

Turbófeltöltők rotor-csapágy rendszereihez kötődő kihívások és lehetőségek áttekintése

Classification of challenges and opportunities related to turbocharger rotor-bearing systems

PESTHY Márk¹ - Tanársegéd, TÓTH-NAGY Csaba Dr.¹ - Egyetemi docens

¹Széchenyi István Egyetem, Audi Hungaria Járműmérnöki Kar, Belső Égésű Motorok és Járműhajtások Tanszék, H 9026 Győr, Egyetem tér 1.

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

Abstract

The complex mechanical loads acting on turbocharger during their lifetime necessitated the study and optimization of the rotordynamics and tribology system of turbochargers. The technical developments that aim to improve the efficiency of internal combustion engines, such as changes in the quality and composition of lubricants, can also indirectly affect the operation of the turbocharger, and cause some cases unexpected failures. The paper summarizes the diagnostic methods used in this topic and conclude potential fields for further optimization opportunities.

Keywords: Turbocharger, Rotordynamics, Vibroacoustics, Measurement technologies

Kivonat

A turbófeltöltőket élettartamuk során érő összetett mechanikai terhelések szükségessé tették a feltöltők rotordinamikai-tribológiai rendszerének vizsgálatát és optimalizálását. A belsőégésű motor hatásfokának növelését célzó technológiai fejlesztések, például a kenőolaj minőségének és összetételének megváltoztatása közvetlenül is hatással lehet a turbófeltöltő működésére, esetenként nem várt meghibásodására. A tanulmány összefoglalóan bemutatja az ebben a témakörben eddig használatos diagnosztikai módszereket és lehetőségeket.

Kulcsszavak: Turbófeltöltő, Rotordinamika, Vibroakusztika, Méréstechnika

1. BEVEZETÉS

A turbófeltöltők belsőégésű motorokon való alkalmazásának száma és a turbófeltöltőt érő motorikus körülményekből adódó mechanikus-, és hőterhelések nagysága párhuzamosan és folyamatosan nőtt az utóbbi évtizedekben. Ezáltal a turbófeltöltő rotordinamikájának helyes értelmezése és fejlesztési lehetőségeinek kutatása is fontossá vált. Ez az ágazat a fejlesztési folyamat szükséges részévé vált a kívánt élettartam elérése érdekében. A turbófeltöltő egy különösen magas fordulatszámon üzemelő forgógép, emiatt a rotor magasabb fordulatszámokon már rugalmasnak tekintendő, ami a tengely különböző hajlási módjaihoz vezet. Ezek a hajlási módok a fordulatszám tartomány különböző szakaszain más-más hatást gyakorolhatnak a csapágyakra, ezáltal az kenési körülményekre is [1-2].

A turbófeltöltő rotordinamikai rendszerének vizsgálatát az is indokolttá teszi, hogy a feltöltő kenési rendszere általában a belsőégésű motor olajkörének része. Ezáltal tehát az esetenként 300.000 1/min fordulatszámot elérő rotor azzal az olajjal dolgozik, amelyet a motor működése erősen befolyásol. Tekintettel a kopadékok olajban való megjelenésére, az olaj hőmérsékletének folyamatos változására, illetve a fejlesztési irányzatokból adódó olajparaméterek (viszkozitás, adalékok) változására, a feltöltő tengelye a működése során számos kihívással nézhet szembe, amelyeket számításba kell venni a jövőbeni fejlesztések során.

2. ROTORDINAMIKAI VIZSGÁLATOK

A korábban említett rotordinamikai kihívásokra több kutató is nagy figyelmet fordított az utóbbi években. A megjelent tanulmányok számos vizsgálati módszert felsorakoztattak a rotordinamikai jelenségek különböző csoportjaira fókuszálva (rotor, olaj és csapágy kondíciók). A jelen tanulmány e fejezetének célja a témában relevánsnak vélt legfontosabb kutatási munkákat felsorakoztatni és karakterizálni.

2.1 Vizsgálatok csoportosítása a diagnosztika módszere szerint

A turbófeltöltők költséges alkatrésznek számítanak a mai autóiparban, így nem meglepő, hogy az alkatrész fejlesztésének különböző szegmenseiben is a szimulációs vizsgálatok dominálnak, és ez igaz a rotordinamikai témájú kutatásokra is. A szimulációs szoftverek széleskörű elterjedése lehetővé tette, hogy egy-egy adott alkatrész több szempontból is vizsgálható, miközben üzemeltetési költségeket megspórolva nem kell összetett teszt környezetet üzemeltetni például tesztpad formájában.

B. Schweizer egy korai tanulmánya [3] volt, amelyben létrehozták egy turbófeltöltő rotordinamikai modelljét és a szimuláció lehetővé tette a turbófeltöltő nemlineáris oszcillációinak a vizsgálatát. A tanulmány eredménye egy háromdimenziós többszemű dinamikai rendszer, amelynél a rotor alkatrészei közül a tengely rugalmasként definiált, míg a turbina-, és sűrítőkerek merev testként vannak jelen, ezt a modell típust azóta is széleskörűen használják tudományos területen. Hasonlóan például L. Tian és társai [4] munkájuk során is egy ilyen típusú modellt használtak arra a célra, hogy vizsgálják a rotor kiegyensúlyozatlanság és motortól érkező vibrációk rotordinamikára gyakorolt hatását. A numerikus szimulációs megoldások a turbófeltöltők rotordinamikai jelenségeinek feltérképezésére kézenfekvő és költséghatékony megoldásnak bizonyultak több jelentős tanulmányban is [5-9].

A szimulációs kutatások ugyan jó közelítést adnak a rotordinamikai jelenségek feltárására, de a kísérleti mérések eltéréseket mutathatnak, és további ismeretekkel szolgálhatnak a témában.

C. Biet és R. Baar tanulmányukban [10] egy részletes vizsgálat sorozatot mutatnak be, ahol együtt alkalmaztak közelítés érzékelőket, gyorsulásérzékelőket és mikrofonokat a tesztek során. Ezek a módszerek ebben a sorrendben egyaránt lehetővé teszik a tengely mozgásának (közelítés érzékelők), a csapágyházon mérhető testhangok (gyorsulásérzékelők), és a környezetben mérhető hanghatások (mikrofonok) feltérképezését. Továbbá, a tanulmány tárgyalja a különböző megoldások egyes vizsgálati fókuszra való hasznosságát is. Ezáltal képet ad arról, hogy a mikrofonok által rögzített adatok lehetőséget teremtenek a kompresszor-, és turbinaházban közlekedő gázok áramlásának ellenőrzésére és a feltöltő hideg üzeme esetén fellépő zajok vizsgálatára. Másrészt, a tanulmány bebizonyítja, hogy a gyorsulásérzékelők és a tengely mozgását figyelő közelítésérzékelők használata megfelelő módszer lehet arra, hogy a rotor sajátfrekvenciáit és az olajáramlás jelenségeit vizsgáljuk. Jelen tanulmány is egy olyan kutatási terv része, amely témakörében a turbófeltöltő rotordinamikai jelenségeire fókuszál, így a továbbiakban a rezgésdiagnosztikai módszerek és a közelítésérzékelők alkalmazását célozza.

2.2 Vizsgálatok csoportosítása a rotordinamikai kihívások típusa szerint

A turbófeltöltők mai konstrukciója már nagyon sok fejlesztési iteráció eredményeit tartalmazza. A legtöbb szériagyártásba bevezetett fejlesztési lépcsőt a feltöltők működési körülményeinek megváltozása, a belsőégésű motorok fejlődéséből adódó összetett mechanikai terhelések igényelték.

E.J. Gunter tanulmányában [11] több nézőpontból tárgyalja egy úszócsapággal szerelt turbófeltöltő tönkremeneteli módjait, kifejezett fókusszal az úszócsapágyból adódó rotordinamikai körülményekre. A tanulmány a témában született legjelentősebb mérföldköveket is rendszerezi egészen 2020-ig, majd egy javaslatot ad a feltöltők élettartamának növelésére. A javaslatok nagy része a feltöltő tribológiai rendszerével hozható összefüggésbe, többek közt részletesen tárgyalja a kenőolaj minősége kapcsán, a hidegindításokból és a motorok start-stop működéséből adódó hátrányokat, és fokozott üzem után a felmelegedett motor megállítását, ugyanis ezek a működési körülmények negatív hatással vannak a megfelelő olajellátásra, ami korai tönkremenetelhez vezethet.

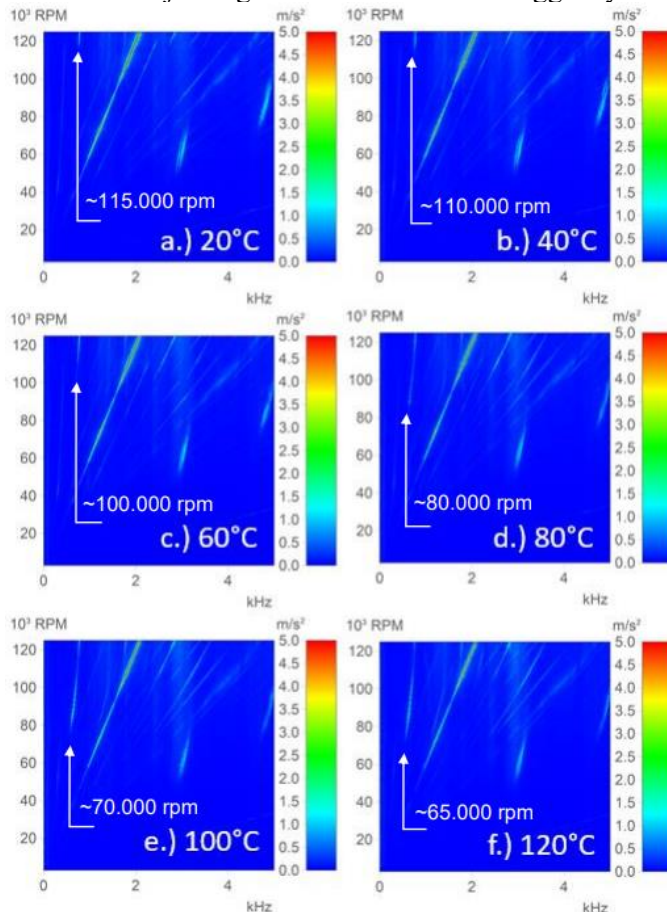
A publikációk rámutatnak, hogy a kenőolaj minősége, kondíciója fontos tényező a turbófeltöltők rotordinamikájában [12]. Továbbá a bemenő olaj paraméterei (viszkozitás, nyomás, hőmérséklet) befolyásolják a forgórész viselkedését és a működés közben fellépő rezgéseket [13]. Mivel a kenőanyag csillapító közegként működik a csapágyrendszerben, így forgórész hajlasi módjai és a detektálható rezgések összefüggésben vannak egymással és a rezgésdiagnosztikával mért adatok szétszerelés nélkül utalhatnak a turbófeltöltő működésére, állapotára.

3. TURBÓFELTÖLTŐ KENŐANYAG MINŐSÉGÉNEK VIZSGÁLATA REZGÉSDIAGNOSZTIKAI MÓDSZEREKKEL

A győri Belsőégésű Motorok és Járműhajtások Tanszék jelenlegi infrastruktúrájának köszönhetően a turbófeltöltő tribológiai rendszere több különböző összetettségű környezetben is vizsgálható. A motorjárató tesztpad képes a valósághoz legjobban közel álló körülményeket teremteni, míg a tribométerek egy turbófeltöltő csapágójának anyagát képesek tesztelni részletesen beállítható kenési és súrlódási körülmények között. A két szélsőséges tesztípus között pedig a turbófeltöltő komponens tesztpadok találhatóak, amelyek sűrített levegő, vagy elégetett földgáz segítségével képesek a feltöltők tesztelésére nagy pontossággal beállítható paraméterekkel. Az olajok hőmérsékletének és viszkozitásának tesztelésére így ez a tesztkörnyezet bizonyult a legjobban megfelelőnek. A tesztsorozat rezgésdiagnosztika alkalmazásával célozta a turbófeltöltő bemenő olajhőmérsékletének kimutatását, különböző viszkozitású olajokkal. Az 1. ábra bemutatja az olaj térfogatáram változását a hőmérséklet függvényében, amely megfigyelhető három különböző viszkozitású olaj esetén is. A mérés a turbófeltöltő által tesztpadon elérhető legmagasabb fordulatszámon (130.000 1/min) készült. A 2. ábra a vizsgálat során a gyorsulásérzékelők által mért értékeket mutatja be frekvenciaspektrum segítségével. Az eredmények a turbófeltöltő többszöri fordulatszám felfutásának átlagolt mérési adatait mutatják a 0W20 típusú olaj esetén.



1. ábra. Olaj térfogatáram a hőmérséklet függvényében



2. ábra. Frekvenciaspektrum a turbófeltöltő fordulatszám felfutása során mért rezgésértékekről

Az eredményekből jól látható, hogy az olajörvénylés jelenségeként azonosított szubszinkron rezgés a 700 Hz körüli tartományban az olaj hőmérsékletének növelésével egyre alacsonyabb fordulatszámú jelen van. Ez abból valószínűsíthető, hogy megnövekedett olajmennyiség van jelen a csapágyrendszerben. Mindemellett a mérési eredmények arra is rávilágítottak, hogy az egyszeres forgásfrekvencián jelentkező rezgések amplitúdója egyre alacsonyabb az olaj hőmérsékletének növekedésével.

4. KONKLÚZIÓ ÉS KITEKINTÉS

A bemutatott mérési eredmények számot adtak arról, hogy turbófeltöltőbe belépő olaj hőmérsékletének milyen hatása van a szubszinkron tartományban mérhető rezgésekre. Illetve bemutatásra került, hogy a hőmérséklet növekedtével milyen nagyságrendű növekedés tapasztalható az olaj térfogatáramán egy adott konstrukció esetén. A tanulmány a turbófeltöltő rotordinamikai rendszeréhez köthető, fontosnak vélt tanulmányokat rendszerezte. Jelen tanulmány csak az úszó-, és siklócsapággal rendelkező turbófeltöltők körével foglalkozott, azonban fontos megemlíteni, hogy a gördülőelemes csapágyak alkalmazása turbófeltöltőkön is egyre népszerűbb az iparban, a kedvezőbb sűrűláthatósági körülményei miatt az alsó-középső fordulatszám tartományban, azonban ez a technológia további rotordinamikai kérdéseket vet fel [14].

A kutatás további célja tesztelési kísérletek alkalmazása, a turbófeltöltő rotordinamikai, főleg tribológiaihoz köthető kérdéseinek vizsgálatára. Ebbe beletartozik a hidegindítási körülmények olajra gyakorolt hatásának és az ultra alacsony viszkozitású olajok hatásának vizsgálata. Továbbá, a rezgésdiagnosztikával megvalósítható lehetséges hiba előrejelzés kutatása is cél, fémkopadékokkal szennyezett és öregített olajok alkalmazásával.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Nguyen-Schäfer, H. (2015). *Springer Tracts in Mechanical Engineering, Rotordynamics of Automotive Turbochargers Second Edition*. Springer, DOI 10.1007/978-3-319-17644-4
- [2] Knotek, J., Novotný, P., Maršálek, O., Raffai, P., Dluhoš, J., & Knotek, I. J. (2016). *Influence of Turbine and Compressor Wheel Mass and Inertia on the Rotor Dynamics of Turbocharger*, Tribology in Industry
- [3] Schweizer, B. (2010). *Dynamics and stability of turbocharger rotors*. Archive of Applied Mechanics, 80(9), 1017–1043. <https://doi.org/10.1007/s00419-009-0331-0>
- [4] Tian L., Wang W. J., & Peng Z. J. (2011). *Dynamic behaviours of a full floating ring bearing supported turbocharger rotor with engine excitation*. Journal of Sound and Vibration, Vol. 330, Issue 20, p. 4851-4874
- [5] Eling, R., van Ostayen, R., & Rixen, D. (2013). *Dynamics of Rotors on Hydrodynamic Bearings*, COMSOL Conference, Rotterdam
- [6] Wang, L., Bin, G., Li, X., & Liu, D. (2016). *Effects of unbalance location on dynamic characteristics of high-speed gasoline engine turbocharger with floating ring bearings*. Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition), 29(2), 271–280. <https://doi.org/10.3901/CJME.2015.1013.121>
- [7] Cao, J., Dousti, S., Allaire, P., & Dimond, T. (2017). *Nonlinear transient modeling and design of turbocharger rotor/semi-floating bush bearing system*. <https://doi.org/10.3390/lubricants5020016>
- [8] Singh, A., & Gupta, T. C. (2020). *Stability analysis of turbocharger rotor system supported on fluid film bearings*. 3rd International Conference on Condensed Matter and Applied Physics (ICC-2019), 2220, 130009. <https://doi.org/10.1063/5.0001248>
- [9] Ziese, C., Irmscher, C., Nitzschke, S., Daniel, C., & Woschke, E. (2021). *Run-Up Simulation of a Semi-Floating Ring Supported Turbocharger Rotor Considering Thrust Bearing and Mass-Conserving Cavitation*. <https://doi.org/10.3390/lubricants>
- [10] Biet, C., & Baar, R. (2015). *Turbocharger Test Bench Extension for Acoustic Measurements at Cold Environment Conditions*. SAE International Journal of Engines, 8(4), 1790–1797. <https://doi.org/10.4271/2015-01-1672>
- [11] Gunter, E. J. (2020). *Review and Failure Analysis of Three 4 Cylinder Engine Turbochargers And Methods on How to Extend Turbocharger Life*. Dyrobes Rotordynamics Software Papers
- [12] Champagne, N., Obrecht, N., Gangopadhyay, A., Zdrodowski, R., Liu, Z. (2017). *Enhanced anti-wear performance induced by innovative base oil in low viscosity engine oil*. SAE Int. J. Fuels Lubricants 10(3), 822–830
- [13] Yang, K., Fletcher, K.A., Styer, J.P., Lam, W.Y., Guinther, G.H. (2017). *Engine oil components effects on turbocharger protection and the relevance of the TEOST 33C test for gasoline turbocharger deposit protection*. SAE Int. J. Fuels Lubricants 10(3), 815–821
- [14] Conley, B., & Sadeghi, F. (2020). *Experimental and Analytical Investigation of Turbocharger Whirl and Dynamics*. Tribology Transactions. <https://doi.org/10.1080/10402004.2020.1827106>