

HAJTÓMŰVEK REZGÉSÉNEK MÉRÉSE

A légi jármű hajtóműveinek alapvető diagnosztikát segítő részrendszere napjainkban a rezgésfigyelő- és elemzőrendszer. Ezek a rendszerek a korábban már alkalmazott forgórész kiegyensúlyozatlanságot figyelő elemekből fejlődtek ki oly módon, hogy az alapegységekhez további diagnosztikai célú és karbantartást segítő (támogató) modulokat csatoltak.

A RENDSZER KIALAKÍTÁSA

Egy tipikus rezgésfigyelő rendszer felépítését mutatja be az 1. ábra. Látható, hogy a komplett rendszer fedélzeti és fedélzeten kívül elhelyezett elemekből tevődik össze. Jelen cikk főként a fedélzeti elemek átfogó bemutatásával és a velük kapcsolatos problémák kiemelésével foglalkozik. Egy általános rendszer jeladót (jeladókat), jeltovábbító elemeket és jelfeldolgozó részeket, valamint más rendszerekhez illeszkedést, kapcsolódást biztosító csatlakozási lehetőségeket tartalmaz.

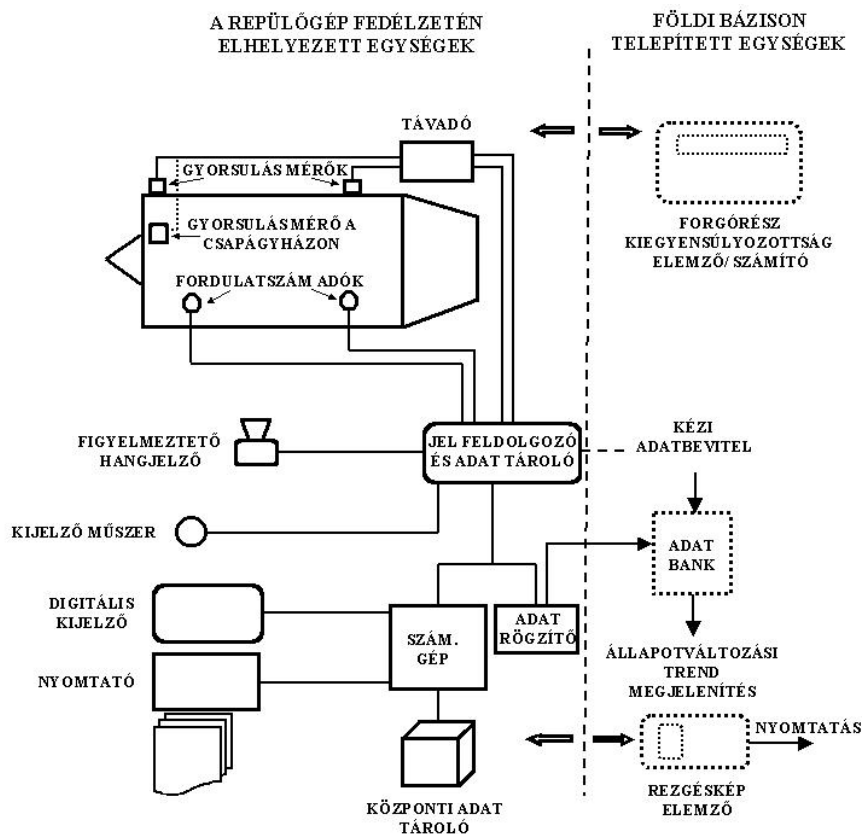
A jeladók és elhelyezésük

A rezgés mérés során az egyik legnagyobb feladat az érzékelő karakterisztikájának, elhelyezésének és rögzítési módjának helyes megválasztása. A legtöbb rezgésfigyelő rendszer kétcsatornás kialakításban működik és az érzékelő elhelyezése a hajtóműtípustól függően, kétféle alapvető módon történhet.

Az első esetben egy érzékelőt helyeznek el a hajtómű külső felületén, az 1. számú. forgórész mellső csapágyazása közelében, egy másikat pedig valahol a turbinaházon. Ez a módszer két mérési felületet biztosít, amelynek az előnye, hogy viszonylag könnyű megkülönböztetni a kiegyensúlyozatlanság helyét.

Egy másik esetben két összekapcsolt jeladót alkalmaznak a kompresszor-házra erősítve. Ez esetében összehasonlítható a két csatorna jele, ami a mérés, érzékelés hitelességének ellenőrzését könnyíti meg. Más oldalról rendkívül nehéz megállapítani, hogy a hajtómű mely része okozza a megnövekedett vibrációt.

Kisebb teljesítményű hajtóművek esetén (pl. egy regionális, vagy üzleti kategóriájú repülőgép) szinte mindig egy érzékelőt helyeznek el a hajtóművön. Az érzékelő tartószerkezetének kialakítása is rendkívül fontos, gyakorlatilag a hajtómű kifejlesztése során alakul ki, és módosul a földi hajtóműpróbák, valamint a légi berepülések alkalmával. A legjobb megoldás az érzékelő elhelyezésére egy tartófelület a hajtóművön, de jól alkalmazhatóak a speciális tartókonzolok és tartópontok is.



1. ábra. Rezgésfigyelő rendszer

A csatlakozó felületnek fém tisztának kell lennie, hogy a felületi érdesség kisebb legyen a 0,013 mm-es értéknél. Magasabb frekvenciák mérése esetén ez az érdességi határ 0,8 mm. A felhelyezett értékelők rezonancia frekvenciája legalább háromszor magasabb kell, hogy legyen a várható, mérendő legmagasabb értéknél.

Az érzékelő fajtája, típusa

A régebben használt elmozdulás- és sebességérzékelők helyett napjainkban szinte kizárólag gyorsulásmérőket alkalmaznak rezgésmérő-rendszer érzékelő elemeként. A piezzo elektromos gyorsulásmérők széleskörűen alkalmazhatók (nincs bennük mozgó alkatrész és magas hőmérsékleten is kb. 650 °C-ig), használhatók.

Napjainkban az egyes hajtómű típusra testreszabottan készülnek az érzékelők, de a kereskedelmi forgalomban kapható „általános” elemek közül is néhány felhasználható ilyen célra. Fontos a kiválasztásnál, hogy az adott típusú érzékelő érzékenység, rezonancia, üzemi hőmérséklet, méréstartomány követelmények tekintetében egyaránt alkalmas legyen a feladatra. Tapasztalati eredmények alap-

ján derült ki, hogy ugyanaz az érzékelő nem biztos, hogy alkalmazható hasonló hajtóműre, ha annak üzemi, bekötési stb. körülményei eltérnek az eredetileg alapul vett hajtóműétől. Még a legkisebb változtatások is nagymértékben képesek befolyásolni a mérőrendszer dinamikai viselkedését.

Jelátvitel, jeltovábbítás

A mért jelek továbbítása a repülőszervezetek esetében szintén megoldandó probléma, hiszen a mérés helyétől (hajtómű) a jelfeldolgozást, értékelést végző berendezés távol helyezkedik el, valahol a gép elektronikus rendszerében integrálva. A gyorsulásmérő kimeneti jele magas impedancia és alacsony feszültség értékkel jellemezhető, ezért speciális átviteli rendszert építenek ki. A legfontosabb kérdések ebben a feladatban az árnyékolás megoldása, a vezetékjellemzők kiválasztása, a vezeték útvonalának helyes meghatározása, rögzítések, csatlakozások árnyékolása, torzítások megszüntetése. Természetesen alacsony zajszintű kábelek használatosak e célra. A gyenge jelek átvitelében rejülő nehézségek elkerülhetőek, ha a jelfeldolgozás első lépcsőjét szorosan gyorsulásérzékelő mellé helyezzük (például az érzékelő házába építjük). Más megoldásként szóba jöhet, ha a távolsági jelátadás úgy valósul meg, hogy a hajtóműre egy önálló egységként kialakított adóberendezést építenek fel, amely távolsági adó vezeték nélküli módon juttatja el a repülőgép más helyén elhelyezett vevőberendezéshez a jelet. Ezzel a módszerrel egy elemen belül két, illetve három csatornán történhet az átvitel.

A mért jelek feldolgozása

A gyorsulásérzékelő által szolgáltatott jel egy elektromos feszültségi jel, amely arányos a vibráció amplitúdójával, frekvenciájával és fázisával. A felerősített kimeneti jel természetesen különböző szűrőkön áthaladva beleintegrálódik a fordulatszám jelbe és analóg formából átalakul digitálissá. Ezután a rezgésfigyelő rendszer elvégzi a spektrum analizálását. A rezgésjel spektrum analízise összekapcsolva a forgórész fordulatszám jelével a rezgésből egy „sűrített” jelet képez. Ráadásul a spektrum egy sor olyan, nem forgórész függő információt is szolgáltat, amelyek a karbantartás, hiba előrejelzés terén jól hasznosíthatók.

A vibrációról nyert adatok a repülőgép fedélzetén kétféle módon kerülnek felhasználásra:

- folyamatos figyelés és kijelzés alapján adatrögzítő gyűjti és rögzíti a mért értékeket, valamint a fülkében riasztási jelzést kapcsol be szükség esetén;
- karbantartás célra adatgyűjtésre és tárolási tevékenységre.

Figyelési funkció

A hajtómű rezgésképének folyamatos figyelése bonyolult, nehezen megvalósítható folyamat. Az alapnehézség abban rejlik, hogy a forgórészek felgyorsítása

időszakában is fel kell ismerni a géprészek jelét a teljes spektrumból, illetve a vibráció mértékét is figyelni kell. Ez a legegyszerűbben úgy oldható meg, hogy az elektronikai folyamatba be kell integrálni a rezgésmérők jelét „a forgórész fordulatszám jelét a forgórész gyorsulásának jelét. Ily módon előállítható egy „egyenértékű fordulatszám” jel, amit normalizálás után használnak fel a hajtómű pillanatnyi állapotának azonosítására.

Karbantartási feladatok

Ez a tevékenység a rendszer „rejtett” feladatai közé tartozik, hiszen repülés közben semmilyen külső jel nem utal a funkció működésére. Az adatgyűjtés és – rögzítés teljesen automatikusan zajlik és repülési feladat után a karbantartó személyzet ezen külön adatok alapján képes a repülőgép (hajtómű) állapotának elemzésére. Ezen információk teszik lehetővé a gazdaságos és megbízható állapot szerinti üzemeltetést és a megbízható diagnosztikát. Mindezeket felül külön adatok található itt a hajtómű forgórészek kiegyensúlyozásához.

Hajtómű kiegyensúlyozás

A legtöbb hajtóműre a gyártó cég egy vagy több kiegyensúlyozási tervet készít, külön a ventilátor-fokozatra, külön a kisnyomású turbinára stb. A korai időszakban speciális felszerelésekkel és földi hajtómű tesztekkel lehetett a kiegyensúlyozást elvégezni. A korszerű rezgésfigyelő rendszerek azonban már repülés közben eltárolják azokat a rezgési adatokat is, amelyek segítségével a földön, a kiadott kiegyensúlyozási tervek segítségével hideg hajtóművel (külön indítások nélkül) el lehet végezni akár részleges, akár teljes kiegyensúlyozást. Az adatgyűjtés repülési feladatonként kerül végrehajtásra, amikor is a rendszer a mérést egy időablakban készíti el. A legrövidebb mérési tartomány kb. 5 s, de általában a teljes repülési időtartam a vizsgált és rögzített tartomány. Mérési kritériumként elfogadott az N_1 fordulatszám $\pm 1\%$ -on belüli; a rezgési amplitúdó $\pm 0,1$ mm/s és a rezgési fázis $\pm 10\%$ -os pontosságú mérése.

A JÖVŐ HAJTÓMŰ VIBRÁCIÓFIGYELŐ RENDSZEREI

Mivel a hajtóművekkel szemben támasztott megbízhatósági követelmények folyamatosan növekednek és szükségszerűen új hajtómű konstrukciók is születnek, elkerülhetetlen egy teljesen új „program” létrehozása, vagy a meglévő rendszereket tovább kell fejleszteni egy kifinomultabb jelelemző, jelfeldolgozó irányban.

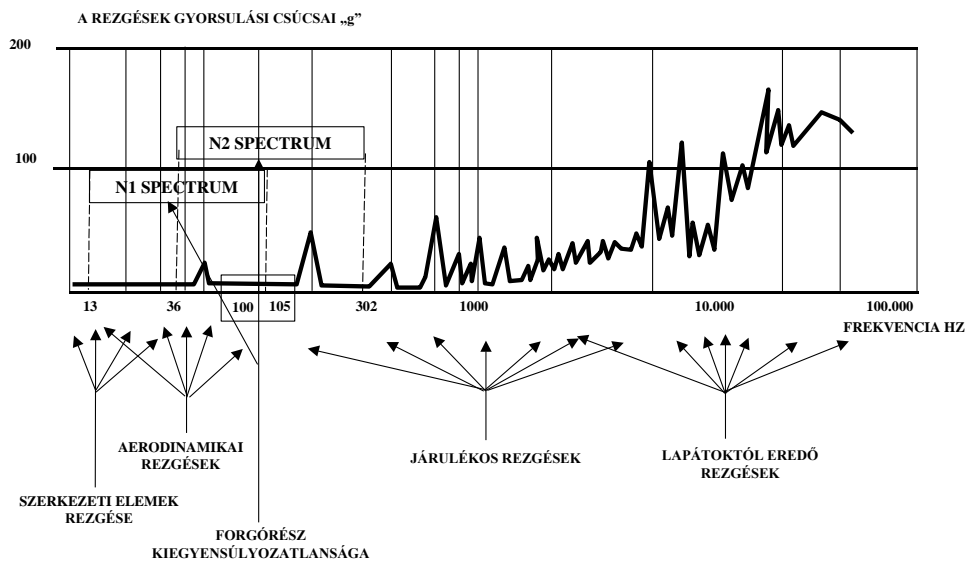
A megváltozott, új eljárások teljesítése érdekében a jövő fejlesztési irányai lehetnek:

- harmonikus és nem harmonikus rezgési amplitúdók és fázisok érzékelése, mérése, gyűjtése;

- mind a hajtómű állandósult, mind az átmeneti üzemmódokhoz kapcsolódó vibráció jellemzők gyűjtése;
- egyidejűleg a jelenleginél több diagnosztikai paraméter rögzítése hosszú távú prognózis és változási trend elkészítéséhez;
- egy továbbfejlesztett jelfeldolgozó technika kialakítása, amely biztosítja a csapágyak és a meghajtásházak állapotának figyelését és diagnosztizálását.

A fentiekből az következik, hogy a jelenleg alkalmazott rezgésfigyelő rendszer által megfigyelt frekvenciasávon kívül eső spektrumrészeket is figyelemmel kell kísérni, innen lehet azokat a többletinformációkat beszerezni, ami lehetővé teszi a jelfeldolgozó technika fejlesztését.

Nagy lehetőség rejlik egy olyan kombinációban is, amelyben a repülőgépeken található hagyományos kiegyensúlyozatlanság figyelőrendszert és az ipari gázturbinák-nál alkalmazott magas-frekvenciás csapágy diagnosztikai módszert összekapcsolják.



2. ábra. A hajtómű általános rezgési spektruma

KAPCSOLAT A HAJTÓMŰ REZGÉSFIGYELŐ RENDSZERE ÉS A HAJTÓMŰ ÁLLAPOTFIGYELŐ RENDSZERE KÖZÖTT

A hajtóműgyártók egyre erőteljesebben foglalkoznak olyan hajtómű állapotfigyelő rendszerekkel, amelyek az állapot szerinti üzemeltetést teszik lehetővé.

Ám e rendszerek felépítése és repülőgépen való elhelyezése még nem tisztázódott le teljes mértékben napjainkig.

Az állapotfigyelő rendszer feladatainak megvalósulása legvalószínűbben a következőképpen történhet:

- különálló egységként¹ a repülőgép elektronikai rendszerében;
- a repülőgép állapotfigyelő rendszerében, modulként elhelyezve;
- különálló egységként a hajtóművön elhelyezve;
- az elektronikus hajtóműszabályzó egységben, modulként kialakítva és a hajtóműre építve;
- különálló egységként, különböző eljárások megvalósítására a hajtóművön, annak elektronikus rendszerében elhelyezve;
- a fentiek valamilyen kombinációjában megvalósítva.

Talán a legvalószínűbb a hajtóműgyártók oldaláról eredő készség egy olyan hajtómű állapotfigyelő rendszer kifejlesztésére, amely azt fogja eredményezni, hogy egységes hardware profilt hoznak létre a gyártó valamennyi hajtómű típusa és fajtája számára. A cél az, hogy egy olyan rendszer kerüljön alkalmazásra, amely szabványként szolgál minden állapot szerinti üzemeltetést végző szervezet számára, és utólagosan ráilleszhető a már üzemeltetés alatt álló típusokra is. A másik oldalról, a sárkányszerkezet gyártók azt fogják a legvalószínűbben támogatni, hogy az összes hajtóművek egységes illeszkedő (kapcsolódó) rendszere legyen, amely lehetővé teszi a hajtóművek ugyanazon kategóriába eső repülőgéptípushoz való egységes csatlakozását. Ilyen példa már létezik EIVMU², amely két különböző repülőgép-típushoz öt különböző hajtómű alkalmazását teszi lehetővé.

Természetesen a jövőbeli rendszerek esetében fontos kérdés egyes speciális feladatú elektronikus egységek közötti kapcsolat megteremtése, vagyis a specifikus kimeneti jeleket hatékonyan át kell tudni adni más rendszereknek, azaz a paraméter hozzáférés minden rendszer számára biztosított legyen.

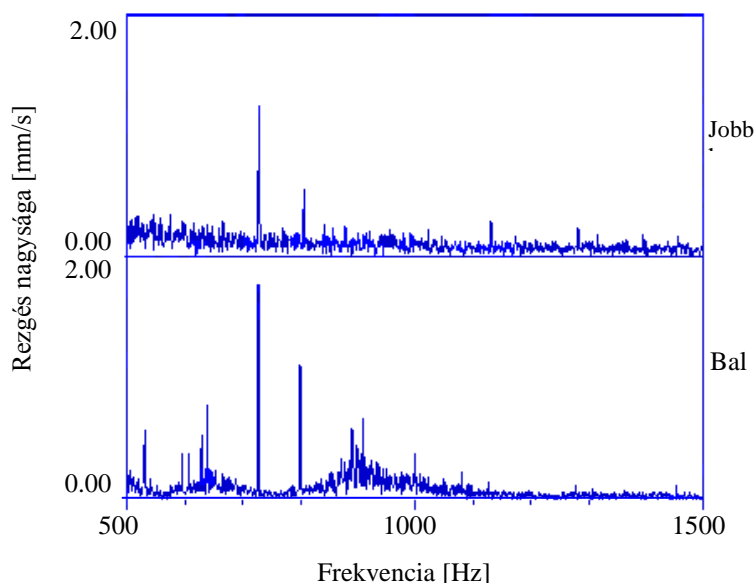
MÉRÉSI TAPASZTALATOK

Egy általános célú rezgésdiagnosztikai mérőrendszerrel kisteljesítményű helikopter hajtómű mérése során a következő oldalakon bemutatott regisztrátumokat nyertük. A mérések a következő módon készültek. Hajtóművenként egy mérési pontot választottunk, mégpedig a kompresszorházon lévő bekötési csomópontot. Ott egy menetes csap tartóelemre került ragasztással mindhárom térbeli tengelyirányban egy-egy érzékelő. A készülék mérőcsatornáinak nagy száma lehetővé tette, hogy egyidejűleg a reduktor-házon is elhelyezzünk adókat. A méréseket egy beállított hajtómű fordulatszámon végeztük.

¹ Engine Condition Monitoring Unit (ECM Unit) — Hajtómű állapotfigyelő egység.

² Engine Interface and Vibration Monitoring Unit (EIVMU) — Hajtómű interfész és rezgésfigyelő egység.

Összehasonlításként megvizsgáltuk egy viszonylag kevés üzemórával rendelkező és egy üzemideje vége felé közeledő hajtómű rezgésképét is. Egyértelműen bebizonyosodott, hogy minden hajtómű állapota csak önmaga előző állapotával hasonlítható össze, és a változási trend is csak ugyanazon hajtóművön nyert adatok alapján készíthető. Két ugyanazon típusú hajtóműnek sem egyezik meg a rezgésképe, azonos működési körülmények között. A nagyobb bedolgozott üzemidővel rendelkező hajtóműnek esetünkben „jobb” volt a rezgési regisztrátuma, mint a kevésbé használt párjáé.

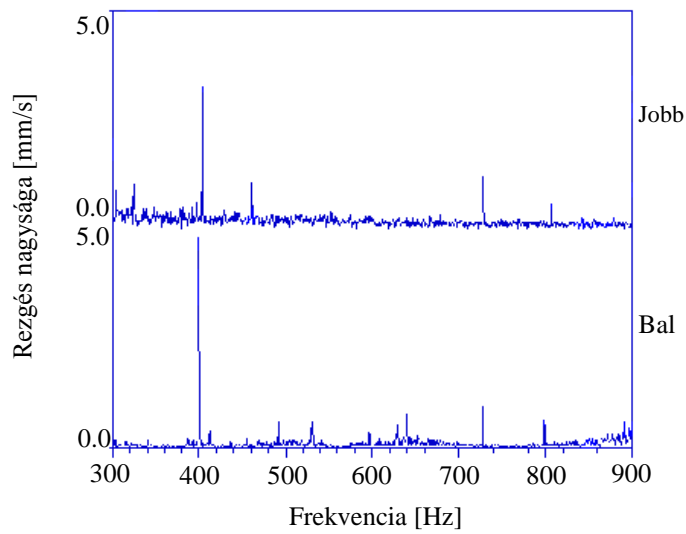


3. ábra. A kompresszor turbinák mért rezgésképe

A mérés során a pontos, rögzített paraméterek a következők:

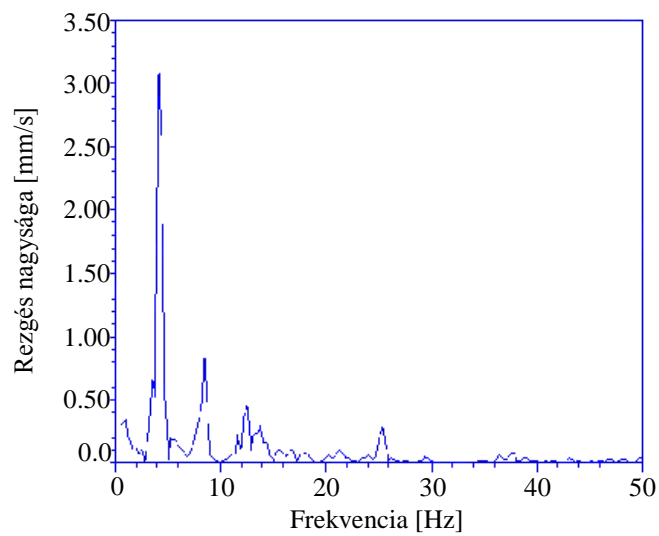
	Bal hajtómű	Jobb hajtómű
turbina fordulatszám (1/min)	43 614	43 656
forgási frekvenciája Hz	726,9	727,6

A bemutatott valamennyi mérési eredmény az A.+A. Stádium diagnosztikai és Menedzsment Kft. eszközeivel és szakembereinek, valamint Dr. Kovács Attila egyetemi docens úr (Miskolci Egyetem Gépelemek tanszék) segítségével került rögzítésre. Egyelőre a Magyar Honvédség nem rendelkezik ilyen eszközökkel, bár a kutatások, kísérletek sikeres befejezéséhez elengedhetetlen lenne.



4. ábra. A munkaturbina mért rezgése

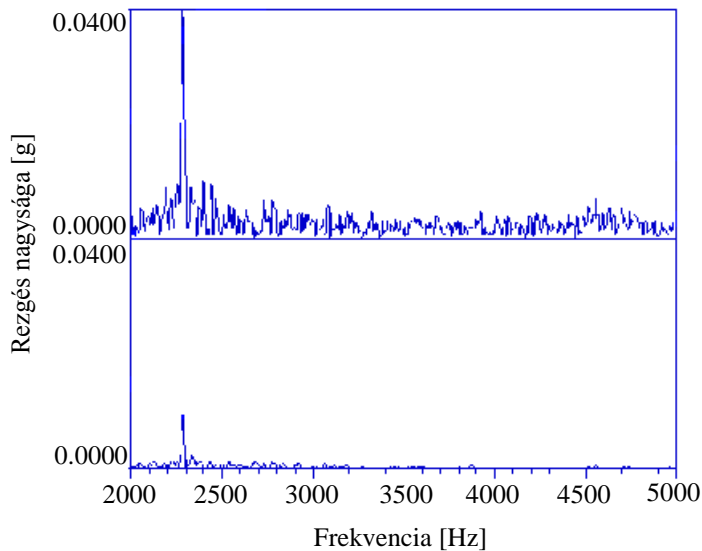
	Bal hajtómű	Jobb hajtómű
munkaturbina fordulatszáma (1/min)	23 958	24 198
forgási frekvenciája Hz	399,3	403,3



5. ábra. A forgószárny mért rezgése

A forgószárny fordulatszáma: 246 1/min
 Forgási frekvenciája: 4,13 Hz

A 3–5. ábrákon megfigyelhető, hogy a mérési eredmény és az ábra alatt feltüntetett számított (kalkulált) érték nem egyezik meg pontosan. Az eltérés oka a fedélzeti fordulatszám mérő pontatlanságából ered. Mivel a számítások a fedélzeti műszerről leolvasott értékek alapján lettek elvégezve, a mérési pontatlanság átkerült a számított értékekbe is.



6. ábra. A reduktoron mért rezgési értékek

A fent látható rezgés a fogkapcsolódásokból származó rezgés értéket emeli ki, mely úgy jön létre, hogy az adott fordulatszámmal forgó fogaskerék forgási frekvenciáját összeszorozásra kerül a fogaskerék fogszámával.

A fenti regisztrátum egy 99 Hz forgási frekvenciájú 23 fogszámú fogaskerék mért jellemzőjét mutatja be

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] SAE – E32 COMMITTEE: AIR 1839.
- [2] PAVOL RYBARIK: Engine Vibration Monitoring Systems. Proceedings of the 20th Symposium, AIMS, 2000.
- [3] O.BURNELL: Engine Condition Monitoring — Engine Systems and Aircraft Operational Effects. Proceedings of the 18th Symposium of AIMS, 1995.
- [4] I. SÁNTA–ZS. SZÜCS–G. ENDRŐCZI–GY. MOLNÁR–L. KAVAS: An Integrated Condition — Monitoring Systems for Gasturbine Engines. Proceeding of the 20th Symposium of AIMS, 2000.