27, 1967
- [8] Forsyth D. A., Ponce J., *Computer Vision: A Modern Approach*, ed. 2nd, Pearson, 2012
- [9] Cha S. H., *Comprehensive Survey on Distance/Similarity Measures between Probability Density Function*, Internal Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, 1(4), 300–307, 2007
- [10] Zhu G., Zhang D., *A fast KNN algorithm for text categorization*, IEEE Internal Conference on Neural Networks and Brain, 3, 1511–1514, 2005
- [11] Cortes C., Vapnik V., *Support-Vector Networks*, Machine Learning, 20(3), 273–297, DOI: 10.1007/BF00994018, 1995
- [12] Osuna E., Freund R., Girosi F., *Training Support Vector Machines: An Application to Face Detection*, Proceedings of CVPR, 130–136, DOI: 10.1109/CVPR.1997.609310, 1997
- [13] Liu Y., Yu H., Wang Y., *Image Classification Using SVM*, Proceedings of IEEE ICMLA, 335–340, DOI: 10.1109/ICMLA.2017.0, 2017
- [14] Vedaldi A., Zisserman A., *Efficient Additive Kernels via Explicit Feature Maps*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Mechanical Intelligence, 34(3), 480–492, DOI: 10.1109/TPAMI.2011.153, 2012
- [15] Tóth-Nagy, C., Szabó, Ádám I. *Experimental Investigation of the Friction Modifying Effects of Graphene and C60 Fullerene Used as Nanoadditives in Engine Lubricating Oil Performed on an Oscillating Tribometer*, Periodica Polytechnica Transportation Engineering, 51(3), pp. 257–262. <https://doi.org/10.3311/PPtr.20594>, 2023